

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL  
ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL**



**TRABAJO DE GRADUACION:**

“DETERMINACION DE LOS NIVELES DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS EN  
PERIODO DE ZAFRA Y NO ZAFRA EN LA CIUDAD DE SAN MIGUEL, DURANTE  
FEBRERO A JULIO DE 2015”

**PRESENTADO POR:**

BLANCA MIRIAN RAMOS DE ROSALES  
JOSÉ MÁRTIR DIAZ GUEVARA

**PARA OPTAR AL GRADO DE:**

MAESTRO EN GESTION AMBIENTAL

**DOCENTE DIRECTOR:**

Dr. CARLOS ERNESTO RUDAMAS FLORES

**CIUDAD UNIVERSITARIA ORIENTAL, DICIEMBRE DE 2015**

SAN MIGUEL

EL SALVADOR

CENTRO AMERICA

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**AUTORIDADES**

LIC. JOSE LUIS ARGUETA ANTILLON

**RECTOR INTERINO**

ING. CARLOS ARMANDO VILLALTA

**VICERRECTOR ADMINISTRATIVO INTERINO**

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

**SECRETARIA GENERAL INTERINA**

LICDA. NORA BEATRIZ MELENDEZ

**FISCAL GENERAL INTERINA**

**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL**

**AUTORIDADES**

ING. JOAQUIN ORLANDO MACHUCA

**DECANO**

LIC. CARLOS ALEXANDER DÍAZ

**VICE-DECANO**

LIC. JORGE ALBERTO ORTEZ HERNANDEZ

**SECRETARIO**

MSc. MARÍA DEL CARMEN CASTILLO DE HESKI

**DIRECTORA DE ESCUELA DE POSGRADO**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darnos la sabiduría e iluminarnos en cada momento y permitirnos culminar esta meta.

A la Universidad de El Salvador por darnos la oportunidad de seguir superándonos profesionalmente y a los Miembros de Junta Directiva de la Facultad Multidisciplinaria Oriental, por el otorgamiento de la beca interna.

A la Junta Directiva del Hospital San Francisco por prestarnos sus instalaciones para llevar acabo la recolección de datos para el presente estudio.

A nuestros Docentes, por compartir e intercambiar sus conocimientos.

Al Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador (CIC - UES) por permitirnos utilizar el equipo asignado al Proyecto 05.31: "Espectroscopia Óptica de Absorción Diferencial (DOAS) para la Medición de la Contaminación Atmosférica en El Salvador", para la realización de las mediciones

Al nuestro asesor Dr. Carlos Rudamas por su acompañamiento en la ejecución de la investigación, por su comprensión, tolerancia y disposición para atendernos.

Al grupo de investigación GI Rudamas por su valiosa colaboración en aportes y discusiones, especialmente a Karla Gámez por su valiosa ayuda en la realización de las campañas de medición y orientaciones sobre la técnica empleada, a Rafael Nolasco por sus aportes en las campañas de medición, automatización de equipo, a Ignacio Cruz por facilitación de equipo informático para la recolección de datos.

A los Miembros del Jurado Dr. Carlos Ernesto Rudamas, MSc. Oscar Armando Molina, MSc. Guillermo Moya, por el tiempo dedicado y por su gran calidad humana.

A nuestros compañeros por los gratos momentos que compartimos.

A nuestra Coordinadora de Maestría MSc. María del Carmen Castillo de Heski por su valiosa colaboración durante el desarrollo de la carrera.

Mirian y Mártir

## **DEDICATORIA**

Agradecimientos

A Dios Todopoderoso por permitirme culminar esta meta que me había propuesto.

Al Dr. Rudamas por su aporte muy valioso para poder realizar esta investigación.

A la Br. Karla Gámez por su dedicación y aporte a esta investigación.

A mi compañera Blanca Mirian por apoyarme siempre y animarme en los momentos difíciles.

Dedicatoria.

A mi madre que ya no puede estar conmigo porque tuvo que partir con Dios, pero que siempre me brindó todo su apoyo sin pedir nada a cambio sino únicamente con la intención de verme feliz.

A mi padre que siempre ha estado apoyándome en mis decisiones e inculcándome el deseo de superarme para ser una mejor persona en la vida.

A mis hermanos que siempre están dispuestos a brindarme su ayuda cuando me ven en momentos difíciles, por ese gran amor que me tienen.

A mi esposa y mis hijos que son mi incentivo fundamental para superarme cada día y alcanzar las metas que me propongo.

José Mártir Díaz Guevara

## **DEDICATORIA**

A Dios por guiarme e iluminarme durante este proceso y permitirme que alcanzara la meta propuesta.

A mis padres Rosario Ramos y Lorenza Márquez por su gran apoyo, cariño, por animarme a seguir superándome.

A mis hermanos Álvaro, José, Marta, German y Miguel por toda la ayuda que me brindan cuando más lo necesito.

A mi esposo Antonio Rosales por su gran comprensión, apoyo y por animarme siempre en todo momento.

A mis hijos Nathalie, Moisés y Daniel por su gran amor, comprensión, por ser la razón de mi vida que me anima a seguir adelante.

A mi familia, amigos, compañeros de trabajo por su apoyo.

A mi compañero de tesis José Mártir, por todos los momentos que compartimos durante el desarrollo de la carrera y la investigación.

Blanca Mirian Ramos de Rosales

## INDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>4</b>
<b>1.1 Descripción del problema</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Delimitación del problema</b>	<b>11</b>
<b>1.3 Alcances</b>	<b>11</b>
<b>1.4 Factibilidad</b>	<b>12</b>
<b>1.5 Enunciado del problema</b>	<b>12</b>
<b>1.6 Sistematizaciones</b>	<b>13</b>
<b>CAPITULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Antecedentes</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Bases teóricas</b>	<b>19</b>
2.2.1 La atmósfera.	19
2.2.1.1 Estructura de la atmósfera.	20
2.2.1.2 Composición de la atmósfera	21
2.2.2 Contaminación atmosférica.	22
2.2.3 Gases relevantes en la troposfera.	31
2.2.3.1 Dióxido de nitrógeno.	31
2.2.3.1.1 El ciclo del nitrógeno.	32



2.2.3.1.2	<i>Cómo se produce el NO<sub>2</sub>.</i>	34
2.2.3.1.3	<i>Efectos del NO<sub>2</sub> en el medio ambiente.</i>	36
2.2.3.1.4	<i>Efectos del NO<sub>2</sub> en la salud humana.</i>	43
2.2.3.1.5	<i>Bandas de absorción del NO<sub>2</sub>.</i>	44
2.2.3.2	Formaldehído.	46
2.2.3.3	Tetraoxígeno.	48
2.2.3.5	Oxido de bromo.	50
2.2.4	Ciclo de la contaminación atmosférica.	51
2.2.5	Relación entre contaminación atmosférica y la salud.	52
2.2.6	Transporte y dispersión de contaminantes en el aire.	53
2.2.7	Interacción de la radiación con la materia.	54
2.2.7.1	Absorción.	55
2.2.7.2	Esparcimiento elástico o Scattering elástico.	57
2.2.7.3	Esparcimiento inelástico o Scattering inelástico.	59
2.2.8	Espectroscopia Óptica de Absorción Diferencial.	60
2.2.8.1	El principio DOAS.	62
2.2.8.2	Ventajas y desventajas de la técnica DOAS.	68
2.2.8.3	Correcciones en medidas.	70
2.2.9	Año Zafra.	74
2.2.10	Ingenios Azucareros.	76
2.2.11	Elaboración de azúcar de caña.	80
2.2.12	Análisis ambiental y transferencias de externalidades de la industria azucarera.	83
2.2.12.1	Bioproductividad.	83

2.2.12.2 Recursos costeros.	85
2.2.12.3 Habidad.	85
2.2.12.4 Calidad de vida.	86
2.2.12.5 Industrias Afectadas por la Caña de Azúcar	87
2.2.12.6 Transferencias de externalidades.	88
<b><i>CAPÍTULO III: JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS E HIPÓTESIS</i></b>	<b>90</b>
<b>3.1 Justificación de la investigación</b>	<b>90</b>
<b>3.2Objetivos</b>	<b>90</b>
3.2.1 Objetivo general.	90
3.2.2 Objetivos específicos.	90
<b>3.3 Hipótesis</b>	<b>91</b>
<b><i>CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</i></b>	<b>92</b>
<b>4.1 Ubicación del estudio</b>	<b>92</b>
<b>4.2Tipo de investigación</b>	<b>93</b>
<b>4.3 Unidades de análisis</b>	<b>93</b>
<b>El aire de los alrededores del Hospital San Francisco de la Ciudad de San Miguel.</b>	<b>93</b>
<b>4.4 Variables y medición</b>	<b>93</b>
4.4.1Definición de las variables.	93
4.4.2 Indicadores y su medición.	94
<b>4.5 Instrumentos utilizados</b>	<b>95</b>
<b>4.6 Técnicas y procedimientos que se emplearon en la recopilación de la información</b>	<b>98</b>

4.6.1 Técnicas.	98
4.6.2 Procedimiento.	101
<b>4.7 Procesamiento y análisis</b>	<b>108</b>
<b><i>CAPITULO V: ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS</i></b>	<b>109</b>
<b>5.1 Obtención de la densidad óptica de los contaminantes</b>	<b>109</b>
<b>5.2 Variación temporal de dSCD para contaminantes atmosféricos estudiados</b>	<b>110</b>
5.2.1 Campaña de zafra.	111
5.2.2 Campaña de no zafra.	120
5.2.3 Comparación de la campaña de zafra y no zafra.	128
5.2.4 Comparación de la campaña de zafra con otras ciudades.	133
5.2.4.1 Comparación de los niveles de NO <sub>2</sub> de la Ciudad de San Miguel y la Ciudad de San Salvador.	133
5.2.4.2 Comparación de los niveles de NO <sub>2</sub> de la Ciudad de San Miguel y la Ciudad de Sonsonate.	135
5.2.5 Comparación de la campaña de no zafra con otras ciudades.	140
5.2.5.1 Comparación con la Ciudad de San Miguel con Santa Ana y Santa Tecla.	140
<b>5.3 Análisis de datos metrológicos para época de zafra</b>	<b>145</b>
<b>5.4 Análisis de datos metrológicos para el período de no zafra</b>	<b>157</b>
<b><i>CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i></b>	<b>169</b>
<b>6.1 Conclusiones</b>	<b>169</b>
<b>6.2 Recomendaciones</b>	<b>170</b>
<b><i>BIBLIOGRAFIA</i></b>	<b>172</b>

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. 1 Emisiones industriales en San Miguel durante la mañana del 01/12/14</i>	5
<i>Figura 1.2 Emisiones industriales en San Miguel durante la tarde 01/12/14</i>	6
<i>Figura 1.3 Trabajadores recolectando la caña de azúcar quemada</i>	7
<i>Figura 1.4 Automóviles en una zona industrial de San Miguel</i>	8
<i>Figura 1.5 Movimiento vehicular en Avenida Roosevelt en San Miguel</i>	8
<i>Figura 1.6 Tendencia del crecimiento del tráfico en CA01E y la CA07N en San Miguel</i>	9
<i>Figura 1.7 Comportamiento de enfermedades respiratorias en San Miguel de 2006-2015</i>	10
<i>Figura 2.1 Concentraciones de partículas contaminantes en período de zafra y no zafra</i>	15
<i>Figura 2. 2 Concentraciones de gases contaminantes en período de zafra y no zafra</i>	15
<i>Figura 2. 3 Variación de la dSCD del HCHO en San Salvador, 2011</i>	16
<i>Figura 2. 4 Variación de la dSCD de NO<sub>2</sub>, O<sub>4</sub> y HCHO en San Salvador, 2012</i>	18
<i>Figura 2. 5 Capas de la atmosfera terrestre</i>	21
<i>Figura 2. 6 Contaminación del aire</i>	24
<i>Figura 2.7 Contaminantes primarios y secundarios</i>	26
<i>Figura 2.8 Ciclo del Nitrógeno</i>	33
<i>Figura 2. 9 Relación de las emisiones de NO<sub>x</sub> con la formación de NO<sub>2</sub></i>	35
<i>Figura 2. 10 Niveles de pH ácido y alcalino del Sitio Ramsar Jocotal</i>	39
<i>Figura 2. 11 Niveles de pH ácido y alcalino de Sitio Ramsar Olomega</i>	40
<i>Figura 2. 12 Daños producidos en las hojas por la lluvia ácida</i>	41
<i>Figura 2. 13 Consecuencias de la lluvia ácida sobre edificios</i>	43
<i>Figura 2. 14 Coeficientes de absorción diferencial de gases</i>	45
<i>Figura 2. 15 Bandas de absorción del HCHO</i>	47

<i>Figura 2. 16 Esquema simplificado de las trayectorias de la luz en la atmósfera</i>	49
<i>Figura 2. 17 Fenómeno de la contaminación</i>	53
<i>Figura 2. 18 Procesos generados por la interacción de la radiación con la materia</i>	54
<i>Figura 2. 19 Proceso de absorción de un fotón por una molécula</i>	56
<i>Figura 2. 20 Esquema que describe la ley de Beer-Lambert</i>	57
<i>Figura 2. 21 Espectro de absorción</i>	63
<i>Figura 2. 22 El principio DOAS.</i>	65
<i>Figura 2. 23 Representación esquemática de la técnica DOAS</i>	66
<i>Figura 2. 24 Visualización geométrica de la densidad de columna vertical y oblicua</i>	66
<i>Figura 2. 25 Esquema montaje experimental DOAS</i>	69
<i>Figura 2. 26 Ubicación geográfica de Ingenios Azucareros de El Salvador</i>	77
<i>Figura 2. 27 Zonas de influencia a Ingenio Chaparrastique</i>	78
<i>Figura 2. 28 Esquema de una combustión incompleta.</i>	79
<i>Figura 2. 29 Diagrama de flujo de los gases de combustión para un ingenio azucarero</i>	80
<i>Figura 2. 30 Diagrama General de Flujo para un Ingenio Azucarero</i>	84
<i>Figura 4. 1 Ubicación geográfica de la zona de estudio</i>	92
<i>Figura 4. 2 Partes del Espectrógrafo Ocean Optics (USB4000-UV-VIS)</i>	96
<i>Figura 4.3 Componentes ópticos del telescopio (Alvarado, 2011)</i>	97
<i>Figura 4. 4 Telescopio utilizado para las mediciones</i>	98
<i>Figura 4. 5 Telescopio utilizado para las mediciones</i>	99
<i>Figura 4. 6 Diferentes ángulos de elevación utilizados en la técnica DOAS pasiva.</i>	100
<i>Figura 4. 7 Ubicación de fibra óptica en telescopio.</i>	101
<i>Figura 4. 8 Ubicación de fibra óptica en el espectrógrafo, conexiones</i>	102

<i>Figura 4. 9 Montaje experimental para las mediciones realizadas</i>	103
<i>Figura 4. 10 Emisiones de la planta industrial de San Miguel, 19/03/15</i>	104
<i>Figura 4. 11 Emisiones de la planta industrial de San Miguel, 20/03/15</i>	104
<i>Figura 4. 12 Emisiones de la planta industrial de San Miguel, 21/03/15</i>	105
<i>Figura 4. 13 Emisiones de la planta industrial de San Miguel, 22/03/15</i>	105
<i>Figura 5. 1 Proceso realizado para la determinación de la densidad óptica</i>	110
<i>Figura 5. 2 Resultados para obtener las dSCD en período de zafra</i>	111
<i>Figura 5. 3 Variación diurna del NO<sub>2</sub> período de zafra</i>	112
<i>Figura 5. 4 Comparación de valores de SCD y VCD para NO<sub>2</sub> período de zafra</i>	113
<i>Figura 5. 5 Variación diurna del HCHO período de zafra</i>	115
<i>Figura 5. 6 Variación diurna del HONO período de zafra</i>	116
<i>Figura 5. 7 Variación diurna del O<sub>4</sub> período de zafra</i>	117
<i>Figura 5. 8 Variación diurna del BrO período de zafra</i>	118
<i>Figura 5. 9 Resultados para obtener las dSCD período de no zafra</i>	120
<i>Figura 5. 10 Variación diurna del NO<sub>2</sub> período de no zafra</i>	121
<i>Figura 5. 11 Comparación de valores de SCD y VCD para NO<sub>2</sub> período de no zafra</i>	123
<i>Figura 5. 12 Variación diurna del HCHO período de no zafra</i>	123
<i>Figura 5. 13 Variación diurna del HONO período de no zafra</i>	125
<i>Figura 5. 14 Variación diurna del O<sub>4</sub> período de no zafra</i>	126
<i>Figura 5. 15 Variación diurna del BrO período de no zafra</i>	127
<i>Figura 5. 16 Comparación de NO<sub>2</sub> período de zafra y no zafra (19/03/15 y 23/07/15)</i>	130
<i>Figura 5. 17 Comparación de NO<sub>2</sub> período de zafra y no zafra (20/03/15 y 24/07/15)</i>	131
<i>Figura 5. 18. Comparación de NO<sub>2</sub> período de zafra y no zafra (21/03/15 y 25/07/15)</i>	131

<i>Figura 5. 19 Comparación de NO<sub>2</sub> período de zafra y no zafra (22/03/15 y 26/07/15)</i>	_____	132
<i>Figura 5. 20 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 19/03/2015</i>	_____	136
<i>Figura 5. 21 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 20/03/2015</i>	_____	137
<i>Figura 5. 22 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 21/03/2015</i>	_____	138
<i>Figura 5. 23 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 22/03/2015</i>	_____	139
<i>Figura 5. 24 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 23/07/2015</i>	_____	141
<i>Figura 5. 25 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 24/07/2015</i>	_____	142
<i>Figura 5. 26 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 25/07/2015</i>	_____	143
<i>Figura 5. 27 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 26/07/2015</i>	_____	144
<i>Figura 5. 28 Variación de la temperatura 19/03/15</i>	_____	146
<i>Figura 5. 29 Nubosidad observada 13:21 pm 19/03/15</i>	_____	147
<i>Figura 5. 30 Variación de la humedad relativa 19/03/15</i>	_____	147
<i>Figura 5. 31 Variación de la velocidad del viento 19/03/15</i>	_____	148
<i>Figura 5. 32 Variación de la dirección del viento 19/03/15</i>	_____	148
<i>Figura 5. 33 Variación de la temperatura 20/03/15</i>	_____	149
<i>Figura 5. 34 Nubosidad observada 13:34 pm 20/03/15</i>	_____	149
<i>Figura 5. 35 Variación de la humedad relativa 20/03/15</i>	_____	150
<i>Figura 5. 36 Variación de la velocidad del viento 20/03/15</i>	_____	150
<i>Figura 5. 37 Variación de la dirección del viento 20/03/15</i>	_____	151
<i>Figura 5. 38 Variación de la dirección del viento 20/03/15</i>	_____	152
<i>Figura 5. 39 Nubosidad observada 14:33 pm 21/03/15</i>	_____	152
<i>Figura 5. 40 Variación de la humedad relativa 21/03/15</i>	_____	153

<i>Figura 5. 41 Variación de la velocidad del viento 21/03/15</i>	_____	153
<i>Figura 5. 42 Variación de la dirección del viento 21/03/15</i>	_____	154
<i>Figura 5. 43 Variación de la temperatura 22/03/15</i>	_____	154
<i>Figura 5. 44 Nubosidad observada 13:51 pm 22/03/15</i>	_____	155
<i>Figura 5. 45 Variación de la humedad relativa 22/03/15</i>	_____	155
<i>Figura 5. 46 Variación de la velocidad del viento 22/03/15</i>	_____	156
<i>Figura 5. 47 Variación de la dirección del viento 22/03/15</i>	_____	156
<i>Figura 5. 48 Variación de la temperatura 23/07/15</i>	_____	157
<i>Figura 5. 49 Nubosidad observada a las 10:30 AM 23/07/15</i>	_____	158
<i>Figura 5. 50 Variación de la humead relativa 23/07/15</i>	_____	158
<i>Figura 5. 51 Variación de la velocidad del viento 23/07/15</i>	_____	159
<i>Figura 5. 52 Variación de la dirección del viento 23/07/15</i>	_____	159
<i>Figura 5. 53 Variación de la temperatura 24/07/15</i>	_____	160
<i>Figura 5. 54 Nubosidad observada a las 10:50 AM 24/07/15</i>	_____	160
<i>Figura 5. 55 Variación de la humedad relativa 24/07/15</i>	_____	161
<i>Figura 5. 56 Variación de la velocidad del viento 24/07/15</i>	_____	161
<i>Figura 5. 57 Variación de la dirección del viento 24/07/15</i>	_____	162
<i>Figura 5. 58 Variación de la temperatura 25/07/15</i>	_____	162
<i>Figura 5. 59 Nubosidad observada a las 12:14 M 25/07/15</i>	_____	163
<i>Figura 5.60 Variación de la humedad relativa 25/07/15</i>	_____	163
<i>Figura 5. 61 Variación de la velocidad del viento 25/07/15</i>	_____	164
<i>Figura 5. 62 Variación de la dirección del viento 25/07/15</i>	_____	164



<i>Figura 5. 63 Variación de la temperatura 26/07/15</i>	<u>165</u>
<i>Figura 5. 64 Nubosidad observada a las 11:10 AM 26/07/15</i>	<u>166</u>
<i>Figura 5. 65 Variación de la humedad relativa 26/07/15</i>	<u>166</u>
<i>Figura 5. 66 Variación de la velocidad del viento 26/07/15</i>	<u>167</u>
<i>Figura 5. 67 Variación de la dirección del viento 26/07/15</i>	<u>168</u>

## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2. 1 Estándares de calidad de aire para diferentes países de Latinoamérica</i>	28
<i>Tabla 2. 2 Valores límites máximos permisibles para la calidad del aire en El Salvador</i>	29
<i>Tabla 2. 3 Estándares de calidad de aire para diferentes comunidades en <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math> (ppm)</i>	30
<i>Tabla 2. 4 Principales fuentes antropogénicas y naturales para <math>\text{NO}_x</math> troposférico mundial</i>	36
<i>Tabla 4. 1 Operacionalización de variables</i>	94
<i>Tabla 4. 2 Comparación de las Ciudades de San Miguel-San Salvador-Sonsonate</i>	106
<i>Tabla 4. 3 Comparación de las Ciudades de San Miguel-Santa Ana-Santa Tecla</i>	107
<i>Tabla 5. 1 Secciones eficaces de absorción</i>	110
<i>Tabla 5. 2 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> de <math>\text{NO}_2</math> período de zafra</i>	114
<i>Tabla 5. 3 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> de <math>\text{HCHO}</math> período de zafra</i>	115
<i>Tabla 5. 4 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> de <math>\text{HONO}</math> período de zafra</i>	116
<i>Tabla 5. 5 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^5</math> de <math>\text{O}_4</math> período de zafra</i>	118
<i>Tabla 5. 6 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> de <math>\text{BrO}</math> período de zafra</i>	119
<i>Tabla 5. 7 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> para contaminantes período de zafra</i>	119
<i>Tabla 5. 8 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> de <math>\text{NO}_2</math> período de no zafra</i>	122
<i>Tabla 5. 9 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> de <math>\text{HCHO}</math> período de no zafra</i>	124
<i>Tabla 5. 10 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> de <math>\text{HONO}</math> período de no zafra</i>	125
<i>Tabla 5. 11 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> de <math>\text{O}_4</math> período de no zafra</i>	126
<i>Tabla 5. 12 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> de <math>\text{BrO}</math> período de no zafra</i>	127
<i>Tabla 5. 13 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> para contaminantes período de no zafra</i>	128
<i>Tabla 5. 14 Comparación de los valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> de <math>\text{NO}_2</math></i>	129
<i>Tabla 5. 15 Valores promedios de moléculas <math>/\text{cm}^2</math> de <math>\text{NO}_2</math> obtenidos en Col Escalón.</i>	133

*Tabla 5. 16 Concentraciones de NO<sub>2</sub> para San Miguel y Col. Escalón \_\_\_\_\_ 134*

*Tabla 5. 17 Concentraciones de NO<sub>2</sub> (VCD) para San Miguel y Sonsonate (OMI) \_\_\_\_\_ 140*

*Tabla 5. 18 Concentraciones de NO<sub>2</sub> (VCD) para San Miguel, Santa Ana y Santa Tecla \_\_ 145*

## **SIGLAS**

**CIC – UES:** Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador.

**CONACYT:** Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

**COV:** Compuestos Orgánicos Volátiles.

**DOAS:** Differential Optical Absorption Spectroscopy.

**DRR:** Dispersión Raman Rotacional

**DRVR:** Dispersión Raman Rotacional-Vibracional

**dSCD:** differential Slant Column Density.

**EPA:** Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos.

**FMO:** Facultad Multidisciplinaria Oriental

**INCAP:** Instituto Nutricional de Centro América y Panamá.

**ISSS:** Instituto Salvadoreño del Seguro Social.

**MARN:** Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

**NASA:** National Aeronautics and Space Administration.

**NKP:** Nitrógeno, Fósforo y Potasio.

**NSO:** Norma Salvadoreña Obligatoria

**OMI:** Instrumento de Monitoreo de Ozono.

**OMS:** Organización Mundial de la Salud.

**OPS:** Organización Panamericana de la Salud.

**PANs:** Nitrato de Peroxiacilo

**PM<sub>10</sub>:** Son partículas en suspensión con diámetros promedios menores o iguales a 10  $\mu\text{m}$ .

**PM<sub>2.5</sub>:** Son partículas en suspensión con diámetros promedios menores o iguales a 2,5  $\mu\text{m}$ .

**PNC:** Policía Nacional Civil

**TPDA:** Tráfico Promedio Diario Anual.

**PTS:** Partículas Totales Suspendidas

**UCM:** Universidad Complutense de Madrid

**pH:** Potencial de Hidrógeno

## RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la diferencia existente en los niveles de contaminación atmosférica para el Dióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en período de zafra y no zafra en la Ciudad de San Miguel utilizando la técnica de Espectroscopia Óptica de Absorción Diferencial (DOAS) pasiva por sus siglas en inglés (“Differential Optical Absorption Spectroscopy”). Se determinó que para el período de zafra los niveles de  $\text{NO}_2$  son más elevados que los valores obtenidos para el período de no zafra. La recolección de datos se llevó a cabo en el mes de marzo y en julio de 2015 en la Ciudad de San Miguel. También se midieron otros contaminantes atmosféricos como el Formaldehído (HCHO), Ácido nitroso (HONO), Dímero de Oxígeno o Tetraoxígeno ( $\text{O}_4$ ) y Óxido de Bromo (BrO). Los resultados obtenidos en este estudio podrían ayudar a las Autoridades de la Facultad Multidisciplinaria Oriental (FMO) de la Universidad de El Salvador para que ellos realicen las gestiones pertinentes para que la planta industrial cumpla con los requerimientos establecidos en las Normas Técnicas de Calidad Ambiental para El Salvador.

## INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente estudio ha sido determinar los niveles de contaminante atmosférico  $\text{NO}_2$  en la ciudad de San Miguel durante el período de zafra y no zafra en el año 2015. Para cada uno de los períodos de medición realizados se recolectaron datos durante cuatro días de 5:00 AM hasta las 18:00 PM. A los cuatro días de mediciones realizadas se le conoce como campaña de medición. La primera campaña de medición se realizó del 19 al 22 de marzo de 2015 y la segunda campaña del 23 al 26 de julio del 2015. Los datos obtenidos en período de zafra fueron comparados con dos estudios. Un estudio realizado en la Colonia Escalón de la Ciudad de San Salvador utilizando MAX-DOAS que es una técnica similar a la utilizada en San Miguel y el segundo estudio realizado en la Ciudad de Sonsonate utilizando DOAS Satelital cuyos datos fueron obtenidos por el Instrumento de Monitoreo de Ozono (OMI) que está ubicado en el satélite Aura de la NASA siglas en inglés de “National Aeronautics and Space Administration”. Los datos obtenidos para el período de no zafra en la Ciudad de San Miguel se compararon con los datos obtenidos por el OMI para las Ciudades de Santa Ana y Santa Tecla.

La investigación fue de tipo experimental con un enfoque cuantitativo.

La detección de los niveles del contaminante atmosférico  $\text{NO}_2$  se realizó utilizando la técnica DOAS. También se midieron los niveles de otros gases contaminantes atmosféricos como el HCHO, HONO,  $\text{O}_4$  y BrO, de los cuales no se realizó un exhaustivo análisis.

El presente documento está dividido en seis capítulos. En el capítulo I se aborda el planteamiento del problema que comprende una breve descripción del problema que se investigó, la delimitación temporal, geográfica, el alcance de la investigación, la factibilidad para realizar el trabajo de investigación y el enunciado del problema con las preguntas

específicas. En el capítulo II se presenta la fundamentación teórica que respalda la investigación y los antecedentes de ésta. En la fundamentación teórica se realiza una descripción de la atmósfera, la contaminación atmosférica, principales gases contaminantes, relación entre la salud y los contaminantes atmosféricos, definiciones de período de zafra y no zafra, descripción de la técnica DOAS. En el capítulo III se ubica la justificación de la investigación, los objetivos que guiaron este trabajo y la hipótesis de investigación. El capítulo IV comprende la metodología de la investigación empleada la ubicación geográfica, el tipo de investigación, las variables, los instrumentos de medición, el procedimiento realizado, la técnica que se empleó para la recopilación de información. En el capítulo V se presenta el análisis de los datos. Este comprende un análisis para la obtención de la densidad óptica de los contaminantes atmosféricos para cada campaña de medidas y los ajustes que se realiza en la comparación de los valores medidos con los simulados. También se presenta cómo se obtienen los niveles de densidad de columna oblicua (dSCD: “differential Slant Column Density”) en (moléculas/cm<sup>2</sup>). Se presenta la comparación de valores obtenidos en período de zafra y no zafra. En el capítulo VI se presentan las conclusiones de la investigación realizada y recomendaciones para futuras investigaciones.



## **CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Descripción del problema**

El acelerado crecimiento de los centros urbanos en El Salvador en las últimas dos décadas ha provocado entre otros, un incremento de la actividad industrial y comercial, la ejecución de obras de infraestructura y vivienda, la demanda de transporte de personas y bienes, el consumo de energía, y principalmente un incremento del consumo de combustibles para uso industrial, vehicular y doméstico. Estas circunstancias, sumadas a la creciente deforestación y erosión del suelo han repercutido negativamente en la calidad del aire que respira la población salvadoreña con consecuencias negativas sobre su salud y su calidad de vida (Trejo, 2003).

Para el año 2003 no se conocía con exactitud el aporte a la contaminación atmosférica generada por las emisiones industriales, porque no se contaba con un inventario de las emisiones de las fuentes fijas ni con información sobre su distribución geográfica (Trejo, 2003).

Al MARN en el 2006 le realizaron una consultoría para clasificar las fuentes contaminantes del aire para las Áreas Metropolitanas de San Salvador, Santa Ana, San Miguel y Sonsonate. En la consultoría se compararon tres modelos de dispersión de contaminantes en el aire. Según el informe para el Área Metropolitana de San Miguel descargaron 52,203 toneladas de contaminantes (excluyendo CO<sub>2</sub>). De estas emisiones el 48% son descargadas por la cocción residencial de alimentos, 18% por el tráfico vehicular y 8% por el polvo de los caminos no pavimentados, estos tres grupos de fuentes el origen del 74% de todas las emisiones de la ciudad. Se determinó que la única fuente fija de

importancia en San Miguel es el Ingenio Azucarero Chaparrastique, cuyas emisiones constituyen el 4% del total. El resto de las fuentes fijas descarga emisiones equivalentes a menos del 1% del total, y no son, por tanto, fuentes emisoras de importancia (EUROLATINA, 2006).

En período de zafra en San Miguel se dan emanaciones de gases generadas por la fuente industrial como se ilustra en las figuras 1.1 y 1.2. Se evidencia que la planta industrial envía una cantidad considerable de gases a la atmósfera durante la mañana y la tarde. La pluma de gases observada es debido al proceso de combustión incompleta.



*Figura 1. 1* Emisiones industriales en San Miguel durante la mañana del 01/12/14



*Figura 1.2* Emisiones industriales en San Miguel durante la tarde 01/12/14

En la quema de la caña de azúcar se generan una serie de impactos negativos que inciden directamente sobre el suelo, los recursos hídricos, la atmósfera, la biodiversidad, el ser humano y la materia prima, incrementa la contaminación del aire debido a las emisiones de gases de combustión y partículas sólidas producidos por la quema de biomasa. Se estima que un 80 a 90% del área total cultivada de caña es quemada para la cosecha (MARN, 2011).

En la figura 1.3 se muestra a trabajadores que recolectan la caña de azúcar quemada para el período de zafra de 2013-2014. Alrededor de 200,000 personas trabajaron en forma directa e indirecta para su cultivo, cosecha en el campo, transporte y procesamiento de la caña en los ingenios azucareros (El Diario de Hoy, 2013).



*Figura 1.3* Trabajadores recolectando la caña de azúcar quemada para enviarla al ingenio azucarero para su procesamiento, durante la zafra 2013-2014 (El Diario de Hoy, 2013).

El aire en las grandes ciudades es contaminado por el uso masivo de automóviles particulares en malas condiciones, transporte público y la congestión vehicular (Tolcachier, 2006).

Además de las emanaciones procedentes de las chimeneas de la fuente industrial de San Miguel, se deben incluir las generadas por vehículos que transportan la caña de azúcar, como se ilustra en la figura 1.4.

San Miguel durante varios años ha presentado constantes congestionamientos vehiculares que se generan en distintos puntos de la ciudad, a pesar de los esfuerzos de la Policía Nacional Civil (PNC) por ordenar el tráfico (Rivas, 2012).

En la figura 1.5 se muestra parte del congestionamiento que se presenta en la Avenida Roosevelt en la Ciudad de San Miguel.



*Figura 1.4* Automóviles en una zona industrial de San Miguel, generando emanaciones de gases por sus escapes 02-12-14.



*Figura 1.5* Movimiento vehicular en Avenida Roosevelt en San Miguel, que generan emanaciones de gases contaminantes a través de sus escapes, el 19-03-15.

En San Miguel se ha aumentado el número de vehículos que circulan por las principales calles de la ciudad (CA01E el tramo de la Carretera Panamericana conocido como Avenida Roosevelt y CA07N conocida como Carretera Ruta Militar) en los últimos años, muestra de ello es el incremento del Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA), que se presenta en la figura 1.6.

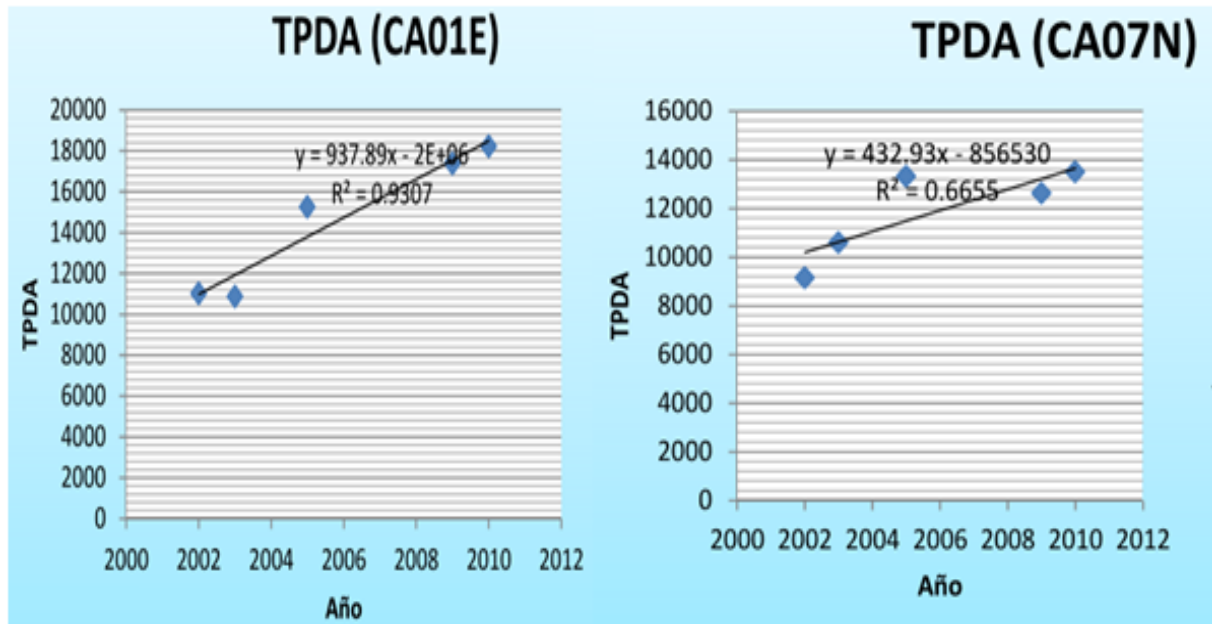


Figura 1.6 Tendencia del crecimiento del tráfico en CA01E y la CA07N en San Miguel, muestra un crecimiento lineal en el número de vehículos, el análisis se realizó desde el 2000 hasta el 2012 (Alfaro et al, 2011)

Según datos de Viceministerio de Transporte de San Miguel, en el 2006 en el Departamento de San Miguel existía un total de 45,451 automóviles, en el 2007 había 47,9401. Según proyecciones la cantidad aumentará, en el 2012 habían 57,127, en 2014 habían 62,665 automóviles.

La mayoría de actividades cotidianas originan algún tipo de contaminación, cuando se usa electricidad, medios de transporte, metales, plásticos o pinturas; cuando se cocinan

alimentos, medicinas o productos de limpieza; cuando se enciende la calefacción o se calienta la comida o el agua, etc. se producen, directa o indirectamente, sustancias contaminantes (Echarri, 1998).

Las actividades humanas perjudican la calidad del aire, al aumentar la población las cantidades emitidas de contaminantes están aumentando y la cantidad total de aire, tierra y agua de la tierra es la misma. La cantidad disponible de recursos naturales para cada persona está disminuyendo (Inche, 2004).

Según datos estadísticos proporcionados por el Director de la Clínica Comunal Panamericana del Instituto Salvadoreño del Seguro Social del 2006–2015 el comportamiento de las enfermedades respiratorias agudas varía con el tiempo. En la figura 1.7 se muestra esta variación.

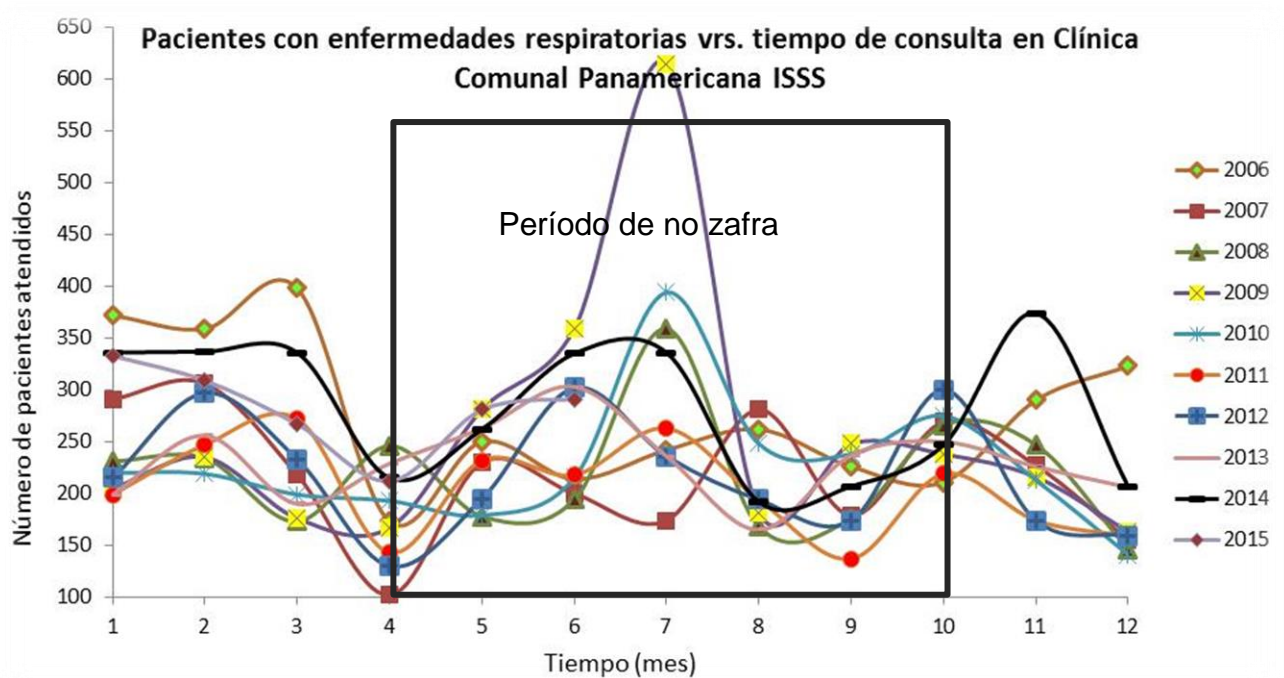


Figura 1.7 Comportamiento de enfermedades respiratorias en San Miguel de 2006-2015.

En la figura 1.7 se muestra un incremento en el número de consultas para los meses de enero a marzo, período que coincide con la zafra. Existe una disminución considerable al finalizar la zafra en abril. En mayo empieza un incremento que se agudiza en julio que coincide con época de invierno y desde ese mes empieza disminuir. En noviembre empieza a incrementarse mes donde se inicia la zafra, en diciembre disminuye, esta disminución podría ser debida al cierre de la Clínica Comunal Panamericana del ISSS por la vacación de diciembre. En resumen, sólo en algunos años se evidencia el aumento de pacientes con enfermedades respiratorias agudas en el período de zafra.

## **1.2 Delimitación del problema**

El presente trabajo se desarrolló en la de San Miguel. El contaminante atmosférico que se estudió fue el  $\text{NO}_2$  aplicando la técnica DOAS. Otros contaminantes medidos fueron el HCHO, HONO,  $\text{O}_4$ , y BrO. La recolección de datos se realizó en dos fases el período de zafra en marzo y no zafra en julio de 2015.

## **1.3 Alcances**

La investigación que se realizó es de tipo experimental con un enfoque cuantitativo. Se aplicó la técnica DOAS pasiva para detectar los contaminantes atmosféricos en la Ciudad de San Miguel en período de zafra y no zafra.

El contaminante atmosférico que se evaluó fue el  $\text{NO}_2$ , porque es de gran importancia conocer sus niveles en la atmósfera por ser considerado un contaminante criterio (INECC, 2013). El  $\text{NO}_2$  daña el sistema respiratorio ocasionando lesiones en las mucosas, causando bronquitis y bronconeumonías, agravamiento de alergias respiratorias,



empeoramiento de enfermedades respiratorias crónicas, reducción de la función pulmonar, disfunción y disminución de la capacidad del sistema inmunológico (Carranza, 2014).

El estudio realizado ha sido difundido en el Curso Latinoamericano sobre Técnicas de Percepción Remota Aplicadas en la Química de la Atmósfera realizado en la Universidad Autónoma de México del 7 al 11 de Diciembre de 2015. Además los resultados obtenidos fueron compartidos con los estudiantes de Licenciatura en Física de la FMO, se entregó una copia a la Junta Directiva de la FMO y al Consejo de Becas e Investigaciones Científicas de la UES.

#### **1.4 Factibilidad**

Es estudio fue parcialmente financiada por el Consejo de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador (CIC–UES) bajo el proyecto titulado 05.31: "Espectroscopia Óptica de Absorción Diferencial (DOAS) para la Medición de la Contaminación Atmosférica en El Salvador" que dirige el Dr. Carlos Ernesto Rudamas. Además se dispuso de tiempo, los recursos humanos y financieros para realizarla. Se contó con el espacio del Laboratorio de Espectroscopia Óptica de la Escuela de Física de la UES de San Salvador.

#### **1.5 Enunciado del problema**

¿Existirá diferencia en los niveles de contaminantes atmosféricos en período de zafra y no zafra en la ciudad de San Miguel?

## **1.6 Sistematizaciones**

¿Son iguales los niveles del dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) durante el período de zafra y no zafra en la ciudad de San Miguel?

¿Son iguales los niveles del dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) durante el período de zafra en la ciudad de San Miguel con los datos obtenidos en estudios en otras ciudades?

¿Son iguales los niveles del dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) durante el período de no zafra en la ciudad de San Miguel con los datos obtenidos en estudios en otras ciudades?

## CAPITULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1 Antecedentes

Para la ciudad de San Miguel no se han encontrado investigaciones que determinen los niveles de contaminantes atmosféricos para el período de zafra y no zafra utilizando la técnica DOAS.

Castillo y Vides (2011) realizaron una investigación para evaluar la calidad del aire y los síntomas de enfermedades respiratorias que se manifiestan en período de zafra y no zafra en la Ciudad de San Miguel, pero, utilizaron una técnica puntual. En su estudio midieron las concentraciones de Partículas Totales Suspendidas (PTS) y gases contaminantes del aire. Los resultados obtenidos los compararon con las normas de calidad del aire establecidas por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) como se ilustran en las figuras 2.1 y 2.2. Los autores concluyeron que en período de zafra se encuentran concentraciones altas de PTS y  $PM_{10}$  que superan los valores permisibles de la calidad de aire establecidas por la EPA. La concentración de  $NO_2$  en período de zafra es mayor que el valor guía establecido por la OMS, indicaron que existe un deterioro a la calidad del aire en la FMO y que la población estudiada manifestó en período de zafra un mayor número de días con síntomas de enfermedades respiratorias tales como: tos, nariz tapada, ardor de garganta, cansancio al respirar, y otros síntomas como ardor de ojos.

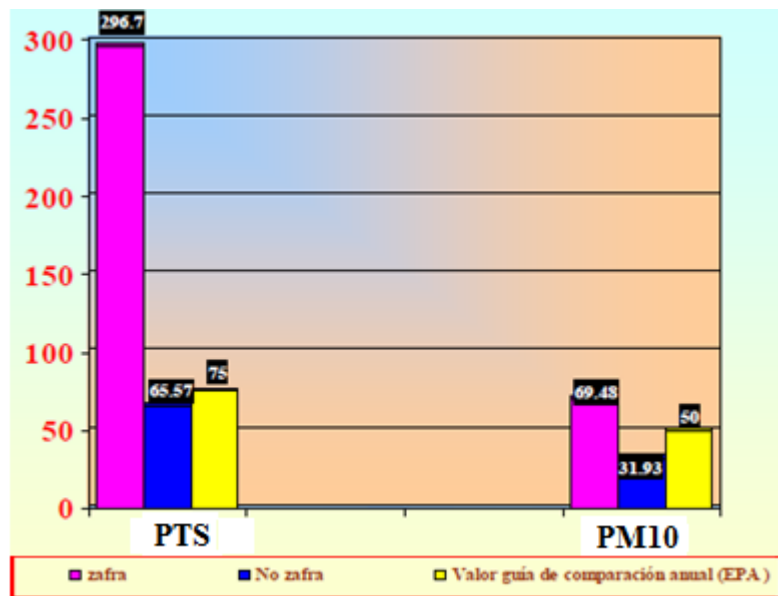


Figura 2.1 Comparación de concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de partículas contaminantes en período de zafra y no zafra en la ciudad de San Miguel obtenidas en una investigación realizada el año 2001 y los valores guías reportados por la EPA (Castillo y Vides, 2001).

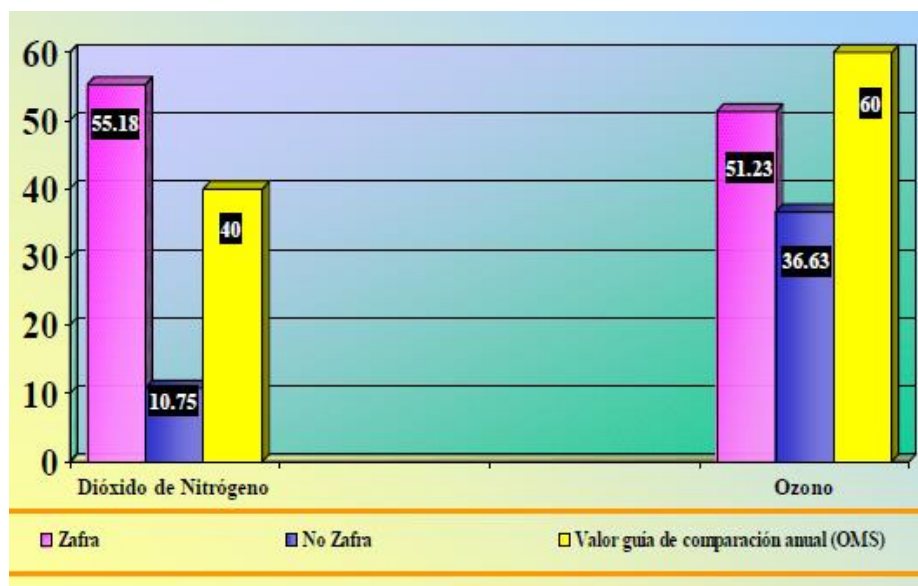


Figura 2. 2 Comparación de concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de gases contaminantes en período de zafra y no zafra en la ciudad de San Miguel obtenidas en una investigación realizada el año 2001 y los valores permisibles reportados por la EPA (Castillo y Vides, 2001).

La técnica DOAS se está aplicando en El Salvador, los estudios los dirige el Dr. Carlos Ernesto Rudamas. Entre los estudios efectuados está el de Alvarado (2011), realizó un estudio para determinar los niveles de HCHO en San Salvador. Determinó los valores de densidad de columna oblicua diferencial (dSCD: diferencial Slant Column Density), expresada en ( $\text{moléculas /cm}^2$ ) en la región ultravioleta-visible. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 2.3.

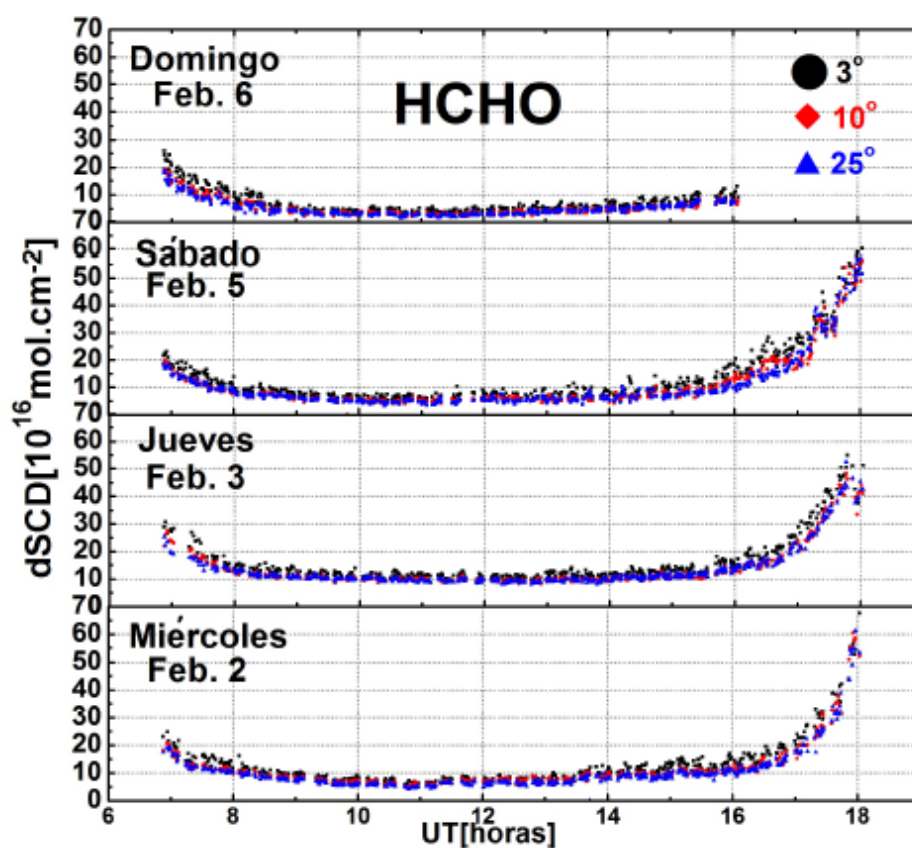


Figura 2. 3 Variación de la dSCD con el tiempo durante cuatro días para ángulos de  $3^\circ$ ,  $10^\circ$  y  $25^\circ$ , investigación realizada para determinar los niveles del HCHO en San Salvador en 2011 (Alvarado, 2011).

Con éstos resultados Alvarado determinó que los valores obtenidos de dSCD para el HCHO son alarmantes, debido a que son de similar orden de magnitud a los reportados en otros estudios por otros autores en ciudades de mayor población que San Salvador y que dichos valores varían de acuerdo a las condiciones climáticas de la región de estudio como la intensidad y la dirección del viento.

Alberti, Mendoza y Rudamas (2012) realizaron un estudio “Ground based MAX-DOAS observations of tropospheric trace gases in San Salvador, El Salvador”. Evaluaron los gases NO<sub>2</sub>, HCHO y O<sub>4</sub>. Verificaron que la variación aparente diurna de los valores de la dSCD para el O<sub>4</sub> a diferentes ángulos de elevación se ven afectadas por las condiciones meteorológicas como la nubosidad y durante las tardes las curvas se acercan debido a la presencia de nubosidad, los resultados obtenidos se muestran en la figura 2.4.

Los autores Alberti et al. (2012) manifestaron que los altos niveles en valores diurnos de NO<sub>2</sub> de la dSCD por la mañana en 03 de febrero podrían estar asociadas a las emisiones del tráfico vehicular y para el HCHO los valores de dSCD no presentan mayor diferencia en los días de observación.

Existen a nivel internacional investigaciones sobre la calidad del aire aplicando la técnica DOAS activa y pasiva. Entre las investigaciones realizadas aplicando la técnica DOAS están mediciones de HCHO en el Valle del Po al Norte de Italia aplicando MAX-DOAS (Heckel et al, 2005). Dix (2007) realizó mediciones sobre gases traza utilizando la técnica DOAS, las medidas las realizó desde un avión, evaluó los niveles de NO<sub>2</sub>, HCHO, HONO, BrO y O<sub>3</sub>. En México, Grutter, Flores, Andraca y Baez realizaron una investigación para determinar los niveles del HCHO en el centro de la ciudad de México. En el estudio, se

aplicaron dos técnicas espectroscópicas y dos técnicas DNPH, las medidas fueron realizadas simultáneamente en un sitio del centro de la Ciudad de México, durante febrero y octubre de 2003 (Grutter et al, 2005). Honninger, Friedeburg y Platt, realizaron un trabajo sobre el desarrollo de la técnica MAX-DOAS, donde se utiliza la luz solar dispersada recibida desde múltiples direcciones de visión (Honninger et al, 2004).

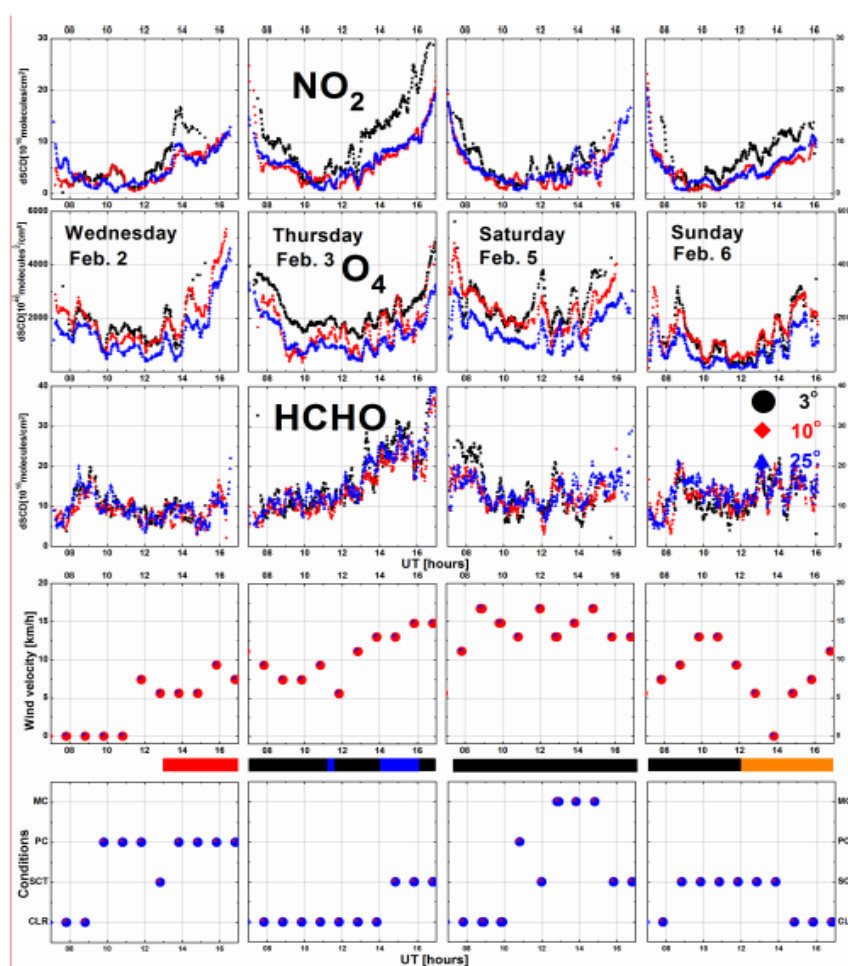


Figura 2. 4 Variación de la dSCD con el tiempo durante cuatro días para ángulos de  $3^\circ$ ,  $10^\circ$  y  $25^\circ$ , trabajo realizado para determinar los niveles de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_4$  y HCHO en la Ciudad de San Salvador, en 2012

(Alberti et al, 2012)

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1 La atmósfera.

La Tierra está rodeada de una capa gaseosa denominada atmósfera, es delgada, tenue, la mitad se encuentra por debajo de una altitud de 5.6 km y el 90 % ocupa una franja de 16 km desde la superficie de la tierra, el delgado manto de aire es una parte integral del planeta, proporciona el aire para respirar, protege del intenso calor solar y de las peligrosas radiaciones ultravioletas (Tarbuck, 2005).

Entre las propiedades de la atmósfera están:

- a) Contiene los gases imprescindibles para la vida.
- b) Regula la temperatura, el vapor de agua y el dióxido de carbono se comportan igual que el cristal de un invernadero evitando los cambios bruscos de temperatura (efecto invernadero).
- c) Filtra las radiaciones solares, la capa de ozono protege a los seres vivos de la acción dañina de los rayos ultravioleta.
- d) Protege del impacto de objetos procedentes del espacio, como la basura espacial, los cuerpos que caen continuamente del espacio se desintegran en la mayoría de los casos al penetrar en nuestra atmósfera (concretamente en la ionosfera).
- e) Permite el transporte y las comunicaciones, todas las aves, nubes, semillas, aviones, etc. pueden volar gracias a la resistencia que ofrece el aire. Así pueden sostenerse y desplazarse, permite las comunicaciones ya que estas se realizan mediante ondas, a través del aire.



- f) Modifica el suelo y determina el clima, como agente geológico externo, la atmósfera modela el paisaje, en ella se producen los fenómenos meteorológicos (Consejería de Educación, 2013).

### ***2.2.1.1 Estructura de la atmósfera.***

La atmósfera no tiene uniformidad en cuanto a densidad y composición del aire y a la temperatura, por eso se divide en capas o estratos. Las capas de la atmósfera se clasifican de acuerdo a la temperatura. En la figura 2.5 se ilustran los estratos en orden ascendente: tropósfera, estratósfera, mesósfera, termósfera y ionósfera.

La tropósfera en esta capa desarrolla la vida la mayoría de los fenómenos meteorológicos. Se extiende hasta una altura aproximada de 10 km en los polos y 18 km en el Ecuador. En la tropósfera la temperatura disminuye paulatinamente con la altura hasta alcanzar los  $-70^{\circ}\text{C}$ . Su límite superior es la tropopausa.

En la estratósfera la temperatura se incrementa hasta alcanzar aproximadamente los  $-10^{\circ}\text{C}$  a unos 50 km de altitud. En esta capa donde se localiza la máxima concentración de ozono, “capa de ozono”, gas que al absorber parte de la radiación ultravioleta e infrarroja del Sol posibilita la existencia de condiciones adecuadas para la vida en la superficie de la Tierra. El tope de esta capa se denomina estratopausa.

En la mesósfera la temperatura vuelve a disminuir con la altura hasta los  $140^{\circ}\text{C}$ . Llega a una altitud de 80 km, al final de los cuales se encuentra la mesopausa.

La termósfera se extiende hasta varios cientos de km. de altitud, presentando temperaturas crecientes hasta los  $1000^{\circ}\text{C}$ . En esa capa los gases presentan una densidad muy baja y se encuentran ionizados (Rodríguez, 2004).

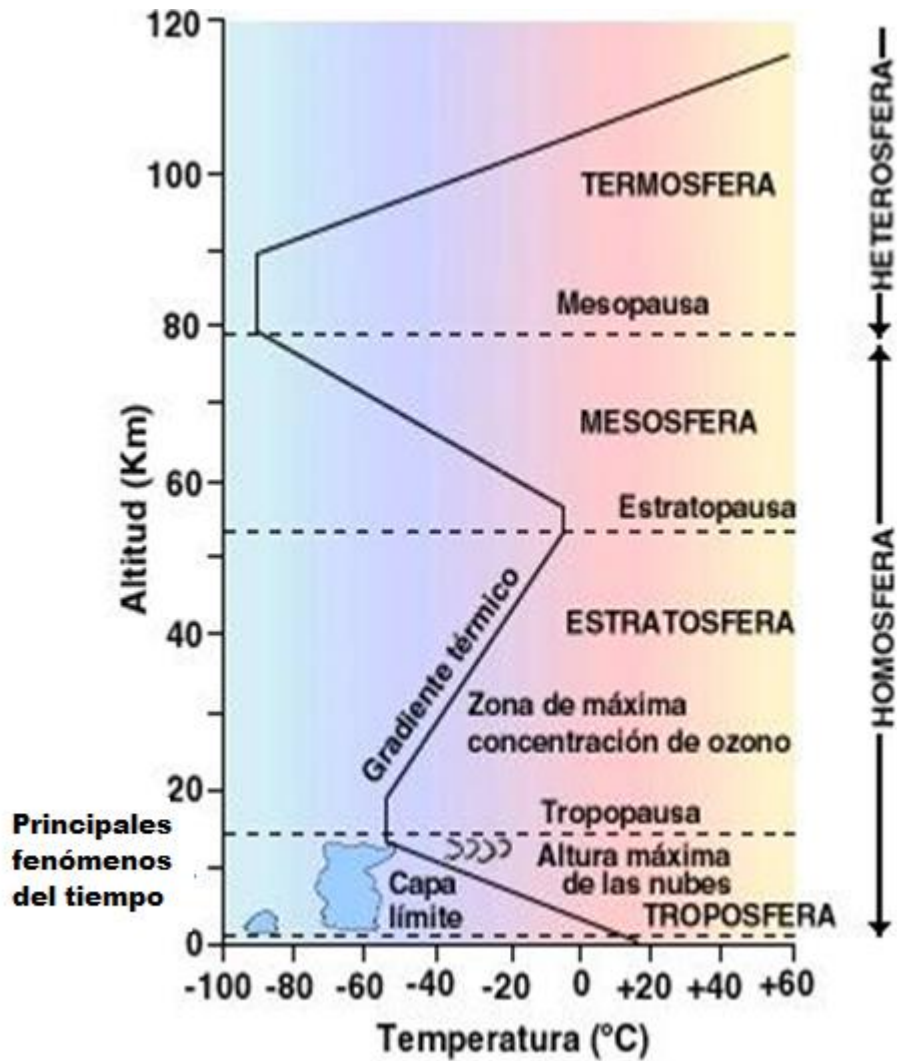


Figura 2. 5 Capas de la atmósfera terrestre y principales fenómenos que se realizan en cada una de ellas (Organización Metereológica Mundial, 1996)

### 2.2.1.2 Composición de la atmósfera.

Los principales gases que componen la atmósfera son:

- Nitrógeno ( $N_2$ ) representa el 78 % total del aire. Es un gas que no reacciona con casi ninguna otra sustancia (inerte) y apenas se disuelve en agua.

- Oxígeno (O<sub>2</sub>) representa el 21 % del total. Es un gas muy reactivo, se combina con otras sustancias oxidándolas. Permite que los combustibles ardan y se disuelve en agua.
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) representa el 0.033 % del total. Producido por la combustión de los combustibles fósiles y la respiración de las plantas y animales. Es soluble en agua.

Otros gases que forman la atmósfera son el Argón (Ar) 0.93 %, Kriptón (Kr) 0.000114 %, Neón (Ne) 0.00182 %, Helio (He) 0.000524 %, Hidrógeno y Metano (Ministerio de Educación, 2011).

### **2.2.2 Contaminación atmosférica.**

Desde el descubrimiento del fuego el hombre ha contaminado la atmósfera con gases perniciosos y polvo. El aumento de consumo de combustibles por la industria, por las grandes concentraciones humanas en las áreas urbanas y por la aparición del motor de explosión, ha empeorado el problema año tras año. (Inche, 2004).

La contaminación es considerada como la presencia o introducción al ambiente de elementos nocivos a la vida, la flora o la fauna, o que degraden la calidad de la atmósfera, del agua, del suelo o de los bienes y recursos naturales en general, (Asamblea Legislativa, 1998)

Todas las actividades originan algún tipo de contaminación. Cuando se usa electricidad, medios de transporte, metales, plásticos o pinturas; cuando se consumen alimentos, medicinas o productos de limpieza; cuando se enciende la calefacción o se calienta

la comida o el agua; etc. se producen, directa o indirectamente, sustancias contaminantes (Echarri, 1998).

En un país industrializado la contaminación del aire procede los sistemas de transporte, los grandes focos de emisiones industriales y los pequeños focos de emisiones de las ciudades o el campo; las fuentes de contaminación dependen de la demanda de productos, energía y servicios que se hacen en conjunto de la sociedad (Echarri, 1998).

La industrialización del mundo en vías de desarrollo está creando niveles de contaminación insostenibles. La solución requiere una revolución tecnológica e intelectual; una ruta alternativa a la prosperidad económica que preserve los recursos y limite las emisiones (Ji, 2014).

En los países en vías de desarrollo, el crecimiento de la población, el dinamismo de la economía y el aumento del parque vehicular son factores que inciden sobre el aumento en los niveles de contaminación atmosférica, superando en la mayoría de los casos los estándares establecidos por la OMS (Ferrer y Escalante, 2009)

Los contaminantes presentes en la atmósfera proceden de dos tipos de fuentes las naturales y las antropogénicas o artificiales (Inche, 2004).

Las fuentes naturales son factores que contaminan independientemente de las actividades humanas, como los vientos que producen polvaredas, las erupciones volcánicas, la erosión del suelo, los incendios forestales.

Las fuentes artificiales son las que contaminan a causa de actividades humanas. Comprende las fuentes fijas y móviles.

Las fuentes fijas o estacionarias son las establecidas en un solo lugar y que tiene como propósito desarrollar procesos industriales, comerciales, de servicio o actividades que

generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera. Incluyen a los químicos, petróleo, pintura, tintas, de automóviles, de papel, del acero, del vidrio, de la generación de la electricidad, del cemento, etc. (Inche, 2004). En la figura 2.6 se muestra el proceso de contaminación generada por una fuente emisora fija.

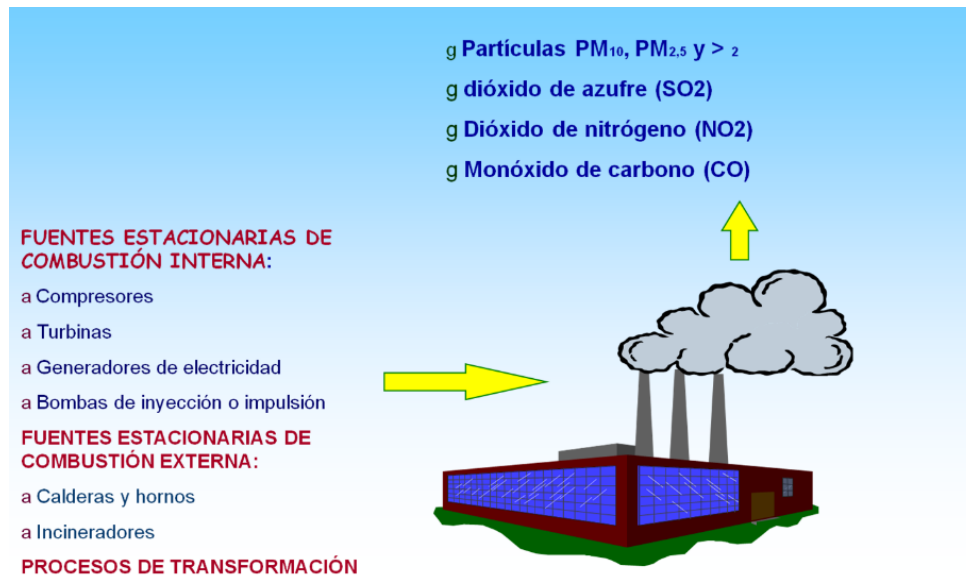


Figura 2. 6 Contaminación del aire por la industria, la contaminación procede de fuentes internas y externas. (Comité de Calidad del Aire, 2010)

En las fuentes móviles se consideran los vehículos, automóviles, autobuses y motocicletas (Inche, 2004).

La contaminación atmosférica es "Cualquier condición atmosférica en la que ciertas sustancias alcanzan concentraciones lo suficientemente elevadas sobre su nivel ambiental normal como para producir un efecto mensurable en el hombre, los animales, la vegetación o los materiales" (Echarri, 1998).

En la Ley de Medio Ambiente de El Salvador (1998), se le llama contaminante a toda materia, elemento, compuesto, sustancias, derivados químicos o biológicos, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos en cualquiera de sus estados físicos que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier otro elemento del ambiente, altere o modifique su composición natural y degrade su calidad, poniendo en riesgo la salud de las personas y la preservación o conservación del ambiente (Asamblea Legislativa, 1998).

Los contaminantes se clasifican en dos grandes grupos con el criterio de si han sido emitidos desde fuentes conocidas o se han formado en la atmósfera.

#### **1. Según su formación**

- a) Contaminantes primarios son aquellos procedentes directamente de las fuentes de emisión como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), que daña directamente la vegetación y es irritante para los pulmones.
- b) Contaminantes secundarios son aquellos originados en el aire por interacción entre dos o más contaminantes primarios, o por sus reacciones con los constituyentes normales de la atmósfera (Echarri, 1998).

Los contaminantes secundarios más importantes son el ácido sulfúrico,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , que se forma por la oxidación del  $\text{SO}_2$ , el dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ , que se forma al oxidarse el contaminante primario  $\text{NO}$  y el  $\text{O}_3$  que se forma a partir del oxígeno  $\text{O}_2$ , en la figura 2.7 se ilustran los contaminantes primarios y secundarios.

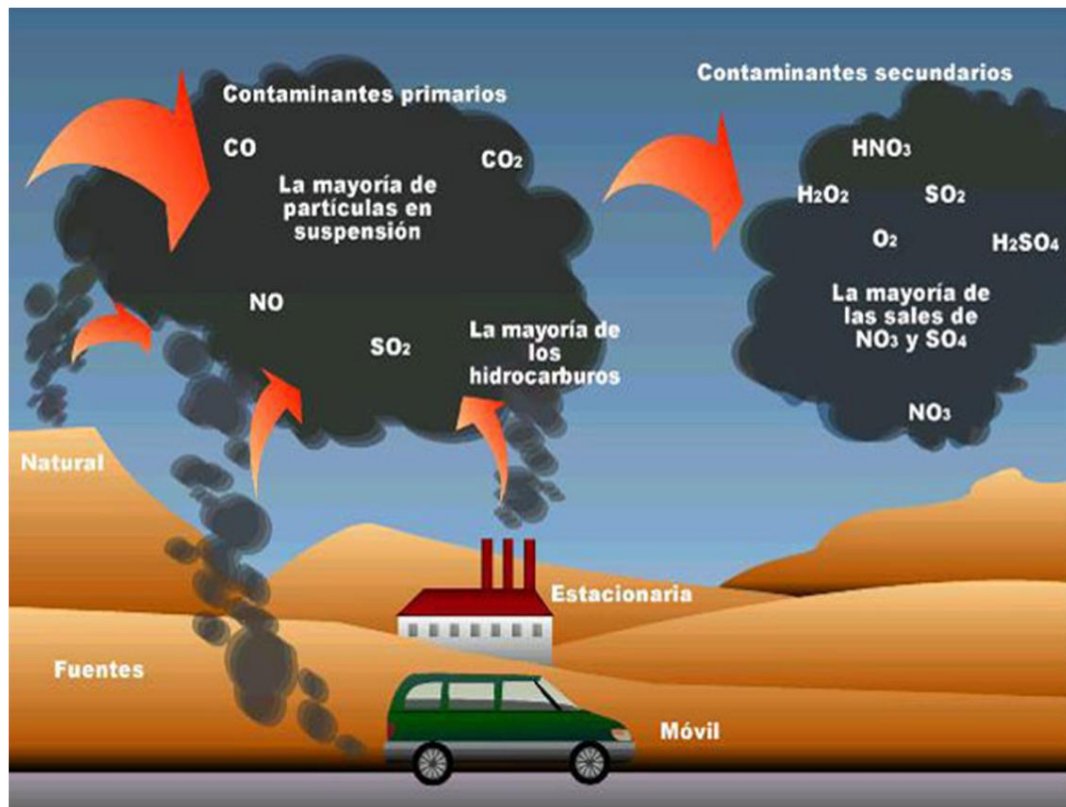


Figura 2.7 Contaminantes primarios y secundarios que se originan a partir de fuentes fijas, naturales y móviles. (Comité de Calidad del Aire, 2010)

Los contaminantes secundarios, como el ozono, material particulado y el dióxido de nitrógeno, tiene efectos perjudiciales sobre la salud humana

**2. Según su composición química se clasifican en**

- a) Contaminantes orgánicos están compuestos básicamente de carbono e hidrógeno, pudiendo contener además otros elementos. Las fuentes naturales son las que más contribuyen con la emisión de estos compuestos metano (CH<sub>4</sub>), terpenos (aceites esenciales)

- b) Contaminantes inorgánicos son principalmente producto de la actividad antropogénica. Incluyen los compuestos simples del carbono (CO y CO<sub>2</sub>), partículas metálicas, óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

### 3. Contaminantes criterios

Se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llamó contaminantes criterio porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos (EU), con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población (INECC, 2013).

Entre los contaminantes criterios están el SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, material particulado (PM), plomo (Pb), monóxido de carbono (CO), O<sub>3</sub> (INECC, 2013). Para cada contaminante criterio se han desarrollado normas que establecen los niveles de exposición en diferentes países, con el objetivo de disminuir los riesgos en la salud.

Entre las normas de calidad del aire están las establecidas por: Agencia de Protección Ambiental (EPA) en Estados Unidos, Organización Mundial de la Salud (OMS), Países de Latinoamérica. En la tabla 2.1 los valores permisibles en las normas de algunos países latinoamericanos



Tabla 2. 1

Estándares de calidad de aire para diferentes países de Latinoamérica

Contaminante	Tiempo promedio	Brasil	Chile	Colombia	México	Perú	Venezuela
Partículas Suspendidas Totales (PST)	Anual <sup>a</sup> 24 Horas	80 240	75 260	76.8 400	75 <sup>b</sup> 260	300	75 260
Partículas fracción (PM <sub>10</sub> )	Anual <sup>a</sup> 24 Horas	50 150	150		50 <sup>b</sup> 150		
Bióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	Anual <sup>b</sup> 24 Horas 1 Hora	80 (0.03) 365 (0.14)	80 (0.03) 365 (0.14)	100 (0.04) 400 (0.15)	79 (0.03) 341(0.13)	160 (0.06)	80 (0.03) 365 (0.14)
Bióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	Anual <sup>b</sup> 24 Horas 1 Hora	100 (0.05) 320	100 (0.05) 470 (0.25)	100 (0.05)	395(0.21)		100 (0.05)
Ozono (O <sub>3</sub> )	8 Horas 1 Hora	160 (0.08)	160 (0.08)	170 (0.09)	216 (0.11) <sup>c</sup>		200 (0.10)
Hidrocarburos (no Metano)	Media diaria 8 Horas <sup>b</sup> 1 Hora	10 000 (9) 40 000 (35)	10 000 (9) 40 000 (35)	15 000 50 000	12 595 (11)		10 000 35 000
Plomo, Pb <sup>b</sup>	Trimestral Anual				1.5		2

(Martínez, 1997)

Nota

<sup>a</sup> Media Geométrica.

<sup>b</sup> Media Aritmética.

<sup>c</sup> No debe excederse más de una vez cada tres años.

Todos los demás valores horarios y de 24 horas, no deberán de excederse más de una vez por año.

Para El Salvador se han establecido valores límites máximos permisibles que deberán aplicarse para los contaminantes del aire, para garantizar la salud humana y el medio ambiente, los cuales nunca podrán superar los límites de valores permisibles de la calidad del aire. Los valores establecidos se muestran en la tabla 2.2.

Los valores permisibles para los diferentes contaminantes indicados en la tabla 2.2 son iguales a los que reporta el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para El Salvador en la Norma Obligatoria Salvadoreña (NSO 13.11.01:01) relacionada con a calidad del aire ambiental inmisiones atmosféricas (Diario Oficial, 2003).

Tabla 2. 2

Valores límites máximos permisibles para la calidad del aire en El Salvador

Parámetros	Unidades	Valores permisibles máximos	Período
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	μ/m <sup>3</sup>	80	Anual
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	μ/m <sup>3</sup>	365	24 horas
Monóxido de Carbono (CO)	μ/m <sup>3</sup>	10000	8 horas
Monóxido de Carbono (CO)	μ/m <sup>3</sup>	40000	1 hora
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	μ/m <sup>3</sup>	100	Anual
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	μ/m <sup>3</sup>	150	24 horas
Ozono	μ/m <sup>3</sup>	120	8 horas
Ozono	μ/m <sup>3</sup>	60	Anual
Partículas inhalables (PM <sub>10</sub> )	μ/m <sup>3</sup>	50	Anual
Partículas inhalables (PM <sub>10</sub> )	μ/m <sup>3</sup>	150	24 horas
Partículas inhalables (PM <sub>2.5</sub> )	μ/m <sup>3</sup>	15	Anual
Partículas inhalables (PM <sub>2.5</sub> )	μ/m <sup>3</sup>	65	24 horas
Partículas totales suspendidas	μ/m <sup>3</sup>	75	Anual
Partículas totales suspendidas	μ/m <sup>3</sup>	260	24 horas
Plomo (Pb)	μ/m <sup>3</sup>	0.5	Anual

(MARN, 2002)

En la tabla 2.3 se presentan los valores autorizados para la calidad del aire por EPA, OMS, y la Norma Obligatoria Salvadoreña.

Tabla 2. 3

Estándares de calidad de aire para diferentes comunidades en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (ppm)

Contaminante	Tiempo promedio	Guías OMS	E.U.A. EPA	El Salvador
Partículas Suspendidas Totales (PST).	Anual <sup>a</sup> 24 Horas		75 260	75 260
Partículas fracción (PM <sub>10</sub> )	Anual <sup>a</sup> 24 Horas 1 Hora		50 150	50 150
Bióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	Anual <sup>b</sup> 24 Horas 1 Hora 10 minutos	50 (0.02) 125 (0.04) 500 (0.18)	79 (0.03) 341(0.13) 1046(0.40)	80 365
Bióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	Anual <sup>c</sup> 24 Horas 1 Hora	40-50 (0.02) 200 (0.11)	100 (0.05) 300 (0.16)	100 150
Ozono (O <sub>3</sub> )	Anual 8 Horas 1 Hora	120 (0.06)	235 (0.12)	60 120 235
Hidrocarburos (no Metano).	3 Horas		160	
Monóxido de Carbono (CO).	Media diaria 8 Horas <sup>c</sup> 1 Hora 30 min. 15 min	10 000 (10) 30 000 (25) 60 000 (50) 100 000 (90)	10 000 40 000	10 000 40 000
Plomo (Pb) <sup>b</sup>	Anual Trimestral		1.5	0.5 1.5

(Martínez, 1997) y (Diario Oficial, 2003).

**Nota:** Dados los posibles efectos en la salud a muy bajas concentraciones de partículas la OMS no recomienda ninguna guía.

Todos los valores horarios y de 24 horas no deberán de excederse más de una vez por año.

<sup>a</sup> Media Geométrica.

<sup>b</sup> Media Aritmética

<sup>c</sup> 98 Percentil.

### **2.2.3 Gases relevantes en la troposfera.**

Los gases que se encuentran en menor concentración en la atmósfera se conocen como gases traza, estos gases pueden clasificarse como primarios, si son emitidos directamente de la fuente, o secundarios, si son generados debido a reacciones fotoquímica en la atmósfera, los más relevantes que se encuentran en la troposfera en la región del ultravioleta-visible se describen a continuación:

#### ***2.2.3.1 Dióxido de nitrógeno.***

Los óxidos de nitrógeno NO (óxido nítrico) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) se conocen en conjunto como NO<sub>x</sub>. Se trata de uno de los contaminantes más problemáticos en las zonas urbanas no sólo en el desarrollo, sino también en los países industrializados. Ellos son especies clave en el control de la producción del ozono troposférico y por esta juegan un papel importante en la formación de la denominada niebla tóxica "smog" (Kern, 2014).

Todas las personas están expuestas a pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno en el aire. La exposición a niveles más altos puede producirse en las proximidades de las cocinas de gas, al quemar madera o combustibles o si se fuma ( Portal Sanitario de la Región de Murcia).

El NO<sub>2</sub>, es un compuesto químico de color marrón o amarillo, gaseoso, que se forma como subproducto en la combustión en altas temperaturas, como en motores de vehículos y en plantas industriales. Desde el punto de vista ambiental, el NO<sub>2</sub> es uno de los responsables de la lluvia ácida, ya que al disolverse en agua da lugar al ácido nítrico (González, 2010).

#### *2.2.3.1.1 El ciclo del nitrógeno.*

El nitrógeno es un elemento básico de la vida y está presente en determinadas reacciones químicas e intercambios entre la atmósfera, suelos y seres vivos, que se realizan en la naturaleza de forma cíclica. Intervienen fundamentalmente en este ciclo los vegetales y las bacterias fijadoras del nitrógeno. En ese proceso, el nitrógeno es incorporado al suelo, que será absorbido por los organismos vivos antes de regresar de nuevo a la atmósfera (Natureduca).

El proceso. Los organismos vivos no pueden utilizar directamente el nitrógeno que se encuentra en la atmósfera en forma gaseosa y que supone el 71% del total; para ello, debe ser transformado previamente en nitrógeno orgánico (nitratos o amoníaco). Esto se consigue, fundamentalmente, mediante la fijación biológica, aunque también las radiaciones cósmicas y la energía que producen los rayos en la atmósfera intervienen en este proceso en menor medida combinando nitrógeno y oxígeno que una vez transformado es enviado a la superficie terrestre por las precipitaciones.

En la fijación biológica intervienen bacterias simbióticas que viven en las raíces de las plantas, sobre todo leguminosas como el guisante, trébol o la alfalfa, pero también determinadas algas, líquenes, etc. Las bacterias se alimentan de estas plantas, pero a cambio le entregan abundantes compuestos nitrogenados. Es muy común en agricultura cultivar leguminosas en determinados terrenos pobres en nitrógeno, o que han quedado agotados por otras cosechas, para permitir rotar los sembrados en el mismo lugar. Cuando el nitrógeno ha quedado fijado en las raíces de las plantas, ya puede ser absorbido por éstas e incorporarlo a los tejidos en forma de proteínas vegetales. Desde aquí, el nitrógeno ya entra en la cadena alimentaria mediante los animales herbívoros y carnívoros. Cuando las plantas y animales

mueren, mediante la descomposición se produce una transformación química de los compuestos nitrogenados, convirtiéndose en nitrógeno amoniacal (actividad denominada amonificación), última etapa de la mineralización del nitrógeno que está contenido en la materia orgánica del suelo. Este amoníaco vuelve a ser en parte recuperado por las plantas, pero el resto alcanza el medio acuático o simplemente permanece en el suelo, donde será convertido en nitrógeno nítrico por los microorganismos, en un proceso que se denomina nitrificación y que es aprovechado de nuevo por las plantas. Los nitratos pueden volver a la atmósfera mediante la desnitrificación, o ser eliminado del suelo por lixiviación (disolución en el agua) y posterior arrastrado a los ríos y lagos. El ciclo del nitrógeno se ilustra en la figura 2.8

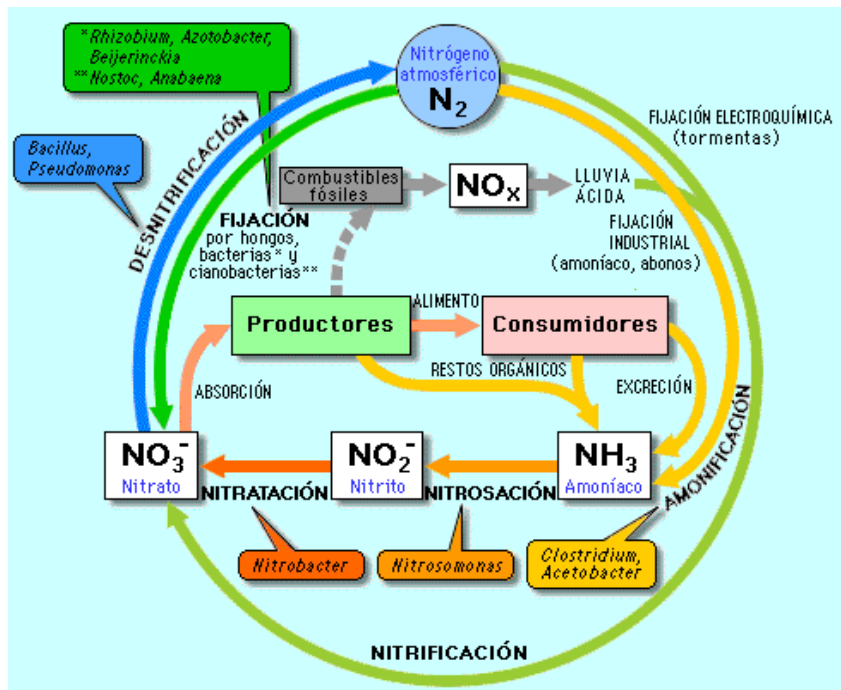


Figura 2.8 Ciclo del Nitrógeno, etapas en que se presenta fijación, momificación, nitrificación, desnitrificación (González, 2010)

#### *2.2.3.1.2 Cómo se produce el NO<sub>2</sub>.*

Los NO<sub>x</sub> son liberados al aire por los tubos de escape de los vehículos motorizados, en los procesos de combustión del carbón, petróleo, o gas natural, y en tratamientos industriales (soldadura al arco, grabado de metales y detonación de dinamita). También son producidos comercialmente al hacer reaccionar el ácido nítrico con metales o con celulosa y son utilizados en la producción industrial (ácido nítrico, lacas, tinturas y otros productos químicos). También se usan en combustibles para cohetes, en la nitrificación de compuestos químicos orgánicos y en la manufactura de explosivos ( Portal Sanitario de la Región de Murcia).

El NO<sub>2</sub> se forma en la atmósfera por la combinación directa del monóxido de nitrógeno generado en la combustión de los motores, con oxígeno, se forman de manera natural por actividad bacteriana, actividad volcánica (González, 2010).

Los NO<sub>x</sub> se degradan rápidamente en la atmósfera al reaccionar con otras sustancias comúnmente presentes en el aire. La reacción del dióxido de nitrógeno con sustancias químicas producidas por la luz solar lleva a la formación de ácido nítrico, el principal constituyente de la lluvia ácida. El NO<sub>2</sub> reacciona con la luz solar, permitiendo la formación de ozono y smog en el aire. En las viviendas en las que se quema madera o que usan calentadores y cocinas de gas tienden a tener niveles de NO<sub>x</sub> más altos en su interior comparadas a viviendas que no usan estos combustibles ( Portal Sanitario de la Región de Murcia).

El NO<sub>2</sub> además de ser un peligro para la salud es precursor de un número de contaminantes secundarios nocivos, incluyendo la formación de material particulado

inorgánico a través de  $\text{HNO}_3$  y oxidantes (ozono y PANs “Nitrato de Peroxiacilo”). Estas relaciones se muestran en la figura 2.9.

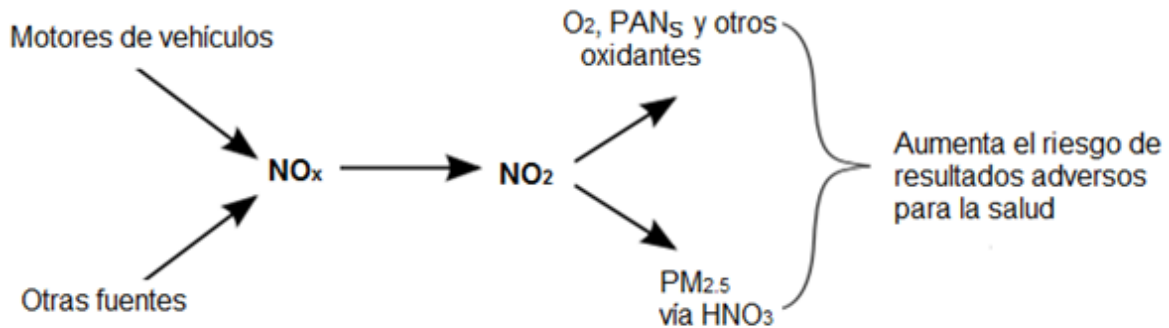


Figura 2. 9 Relación simplificada de las emisiones de  $\text{NO}_x$  con la formación de  $\text{NO}_2$  y otras reacciones dañinas incluyendo  $\text{O}_3$  y partículas  $\text{PM}_{2.5}$  (Kern, 2014)

Las emisiones globales de  $\text{NO}_x$  son causadas tanto por las actividades humanas y los procesos naturales. La principal fuente de  $\text{NO}_x$  antropogénico es la combustión de combustibles fósiles en los procesos industriales, centrales eléctricas y tráfico vehicular.

En un ambiente que esté libre de compuestos orgánicos volátiles (COV),  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$  y  $\text{O}_3$  se encuentran un ciclo diurno autónomo, que es fuertemente dependiente de la luz UV del sol. En la mañana, la intensidad de la luz solar aumenta, esto conduce a la fotodisociación de  $\text{NO}_2$ . Durante el día,  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  están en un equilibrio fotoestacionario (Kern, 2014).

La tabla 1.3 muestra las fuentes de  $\text{NO}_x$  y su contribución a las emisiones globales.



Tabla 2. 4

Principales fuentes antropogénicas y naturales para NO<sub>x</sub> troposférico mundial

Fuente	Emisión (10 <sup>12</sup> g/a)	Rango de incertidumbre (10 <sup>12</sup> g/a)
Combustión de combustibles fósiles	22	13 - 31
La quema de biomasa	7.9	3 - 15
Producción microbiana del suelo	7.0	4 - 12
Relámpago	5.0	2- 20
Aeronave	0.8	0.59 - 0.95
Estratosférico	0.64	0.4 - 1
TOTAL	44	23 - 81

Nota g/a: gramo/año

Tomada de (Lee D.S., 1997).

#### 2.2.3.1.3 Efectos del NO<sub>2</sub> en el medio ambiente.

El NO<sub>2</sub> reacciona con el radical OH para producir partículas de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), las cuales se dispersan en el ambiente en forma de lluvia, llovizna, niebla, nieve y rocío, dando origen a un proceso de acidificación de la tierra y cuerpos de agua. Las variaciones o cambios permanentes en las propiedades de estos elementos, deriva finalmente en la pérdida de hábitat de especies primarias y consecuentemente en catástrofes ecológicas con daños irreversibles (EcuRed, 2011). Uno de los efectos del NO<sub>2</sub> es la lluvia ácida.

#### **La lluvia ácida**

Engloba cualquier forma de precipitación que presente elevadas concentraciones de ácido sulfúrico y nítrico. También puede mostrarse en forma de nieve, niebla y partículas de material seco que se posan sobre la Tierra (National Geographic).

La lluvia ácida se forma a partir de la capa vegetal en descomposición y los volcanes en erupción que liberan algunos químicos a la atmósfera que pueden originar lluvia ácida, pero la mayor parte de estas precipitaciones son el resultado de la acción humana. La lluvia ácida se genera principalmente por la quema de combustibles fósiles procedentes de plantas de carbón generadoras de electricidad, las fábricas y los escapes de automóviles. Con la quema combustibles fósiles, libera  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  a la atmósfera. Estos gases químicos reaccionan con el agua, el oxígeno y otras sustancias para formar soluciones diluidas de ácido nítrico y sulfúrico. Los vientos propagan estas soluciones acídicas en la atmósfera a través de cientos de kilómetros. Cuando la lluvia ácida alcanza la Tierra, fluye a través de la superficie mezclada con el agua residual y entra en los acuíferos y suelos de cultivo (National Geographic).

### **Consecuencias de la lluvia ácida en**

- **En cuerpos de agua**

La lluvia ácida tiene muchas consecuencias nocivas sobre los lagos, ríos, arroyos, pantanos y otros medios acuáticos. Las poblaciones de algas, plantas y animales acuáticos se dañan de varias maneras. El agua ácida interrumpe su ciclo reproductivo (UCM, 2006).

La lluvia ácida eleva el nivel ácido en los acuíferos, lo que posibilita la absorción de aluminio que se transfiere, a su vez, desde las tierras de labranza a los lagos y ríos. Esta combinación incrementa la toxicidad de las aguas para los cangrejos de río, mejillones, peces y otros animales acuáticos. Algunas especies pueden tolerar las aguas acídicas mejor que otras. Sin embargo, en un ecosistema interconectado, lo que afecta a algunas especies, con el

tiempo acaba afectando a muchas más a través de la cadena alimentaria, incluso a especies no acuáticas como los pájaros (National Geographic).

- **Variación del Potencial de Hidrógeno (pH)**

Cuando un lago se acidifica, desaparece una especie tras otra, empezando por las más sensibles al pH del agua, pero en situaciones extremas desaparecen también las más tolerantes. Además de lagos, las corrientes y ríos son también sensibles a los depósitos ácidos. Algunos de ellos pueden disminuir su pH al derretirse la nieve ácida en primavera. El exceso de ácido nítrico puede provocar un aumento de nitratos en los lagos, mares, océanos y la consiguiente eutrofización de los mismos con sus dramáticas consecuencias (UCM, 2006).

La lluvia ácida genera acidificación las aguas de los lagos, pantanos o arroyos. La mayoría de los lagos y arroyos tiene un pH entre 6 y 8. La escala de pH va de 0 a 14. Si un pH es inferior a 7 es ácido y si es mayor que 7 es alcalino (Bell, 2015).

Para el Sitio Ramsar Área Natural Protegida Laguna El Jocotal, se presentan algunos factores que dañan a este humedal uno de ellos es la quema en el humedal y zona circundante están asociados al cultivo de caña de azúcar, que usualmente genera migraciones y mortandad de fauna y flora silvestre. Así mismo, aporta sedimentos cuando el suelo está expuesto a la lluvia, esto incrementa el nivel de azolvamiento del ecosistema. En la figura 2.10 se muestran los valores de pH ácido y alcalino (MARN, 2011)

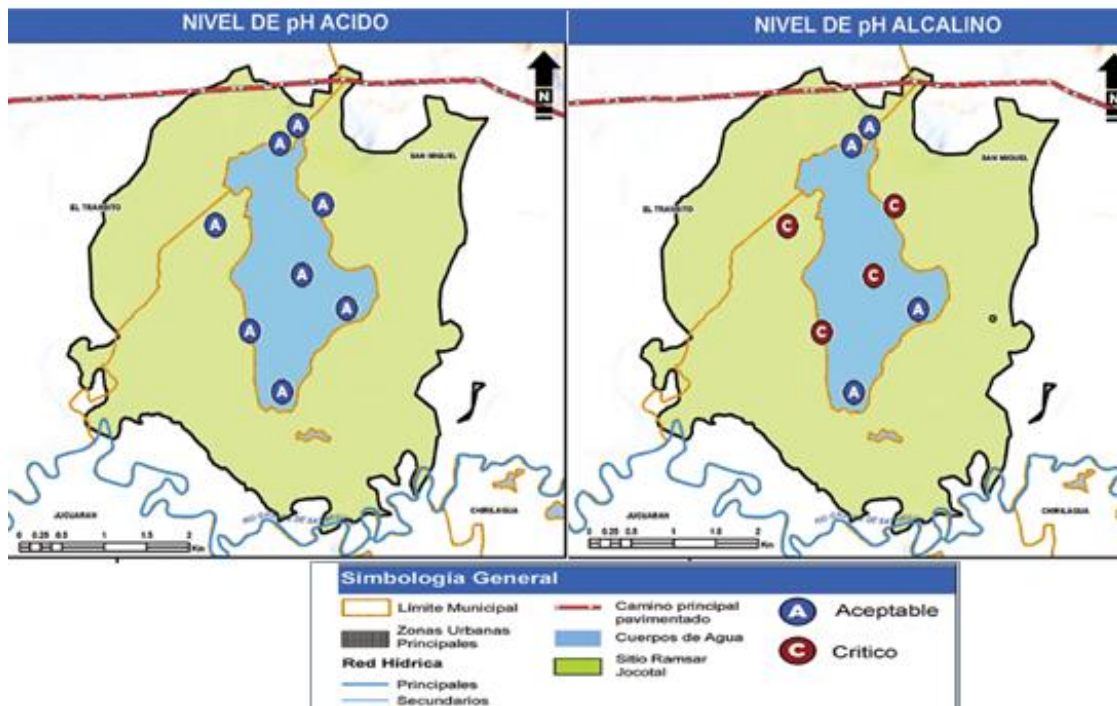


Figura 2. 10 Niveles de pH ácido y alcalino del Sitio Ramsar Jocotal (MARN, 2011)

La figura 2.10 muestra que el pH ácido es aceptable para la fecha que se realizó el estudio, para el pH alcalino muestra áreas aceptables y áreas críticas.

El Sitio Ramsar Laguna de Olomega, presenta situaciones adversas que inciden negativamente sobre él, como la quema provocada en zonas boscosas ocurre en la parte alta de la cuenca del humedal, en la zona Sur, asociada a cultivos agrícolas, como se ilustra en la figura 2.11 (MARN, 2011).

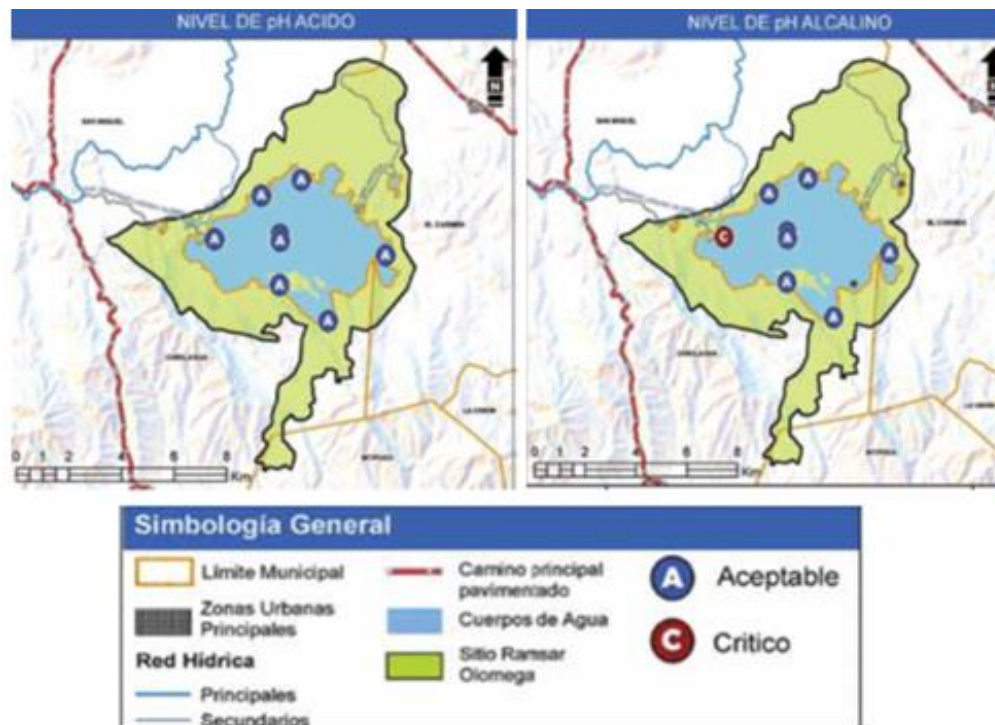


Figura 2. 11 Niveles de pH ácido y alcalino de Sitio Ramsar Olomega (MARN, 2011)

En la figura 2.11 muestra que el pH ácido es aceptable para la fecha que se realizó el estudio, para el pH alcalino muestra áreas aceptables y un área crítica.

- **En selvas y bosques**

La lluvia ácida también contamina selvas y bosques, especialmente los situados a mayor altitud. Esta precipitación nociva roba los nutrientes esenciales del suelo a la vez que libera aluminio, lo que dificulta la absorción del agua por parte de los árboles. Los ácidos también dañan las agujas de las coníferas y las hojas de los árboles (National Geographic).

La lluvia acida al dañar las hojas de la planta queda debilitada, retrasando su desarrollo, es fácilmente atacada por distintos tipos de parásitos, y con más sensibilidad a los

periodos de sequía, situaciones todas ellas que en condiciones normales hubiera resistido como se ilustra en la figura 2.12 (UCM, 2006)



*Figura 2. 12* Daños producidos en las hojas por la lluvia ácida (UCM, 2006)

Los efectos de la lluvia ácida, en combinación con otros agentes agresivos para el medioambiente, reduce la resistencia de los árboles y plantas a las bajas temperaturas, la acción de insectos y las enfermedades. Los contaminantes también pueden inhibir la capacidad arbórea de reproducirse. Algunas tierras tienen una mayor capacidad que otras para neutralizar los ácidos. En aquellas áreas en las que la “capacidad amortiguadora” del suelo es menor, los efectos nocivos de la lluvia ácida son significativamente mayores (National Geographic).

- **En el suelo**

El aumento de la acidez del suelo destruye a los microorganismos que lo forman, con lo que este se va deteriorando. La persistencia de la lluvia ácida sobre el suelo puede facilitar la pérdida de algunos nutrientes de las plantas como el calcio, potasio y magnesio, ya que con

el aumento de acidez aumenta su solubilidad y su pérdida por lixiviación. Los suelos se empobrecen más todavía. En este tipo de suelos, también se inhibe la germinación de las semillas y con ello la reproducción de las plantas. Todo ello parece influir de nuevo negativamente en las plantas, esta vez a través del suelo. Se produce además la solubilización de compuestos de metales tóxicos (cadmio, níquel, manganeso, plomo, mercurio, aluminio) y puede aumentar el contenido de los mismos en las plantas y, a través de las cadenas alimenticias, también pueden verse afectados los animales. Si estos metales también son movilizados y conducidos a las corrientes de agua, pueden tener un efecto venenoso en animales acuáticos o en otros que solamente beben esta agua. Incluso parece probable que las lluvias acidificadas pudiesen penetrar en las reservas de aguas subterráneas y aumentar la solubilidad de los metales tóxicos (UCM, 2006).

- **En edificios**

Los edificios, principalmente los construidos por rocas calcáreas (calizas y mármoles) y por rocas que estén cementadas por carbonatos (areniscas y otras) son especialmente sensibles a la lluvia ácida. El carbonato cálcico de todas estas rocas es atacado por los ácidos, transformándose en yeso, formando una costra llamada sulfina, que no sólo es más soluble y por tanto, más fácilmente arrastrada por el agua, sino que, además, por ocupar más volumen, actúa como una cuña sobre la piedra, aumentando la destrucción de la misma ahora por erosión mecánica. Todo ello produce una descomposición superficial de la piedra en forma de exfoliaciones, arenilla y desprendimiento de las capas externas, como se ilustra en la figura 2.13. Existe un desgaste de los relieves y formas escultóricas, así como pérdida de las policromías e incluso el desprendimiento de algunas partes, que pueden producir

inestabilidad mecánica y daños muy serios en este tipo de edificaciones. Esto es lo que se conoce con el nombre de “mal de la piedra” (UCM, 2006).



*Figura 2. 13* Consecuencias de la lluvia ácida sobre edificios (Bell, 2015)

El hombre puede prevenir la lluvia ácida mediante el ahorro de energía. Mientras menos electricidad se consume en los hogares, menos químicos emitirán las centrales. Los automóviles también consumen ingentes cantidades de combustible fósil, por lo que los motoristas pueden reducir las emisiones nocivas al usar el transporte público, vehículos con alta ocupación, bicicletas o caminar siempre que sea posible (National Geographic).

#### *2.2.3.1.4 Efectos del NO<sub>2</sub> en la salud humana.*

La intoxicación aguda (exposición a altas concentraciones de la sustancia durante corto período de tiempo) causa daño en las células pulmonares. La intoxicación crónica (exposición a bajas concentraciones, largos períodos) puede causar graves cambios en el tejido pulmonar, asma, bronquitis y otras afecciones respiratorias (González, 2010).



Los efectos del NO<sub>2</sub> en la salud humana se centran sobre todo en el aparato respiratorio, aumentando la frecuencia de las infecciones de las vías respiratorias. El NO<sub>2</sub> en concentraciones alta, puede conducir a la muerte (700 ppm después de 30 minutos será letal). Inhalar gas con la mucosa húmeda crea ácido nítrico, lo que provoca una fuerte degradación de los capilares pulmonares (Kern, 2014).

#### *2.2.3.1.5 Bandas de absorción del NO<sub>2</sub>.*

La absorción de NO<sub>2</sub> ocupa la totalidad UV-Vis y de infrarrojo cercano de las regiones. Sus secciones de absorción son de un orden de magnitud menor que las de O<sub>3</sub>, el NO<sub>2</sub> muestra menor absorción en los espectros (Platt, 1999). El espectro de absorción de NO<sub>2</sub> tiene estructuras espectrales muy estrechos que muestran variaciones tanto con la temperatura y con la presión (Burrows et al, 1998), (Voigt, 2001). Para el NO<sub>2</sub> las secciones transversales tienen que ser grabada a alta resolución espectral y a presiones representativas. La dependencia de la temperatura es útil para la separación del NO<sub>2</sub> estratosférico y troposférico en los espectros.

La molécula de NO<sub>2</sub> tiene una absorción continua por debajo de 200 nm ( máximo a 170 nm), un sistema UV de onda corta con banda en 235,0 y 249.1nm (transiciones  $B^2B_2 \leftarrow X^2A_1$ ) y un sistema extendido con absorciones desde el ultravioleta (sobre los 320nm) hasta la región espectral en verde (transiciones  $A^2B^1 \leftarrow X_2A^1$ ) Este sistema es responsable del color café del NO<sub>2</sub>; este es usado para medidas DOAS de NO<sub>2</sub> en la atmósfera y permite promedios límites de detección en el orden de 10ppt en un recorrido óptico de 10km (Platt y Stutz, 2008). Hay numerosas medidas de secciones eficaces de absorción NO<sub>2</sub>, por ejemplo,

(Burrows et al, 1998), (Voigt, 2001). La dependencia de la sección eficaz de absorción con la temperatura ha sido estudiada por (Burrows et al, 1998).

El  $\text{NO}_2$  es uno de los contaminantes que se detectan con la técnica DOAS. Los rangos espectrales útiles para esta técnica se ilustran en la figura. 2.14.

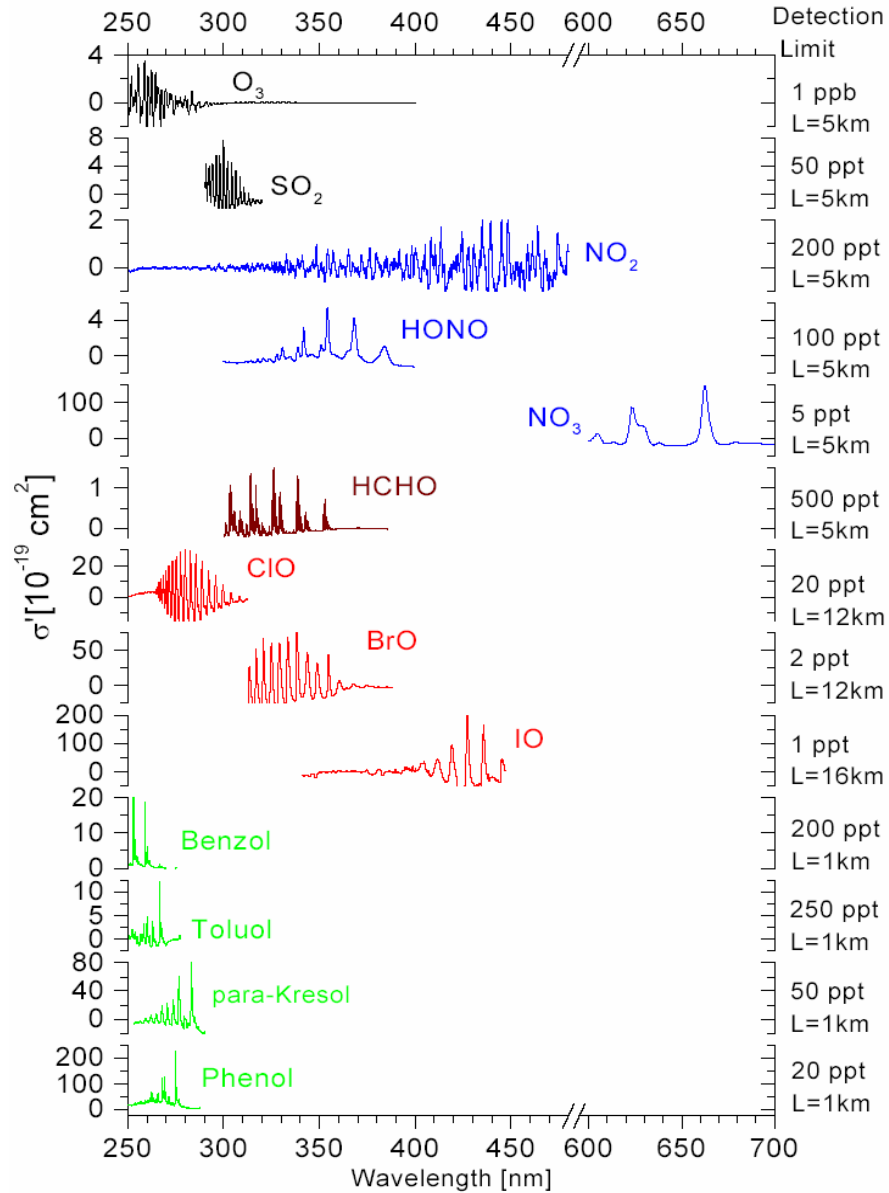


Figura 2. 14 Coeficientes de absorción diferencial  $\sigma'(\lambda)$  de una serie de especies relevantes. Los límites de detección y su correspondiente longitud de paso están indicados a la derecha (Platt y Stutz, 2008).

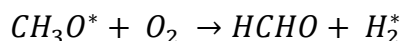
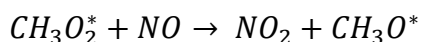
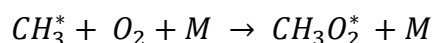
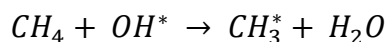
### 2.2.3.2 Formaldehído.

El HCHO puro a temperatura y presión ambiente es un gas incoloro de olor fuerte e irritante. Esta sustancia se conoce con varios nombres; entre ellos está el Metanol, Oxido de Metileno, Oximetileno, Metilaldehído, Oxometano, Formalina (solución con agua), Aldehído Fórmico, Formol (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1999).

El HCHO es irritante para los ojos y el tracto respiratorio aún en bajas concentraciones (1ppm), causando sensación de ardor a mayores concentraciones; los vapores de soluciones de HCHO son inflamables y explosivos (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1999). Está compuesto por dos átomos de hidrógeno, uno de carbono y uno de oxígeno, tiene ángulos de enlace entre átomos de  $121^\circ$  (OCH) y  $118^\circ$  (HCH).

El HCHO es un producto metabólico importante en plantas y animales y por ello está presente en el medio ambiente de forma natural en bajas concentraciones. En la atmósfera se genera a través de la quema de biomasa, actividades humanas, por medio de oxidación fotoquímica de los hidrocarburos en la atmósfera y por ozonólisis (Alvarado, 2011).

El proceso de formación de HCHO en la atmosfera se representa como un mecanismo de reacción en cadena (Heckel, 2003), donde M es un catalizador:



Las principales bandas de absorción del HCHO son encontradas cerca del rango espectral ultravioleta visible (260-360)nm y son asociadas a transiciones electrónicas

(Valeour, 2003). Las bandas a 326nm, 330nm, 339nm, 343nm y 353nm son transiciones vibracionales de baja energía que corresponden a la transición electrónica alrededor de los 303nm (Dieke y Kistiakowsky, 1934). Esta estructura ha sido utilizada en numerosos estudios atmosféricos para la determinación de concentraciones con DOAS (Heckel et al, 2005). Las bandas de absorción del HCHO se ilustran en la figura 2.15.

El HCHO se puede encontrar en el aire que se respira en el hogar y el trabajo, en los alimentos que comemos y en algunos productos que usamos en la piel. Una fuente importante de formaldehído que se respira diariamente se encuentra en el smog en la capa inferior de la atmósfera. El escape de automóviles con convertidores catalíticos o de automóviles que usan gasolina oxigenada también contiene formaldehído. En el hogar, el formaldehído es producido por cigarrillos y otros productos de tabaco, estufas de gas y chimeneas abiertas al aire (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1999).

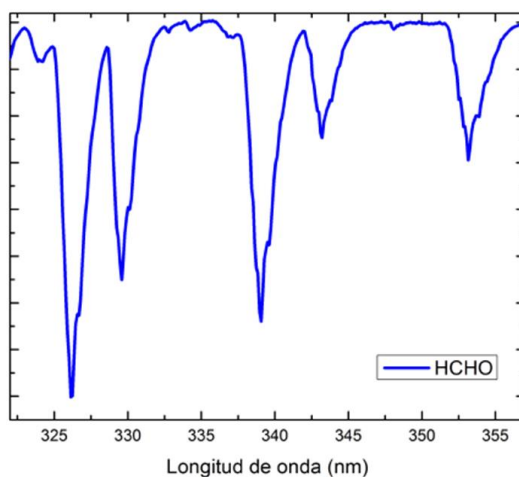


Figura 2. 15 Bandas de absorción del HCHO, (Dieke y Kistiakowsky, 1934).

El HCHO se usa como preservativo en algunos alimentos tales como algunos quesos italianos, alimentos desecados y pescados. El HCHO se encuentra en muchos productos que

se usan diariamente en el hogar, por ejemplo, antisépticos, medicamentos, cosméticos, líquidos para lavar platos, suavizadores de telas, artículos para el cuidado de zapatos, limpiadores de alfombras, pegamentos y adhesivos, barnices, papel, plásticos y en algunos productos de madera. Algunas personas están expuestas a niveles altos de HCHO si viven en una casa móvil nueva, ya que los productos de madera que se usan en este tipo de casas emiten HCHO (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1999).

El HCHO es un compuesto reactivo considerado como tóxico atmosférico que posee efectos agudos (irritación) y crónicos (cáncer) a la salud y que se encuentra tanto en áreas rurales como urbanas (Satsumabayashi et al, 1995), (Granby et al, 1997), (Müller, 1997), (Viskari et al, 2000). El HCHO es uno de los compuestos del humo del tabaco, se puede producir por reacciones de compuestos primarios (Finlayson-Pitts y Pitts Jr, 1986), también es emitido directamente por vehículos (Herndon et al, 2005) y por algunos procesos industriales (Carrier et al, 1986), (Grutter et al, 2007).

### ***2.2.3.3 Tetraoxígeno.***

La molécula  $O_4$  es el dímero de la molécula de oxígeno  $O_2$ . Se puede formar cuando dos moléculas de oxígeno chocan.

El  $(O_2)_2$  tiene bandas de absorción en la región espectral ultravioleta-visible en el rango de (360-630) nm, éstas pertenecen a transiciones simultáneas entre dos estados base de la molécula y estados excitados de ambas moléculas de oxígeno. A longitudes de ondas  $[\lambda(\text{nm})]$  grandes, ocurren solamente transiciones desde un estado excitado a un estado base y bajo condiciones atmosféricas en el que  $N_2$  puede servir como pareja en las colisiones.

En las bandas de absorción investigadas por Wagner et al, 2002b, se encontró que existe un aumento en la absorción con la disminución de la temperatura que va desde  $\approx 13\%$  en 477.3nm y 532.2nm,  $\approx 20\%$  en 360.5nm y 577.2nm a  $\approx 33\%$  en 380.2nm y 630.0 nm. Excepto para la banda a 380.2nm la absorción de  $O_4$  en resultado ser más grande que en las medidas a mayor temperatura (Platt y Stutz, 2008).

Las observaciones del  $O_4$  pueden servir como un nuevo método para la determinación de propiedades de los aerosoles que se presentan en la atmósfera. En la figura 2.16 se muestra un esquema simplificado de las trayectorias de la luz en la atmósfera relevantes para las observaciones MAX- DOAS. También se muestra el perfil de altura atmosférica del  $O_4$  (Wagner, 2004).

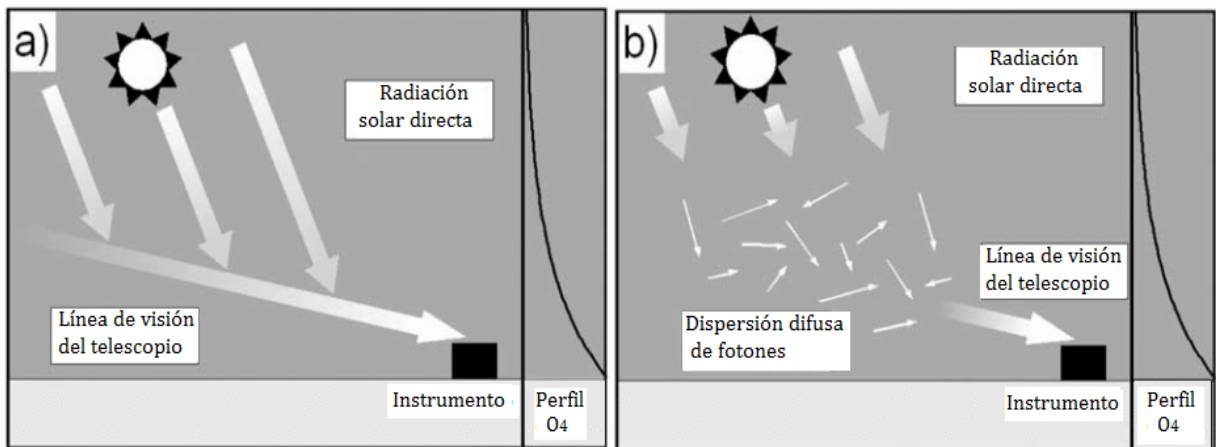


Figura 2. 16 a) Esquema simplificado de las trayectorias de la luz en la atmósfera relevantes para las observaciones MAX- DOAS. Para una atmósfera ópticamente delgada, por ejemplo, para una atmósfera sin dispersión de aerosoles y las observaciones en el rango espectral visible, los fotones observados son principalmente provenientes de la dispersión. La profundidad de penetración de la luz solar directa es grande (primer segmento). También la línea directa de visión de los telescopios (tercer segmento) es de mayor alcance. b) Además de la dispersión hay una contribución adicional debida a los aerosoles, lo que disminuye la línea directa de visión de los telescopios. Dado que la mayoría del  $O_4$  en la atmósfera se encuentra cerca de la superficie terrestre, se observa que la absorción de  $O_4$  disminuye significativamente (Wagner, 2004).

#### ***2.2.3.4 Acido nitroso.***

El HONO ( $\text{HNO}_2$ ), tiene bandas de absorción en el rango espectral entre los 300nm a los 400nm. Este ha sido ampliamente estudiado aplicando la técnica DOAS (Dix B, 2007), (Platt y Stutz, 2008)].

La fotólisis de ácido nitroso, HONO, es una fuente importante de radicales OH en la atmósfera urbana contaminada (Perner y Platt, 1979), (Platt et al, 1980 (b)). Además el HONO es tóxico (Beckett et al, 1995) y su química conduce a la formación de carcinógeno nitrosaminas (Shapley, 1976). La fotólisis de HONO comienza temprano en la mañana, cuando las concentraciones son más altas. La combinación de altas concentraciones HONO al amanecer y la fotólisis rápida genera una producción de radicales OH que supera otras fuentes como  $\text{O}_3$  y la fotólisis de HCHO (Alicke et al, 2002). El HONO se identificó y cuantificó en la atmósfera con DOAS por (Perner y Platt, 1979).

La variación diurna de la relación de mezcla de HONO está dominada por su fotólisis, lo que conduce a niveles más bajos durante el día. Durante la noche las concentraciones aumentan, llegando a menudo a un valor constante en la madrugada. El HONO se forma a través de diversos mecanismos químicos en la atmósfera. Se sospecha que la mayor parte de HONO urbana puede ser formado a partir de  $\text{NO}_x$  y vapor de agua (Perner y Platt, 1979).

#### ***2.2.3.5 Oxido de bromo.***

Las bandas de absorción del BrO se encuentran en el rango espectral desde los 310nm hasta los 350nm. El bromo (Br) se encuentra en el séptimo grupo de la tabla periódica, los halógenos junto con flúor (F), cloro (Cl), yodo (I) y astato (As). Los halógenos son muy

reactivos y juegan un papel importante en la química atmosférica y se asocian con agotamiento del ozono estratosférico (Dix, 2007).

Las fuentes de bromo reactivo estratosférico ( $\text{BrO}_x = \text{Br} + \text{BRO}$ ) están en un punto medio en forma natural y antropogénico. La fuente más importante es el bromuro de metilo ( $\text{CH}_3\text{Br}$ ), liberado por la quema de biomasa, por los océanos y con una concentración menor el procedente de la agricultura y la gasolina con plomo. Otra fuente importante son gases halogenados de hidrocarburos (halones) en su mayoría utilizados en extintores. Su concentración media mundial está en aumento, causado por el uso de grandes existencias de halones y una producción continua en países en desarrollo. La tasa de crecimiento medio anual, es menor que las tasas observadas en la década de los 1990s (Dorf, 2005).

Antes los compuestos halogenados no tenían importancia para la química de la tropósfera. Esta visión cambió cuando se observaron pérdidas de ozono repentinos en la capa límite del ártico, coincidiendo con los altos niveles de bromo (Barrie et al, 1988).

La liberación de la sal del mar, el aerosol de sal marina o la superficie del hielo marino del Ártico representan fuentes de  $\text{BrO}$ . En los últimos años, se encontraron grandes cantidades de  $\text{BrO}$  en penachos volcánicos (Bobrowski et al, 2003) .

#### **2.2.4 Ciclo de la contaminación atmosférica.**

Cuando los contaminantes se han emitido permanecen en la atmosfera durante un tiempo concreto que se conoce como tiempo de residencia. Este tiempo de permanencia está relacionado con la reactividad química de cada contaminante, con el lavado de la atmosfera que efectúa la lluvia y con la capacidad del medio para dispersarlos. La última fase de la contaminación atmosférica debe incluir los efectos de los contaminantes sobre los seres



vivos, las estructuras (edificaciones, monumentos) y sobre las propiedades intrínsecas de la atmosfera (reducción de la visibilidad, alteración del balance de calor del sistema tierra-atmosfera, alteraciones sobre el clima (Rodríguez, 2004).

La contaminación del aire es un proceso que se inicia con las emisiones al aire por parte de los diferentes focos emisores (niveles de emisión) de contaminantes a la atmosfera. Cuando estas sustancias llegan a la atmosfera sufren varios efectos de transporte y transformación: describe los fenómenos que afectan a los contaminantes en la atmosfera entre la fuente y el receptor (dilución de los contaminantes, reacciones químicas). Como resultado de estos procesos en un punto determinado se da una concentración determinada de cada contaminante, la cual se conoce como nivel de inmisión. Los niveles de inmisión o calidad del aire determinan el efecto de un contaminante sobre la salud o el medio ambiente (Jiménez, 2007).

En las figura 2.17 se ilustra cómo se realiza el proceso de la contaminación

### **2.2.5 Relación entre contaminación atmosférica y la salud.**

Los estudios efectuados en todo el mundo han encontrado relaciones negativas entre la exposición a los contaminantes del aire exterior que usualmente se encuentran en áreas urbanas y los efectos adversos para la salud (OPS, 2005).

La contaminación del aire afecta los sistemas cardiovascular y respiratorio. Los estudios de series temporales realizados en diferentes poblaciones han reportado un exceso de mortalidad por causas cardiovasculares y respiratorias (OPS, 2005).

La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud, con la disminución de los niveles de contaminación del aire los países pueden reducir

la carga de morbilidad derivada de accidentes cerebrovasculares, cánceres de pulmón, neumopatías crónicas y agudas, entre ellas el asma (OMS, 2014).

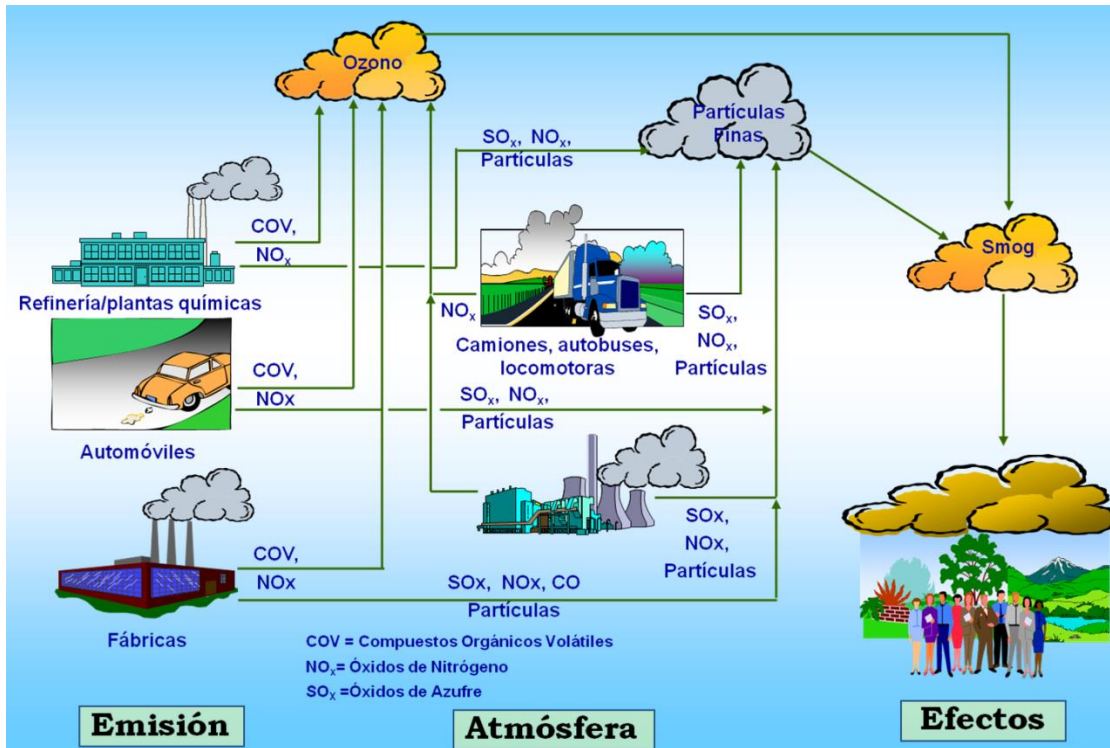


Figura 2. 17 Fenómeno de la contaminación, fuentes de emisión y efectos sobre la salud humana y el medio ambiente (Comité de Calidad del Aire, 2010)

### 2.2.6 Transporte y dispersión de contaminantes en el aire.

El transporte y dispersión de los contaminantes del aire está influenciado por las variaciones del clima, la topografía, el viento, la estabilidad atmosférica, radiación solar, precipitación (Inche, 2004).

El viento es el movimiento del aire. La velocidad del viento puede afectar en gran medida la concentración de contaminantes en un área. A mayor velocidad del viento menor es la concentración de contaminantes (Inche, 2004).

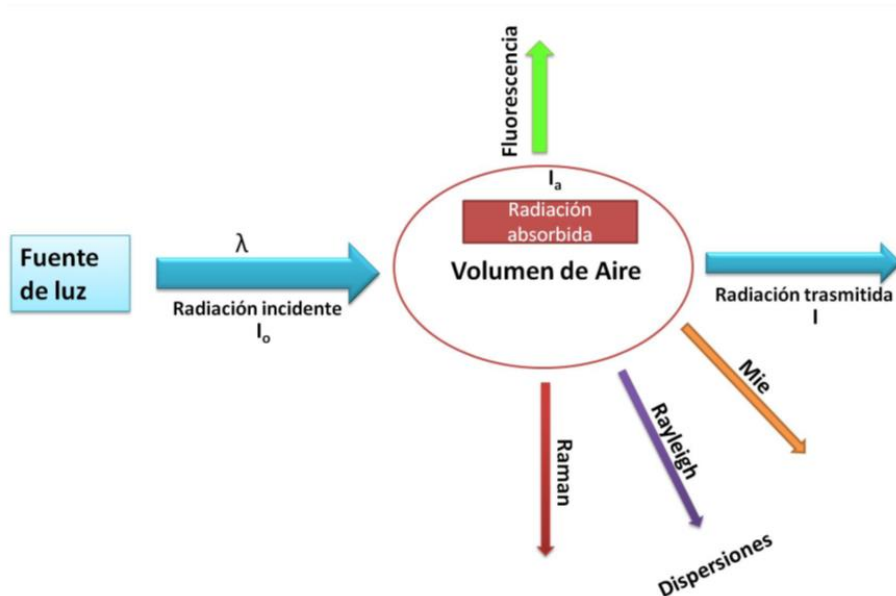
La radiación solar influye en la formación del ozono, ya que permite la reacción de vapores orgánicos con los óxidos de nitrógeno (Inche, 2004).

La precipitación permite un efecto beneficioso, porque lava las partículas contaminantes del aire y ayuda a minimizar las partículas provenientes de actividades como la construcción y algunos procesos industriales (Inche, 2004).

La topografía las grandes ciudades rodeadas de una topografía compleja como valles, o cadenas montañosas a menudo experimentan altas concentraciones de contaminantes del aire (Inche, 2004).

### 2.2.7 Interacción de la radiación con la materia.

Al incidir radiación electromagnética sobre cierto volumen de material se pueden observar tres fenómenos: fluorescencia, absorción y dispersión como se ilustra en la figura 2.18.



**Figura 2. 18** Procesos generados por la interacción de la radiación con la materia: fluorescencia, absorción y dispersión (Alvarado, 2011)

La dispersión se divide en tres tipos, la dispersión Rayleigh ( $\lambda \gg$  diámetro de la molécula de aire), Mie ( $\lambda \approx$  diámetro de la molécula de aire) y Raman. Por su parte la fluorescencia es la emisión de luz generada debido a la excitación de un sistema molecular (Alvarado, 2011).

### ***2.2.7.1 Absorción.***

Todos los átomos o moléculas poseen un número discreto de niveles de energía. A temperatura ambiente la mayoría de las especies se encuentran en su nivel energético más bajo denominado estado fundamental. Cuando una onda electromagnética interacciona con un átomo o molécula, la energía de dicha onda puede resultar absorbida si coincide exactamente con la energía necesaria para llevar a la especie química desde el estado fundamental hasta alguno de los niveles energéticos superiores (Sorgorb).

La radiación solar es absorbida por las moléculas en la atmósfera (como el ozono, el oxígeno, dióxido de nitrógeno, o vapor de agua) o aerosol (como hollín) y es un proceso clave en el sistema climático de la Tierra (Platt y Stutz, 2008).

La absorción se refiere a la radiación extinguida o removida desde un campo de radiación incidente, la cual es dependiente con la longitud de onda. Fundamentalmente, es un proceso cuántico donde las moléculas atmosféricas absorben energía desde los fotones incidentes, que posteriormente se transforma en otra forma de energía, tal como calor térmico. El vapor de agua, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO y el ozono son los principales gases atmosféricos absorbentes de radiación (Fuentes, 2012). La absorción de un fotón por una molécula, produce una transición electrónica como se ilustra en la figura 2.19.

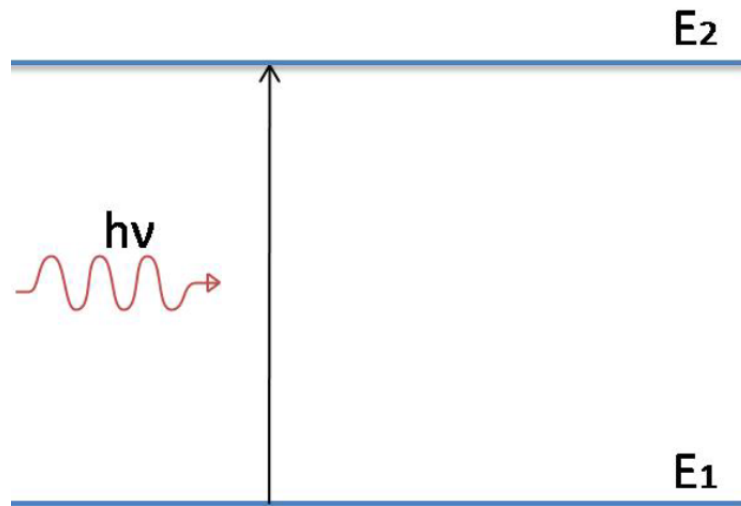


Figura 2. 19 Proceso de absorción de un fotón por una molécula, el electrón “salta” de un estado de menor energía  $E_1$ , a otro estado de mayor energía  $E_2$ , la molécula se encuentra en un estado excitado (Alvarado, 2011)

Una forma de describir clásicamente el proceso de absorción, es a través de la ley de Beer-Lambert que establece que la relación entre la cantidad de luz absorbida y el número de moléculas dentro del camino óptico recorrido por la luz, como se ilustra en la figura 2.20.

$$I_{(\lambda)} = I_{0(\lambda)} e^{(-\sigma(\lambda)\rho s)} \quad (2.1)$$

Donde  $I(\lambda_0)$  representa la intensidad inicial,  $I(\lambda)$  la intensidad después de atravesar la porción de materia,  $\lambda$  la longitud de onda,  $\rho$  la concentración uniforme del material,  $s$  el camino óptico recorrido o trayectoria y  $\sigma(\lambda)$  representa la sección eficaz de absorción, la cual es característica de cada material. Reescribiendo la ecuación 2.1 se obtiene que la concentración para un material uniforme y homogéneo viene dada por:

$$\rho = \frac{\ln(I_0/I)}{\sigma(\lambda)s} \quad (2.2)$$

La expresión:

$$D = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.3)$$

Se conoce como densidad óptica o absorbancia de un material dado

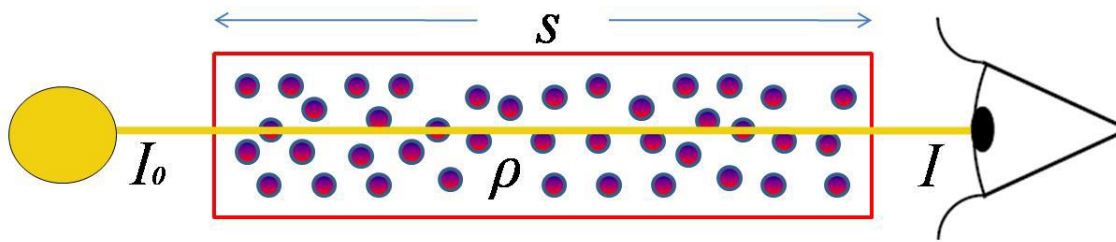


Figura 2. 20 Esquema que describe la ley de Beer-Lambert. La intensidad después de atravesar la muestra es recolectada por un detector (Alvarado, 2011) modificada de (Platt y Stutz, 2008)

En la atmósfera la ecuación 2.1 debe incluir todos los procesos de absorción de todas las moléculas. Además describe los procesos de dispersión de la luz Rayleigh, Mie y Raman. La dispersión Raman está relacionada directamente con el efecto Ring. Entonces, la ecuación 2.1 se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp[-\int ds \sum_i \rho_i(s) \sigma_i(\lambda, s) + \rho_{\text{Ray}}(s) \sigma_{\text{Ray}}(\lambda, s) + \rho_{\text{Mie}}(s) \sigma_{\text{Mie}}(\lambda, s) + \rho_{\text{Ring}}(s) \sigma_{\text{Ring}}(\lambda, s)] \quad (2.4)$$

Donde,  $i$  representa el número de partículas absorbentes en el aire

### 2.2.7.2 Esparcimiento elástico o Scattering elástico.

Es un proceso de colisión entre un fotón individual de luz con una molécula del aire, la dirección de propagación del fotón es cambiada, pero siempre, la energía total del sistema será conservativa. El esparcimiento producido por las moléculas del aire se conoce como dispersión Rayleigh, y las producidas por partículas o aerosoles es llamada dispersión Mie (Fuentes, 2012).

#### a) Dispersión Rayleigh

La dispersión Rayleigh denota la dispersión elástica de la luz por las moléculas en la atmósfera, las cuales son pequeñas en comparación a la longitud de onda de la luz dispersada

(Nave, 2008). Los procesos físicos pueden ser descritos por la luz incidente que induce un dipolo oscilante en una molécula de aire polarizada. La intensidad relativa de la luz dispersa es dada por la función de fase de dispersión. La dependencia de la sección eficaz de dispersión Rayleigh con la longitud de onda es muy fuerte  $\sigma_R \propto 1/\lambda^4$  y fue derivada por primera vez por Lord Rayleigh (Dix, 2007).

### **b) Dispersión Mie**

La dispersión Mie ocurre cuando la luz es dispersada por partícula dispersora es comparable o mayor en tamaño que la longitud de onda de la luz incidente. En la atmósfera comúnmente son aerosoles. Sus rangos de tamaños son alrededor de (0.01 – 10)  $\mu\text{m}$  de diámetro, esto explica los efectos de interferencia con la luz. Sobre los continentes las concentraciones promedio de los aerosoles están en el rango de  $10^3$  (áreas rurales) a  $10^5$  (áreas urbanas contaminadas)  $\text{mol}\cdot\text{cm}^{-3}$ , sobre los océanos van desde  $10^2$  a  $10^3$ . En otros casos las concentraciones decrecen con la altura. Existe una amplia variedad de aerosoles de diferente tamaño y forma, el cálculo se puede realizar utilizando la función de fase de dispersión. Este problema puede ser abordado con la teoría Mie, la cual incluye un número de modelos numéricos para calcular la función de dispersión de fase y los coeficientes de extinción para ciertos tipos de aerosoles y distribución de tamaño de partículas dadas (Dix, 2007).

Las partículas son asumidas como esféricas. La función de dispersión de fase, determina la dirección de dispersión de la luz, depende en general de la razón entre el radio de la partícula y la longitud de onda de la luz dispersada. La diferencia más importante con la dispersión Rayleigh es la débil dependencia con la longitud de onda  $\sigma_M \propto 1/\lambda^\alpha$ , donde  $\alpha$  es

el exponente de Angstrom. Para partículas pequeñas tiene valores grandes. Para partículas grandes decrece. Una distribución normal de partículas en la atmósfera tienen un valor característico de  $\alpha \approx 1.3$  (Dix, 2007).

### **c) Extinción por aerosoles**

Los aerosoles son importantes por varias razones en la física y química atmosférica. Estos en particular tienen efectos en el cambio de la tasa de radiación en la atmósfera (Wagner et al, 2004). La influencia de los aerosoles en la tasa de radiación en la tierra y en la química atmosférica es compleja, especialmente dependiendo de su composición química, tamaño de distribución y forma de las partículas de aerosoles, los aerosoles no solo dispersan, también absorben luz. Por tanto, debido a su función de dispersión de fase, estos pueden ser caracterizados por un coeficiente de extinción de absorción y uno de dispersión por el albedo.

El coeficiente de extinción es una medida de la probabilidad de que la luz se extinga debido a una absorción y una dispersión, mientras la simple dispersión por el albedo representa la fracción de extinción causada por la dispersión. En la práctica, los efectos totales de la extinción por los aerosoles pueden ser notados por una reducción en la visibilidad, esto puede permitir una reducción en la absorción de  $O_4$  (Wagner et al, 2004).

El incremento en múltiples dispersiones, especialmente en el caso de grandes nubosidades, podrá en general conducir también a un incremento simultáneo de la absorción de  $O_4$  (Wagner et al, 2004).

#### ***2.2.7.3 Esparcimiento inelástico o Scattering inelástico.***

Es el cambio de dirección y energía de un fotón. Cuando este tipo de esparcimiento es producido por una molécula o aerosol el proceso se denomina scattering Raman, en el cual



parte de la energía del fotón incidente se transfiere a la molécula y se le denomina scattering de Stokes, o similarmente la energía puede ser transferida desde la molécula (excitada térmicamente) hacia el fotón denominado scattering anti-Stokes (Fuentes, 2012).

### **Dispersión Raman**

La dispersión inelástica de los fotones por las moléculas de aire se conoce como dispersión Raman. Esto puede ser descrito como la interacción de la luz con una molécula de aire que cambia su estado de excitación durante un proceso de dispersión. Cualquiera de los fotones transfiere parte de su energía a la molécula (línea de Stokes) o pierde su energía la molécula (línea Anti-Stokes), (Nave, 2008). El término de dispersión Raman rotacional (DRR) es usado, si es afectada por la excitación rotacional y si el estado cambia a un estado vibracional, es usado el término dispersión Raman rotacional-vibracional (DRVR). Solamente valores discretos de energía dada por la diferencia entre los niveles de excitación discretos, pueden ser transferidos entre fotón y molécula. La DRVR es un orden de magnitud menor que la DRR, entonces solamente la DRR es considerada para el cálculo del efecto Ring (Dix, 2007).

### **2.2.8 Espectroscopia Óptica de Absorción Diferencial.**

La técnica DOAS se introdujo en 1979 por U. Platt y D. Perner para medir concentraciones de gases trazas (Honninger et al, 2004). Ha sido aplicada frecuentemente para la medida de gases traza en la tropósfera y estratósfera (Dix, 2007). Esta técnica permite determinar las concentraciones de gases traza con bandas de absorción muy estrechas en el UV y en el visible (Honninger et al, 2004). Con este método se analiza la intensidad de las bandas de absorción utilizando la ley de Beer-Lambert, la que se basa en la absorción,

depende de la longitud de onda de la luz y hace uso del hecho de que cada gas traza tiene un patrón de absorción característico (Dix, 2007).

Los primeros contaminantes atmosféricos se midieron por primera vez utilizando DOAS fueron el OH (Perner et al, 1976), HONO (Perner y Platt, 1979), NO<sub>3</sub> (Platt et al, 1980), IO (Alicke et al, 1999) en la troposfera, en la región ultravioleta y visible del espectro de luz se han medido el NO, NO<sub>2</sub>, ClO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, OSI, H<sub>2</sub>O y HCHO (Platt,1978 ; Platt 1994) .

A partir de la ecuación 2.4 y no considerando la dependencia de la sección eficaz con la distancia (ds) se puede intercambiar el signo integral con el de suma y se puede definir la densidad de columna oblicua (SCD: Slant Column Density), S<sub>i</sub>, de la siguiente forma:

$$S_i = \int \rho_i(s) ds \quad (2.5)$$

La sección eficaz puede descomponerse ahora en una componente que varía muy lentamente con la longitud de onda  $\sigma_i^0$ , y otra componente,  $\sigma_i'$ , que muestra una variación rápida con la longitud de onda,  $\sigma_i = \sigma_i^0 + \sigma_i'$ , (Platt, 1999).

La variación rápida está representada por las bandas estrechas de absorción de los gases contaminantes en estudio, mientras que  $\sigma_i^0$ , incluye la variación monótona del espectro de absorción. La sección eficaz  $\sigma_i^0$ , junto a la dispersión Rayleigh ( $\sigma_{Ray} \sim \lambda^{-4}$ ), Mie ( $\sigma_{Mie} \sim \lambda^{-k}$ ),  $0 \leq k \leq 2$ ) y el efecto Ring, pueden agruparse conjuntamente en un polinomio proporcional a  $\lambda^p$ , debido a la variación lenta que presentan con la longitud de onda. Con estas consideraciones se obtiene:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\sum_i \sigma_i(\lambda) S_i - \sum_P a^p \lambda^p] \quad (2.6)$$

Si se conoce  $I(\lambda)$ ,  $I_0(\lambda)$ , y la sección eficaz de absorción se puede determinar  $S_i$  mediante un proceso matemático de ajuste no lineal de mínimos cuadrados. La sección eficaz de absorción del gas contaminante se puede obtener en la literatura o se puede medir en un laboratorio de espectroscopia óptica/ láser. Por otra parte, en la práctica, un espectro tomado al mediodía y con un ángulo  $\vartheta$  tenido a cero grados respecto al cénit se utiliza como espectro de referencia,  $I_0^{M.Z}(\lambda)$  Utilizando este espectro la ecuación 2.7 se convierte en:

$$I(\lambda) = I_0^{M.Z}(\lambda) \exp[-\sum_i \sigma_i(\lambda)(S_i - S_i^{M.Z}) - \sum_P a^P \lambda^P] \quad (2.7)$$

De esta manera se puede calcular la diferencia entre la densidad de columna oblicua entre los dos espectros, lo que proporciona la concentración por unidad de área. En la figura 2.21 se ilustran las variaciones rápidas y lentas en una sección eficaz.

### ***2.2.8.1 El principio DOAS.***

Para la aplicación de la técnica DOAS hay dos tipos de configuraciones DOAS activo y pasivo y se muestran en la figura 2.22. Tanto la concentración del gas contaminante, la densidad de la columna del gas traza y el camino óptico recorrido pueden ser determinados (Alvarado, 2011).

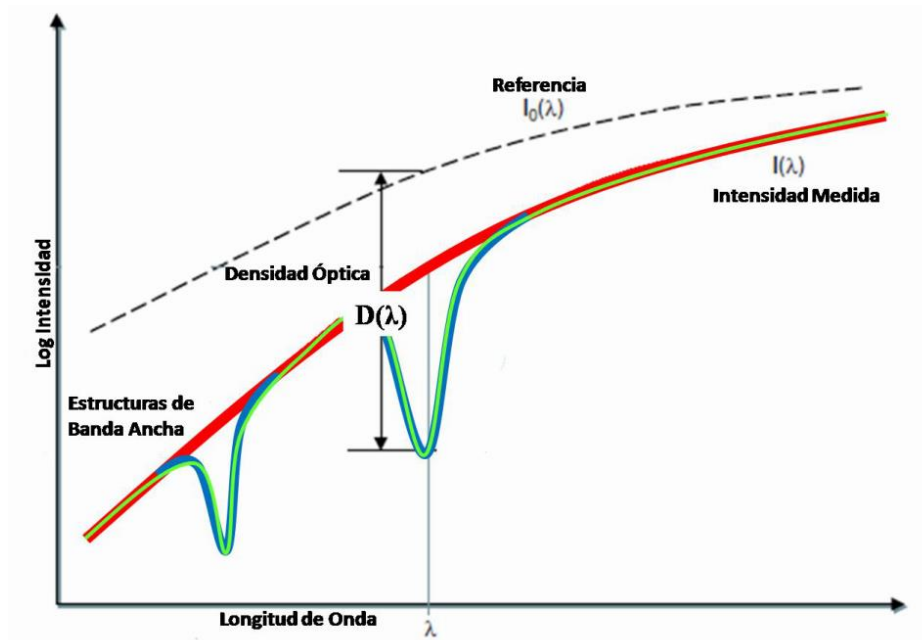


Figura 2. 21 Espectro de absorción medido, la línea roja representa la banda de absorción monótona del espectro y los picos azules representan las variaciones rápidas de absorción (Alvarado, 2011) modificada de (Platt y Stutz, 2008)

1) **DOAS activo** utiliza una fuente de luz artificial para el estudio de gases traza en la troposfera (Perner et al, 1976), (Perner y Platt, 1979). En la Fig. 2.22 “A” se muestra esquemáticamente este arreglo experimental. Varios diseños experimentales han sido publicados en los últimos años. Entre estos se pueden destacar el presentado por Platt y colaboradores (Balín, 1998) a principios de los años 80. Un montaje un poco más avanzado fue publicado por Axelsson y colaboradores (Balín, 1998). Éste utiliza un telescopio (transmisor y receptor a la vez) al que se le acopla una fuente de luz y un arreglo de retroreflectores para enviar y recibir la luz a recorrer un camino óptico dado. En general, la mayoría de montajes que utilizan el DOAS activo varían solamente en algunos de los componentes dependiendo de su aplicación. Los cambios se dan principalmente en el diseño

óptico que se usa, como por ejemplo en la configuración del telescopio, retroreflectores, fuentes de luz y detectores.

2) **DOAS pasivo** la fuente de luz es el sol y consiste en observar la luz solar dispersada en la dirección vertical ( $\vartheta = 0^\circ$ ). Este arreglo experimental se muestra en la figura 2.17. Una de las ventajas de este arreglo experimental es el hecho que la transferencia radiactiva en la atmósfera se entiende mejor para luz dispersada en la dirección del cénit, lo que facilita la determinación de la densidad de columna vertical. Esta configuración incluye otro arreglo experimental conocido como DOAS multi-ejes o MAX-DOAS (“Multi Axis-DOAS”) es un nuevo arreglo experimental que representa un avance significativo respecto al DOAS pasivo tradicional (Honninger et al, 2004), (Dix, 2007).

La luz entra en la atmósfera con un ángulo  $\vartheta$  respecto a la dirección vertical conocido como “solar zenith angle” y es dispersada hacia la dirección de observación definida por el ángulo de elevación  $\theta$ . La densidad de columna oblicua (a lo largo de  $ds$ ),  $S$ , es mayor que la densidad de columna vertical (a lo largo de  $dz$ ),  $V$ . La figura 2.23 representa la situación para una capa de gas traza en la estratosfera, donde uno de los posibles perfiles de comportamiento de los gases traza puede ser como la línea roja.

**El factor de masa de aire**, “A”, conocido también como AMF (“Air Mass Factor”) se utiliza para definir la densidad de columna vertical,  $V$ . Esta definición es necesaria debido a que la densidad de columna oblicua,  $S_i$ , que se mide involucra fotones que han podido recorrer diferentes caminos en la atmósfera, lo que significa que si solo puede representar el recorrido más probable definido por la estadística del conjunto de fotones registrado por el detector (Honninger, 2002).

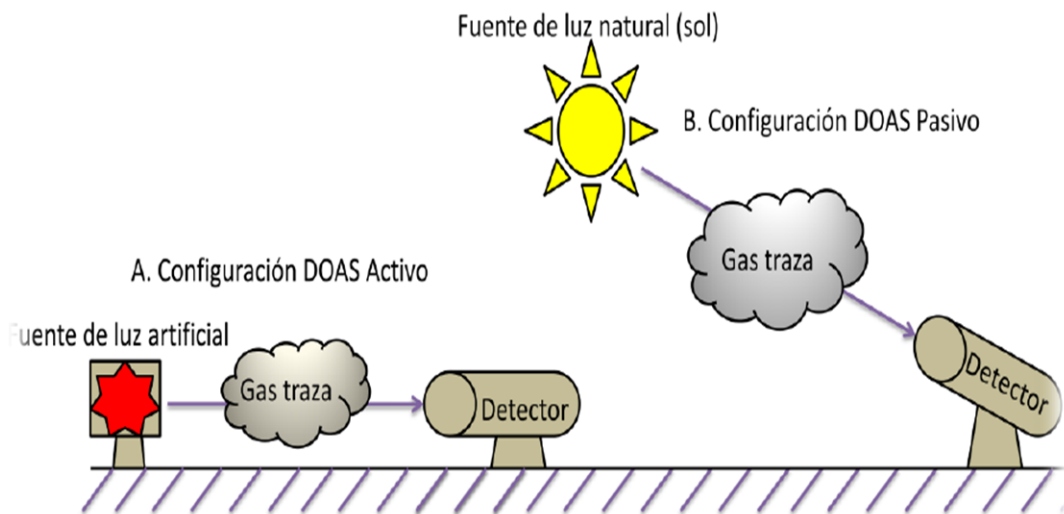


Figura 2. 22 El principio DOAS. (a) DOAS Activo puede aplicarse en una gran variedad de configuraciones usando lámparas artificiales, (b) DOAS Pasivo utiliza fuentes de luz naturales

(Alvarado, 2011) modificada de (Platt, 2008).

La densidad de columna vertical,  $V$ , se define como la concentración,  $c(z)$ , del gas contaminante integrado a lo largo del recorrido vertical a través de la atmósfera como se ilustra en la figura 2.23:

$$V = \int c(z) dz \equiv \int \rho(z) dz \quad (2.8)$$

El proceso de medida DOAS para gases traza en la tropósfera de la figura 2.23 se inicia con el proceso de absorción en la atmósfera, asumiendo que sólo absorbe un gas traza presente en la masa del aire observada. La luz es emitida por una fuente de luz estable con una intensidad  $I(\lambda)$ , esta pasa a través de la atmósfera abierta, la señal es colectada por un telescopio, que luego es transmitida a través de la fibra óptica al espectrógrafo (Alvarado, 2011).

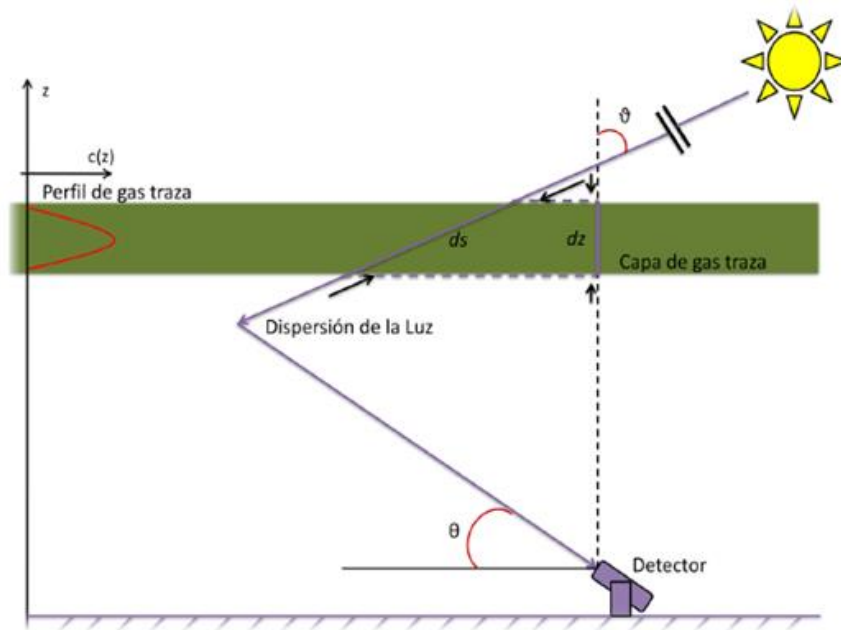


Figura 2. 23 Representación esquemática de la técnica DOAS, La luz entra en la atmósfera con un ángulo  $\theta$  respecto a la dirección vertical y es dispersada hacia la dirección de observación definida por el ángulo de elevación  $\theta$  (Alvarado, 2011) modificada de (Platt, 2008)

La densidad de columna vertical solamente depende del perfil del gas traza y es independiente de la dirección de observación como se ilustra en la figura 2.24.

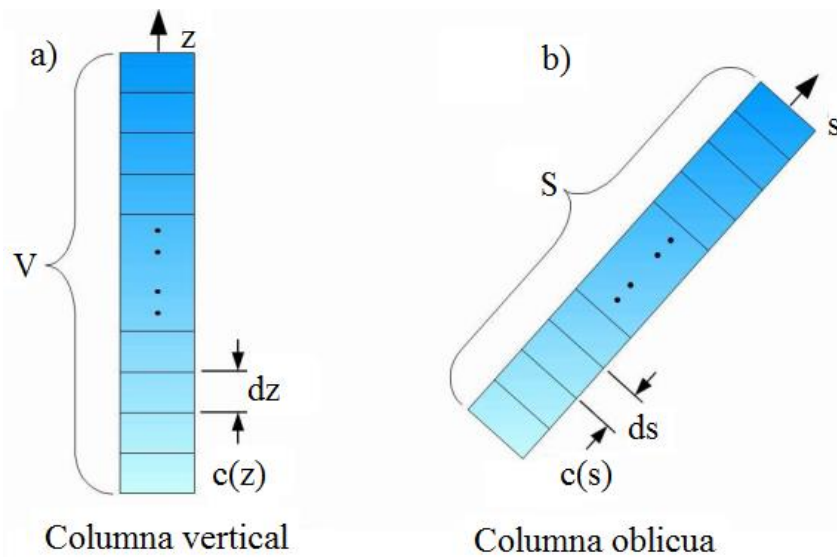


Figura 2. 24 Visualización geométrica de la densidad de columna vertical y oblicua (Fuentes, 2012)

El factor “A” se define entonces como la razón entre la densidad de columna oblicua y la densidad de columna vertical:

$$A(\lambda, \vartheta, \alpha, \phi) = \frac{S(\lambda, \vartheta, \alpha, \phi)}{V} \quad (2.9)$$

El factor “A” depende de la transferencia radiactiva en la atmósfera y viene determinado por el perfil del gas traza, presión, temperatura, perfiles de ozono y aerosoles, así como también por las nubes, el albedo, etc. Para el análisis e interpretación de medidas hechas con DOAS usando luz solar dispersada, el cálculo del factor de masa de aire es importante (Alvarado, 2011).

El factor de masa de aire para  $\vartheta \lesssim 70^\circ$ , es decir, ángulos de elevación que sean mayores  $\theta \approx 20^\circ$ , viene dado por la ecuación 2.10 (Honninger, 2002), (Dix, 2007).

$$A(\vartheta) = \frac{S_i(\vartheta)}{V_i} = \frac{1}{\cos(\vartheta)} \quad (2.10)$$

En la figura 2.25 a) se ilustra el espectro  $I(\lambda, s)$ , muestra resultado de la absorción del HCHO, esta absorción es característica por su sección eficaz de absorción. La sección eficaz de absorción depende de la longitud de onda, presión y temperatura. La resolución espectral del espectrógrafo, es limitada, en consecuencia cambia la forma del espectro  $I(\lambda, s)$ . Matemáticamente este proceso se describe con la convolución de  $I(\lambda, s)$  con la función H del espectrógrafo:  $I^*(\lambda, S) * H$ . En la figura 2.25b) muestra el proceso después de la convolución con la función del instrumento H. El espectro  $I^*(\lambda, s)$  después de la convolución éste es proyectado al detector. El espectro es guardado en un detector multicanal, asignada a un número discreto k de canales (pixel) y es almacenado en una computadora como  $I^+(k)$



para su respectivo análisis como se ilustra en la figura 2.25 c). Cada canal k integra la luz en un intervalo de longitud de onda desde  $\lambda(k)$  a  $\lambda(k+1)$

$$I^+(K) = \int_{\lambda(K)}^{\lambda(K+1)} I^*(\lambda^+, s) d\lambda \quad (2.10)$$

Donde el intervalo de longitudes de onda es dado por las longitudes de ondas asignadas a los números de canales del detector, esto se refiere a la calibración de la longitud de onda del detector  $C_j$  puede ser aproximada por un polinomio

$$C_j : \lambda(k) = \sum_{i=0}^m c_i \cdot k^i \quad (2.11)$$

El vector  $c_i$  determina el canal asignado a la longitud de onda  $\lambda(k)$ . Mientras que un cambio en el valor  $c_0$  describe un corrimiento espectral, un cambio en el valor de  $c_1$  genera un squeeze en el espectro de forma lineal y si el valor de  $c$  es mayor, este provoca distorsiones en la escala de la longitud de onda de orden superior

### ***2.2.8.2 Ventajas y desventajas de la técnica DOAS.***

#### **Ventajas**

- ▲ Se utilizan fuentes de luz natural como luz solar, lunar.
- ▲ Se puede hacer análisis simultáneo de contaminantes y en tiempo real
- ▲ Las medidas se hacen para un recorrido integrado de la luz
- ▲ Son medidas no invasivas, no hay manipulación de muestras.
- ▲ Costos de operación muy bajos (Rudamas, 2015).

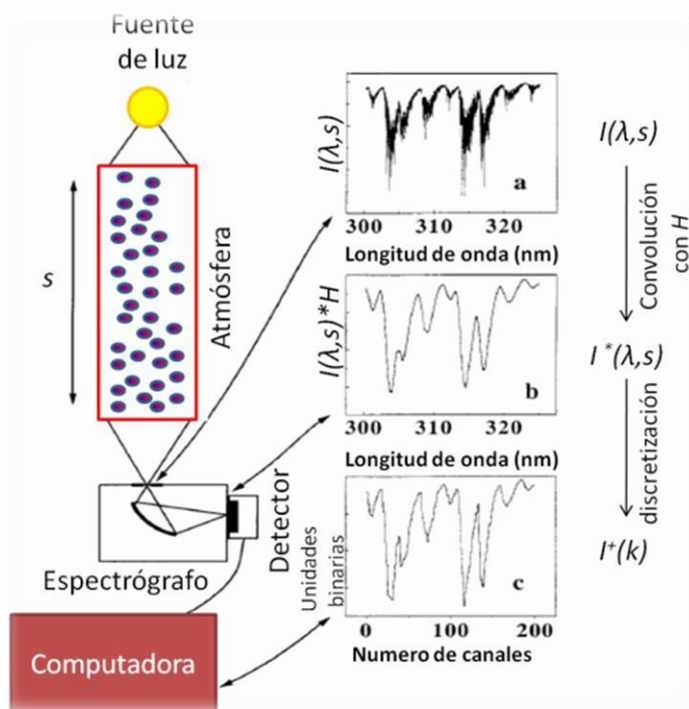


Figura 2. 25 Esquema montaje experimental DOAS para la medida de gases traza en la tropósfera

(Alvarado, 2011) Modificada de (Platt y Stutz, 1996)

### Desventajas

- ▼ No es posible hacer una conversión directa desde absorción a concentración porque la luz cruza una extensión vertical entera de la atmósfera antes de alcanzar al detector (Fuentes, 2012)
- ▼ No se pueden hacer mediciones con cielo cubierto (nublado) ni cuando está lloviendo.
- ▼ Las mediciones solo se pueden hacer durante el día, porque se utiliza luz solar
- ▼ Sólo se puede hacer uso de la luz lunar cuando está en fase de luna llena.

### 2.2.8.3 Correcciones en medidas.

Cuando se utiliza como fuente de luz la proveniente del sol debido a su dispersión en la atmósfera, es necesario considerar ciertas implicaciones adicionales en el proceso de análisis de las medidas DOAS. Entre ellas están el offset electrónico y la corriente oscura que componen la señal de fondo medida cuando no entra luz al espectrógrafo.

- a) **Offset electrónico** [ $O(\lambda)$ ]: Es proporcional al número de escaneo en la medida y es una señal electrónica, la cual es agregada por los fotones inducidos, es una señal de compensación que es añadida a cada espectro por la electrónica del espectrógrafo, para evitar valores negativos en el convertidor analógico-digital. Comúnmente se mide con un bajo tiempo de exposición y con muchos escaneo. En algunos casos se utilizan 10000 en un tiempo de exposición de 3ms. Como el offset es agregado en cada escaneo, entonces debe ser sustraído a cada espectro medido, como se describe en la ecuación 2.12 (Kraus, 2006)

$$I_{offset}(\lambda) = I(\lambda) - \frac{i_s}{O_s} O(\lambda) \quad (2.12)$$

Donde  $i_s$  es el número de escaneo en el espectro medido,  $O_s$  número de escaneo de offset

- b) **Corriente oscura**: Es causada por la excitación térmica de los electrones, esta contribución a la señal de la medida depende de la temperatura del detector CCD. En muchos espectrógrafos el detector es enfriado para tener una señal de corriente oscura baja. Para una temperatura constante la señal de corriente oscura es proporcional al tiempo de exposición. Para la medida de la corriente oscura es mejor utilizar un tiempo de exposición grande y sólo un escaneo, para no agregar otra vez el offset electrónico. Se puede utilizar un tiempo de integración de 15000ms. Como la

corriente oscura es agregada en cada medida, entonces debe ser sustraído a cada espectro medido, como lo describen en la ecuación (Kraus, 2006).

$$I_c(\lambda) = I(\lambda) - \frac{i_e}{C_e} C(\lambda) \quad (2.13)$$

Donde  $i_e$  es tiempo de exposición medido,  $C_e$  es el tiempo de exposición en el espectro de corriente oscura.

- c) **Espectro de referencia de Fraunhofer:** En las medidas DOAS la señal recolectada es la luz del sol dispersa en la atmósfera, este espectro contiene estructuras de absorción de la atmósfera, incluso si no está en la trayectoria de la luz. La fotosfera del sol absorbe parte de la luz emitida por sí mismo. Estas absorciones se llaman líneas de Fraunhofer (Alvarado, 2011).

Para corregir estas absorciones se mide un espectro de Fraunhofer observando el sol directamente o a un ángulo pequeño respecto al cenit. Esta corrección se realiza dividiendo el espectro medido a cierto ángulo de elevación con el espectro de Fraunhofer (espectro de referencia), esto permite eliminar las estructuras que absorben de la fuente de luz. Otra forma de realizar la corrección es utilizando el espectro de Fraunhofer como una sección eficaz en la evaluación del proceso de ajuste. (Alvarado, 2011)

- d) **Efecto Ring:** Cuando se observa la luz del sol dispersada en la atmósfera, la densidad óptica de las líneas de Fraunhofer se ven reducidas si se compara con la luz observada directamente del sol. La corrección de Fraunhofer no es siempre la mejor, por lo que es necesario realizar otra corrección. Esta corrección se conoce como efecto Ring y

consiste en un aparente “llenado” de las líneas de Fraunhofer, porque se aprecia una reducción en la intensidad de éstas y es causado por la dispersión Raman, debido a la dispersión inelástica en las moléculas de aire. Como resultado de la interacción entre un campo eléctrico oscilante y una molécula de rotación, el fotón cambia su longitud de onda (Dix, 2007). Normalmente un espectro Ring se calcula a partir del espectro de referencia Fraunhofer medido. Este espectro de Ring se utilizará como otra referencia adicional o sección eficaz de absorción.

#### **e) Proceso de ajuste**

DOASIS provee una solución de la ley de Beer-Lambert, separando las bandas características, anchas y estrechas (variación monótona y rápida con la longitud de onda respectivamente). En la práctica, existen dos maneras de lograr esta separación, aplicando a la señal un filtro paso alto o por una aproximación de todas las bandas anchas o monótonas con un polinomio (Dix, 2007).

La optimización del proceso para la obtención de los espectros de absorción, se basan comúnmente en la solución de la ecuación 2.8, ésta permite en un intervalo adecuado de longitudes de onda determinar la absorciones diferenciales de los gases traza de interés por medio de la combinación de un ajuste lineal y un no lineal. Este ajuste es un método iterativo basado en el algoritmo de Levenberg-Marquard, el cual combina la parte lineal y la no lineal de la absorción del gas traza de interés. Debido a la naturaleza no lineal del algoritmo del ajuste, el resultado no es necesariamente correcto (Kraus, 2006).

**Ajuste lineal.** En la ley de Beer-Lambert (ecuación 2.7), se separaron las variaciones rápidas (bandas estrechas) y las variaciones monótonas (bandas anchas) con la longitud de onda respectivamente, la separación se hizo utilizando un polinomio proporcional a  $\lambda^p$ , donde las bandas anchas son simuladas por medio de este polinomio. La solución de esta ecuación se realiza por un ajuste lineal de mínimos cuadrados, este permite acercarse a la solución mediante la estimación de un gradiente de parámetros de una función de una iteración anterior. Se espera que un nuevo conjunto de parámetros sea más exacto, cuando se realice la suma de la diferencia de los cuadrados. La ecuación es resuelta por un modelaje de  $\ln(I(\lambda))$  de forma que  $x^2$  es minimizada (Dix, 2007), (Kraus, 2006):

$$x^2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left( \ln(I(\lambda)) - \ln(I_0^{M,Z}(\lambda)) + \sum_i \sigma'_i(\lambda)(S_i - S_i^{M,Z}) - \sum_{p=0}^q a^p \lambda^p \right)^2 d\lambda \rightarrow (2.14)$$

En la práctica el número de secciones eficaces de absorción utilizadas para el ajuste está determinado por el rango de interés y la configuración DOAS utilizada.

El residuo R de un proceso de ajuste es definido como la diferencia entre la densidad óptica de la medida y la del espectro (Dix, 2007).

$$R_j = \ln(I(\lambda)) - \ln(I_0^{M,Z}(\lambda_j)) + \sum_i \sigma'_i(\lambda_j)(S_i - S_i^{M,Z}) - \sum_{p=0}^q a^p \lambda_j^p \quad (2.15)$$

$R_j$  y  $x^2$  son una medida de la buena calidad del ajuste. Una medida ideal y un perfecto ajuste, podrá dar un residuo que solo consiste en ruido. En la práctica diferentes factores pueden causar un mayor residuo.

**Ajuste no lineal.** El espectro extraído del gas traza con una pequeña densidad óptica es muy sensible a los cambios en la longitud de onda de calibración. El corrimiento en la longitud de onda en el orden de un pequeño porcentaje de un canal (pixel), puede causar un

gran error sistemático en el residuo. Un cambio en la longitud de onda de calibración del espectro medido puede explicar un cambio o un corrimiento y un squeeze en el espectro. Estos son términos no lineales del proceso de ajustes y se resuelve numéricamente mediante el algoritmo de Levenberg-Marquard (Dix, 2007), (Kraus, 2006).

En esta parte el proceso de ajuste, la longitud de onda de calibración del espectro a ser analizado,  $I(\lambda_n)$ , es variado respecto a la referencias  $(I_0^{M,Z}, \sigma)$  para lograr las mejores absorciones características en el espectro medido. Para este propósito, la medida y el espectro calibrado  $I(\lambda_n)$  es interpolado a una nueva cuadrícula de puntos de longitud de onda:

$$I(\lambda_n) \rightarrow I(\lambda'_n) \quad (2.16)$$

En resumen, el proceso para determinar la densidad óptica aplicando la ley de Beer-Lambert. A los espectros medidos y a la referencia ( $90^\circ$ ), se les realizan las correcciones del offset electrónico y corriente oscura. Se aplica un filtro paso alto al resultado de la división de los espectros medidos a los diferentes ángulos de elevación con la referencia, después se aplica un filtro paso bajo para disminuir la cantidad de ruido en los resultados, se aplica logaritmo natural al cociente, se multiplica por menos uno (Alvarado, 2011).

### **2.2.9 Año Zafra.**

El año zafra se extiende del 01 de noviembre de un año, al 31 de octubre del siguiente y se divide en dos grandes períodos zafra y no zafra

• **Período de zafra:** El período de zafra comprende la época de verano en que se cosecha la caña de azúcar y se procesa en el ingenio. Se extiende de noviembre hasta abril. (Agroindustria Azucarera de El Salvador, 2010).

Las labores operativas durante el año zafra en el campo constituyen:

- a) La preparación de tierras.
- b) La siembra del cultivo (la caña es un cultivo que en promedio se siembra cada cinco años, en el entremedio, luego de cada corte o cosecha, la planta se reproduce o vuelve a crecer de forma vegetativa).
- c) La fertilización o nutrición
- d) El control de malezas y otras plagas
- e) Aplicación de madurantes como preparativo a la cosecha.

En la época de la cosecha, las actividades principales son las siguientes:

- a) El corte
- b) El alza o cargado
- c) El transporte de la finca al ingenio.

Las tres actividades, conocidas como CAT, son generalmente subcontratadas por el productor de caña a los ingenios, a través de los servicios que estos brindan a sus clientes y son descontadas contra las entregas de la caña. Los costos más importantes de producción de caña son la compra de insumos (fertilizantes y químicos), la mano de obra (para las labores culturales de mantenimiento del cultivo y la cosecha) y el alza y transporte (Agroindustria Azucarera de El Salvador, 2010).

☛ **Período de no zafra:** El período de no zafra comprende los meses de mayo a octubre. Coincide con la época de invierno. Los agricultores se dedican a la siembra de las nuevas áreas o renovación de plantíos.



Durante este período en los ingenios se dedican al desmontaje, reparación y mejoras de su fábrica como antesala al siguiente período de molienda, ejecutar los proyectos de inversión, de contratación de la caña de azúcar para la siguiente temporada, de exportación y venta del azúcar y melaza que no fue vendida durante la zafra, de asesoría técnica a los productores de caña, de coordinación de la flota de transporte que se utilizará durante la época de cosecha (Agroindustria Azucarera de El Salvador, 2010).

### **2.2.10 Ingenios Azucareros.**

La planta donde se da la serie de procesos de transformación de la caña de azúcar, así como la producción de azúcar y demás productos derivados (bagazo, cachaza y melaza) se conoce como Ingenio Azucarero (Castillo y Rivera, 2004).

Ocho son los Ingenios que funcionan en El Salvador como se ilustra en la figura 2.26, se encuentran distribuidos en el territorio nacional de la siguiente manera: dos en la Zona Occidental, cuatro en la Zona Central, uno en la Zona Para-central y uno en la Zona Oriental. Los ingenios son los siguientes lugares: La Magdalena (La Magdalena, Chalchuapa, Departamento de Santa Ana); Central Izalco (Huiscoyalate, Izalco, Departamento de Sonsonate); Chanmico (Chanmico, San Juan Opico, Departamento de La Libertad); El Ángel (Joya Galana, Apopa, Departamento de San Salvador); San Francisco (San Lucas, Suchitoto, Departamento de Cuscatlán); La Cabaña (La Cabaña, El Paisnal, Departamento de San Salvador); Jiboa (San Antonio Caminos, San Vicente, Departamento de San Vicente) y Chaparrastique en el Cantón El Jute, San Miguel, Departamento de San Miguel (Díaz y Romero, 2004).

El Ingenio Chaparrastique es el único que tiene bien definida su zona de influencia en los departamentos de Usulután y San Miguel, con un área total de 9,675 Mz. que representa un 11.15% del total nacional como se muestra en a figura 2.27; debido a su ubicación no presenta problemas de una competencia agudizada con el resto de los Ingenios. La capacidad de molienda de este Ingenio, con 5,500 toneladas de caña por día, ocupando el tercer lugar. Los productos que obtienen son azúcar cruda, blanca y melaza que es el sub-producto de la industria azucarera del cual se ha substraído el máximo de azúcar (Díaz y Romero, 2004).

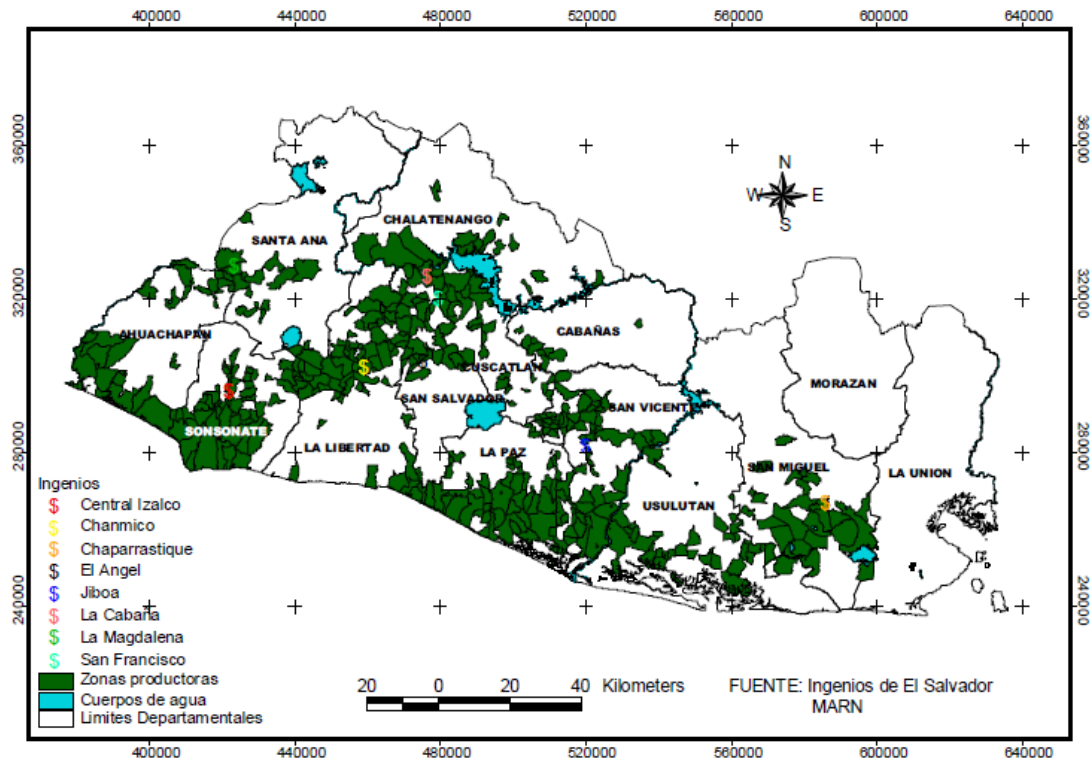


Figura 2. 26 Ubicación geográfica de Ingenios Azucareros y zonas productoras de caña de azúcar de El Salvador (Díaz y Romero, 2004)

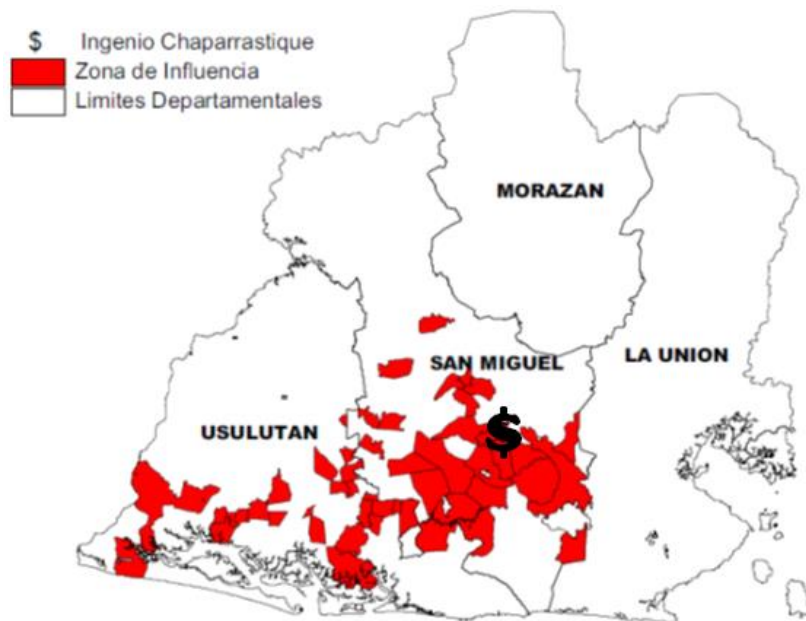


Figura 2. 27 Zonas de influencia a Ingenio Chaparrastique (Díaz y Romero, 2004)

Los ingenios en su proceso de producción, utilizan para su funcionamiento calderas industriales para generar energía en el proceso de transformación de la caña de azúcar en azúcar de caña, enviando así sus emisiones a la atmósfera las cuales salen a través de chimeneas, dichas emisiones deben ser controladas para evitar una contaminación atmosférica (Castillo y Rivera, 2004).

Los ingenios azucareros utilizan como combustible el bagazo de la misma caña de azúcar utilizada como materia prima, generando material particulado que al ser expuesto al trabajador sin protección alguna y por períodos de tiempo no adecuado puede llegar a causar daños en su salud (Castillo y Rivera, 2004).

Todo combustible, sea leña, gas, kerosene, gasolina o diesel, requiere aire para proveer el oxígeno necesario para su combustión. Al obtener una buena combustión se logrará una mayor eficiencia en el proceso y menor emisión de contaminantes a la atmósfera.

La combustión puede ser completa e incompleta. La combustión incompleta se caracteriza por mayor emisión de gases, humos, cenizas y material particulado, además de necesitar un mayor consumo de combustible, donde cualquier hidrocarburo produce dióxido de carbono, monóxido de carbono, agua, cenizas u otros productos, de acuerdo a la composición química del combustible, como se muestra en la figura 2.28.

Razones de una combustión incompleta: Falta de oxígeno, exceso de suministro de combustible, exceso de aire, disociación a alta temperatura, sobrecarga y restricción en el sistema de escape.

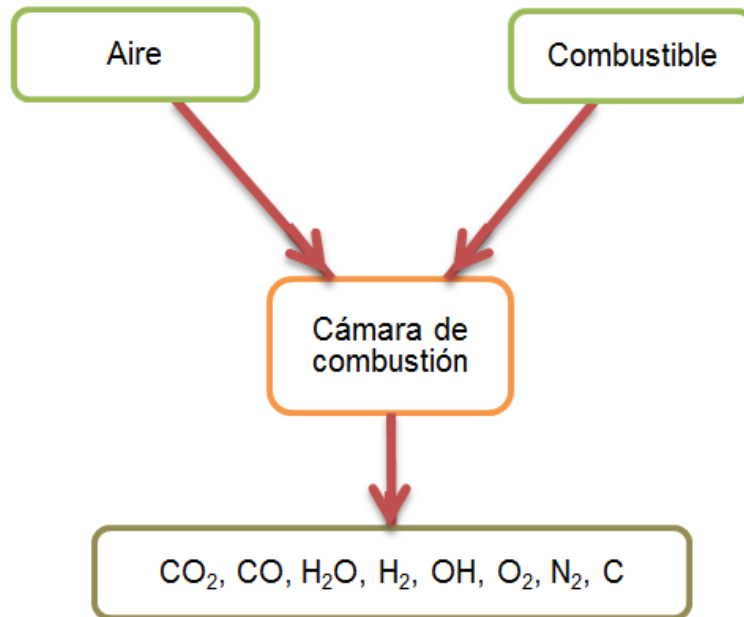


Figura 2. 28 Esquema de una combustión incompleta. Modificada de (Castillo y Rivera, 2004)

La combustión en los ingenios azucareros se realiza de la siguiente manera: En las chimeneas, hornos y motores se emiten gases de escape o humos que son llamados productos de combustión. Su composición depende de la clase de combustible utilizado, de la relación

de aire y combustible, y de las condiciones en que se realiza la combustión. Los productos de combustión generalmente contienen dióxido de carbono, monóxido de carbono, oxígeno, nitrógeno, óxidos de nitrógeno, carbono libre, ceniza, hidrocarburos no quemados, entre otros, como se muestra en la figura 2.29

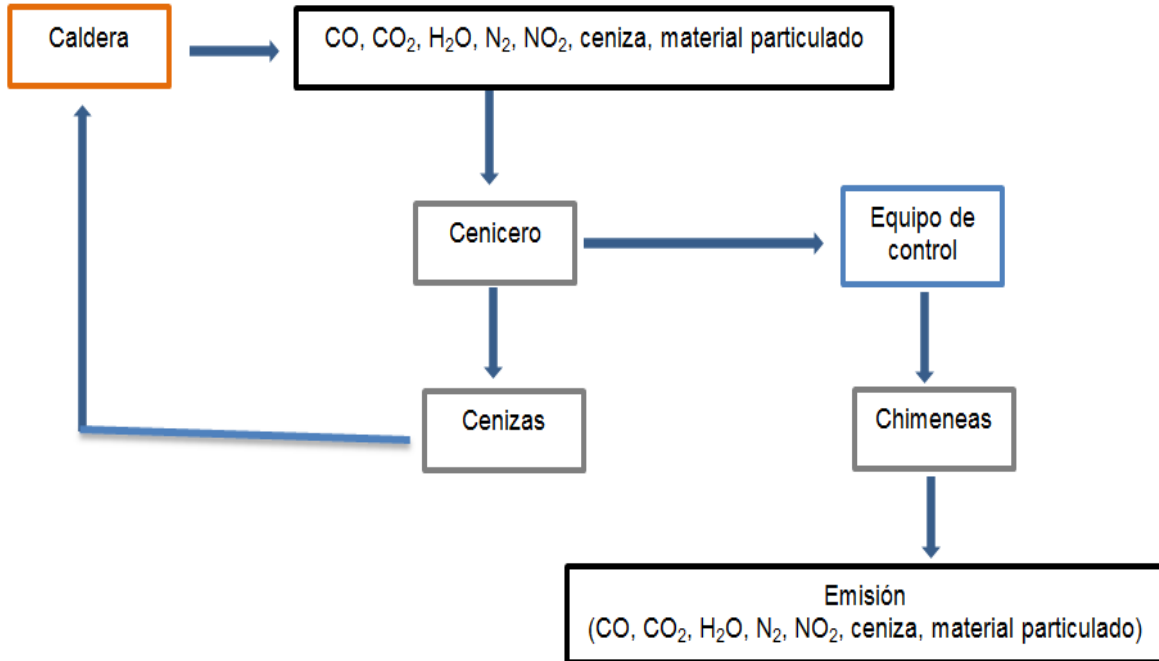


Figura 2. 29 Diagrama de flujo de los gases de combustión para un ingenio azucarero que son emanados hacia la atmósfera. Modificado de (Castillo y Rivera, 2004)

### 2.2.11 Elaboración de azúcar de caña.

La principal fuente de producción mundial de azúcar es la proveniente de la Caña de Azúcar que es una hierba gigante del género *Saccharum* (Meade y Spencer, 1967). Las amplias variaciones en el tamaño, el color y el aspecto son resultado de las diversas condiciones del terreno, del clima, de los métodos de cultivo y de la selección local.

El procedimiento para la elaboración del azúcar se describe a continuación y se ilustra en figura 2.30:

1. Desmenuzación de la caña de azúcar. La caña se prepara para la molienda mediante cuchillas giratorias que cortan los tallos en pedazos pequeños.
2. Molido de caña de azúcar. Se extrae el jugo (guarapo) moliendo la caña entre pedazos de rodillos o mazas. Generalmente el molino o trapiche consta de unidades múltiples que utilizan combinaciones de tres rodillos a través de los cuales pasa la caña exprimida o bagazo.
3. Combustión del bagazo de caña. El bagazo final que sale del último molino contiene el azúcar no extraído, la fibra leñosa, y de 40 a 50 % de agua. Este producto suele ir a las calderas para servir de combustible.
4. Alcalinización del guarapo. Este proceso se utiliza para eliminar tanto las impurezas solubles como las insolubles, por lo general utilizando cal y calor como agentes clarificadores. La lechada de cal, preparada con aproximadamente una libra de CaO por tonelada de caña, neutraliza la acidez natural del jugo, y forma sales insolubles de calcio, principalmente en forma de fosfatos de calcio.
5. Calentamiento del guarapo. La calefacción del jugo alcalino, hasta el punto de ebullición, o un poco más allá de este punto, coagula la albúmina y algunas de las grasas, ceras y gomas, y el precipitado que así se forma engloba tanto los sólidos en suspensión como las partículas más finas.
6. Separación del jugo clarificado por medio de tambores rotativos. Mediante la sedimentación, se logra la separación de los lodos del jugo claro. Los lodos se filtran en filtros de tambor rotativo al vacío. El jugo de los filtros prensas retorna al proceso, o se

añade directamente al jugo claro, y la torta de las prensas (cachaza) se tira o usa como fertilizante. El jugo clarificado, de color café oscuro, retorna a los evaporadores sin sufrir tratamiento adicional.

7. Evaporación del jugo clarificado. Este jugo, que posee casi la misma composición que el jugo crudo extraído (excepto impurezas precipitadas) contiene aproximadamente 85% de agua. Las dos terceras partes de esta agua se evapora en evaporadores de múltiples-efectos al vacío, que consisten en una sucesión (generalmente cuatro) de celdas de ebullición al vacío llamadas “cuerpos”, dispuestas en serie. El vapor que sale del último cuerpo va a un condensador. El jarabe (melaza) sale continuamente del último cuerpo, con un contenido aproximado de 65% de sólidos y 35% de agua.
8. Cristalización. Esta se lleva a cabo en recipientes al vacío, de simple efecto, en los cuales se concentra la melaza hasta quedar saturada de azúcar. Al llegar a este punto, se introducen cristales de siembra para que sirvan de núcleos a los cristales de azúcar, y se va añadiendo más melaza a medida que se evapora el agua. Los cristales originales, que fueron formados por la destreza del operador del cristalizador, crecen, sin que se formen cristales adicionales, a medida que en ellos se va depositando azúcar procedente de la masa en ebullición. Este crecimiento de los cristales continúa hasta que al quedar lleno el recipiente han alcanzado un tamaño previamente determinado. La mezcla de cristales y melaza queda concentrada hasta formar una masa densa, y la templa o contenido del tanque se descarga a través de una válvula inferior hacia un mezclador o cristalizador

9. Centrifugado. La masa cocida que se llevó al mezclador se hace pasar a máquinas giratorias llamadas centrífugas. El canasto cilíndrico de la centrífuga, que está suspendido de una flecha tiene sus costados perforados y forrados de tela metálica; entre el forro y el costado hay láminas de metal que contienen de 400 a 600 perforaciones por pulgada cuadrada. El forro perforado retiene los cristales de azúcar. Las aguas madres o melazas pasan a través del forro, impulsadas por la fuerza centrífuga que sobre ellas se ejerce; y cuando el azúcar queda purgado, se descarga de la centrífuga, quedando lista para recibir otra carga de masa cocida.
10. Envasado. El azúcar de la purga va a tolvas de envase por medio de transportadores de diversos tipos (Meade y Spencer, 1967).

## **2.2.12 Análisis ambiental y transferencias de externalidades de la industria azucarera.**

### ***2.2.12.1 Bioproductividad.***

La producción de caña de azúcar es un proceso agrícola industrial intensivo en insumos y cuya acción física sobre el suelo produce erosión durante la labranza para la siembra, especialmente si se realiza en terrenos con pendientes sin tomar en consideración los contornos naturales del suelo para evitar al máximo la pérdida de la capa vegetal. Este proceso extractivo exige que la pérdida de fertilidad sea compensada con fertilizantes naturales como la cachaza, compostaje, restos de cobertura vegetal, etc., o sintéticos como las formulaciones NPK (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) y otros disponibles en el mercado. El uso generalizado de estos abonos sintéticos sobre todo tipo de suelos conlleva a desbalances de



los nutrientes. Cuando la caña es molida y las impurezas son removidas se genera la cachaza que es rico en materia orgánica y que usualmente se descarga en los ríos adyacentes a los Ingenios. Se considera que la agroindustria es la principal actividad responsable de la contaminación industrial del agua (Pratt y Pérez, 1997).

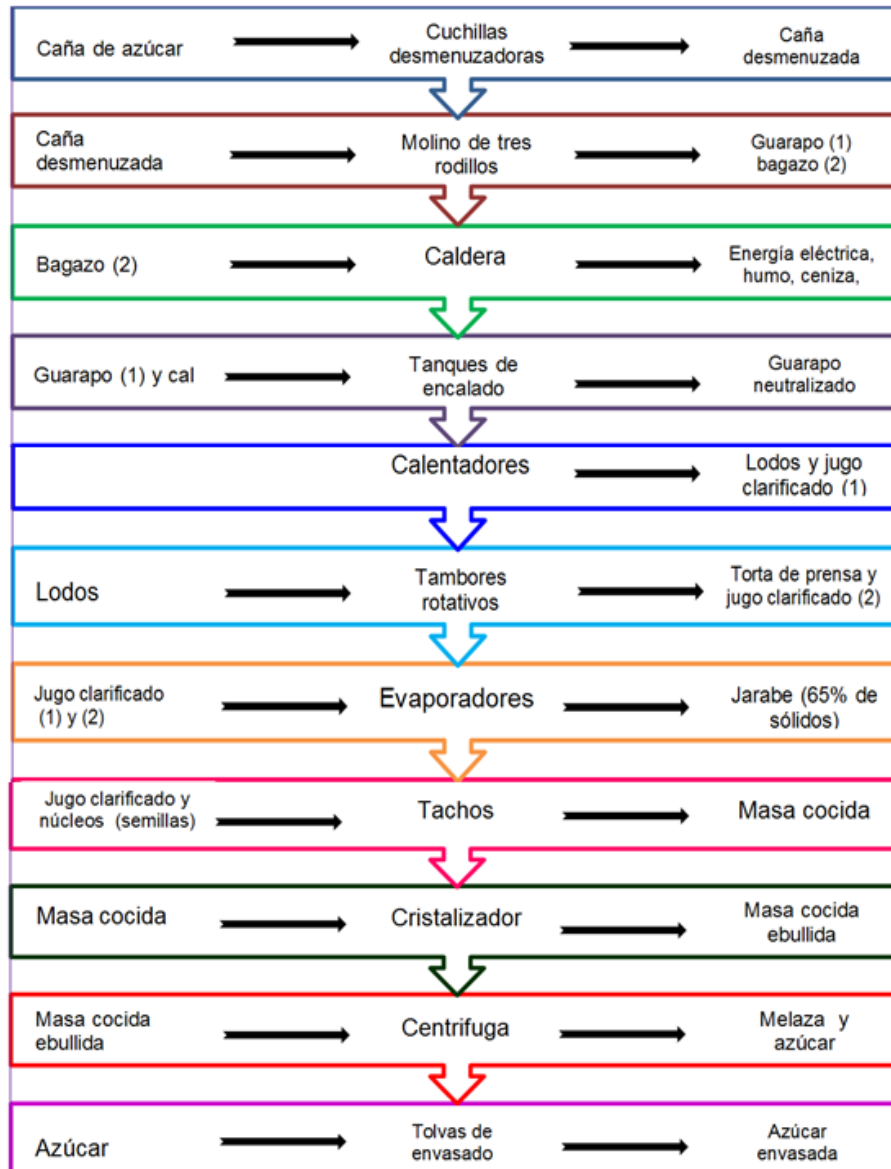


Figura 2. 30 Diagrama General de Flujo para un Ingenio Azucarero, fases y productos obtenidos en cada una de ellas (Castillo y Rivera, 2004)

### ***2.2.12.2 Recursos costeros.***

El impacto del cultivo de caña sobre los recursos costeros es de manera indirecta por la erosión que genera sedimentación en los ríos y desembocaduras al mar y por la carga biológica de las aguas servidas de los Ingenios. Estas partículas sólidas disueltas en el agua causan turbidez afectando la vida acuática que habita en ella y si desemboca cerca de formaciones coralinas, el sedimento asfixia estas colonias alterando el ecosistema marino. Otro factor es la escorrentía de herbicidas en las aguas superficiales que afectan los recursos pesqueros por su alta sensibilidad a estos productos. Estos son altamente tóxicos para peces y estadíos jóvenes de camarones, aun a dosis mínimas que no afectarían a mamíferos (Pratt y Pérez, 1997).

### ***2.2.12.3 Habitad.***

El cultivo extensivo de la caña de azúcar reduce la biodiversidad de la zona, tanto de especies mamíferas, aves e insectos por la uniformidad de vegetación (Pratt y Pérez, 1997).

La fumigación tanto aérea como terrestre de diversos plaguicidas químicos tiende a disminuir la población de insectos. Un uso extenso reduce o elimina la población de depredadores naturales de las plagas. Esto incrementa las poblaciones de plagas, lo que aumenta aún más el uso de plaguicidas. Está también documentado que las abejas y otros polinizadores son susceptibles a los plaguicidas, afectando la producción de miel y la polinización de otros cultivos para lo cual son vitales (De Campos, 1995).

#### ***2.2.12.4 Calidad de vida.***

La quema estacional de sembradíos de caña de azúcar, libera partículas muchas veces cargadas de restos de plaguicidas aplicados con anterioridad y otros productos nocivos de combustión incompleta. En El Salvador, la quema del 80 % de los campos de caña de azúcar se realiza dos veces: antes de la cosecha con el propósito de facilitar este proceso y antes de la siembra con la finalidad de limpiar la maleza (Garzona, 1996).

Alrededor del 35 % de la población total de El Salvador trabaja en el sector agrícola y se encuentra expuesta de forma rutinaria a los plaguicidas. Los residuos de plaguicidas presentes en los estudios de muestreo ecológico son bastante altos. La evidencia proveniente de otros países muestra que los plaguicidas pueden originar cambios profundos en el proceso de reproducción de algunas especies, perturbando así el equilibrio ecológico (Pratt y Pérez, 1997).

El aporte positivo que trae la industria de la caña en El Salvador es que ofrece una fuente de empleo abundante temporal a masas de campesinos que carecen de medios de sustento regular. La industria corta la caña casi exclusivamente con peones lo que la hace intensiva en mano de obra no calificada que alivia el desempleo rural. En la producción primaria el sector genera alrededor de 5.5 millones de jornales por año equivalentes a unos 259,000 empleos directos e indirectos, mientras que en la industria se generan más de 37,000 empleos directos (Pratt y Pérez, 1997).

En El Salvador es obligatorio fortificar el azúcar con Vitamina A bajo la asesoría del Instituto Nutricional de Centro América y Panamá (INCAP). Esta acción ha permitido reducir el grado de avitaminosis A, una deficiencia que afecta la vista de millones de niños en

el mundo, mejorando de esta manera la calidad de vida de la niñez salvadoreña (Pratt y Pérez, 1997).

#### ***2.2.12.5 Industrias Afectadas por la Caña de Azúcar***

Las industrias afectadas por la actividad de la caña, río abajo son las fuentes de Agua Potable y la Pesca Artesanal principalmente.

**El agua potable.** El control de la calidad del agua potable es muy limitado en El Salvador. La valoración de este problema está basada en los efectos de salud causados por las aguas residuales que descargan sin tratamientos en las fuentes abastecedoras de agua. El mayor problema que confronta el agua potable está relacionado con las aguas servidas.

En El Salvador, el tratamiento de aguas servidas es muy limitado y por esto puede afirmarse que el 90 % de los ríos de El Salvador son insalubres. La descarga de aguas servidas industriales y domésticas en el medio ambiente ha disminuido la cantidad de oxígeno y perturbado los ecosistemas en los estuarios y los manglares (Pratt y Pérez, 1997).

Los impactos y riesgos para la salud humana y los ecosistemas, debido a la falta de tratamiento de aguas servidas son altos, llegándose a considerar que las aguas servidas son la principal fuente de contaminación de fuentes de agua para beber. Las agroindustrias como los beneficios de café y los ingenios azucareros descargan sus efluentes en su gran mayoría directamente a los ríos (Pratt y Pérez, 1997).

**Pesca artesanal.** La pesca artesanal se ve afectada por la escorrentía de los plaguicidas utilizados en los cañaverales, como sucede en otros países, especialmente por la alta susceptibilidad de la fauna acuática a los herbicidas y madurantes empleados

regularmente. Además los efectos de la sedimentación producto de la erosión, afectará las desembocaduras de los ríos donde se concentra gran parte de los peces (GTZ/IICA, 1996). La disminución de su concentración en estas áreas afecta el sustento de los pescadores artesanales que viven de esta actividad tanto para su alimentación como para sus ingresos económicos.

#### ***2.2.12.6 Transferencias de externalidades.***

##### **Externalidades negativas**

Las distorsiones del Marco Institucional se traducen en un costo que lo pagamos todos como sociedad, esto es conocido como transferencias negativas. Las principales externalidades negativas son:

- La ausencia de un marco regulatorio claro, operativo y negociado entre las partes ha permitido el empobrecimiento de la calidad del agua de los ríos que reciben las descargas industriales de los ingenios.
- El uso y abuso de agroquímicos como son la afección de la biodiversidad de flora y fauna en los campos destinados al cultivo de caña, los problemas de salud ocupacional de los trabajadores agrícolas y los efectos de la escorrentía de agroquímicos río abajo
- El Salvador utiliza menos agua en el procesamiento de caña de azúcar que los demás países centroamericanos, el no pagar el costo total del aprovechamiento del agua causa que se abuse del recurso y no se valora. Como es un bien libre se aprovecha de acuerdo a su disponibilidad, se utiliza y se devuelve en condiciones peores de las que lo recibieron.

- La contaminación atmosférica se da de manera estacional durante la época de la zafra por la práctica de las quemas previo al corte, alce y transporte de la caña. Los efectos son problemas de salud en las poblaciones humanas alrededor de las plantaciones, la liberación de CO<sub>2</sub> al medio, contribuyendo con el aumento del efecto de invernadero (Pratt y Pérez, 1997).

### **Externalidades positivas**

- Los beneficios económicos de la actividad de este sector repercuten de manera más amplia en la población Salvadoreña por los esquemas de propiedad del recurso tierra (cooperativas y pequeños propietarios), el esquema de pago de la caña de azúcar y la concentración de los productores.

- La vitaminación del azúcar beneficia una población infantil que mediante este mecanismo evita sufrir los estragos de la avitaminosis A que afecta la vista de los menores en esta sociedad (Pratt y Pérez, 1997).

## **CAPÍTULO III: JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **3.1 Justificación de la investigación**

El estudio es de gran importancia porque se conoció que los niveles del NO<sub>2</sub> son mayores durante el período de zafra, afectando a los miembros de la Facultad Multidisciplinaria Oriental, a las comunidades cercanas a la fuente industrial y la ciudad de San Miguel.

Según estudios realizados, la exposición frecuente de los seres humanos al NO<sub>2</sub> aumenta el riesgo de aparición de enfermedades respiratorias como bronquitis aguda, flema, tos. Estas enfermedades afectan principalmente a niños y ancianos (OMS, 2003).

Con el estudio realizado se tienen datos que demuestran que el NO<sub>2</sub> es mayor en el período de zafra. Esta información servirá al Ministerio de Salud para estar preparados y afrontar una mayor demanda de pacientes que presentan enfermedades respiratorias en dicha época y a las Autoridades de la FMO para que realicen las gestiones pertinentes ante el MARN para que exijan a la industria la aplicación de la normativa vigente relacionada con la calidad del aire.

### **3.2 Objetivos**

#### **3.2.1 Objetivo general.**

Evaluar los niveles de contaminantes atmosféricos en período de zafra y no zafra en la ciudad de San Miguel.

#### **3.2.2 Objetivos específicos.**

- Determinar los niveles del NO<sub>2</sub> durante el período de zafra y no zafra en la ciudad de San Miguel.

- Comparar los niveles del NO<sub>2</sub> durante el período de zafra en la ciudad de San Miguel con los datos obtenidos en estudios para otras ciudades.
- Comparar los niveles del NO<sub>2</sub> durante el período de no zafra en la ciudad de San Miguel con los datos obtenidos en estudios para otras ciudades.

### **3.3 Hipótesis**

#### **Hipótesis específica 1**

Ho: Los niveles del NO<sub>2</sub> son iguales durante el período de zafra y no zafra en la ciudad de San Miguel

Ha: Los niveles del NO<sub>2</sub> no son iguales durante el período de zafra y no zafra en la ciudad de San Miguel

#### **Hipótesis específica 2**

Ho: Los niveles del NO<sub>2</sub> durante el período de zafra en la ciudad de San Miguel son iguales con los datos obtenidos en estudios para otras ciudades.

Ha: Los niveles del NO<sub>2</sub> durante el período de zafra en la ciudad de San Miguel no son iguales con los datos obtenidos en estudios para otras ciudades.

#### **Hipótesis específica 3**

Ho: Los niveles del dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> durante el período de no zafra en la ciudad de San Miguel son iguales con los datos obtenidos en estudios para otras ciudades.

Ha: Los niveles del dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> durante el período de no zafra en la ciudad de San Miguel no son iguales con los datos obtenidos en estudios para otras ciudades.



## CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 4.1 Ubicación del estudio

El estudio se desarrolló en la ciudad de San Miguel, el equipo se instaló en el séptimo nivel (19.0 m) del Hospital San Francisco ubicado en la Avenida Roosevelt Norte # 408 (latitud  $13^{\circ}29'03.03''\text{N}$  y longitud  $88^{\circ}11'06.50''\text{O}$ ). El telescopio se orientó hacia zona industrial ubicada en Cantón el Jute del municipio de San Miguel, figura 4.1

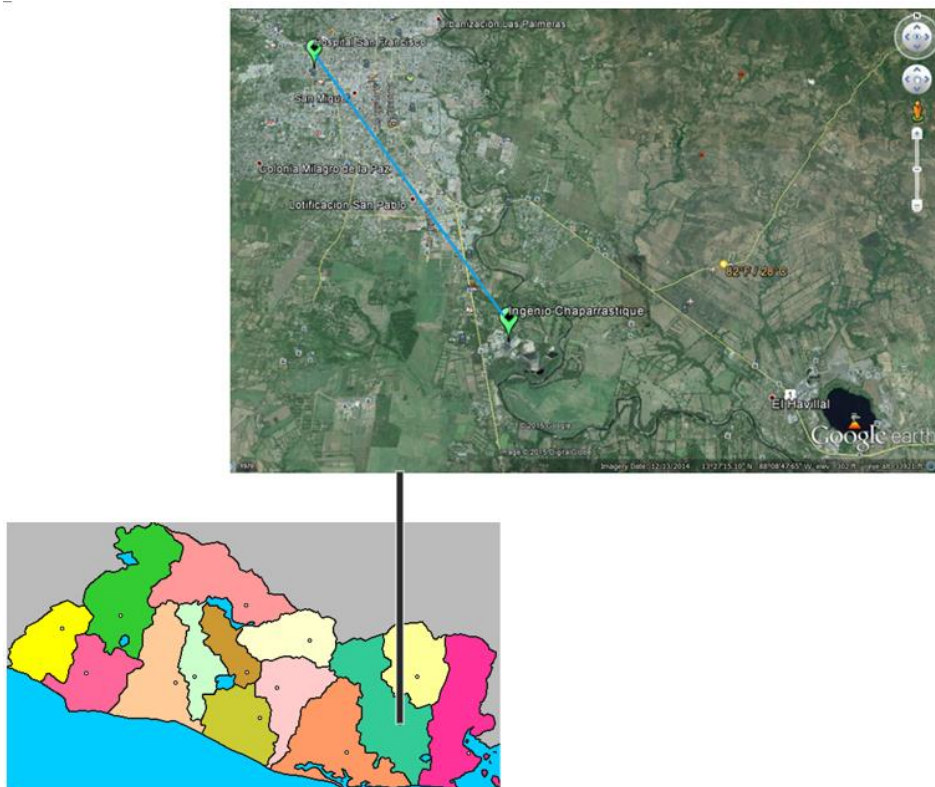


Figura 4. 1 Ubicación geográfica de la zona de estudio, ciudad de San Miguel, trayectoria hasta la planta industrial de San Miguel. Mapa de El Salvador (Luenticus, 2013).

## 4.2 Tipo de investigación

- Por su aplicabilidad. La investigación fue aplicada porque se utilizó la técnica DOAS pasiva para la determinación de los niveles de los contaminantes atmosférico principalmente el NO<sub>2</sub>.
- Por su enfoque. La investigación fue cuantitativa porque se determinaron valores de la densidad óptica de la columna oblicua para el NO<sub>2</sub>.
- Por su alcance. La investigación fue descriptiva, experimental y explicativa.
- Por la fuente de información. La investigación fue primaria, los datos fueron obtenidos por el grupo que realizó la investigación.

## 4.3 Unidades de análisis

El aire de los alrededores del Hospital San Francisco de la Ciudad de San Miguel.

## 4.4 Variables y medición

### 4.4.1 Definición de las variables.

**Variable independiente:** El tiempo

Es el período durante el que se realizaron las mediciones en cada una de las campañas realizadas en período de zafra y no zafra.

**Variable dependiente:** Los niveles del contaminante atmosférico NO<sub>2</sub>.

Los niveles del contaminante atmosférico están representados por la cantidad de moléculas del gas traza por unidad de área en cm<sup>2</sup>.

#### 4.4.2 Indicadores y su medición.

Tabla 4. 1

Operacionalización de variables

Tema: <b>Determinación de los niveles de contaminantes atmosféricos en período de zafra y no zafra en la ciudad de San Miguel, durante febrero a julio de 2015</b>						
Enunciado del problema: <b>¿Existirá diferencia en los niveles de contaminantes atmosféricos en período de zafra y no zafra en la ciudad de San Miguel?</b>						
Objetivo general: <b>Evaluar los niveles de contaminantes atmosféricos en período de zafra y no zafra en la ciudad de San Miguel</b>						
<b>Objetivos Específicos</b>	Unidades de análisis	VARIABLES	Definición conceptual	Operacionalización de variables	Técnicas utilizadas	Instrumentos utilizados
Determinar los niveles del NO <sub>2</sub> durante el período de zafra y no zafra en la ciudad de San Miguel	El aire de los alrededores del Hospital San Francisco de la Ciudad de San Miguel.	El tiempo de medición	Son las doce horas de cada uno de los días de las dos campañas (jueves-domingo) durante el período de zafra y no zafra	Para cada día de las campañas de medición se evaluaron los niveles del contaminante NO <sub>2</sub>	Se aplicó la técnica DOAS pasiva	Espectrógrafo OceanOptics, (USB4000-UV-VIS)
Comparar los niveles del NO <sub>2</sub> durante el período de zafra en la ciudad de San Miguel con los datos obtenidos en estudios para otras ciudades		Los niveles del contaminante atmosférico NO <sub>2</sub>	Es la cantidad de moléculas/cm <sup>2</sup> del contaminante NO <sub>2</sub>		Medida directa e indirecta	Fuente de voltaje Telescopio Fibra óptica Escáner Computadora Calculadora Teléfono Cámara fotográfica y de video Cables
Comparar los niveles del NO <sub>2</sub> durante el período de no zafra en la ciudad de San Miguel con los datos obtenidos en estudios para otras ciudades.						

#### 4.5 Instrumentos utilizados

- Computadora
- Escáner
- Teléfonos
- Bolígrafos
- Calculadora
- Cámara fotográfica y de video
- Telescopio
- Espectrógrafo Ocean Optics (USB4000-UV-VIS)
- Fibra óptica.
- Fuente de voltaje
- Conectores

Las características de los instrumentos más importantes se presentan a continuación:

##### a) **Espectrógrafo Ocean Optics (USB4000-UV-VIS)**

El espectrógrafo utiliza una configuración Czerny-Tuner con una distancia focal de 42mm (input) y 68mm (output). Tiene una red de difracción plana de mayor eficiencia entre 300 y 400nm, lo cual combinado con una apertura de 50 $\mu$ m, dan una resolución espectral óptima de 0.9 nm sobre el rango de 200 a 850nm. Una lente cilíndrica plana convexa es utilizada para reducir la imagen al tamaño de la apertura del detector. El detector opera a temperatura ambiente y es una CCD (“Charge Coupled Device”) lineal

(Toshiba TCD1304AP de silicio) de 3648 fotodiodos. El tamaño de cada elemento es  $8\mu\text{m}$  (ancho) x  $200\mu\text{m}$  (largo), (Ocean Optics Inc, 2008).

En la figura 4.2 se ilustra el espectrógrafo utilizado la para recolección de información

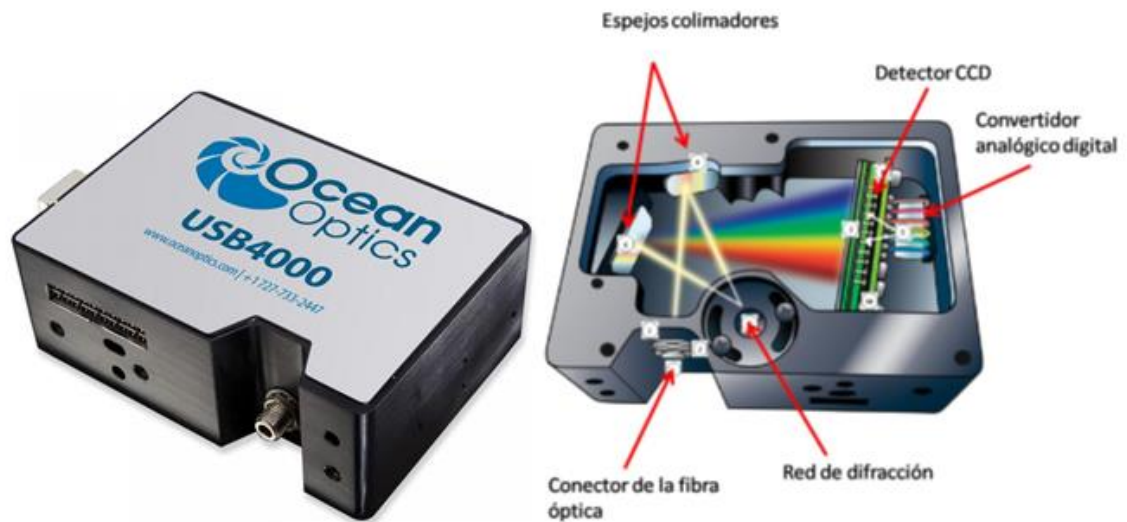


Figura 4. 2 Partes del Espectrógrafo Ocean Optics (USB4000-UV-VIS) que se utilizó en las campañas de medición (Ocean Optics Inc, 2008)

## b) Telescopio

Consiste en dos lentes como se ilustra en la figura 4.3. La primera lente define el campo de visión del telescopio, mientras la segunda actúa como una lente de campo y desacopla la imagen del cielo a partir de la entrada del espectrógrafo. Esto elimina el riesgo de que una falta de uniformidad en la iluminación del campo de visión del telescopio (causada por diferentes nubosidades) se transfiera a los elementos del detector. Un filtro (U330 de la firma Edmund Optics) bloquea la luz visible en cierta banda ( $310\text{-}375\text{nm}$ ) y es utilizado para reducir la luz sobre el espectrógrafo (Alvarado, 2011).

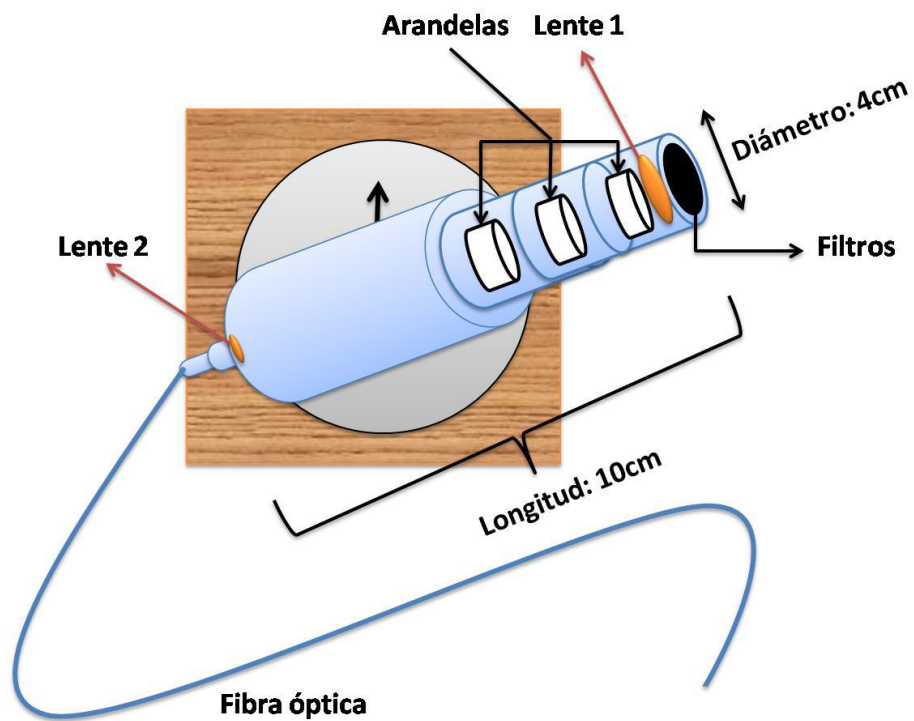


Figura 4.3 Componentes ópticos del telescopio (Alvarado, 2011)

El campo de visión del telescopio es de aproximadamente  $1.5^\circ$ . La luz es transferida del telescopio al espectrógrafo por medio de una fibra óptica de poliamida con longitud de 2m y un diámetro de  $400\mu\text{m}$  (Alvarado, 2011). En la figura 4.4 se muestra el telescopio utilizado en la práctica.



*Figura 4. 4* Telescopio utilizado para las mediciones

#### **4.6 Técnicas y procedimientos que se emplearon en la recopilación de la información**

##### **4.6.1 Técnicas.**

- **Técnica DOAS pasiva** se utilizó para determinar los niveles de los contaminantes atmosférico  $\text{NO}_2$ , HCHO,  $\text{O}_4$ , HONO y BrO. La técnica se desarrolló de la siguiente manera: La luz solar fue colectada por el telescopio que estaba conectado por medio de una fibra óptica al espectrógrafo, la información del espectrógrafo fue transmitida

por una conexión USB a una computadora (Alvarado, 2011) Como se ilustra en la figura. 4.5

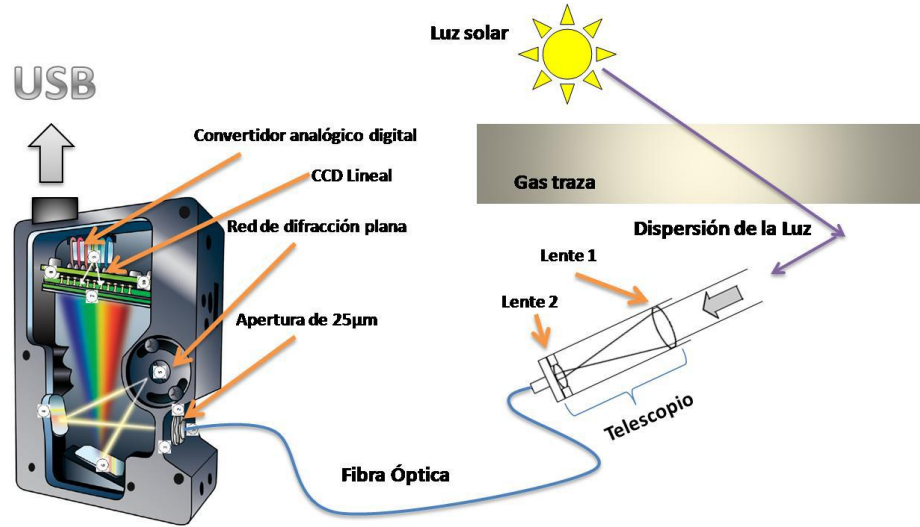


Figura 4. 5 Telescopio utilizado para las mediciones

La medición experimental consistió en la observación de la luz dispersada a diferentes ángulos de elevación como se ilustra en la figura 4.6.

**Medida indirecta** la densidad óptica de los contaminantes se obtuvo de un ajuste del espectro teórico simulado utilizando la Ley de Beer–Lambert y el espectro medido. Este proceso se realizó con el programa DOASIS para evaluar los contaminantes atmosféricos  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HCHO}$ ,  $\text{O}_4$ ,  $\text{HONO}$  y  $\text{BrO}$ .



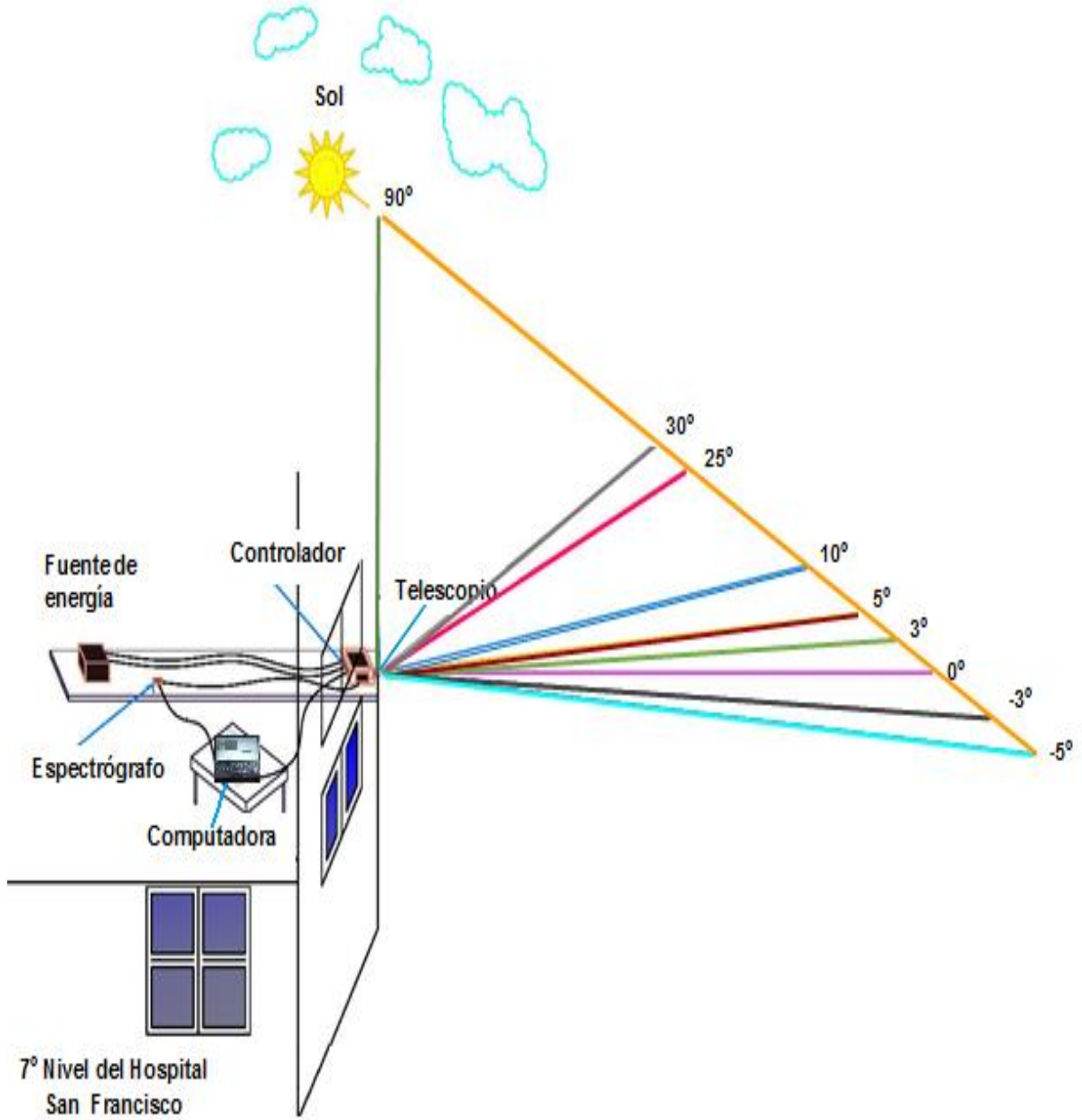


Figura 4. 6 Diferentes ángulos de elevación utilizados en las mediciones realizadas aplicando la técnica DOAS pasiva. Modificada de (Alvarado, 2011)

#### 4.6.2 Procedimiento.

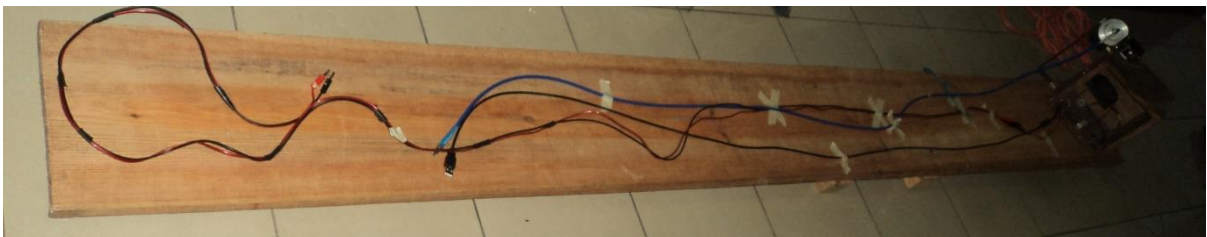
Las etapas en que se desarrolló el estudio se detallan a continuación:

##### a) Campañas de medición

La fase experimental se desarrolló en dos campañas de mediciones una en período de zafra y otra para el período de no zafra. Las medidas se realizaron en las mismas condiciones geográficas. El procedimiento fue el siguiente:

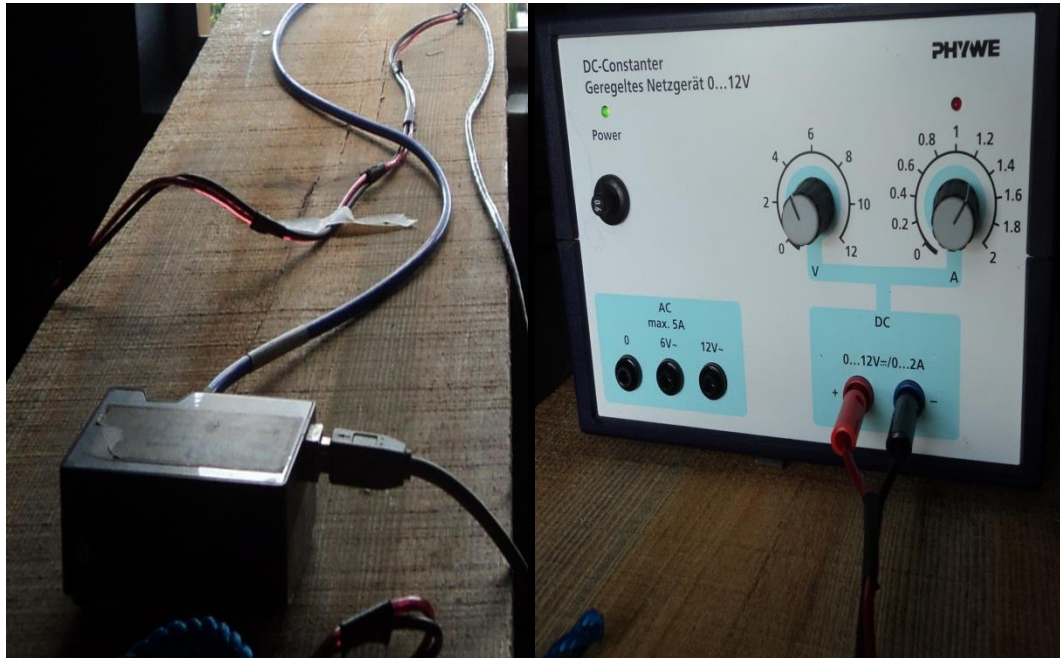
1. Se solicitaron los datos meteorológicos de temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, para cada uno de los días de las mediciones al Observatorio Ambiental del MARN.
2. Se instaló el software DOASIS en la computadora.
3. Se seleccionó en el archivo de procesamiento por lotes “script” los ángulos de elevación (-3, 3, -5, 5, 0, 10, 25 y 90)° para la captación de los fotones, utilizando un tiempo de integración de 2ms, los valores de compensación electrónica (offset electrónico) y corriente oscura se captaron a cada seis sets.
4. Se ubicó la caja que contiene el controlador y el telescopio sobre una tabla de madera, se conectó por un extremo la fibra óptica al telescopio y los cables al controlador.

Como se ilustra en la figura 4.7



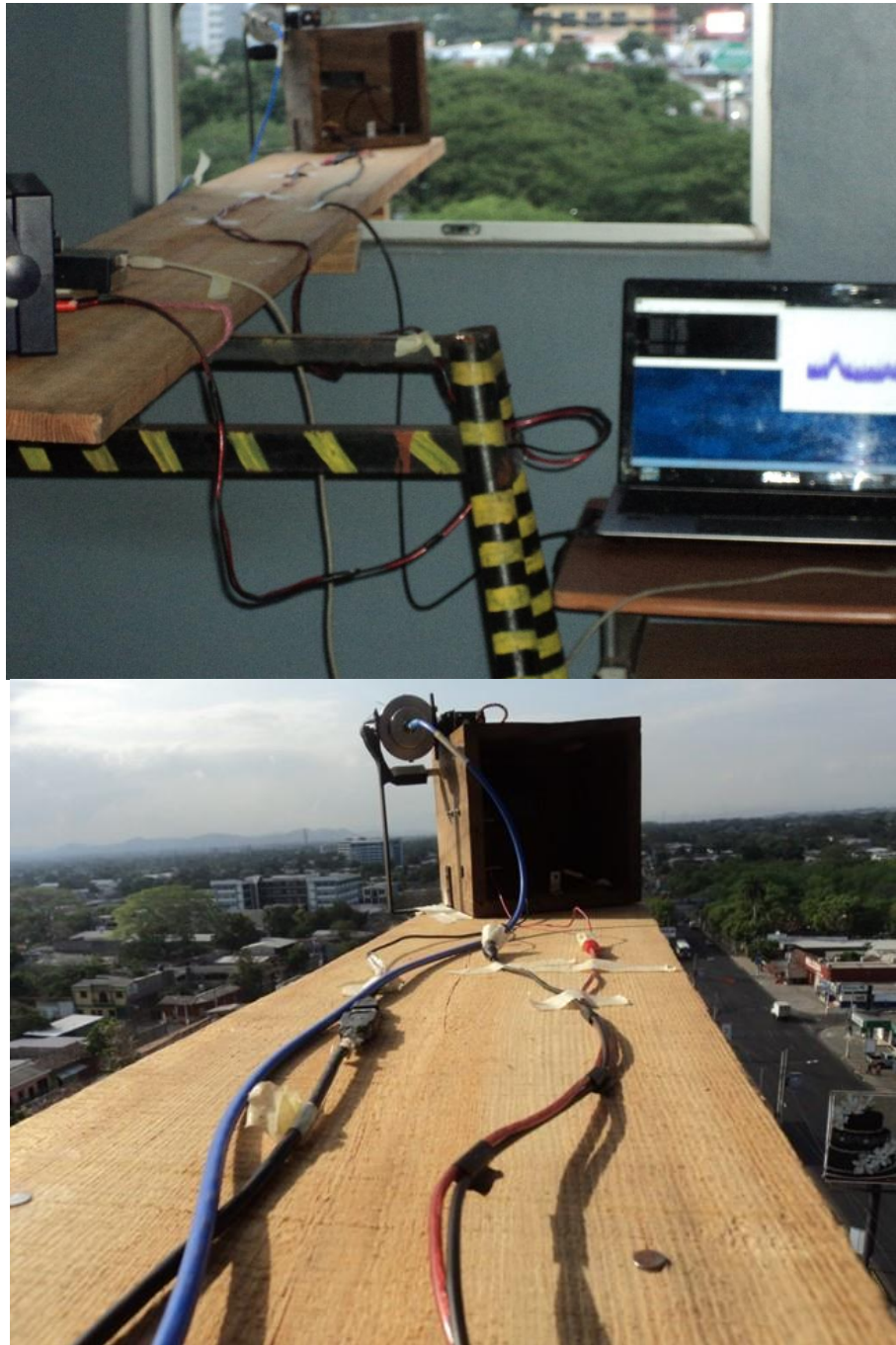
*Figura 4. 7* Ubicación de fibra óptica en telescopio, que estaba sobre una superficie de madera.

5. Se conectó por el otro extremo la fibra óptica al espectrógrafo Ocean Optics (USB 4000-UV-VIS) y éste a la computadora, los cables del controlador se conectaron a una fuente como se muestra en la figura 4.8.



*Figura 4. 8* Ubicación de fibra óptica en el espectrógrafo, conexiones a la fuente de energía.

6. Para la recopilación de datos se apoyó la tabla de madera sobre la ventana del edificio y se realizó el siguiente montaje experimental como se muestra en la figura 4.9.
7. El procedimiento realizado en los numerales (1, 2, 3, 4, 5 y 6) se llevó a cabo para cada una de las campañas de medición.

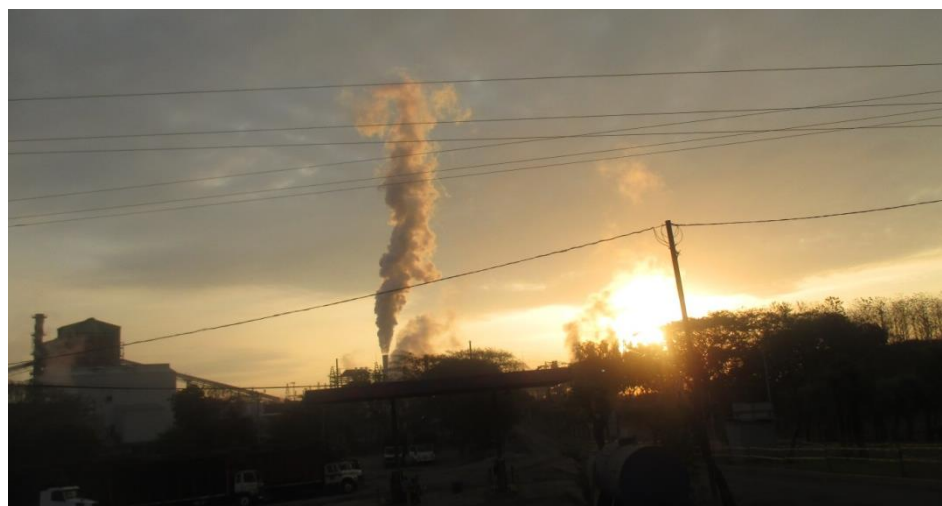


*Figura 4. 9* Montaje experimental para las mediciones realizadas, en las dos campañas de medidas el equipo se ubicó a la misma altura y en la misma orientación.

8. Para la campaña en período de zafra se tomaron fotografías de la fuente industrial de la ciudad de San Miguel entre las 5:30 y 5:40 AM, como ilustran en las figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13.



*Figura 4. 10* Emisiones procedentes de la planta industrial de San Miguel observada el 19/03/15



*Figura 4. 11* Emisiones de la planta industrial de San Miguel observadas el 20/03/15



*Figura 4. 12* Emisiones procedentes de la planta industrial de San Miguel observadas el 21/03/15



*Figura 4. 13* Emisiones procedentes de la planta industrial de San Miguel 22/03/15

Para la campaña de medición del período de no zafra en la zona industrial no se evidencia las emisiones de gases.

**b) Comparación de valores obtenidos para NO<sub>2</sub> en período de zafra en la ciudad de San Miguel con otras ciudades**

1. Los datos obtenidos en período de zafra para la ciudad de San Miguel (19 al 22 de marzo 2015) fueron comparados con dos estudios. Un estudio realizado del 12 al 15 de marzo de 2015 en la Colonia Escalón de la Ciudad de San Salvador (Gámez, 2015) utilizando MAX-DOAS que es una técnica similar a la utilizada en San Miguel y el segundo estudio realizado en la Ciudad de Sonsonate utilizando DOAS Satelital cuyos datos fueron obtenidos por el OMI que está ubicado en el satélite Aura de la NASA. En la tabla 4.2 se muestran las características de ambas ciudades.

Tabla 4. 2

Comparación de las Ciudades de San Miguel-San Salvador-Sonsonate

Característica	San Miguel	San Salvador	Sonsonate
Coordenadas	13°29' N 88°11'O	13°41'N 89°11'O	13°43' N 88°43'O
Altitud media	110 msnm	670 msnm	220 msnm
Población Total	(2014)	( 2015)	( 2014)
Densidad	247 119 hab. 416.03 hab/km <sup>2</sup>	316 090 hab. 4 375 hab/km <sup>2</sup>	71 541 hab. 307.6 hab/km <sup>2</sup>
Superficie	593.98 km <sup>2</sup>	72.25 km <sup>2</sup>	232.53 km <sup>2</sup>

**c) Comparación de valores obtenidos para NO<sub>2</sub> en período de no zafra en la ciudad de San Miguel con otras ciudades**

1. Los datos obtenidos para el período de no zafra en la Ciudad de San Miguel (23 al 26 de julio 2015) se compararon con los datos obtenidos por el OMI para las Ciudades de Santa Ana y Santa Tecla. En la tabla 4.3 se muestran las características de las tres ciudades.

Tabla 4. 3

Comparación de las Ciudades de San Miguel-Santa Ana-Santa Tecla

Característica	San Miguel	Santa Ana	Santa Tecla
Coordenadas	13°29' N 88°11'O	13°59' N 89°32'O	13°21' N 88°27'O
Altitud media	110 msnm	665 msnm	920 msnm
Población Total	(2014)	( 2014)	( 2013)
Densidad	247 119 hab. 416.03 hab/km <sup>2</sup>	264 091hab. 660,2 hab/km <sup>2</sup>	121 908 hab. 1086.52 hab/km <sup>2</sup>
Superficie	593.98 km <sup>2</sup>	408.01 km <sup>2</sup>	112.20 km <sup>2</sup>



#### 4.7 Procesamiento y análisis

Para cada una de las campañas de medición se realizó el siguiente análisis

1. La densidad óptica de los contaminantes se obtuvo de un ajuste del espectro teórico simulado utilizando la Ley de Beer–Lambert y el espectro medido. A las medidas realizadas se hicieron las correcciones respectivas en los espectros medidos.
2. Se realizaron los gráficos de la dSCD y VCD para el  $\text{NO}_2$  y dSCD para los contaminantes estudiados, para cada una de las campañas de medición.

Para cada día se analizaron las condiciones meteorológicas: humedad relativa, temperatura, velocidad y dirección del viento.

3. Se realizaron las comparaciones de los resultados obtenidos en periodo de zafra y no zafra para los contaminantes atmosféricos analizados a través de gráficos.
4. Mediante la representación gráfica, se realizaron las comparaciones de los resultados obtenidos en período de zafra y no zafra para los contaminantes atmosféricos seleccionados.
5. Los datos obtenidos para el  $\text{NO}_2$  para el período de zafra y no zafra se compararon con los obtenidos en otros estudios para otras ciudades.

## **CAPITULO V: ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS**

Para determinar los niveles de los contaminantes se consideraron los siguientes aspectos

### **a. Espectro de referencia**

Se seleccionó el espectro de mayor intensidad de las medidas realizadas con el telescopio apuntando al zenit (90°).

Para campaña de zafra el espectro de mayor intensidad fue el medido a las 13: 24 pm del día 21/03/2015. Este espectro se utilizó para obtener la densidad óptica y las dSCD.

Para la campaña de no zafra el espectro de mayor intensidad el espectro fue el medido a las 11: 20 am del día 25/07/2015. Este espectro se utilizó para obtener la densidad óptica y las dSCD.

### **b. Ventana espectral**

El rango espectral utilizado para el ajuste DOAS fue de (335 a 355) nm y se utilizaron las secciones eficaces de absorción para: NO<sub>2</sub>, HCHO, O<sub>4</sub>, HONO y BrO.

### **5.1 Obtención de la densidad óptica de los contaminantes**

Para obtener la densidad óptica de los contaminantes atmosféricos en estudio se realizó el proceso ilustrado en la figura 5.1:

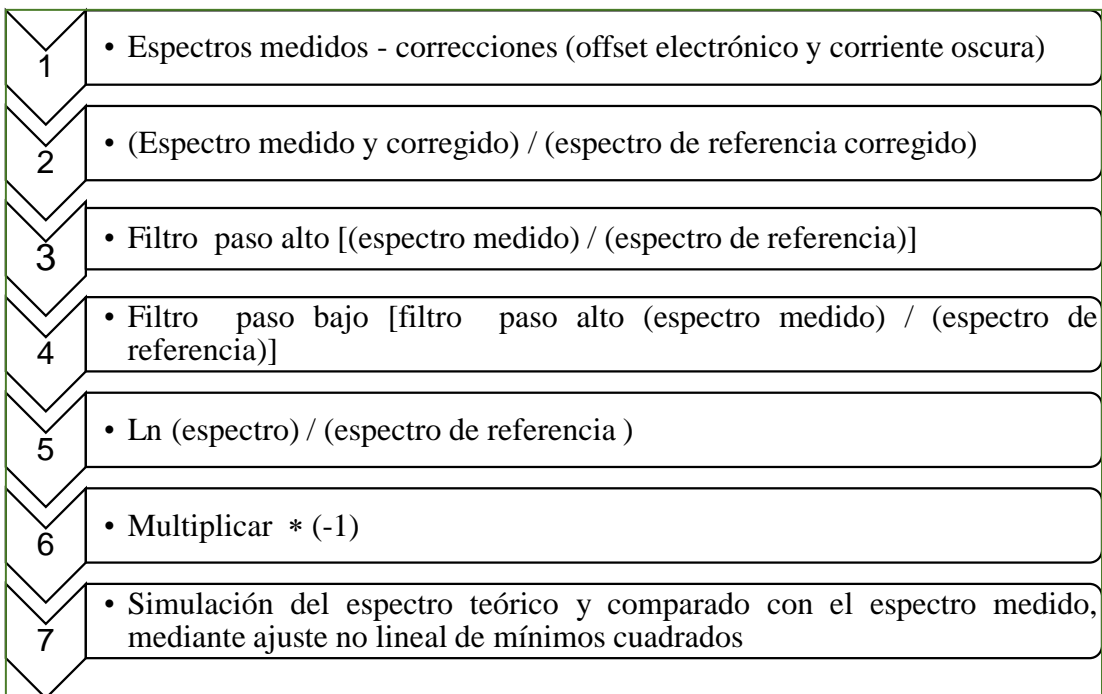


Figura 5. 1 Proceso realizado en el software DOASIS para la determinación de la densidad óptica y el ajuste no lineal de mínimos cuadrados Modificada de (Alvarado, 2011)

## 5.2 Variación temporal de dSCD para contaminantes atmosféricos estudiados

Para obtener los valores de dSCD se utilizaron las secciones eficaces de la tabla 5.1

Tabla 5. 1

Secciones eficaces de absorción

Molécula	Referencia
HCHO	(Bogumil et al, 2003) 293 K
HONO	(Stutz et al, 2000) 298 K
NO <sub>2</sub>	(Burrows et al, 1998) 293 K
O <sub>4</sub>	(Hermans, 2002) 293 K
BrO	(Fleischmann et al, 2004) 298 K

Tomada de (Alvarado, 2011).

### 5.2.1 Campaña de zafra.

Se realizó el ajuste DOAS para determinar el valor de dSCD, con la línea azul se muestra las medidas realizadas y con la línea roja la simulación como se muestra en la figura 5.2.

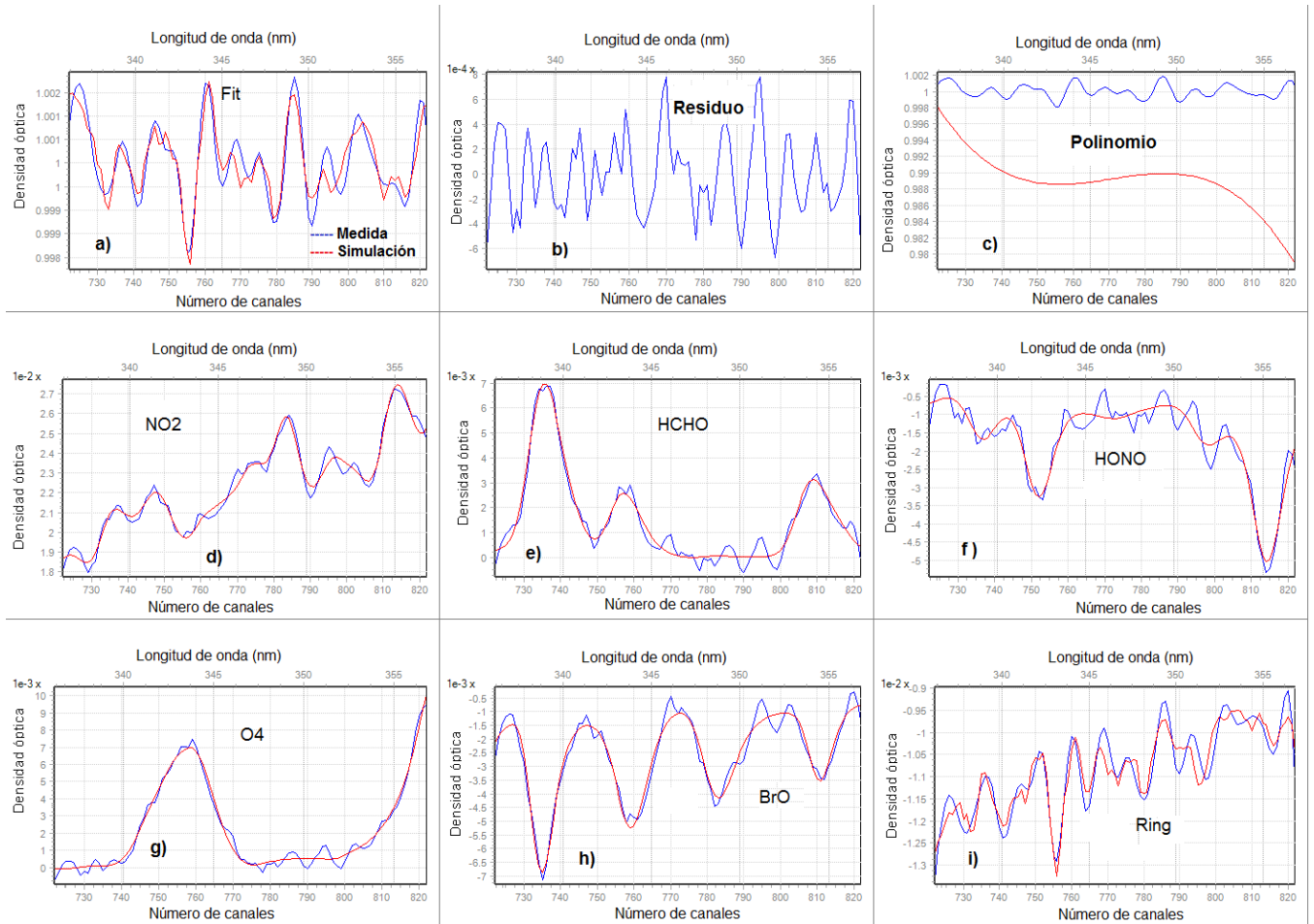


Figura 5. 2 Resultados para obtener las dSCD en período de zafra, medida realizada (línea azul), medida simulada (línea roja) para los espectros obtenidos de: a) absorción total, b) residuo, c) polinomio, d) NO<sub>2</sub>, e) HCHO, f) HONO, g) O<sub>4</sub>, h) BrO, i) Ring

Al analizar los ajustes de la figura 5.2 se verifica que la calidad de los datos es excelente, los espectros son casi iguales a los espectros simulados. Además las bandas de absorción de los gases utilizados se reproducen aceptablemente.

Los niveles de los contaminantes varían durante el día. La variación diurna del  $\text{NO}_2$  se muestra en la figura. 5.3

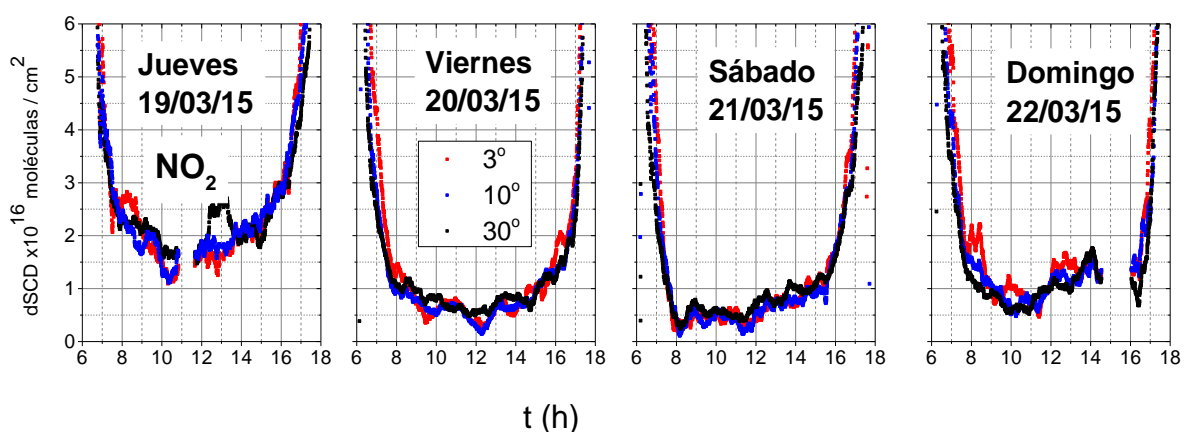


Figura 5. 3 Variación diurna del  $\text{NO}_2$  período de zafra

Para el jueves 19/03/15 el valor promedio de dSCD para el  $\text{NO}_2$  fue de  $2.0 \times 10^{16}$  moléculas/cm<sup>2</sup>. Para este día se dieron incrementos a las 8:00 12:00, 14:00 horas. Estos incrementos podrían estar relacionados al tráfico vehicular, a la disminución de la velocidad del viento que no arrastraba los contaminantes, la velocidad del viento puede afectar en gran medida la concentración de contaminantes en un área, a menor velocidad del viento mayor es la concentración de contaminantes. Los valores de velocidad registrados para esas horas fue de 3.5 km/h para las 8:00 horas, a 12:00 horas fue de 4.3 km/h y a 14:00 horas fue 3.7 km/h. Otro fenómeno que interviene es la dirección del viento a las 14:00 horas éste se desplazaba en la dirección suroeste, hacia el lugar donde se recopilaban los datos.

Para el día 20 se muestran incrementos de las dSCD, a las 11:00 y 13:00 horas. Para el día 21 incrementos de las dSCD, a las 9:00 y 13:00 horas. Para el día 22 de marzo se evidencian incrementos en los valores de dSCD a las 8:00 AM, 12:00 y 14:00 horas. Estos incrementos pueden estar relacionados al tráfico vehicular, a velocidad y dirección del viento que arrastraba los contaminantes hacia el lugar donde se recopilaban los datos. En esas horas la dirección predominante era suroeste.

Para los cuatro días del período de zafra no se evidencia una separación de los diferentes ángulos medidos. Estos resultados muestran la existencia de una atmósfera muy contaminada, como ha sido reportada por otros autores (Heckel et al 2005).

Se calculó de las concentraciones de la densidad de columna vertical para el NO<sub>2</sub>. Los resultados se muestran en la figura 5.4

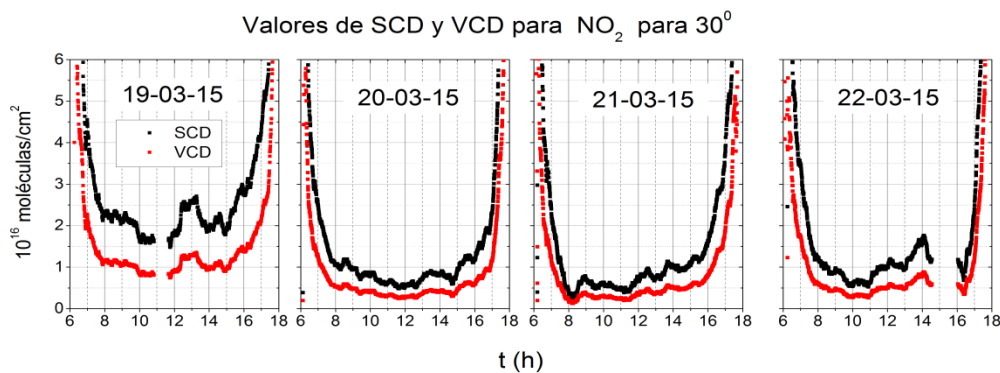


Figura 5. 4 Comparación de valores de SCD y VCD para NO<sub>2</sub> período de zafra

De la figura.5.4 se deduce que existe una mayor concentración de moléculas/cm<sup>2</sup> en la columna inclinada, que en la columna vertical. Esos resultados están de acuerdo con lo ilustrado en la figura 2.23 que la densidad de columna oblicua, S, es mayor que la densidad de columna vertical.

En la tabla 5.2 se muestra los valores promedios de moléculas /cm<sup>2</sup>, evaluados desde las 10:00 horas hasta las 14:00 horas. Estos valores promedios fueron corregidos haciendo una estimación del rol de los aerosoles presentes el día de la recolección de datos.

Tabla 5. 2

Valores promedios de moléculas /cm<sup>2</sup> de NO<sub>2</sub> período de zafra

Angulo (°)	19/03/2015	20/03/2015	21/03/2015	22/03/2015
3	1.89E+16 ± 2.56E+15	2.33E+16 ±1.63E+15	2.28E+16 ±1.66E+15	4.53E+16 ±3.16E+15
10	2.02E+16 ± 2.74E+15	2.14E+16 ±1.64E+15	2.16E+16 ±1.87E+15	3.97E+16 ±2.65E+15
30	2.41E+16 ±3.54E+15	2.71E+16 ±1.20E+15	2.76E+16 ±1.95E+15	3.93E+16 ±2.88E+15

El día que se obtuvo una mayor concentración fue el 22/03/15 y el día donde se obtuvo valores más pequeños fue el 19/03/15. Para los días 20/03/15 y 21/03/15 el comportamiento en las dSCD fue similar.

En la figura 5.5 se muestra la variación diurna del HCHO.

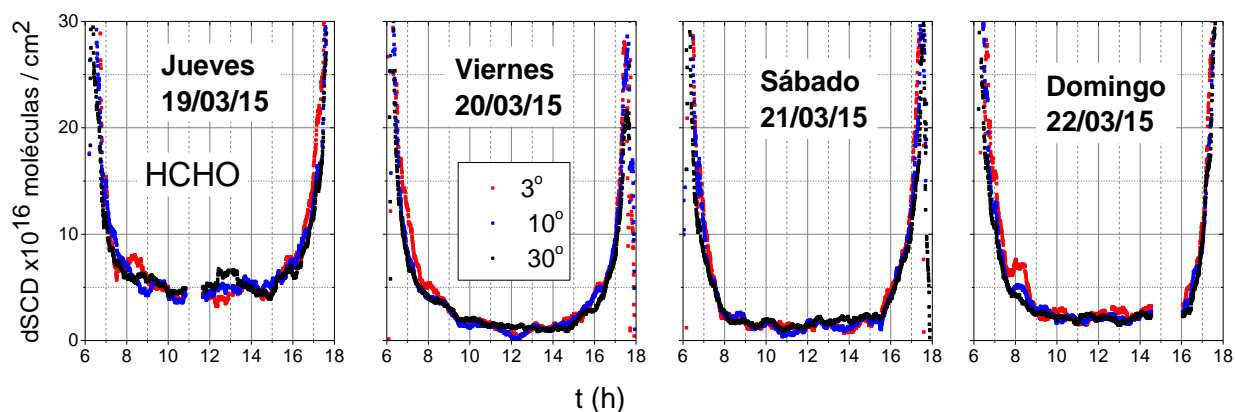


Figura 5. 5 Variación diurna del HCHO período de zafra

El HCHO se ve incrementado únicamente el día 19/03/15, en los tres días restantes el comportamiento es similar. Los resultados muestran para este período una atmósfera muy brumosa, semejante a la interpretación que dio a sus datos (Heckel et al 2005) de un estudio que realizaron para el HCHO. Se promediaron las concentraciones de las 10:00 horas hasta las 14:00 horas, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.3

Tabla 5. 3

Valores promedios de moléculas /cm<sup>2</sup> de HCHO período de zafra

Angulo (°)	19/03/2015	20/03/2015	21/03/2015	22/03/2015
3	4.32E+16 ±5.72E+15	1.16E+16 ±4.65E+15	1.33E+16 ±2.81E+15	2.34E+16 ±4.36E+15
10	4.60E+16 ±6.19E+15	1.03E+16 ±4.06E+15	1.21E+16 ±4.29E+15	2.03E+16 ±2.14E+15
30	5.28E+16 ± 6.92E+15	1.35E+16 ±3.01E+15	1.60E+16 ±3.51E+15	2.06E+16 2.54E+15

El comportamiento del HCHO se ve aumentado sólo el día 19/03/15, le sigue el 22/03/15. Para los días 20 /03/15 y 21/03/15 el comportamiento es muy semejante.

En la figura. 5.6 de muestra la variación diurna del HONO



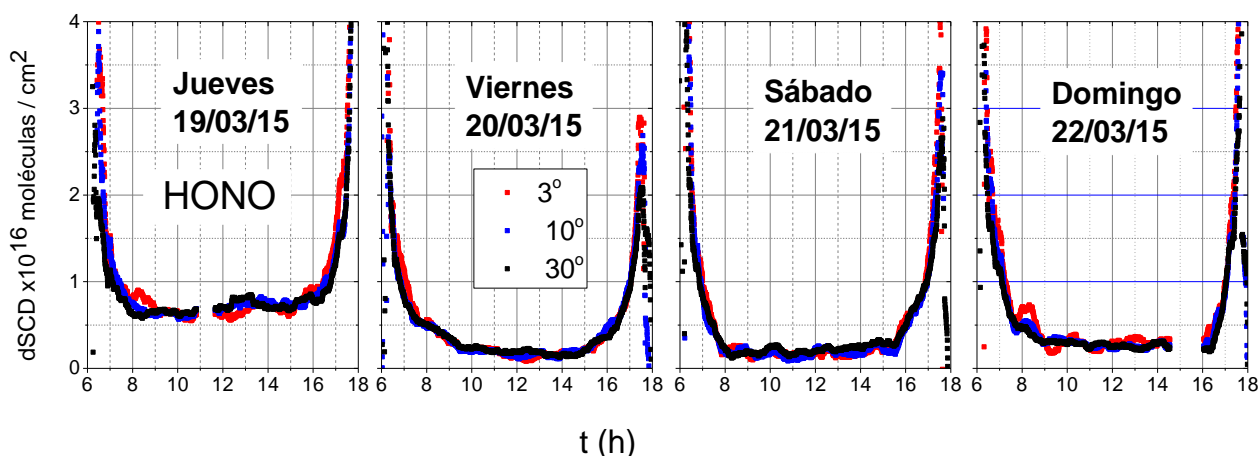


Figura 5. 6 Variación diurna del HONO período de zafra

El valor de las dSCD para el HONO para el jueves 19/03/15 presenta un pequeño incremento en relación a los demás días en que se realizaron las mediciones. Los valores promedios de las dSCD calculados de las 10:00 a las 14:00 horas se muestra en la tabla 5.4

Tabla 5. 4

Valores promedios de moléculas /cm<sup>2</sup> de HONO período de zafra

Angulo (°)	19/03/2015	20/03/2015	21/03/2015	22/03/2015
3	6.48E+15 ± 6.96E+14	1.66E+15 ±4.33E+14	1.65E+15 ±2.28E+14	2.92E+15 ±4.70E+14
10	6.95E+15 ±6.90E+14	1.66E+15 ±2.98E+14	1.68E+15 ±4.36E+14	2.60E+15 ±2.61E+14
30	7.16E+15 ±6.62E+14	1.92E+15 ±2.77E+14	2.12E+15 ±3.21E+14	2.64E+15 ±2.57E+14

En la figura 5.7 se muestra el comportamiento del O<sub>4</sub> para el período de zafra

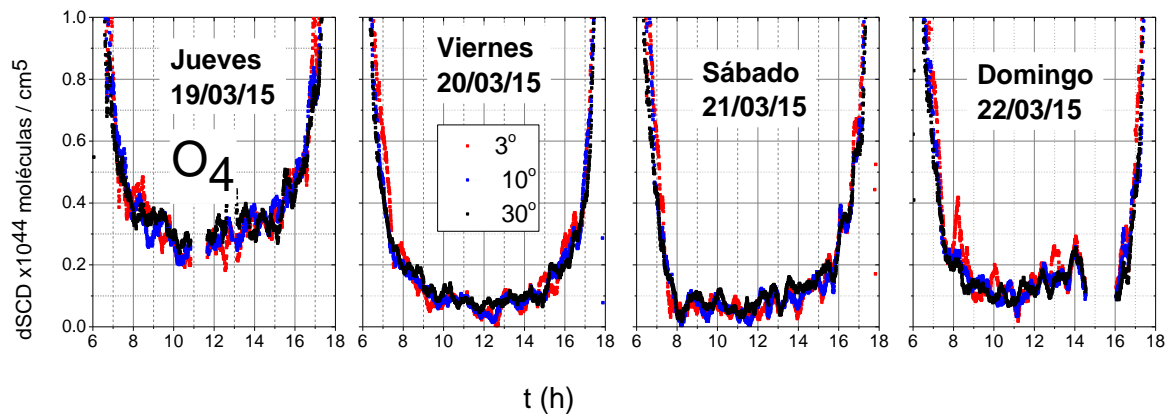


Figura 5. 7 Variación diurna del  $O_4$  período de zafra

Para el jueves el 19/03/15 el  $O_4$  se ve incrementado en relación a los demás días. Este comportamiento podría estar asociado a la cantidad y tipo de aerosoles presentes en la atmósfera de San Miguel. Porque el  $O_4$  es un indicador de la presencia de aerosoles. Los días donde los valores de  $O_4$  se ven disminuidos además de la dispersión en la atmósfera hay una contribución adicional debida a los aerosoles, lo que disminuye el paso de luz hacia el telescopio. Dado que la mayoría del  $O_4$  en la atmósfera se encuentra cerca de la superficie terrestre, la absorción de  $O_4$  disminuye (Wagner et al, 2004).

En la tabla 5.5 se evidencia el aparente incremento del  $O_4$  para el 19/03/15, seguido del 22/03/15 y valores semejantes para el 20 y 21 de marzo de 2015.

Tabla 5. 5

Valores promedios de moléculas /cm<sup>5</sup> de O<sub>4</sub> período de zafra

Angulo (°)	19/03/2015	20/03/2015	21/03/2015	22/03/2015
3	26.9E+42 ±4.62E+42	7.01E+42 ± 2.85E+42	6.27E+42 ±2.59E+42	14.8E+42 ±5.10E+42
10	28.6E+42 ±4.63E+42	7.04E+42 ±2.41E+42	6.70E+42 ±3.02E+42	12.9E+42 ±4.19E+42
30	32.5E+42 ±5.46E+42	8.48E+42 ±1.77E+42	8.51E+42 ±3.29E+42	13.2E+42 ±3.79E+42

La variación diurna que muestra el BrO está ilustrado en la figura 5.8, muestra un comportamiento similar para durante los días de la campaña de medición. No se logra distinguir las observaciones de los diferentes ángulos debido a la brumosis en la atmósfera.

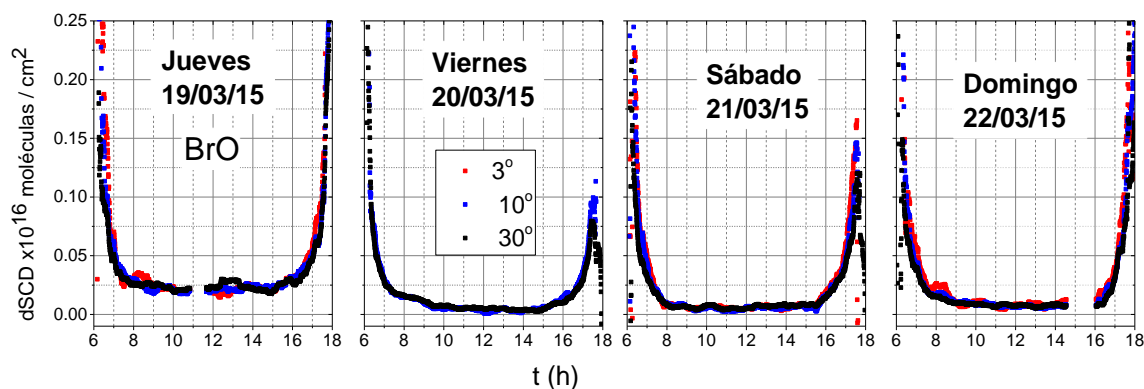


Figura 5. 8 Variación diurna del BrO período de zafra

En los valores promedios mostrados en la tabla 5.6 se evidencia el comportamiento similar para los días 20 y 21 de marzo de 2015.

Tabla 5. 6

Valores promedios de moléculas /cm<sup>2</sup> de BrO período de zafra

Angulo (°)	19/03/2015	20/03/2015	21/03/2015	22/03/2015
3	20.2E+13 ±2.60E+13	4.31E+13 ±1.55E+13	5.74E+13 ±1.11E+13	7.94E+13 ±1.81E+13
10	20.9E+13 ±2.16E+13	3.78E+13 ±1.42E+13	5.03E+13 ±1.31E+13	7.23E+13 ±1.26E+13
30	23.8E+13 ±3.07E+13	5.07E+13 ±1.01E+13	6.33E+13 ±1.44E+13	75.8E+12 ±9.03E+12

Los valores promedios de concentraciones en moléculas/cm<sup>2</sup>, de los contaminantes evaluados en el período de zafra se muestran en la tabla 5.7:

Tabla 5. 7

Valores promedios de moléculas /cm<sup>2</sup> para los contaminantes atmosféricos período de zafra

Fecha	Angulo (°)	Concentraciones (moléculas/cm <sup>2</sup> )				
		NO <sub>2</sub>	HCHO	HONO	O <sub>4</sub>	BrO
	3	1.89E+16	4.32E+16	6.48E+15	2.69E+43	2.02E+14
19/03/2015	10	2.02E+16	4.60E+16	6.95E+15	2.86E+43	2.09E+14
	30	2.41E+16	5.28E+16	7.16E+15	3.2E+43	2.38E+14
	3	2.33E+16	1.16E+16	1.66E+15	0.70E+43	0.43E+14
20/03/2015	10	2.14E+16	1.03E+16	1.66E+15	0.70E+43	0.38E+14
	30	2.71E+16	1.35E+16	1.92E+15	0.85E+43	0.51E+14
	3	2.28E+16	1.33E+16	1.65E+15	0.63E+43	0.57E+14
21/03/2015	10	2.16E+16	1.21E+16	1.68E+15	0.67E+43	0.50E+14
	30	2.76E+16	1.60E+16	2.12E+15	0.85E+43	0.63E+14
	3	4.53E+16	2.34E+16	2.92E+15	1.48E+43	0.79E+14
22/03/2015	10	3.97E+16	2.03E+16	2.60E+15	1.29E+43	0.72E+14
	30	3.93E+16	2.06E+16	2.64E+15	1.32E+43	0.76E+14

Nota: O<sub>4</sub> (moléculas/cm<sup>5</sup>)

Al analizar el comportamiento de los contaminantes involucrados en el estudio se evidencia que el día 22 de marzo de 2015 el valor promedio del  $\text{NO}_2$  se ve incrementado. Este aumento podría estar relacionado con la velocidad y dirección del viento, en ese día los contaminantes eran arrastrados hacia el lugar de la toma de datos porque el viento se mantuvo predominando en la dirección suroeste.

### 5.2.2 Campaña de no zafra.

La comparación de los valores medidos con los simulados se muestra en la figura 5.9.

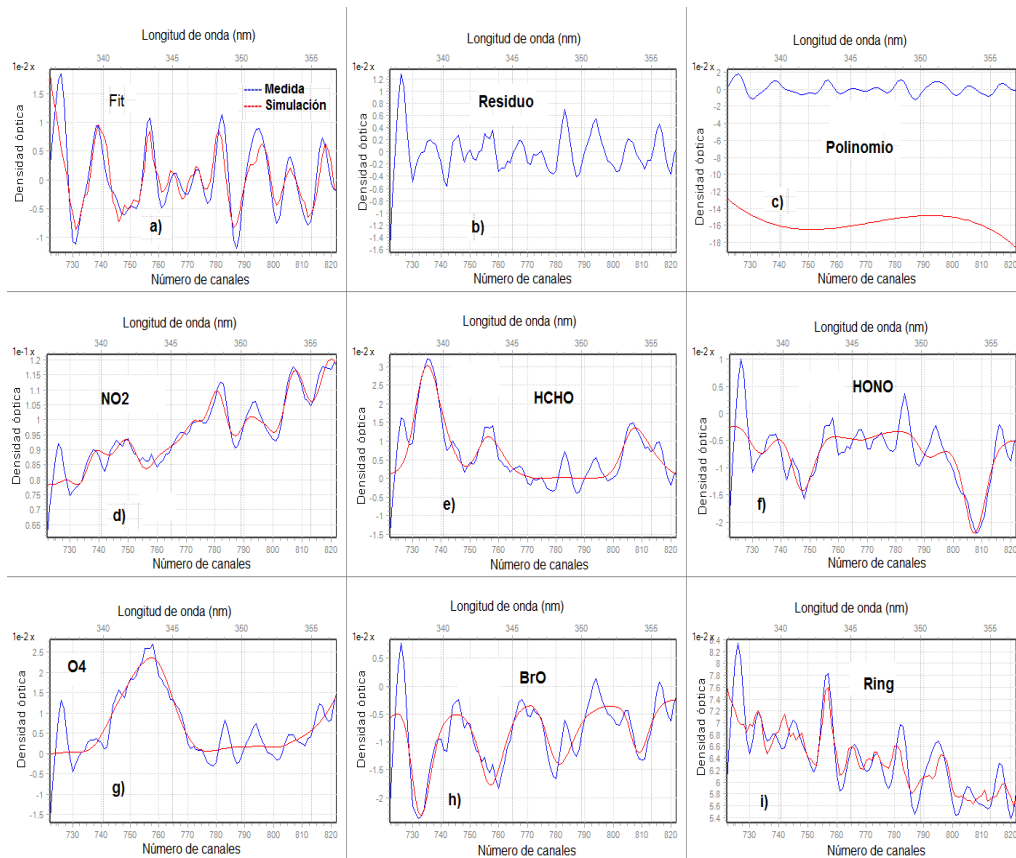


Figura 5. 9 Resultados para obtener las dSCD período de no zafra medida realizada (línea color azul), la simulación (línea color roja) para los espectros obtenidos de a) absorción total, b) residuo, c) polinomio, d)  $\text{NO}_2$ , e) HCHO, f) HONO, g)  $\text{O}_4$ , h) BrO, i) Ring

En la figura 5.9 se evidencia que la correlación entre los valores medidos y simulados es muy buena. Además las bandas de absorción de los gases utilizados se reproducen aceptablemente.

En la figura 5. 10 se muestra cómo fue el comportamiento del NO<sub>2</sub> durante el período de no zafra.

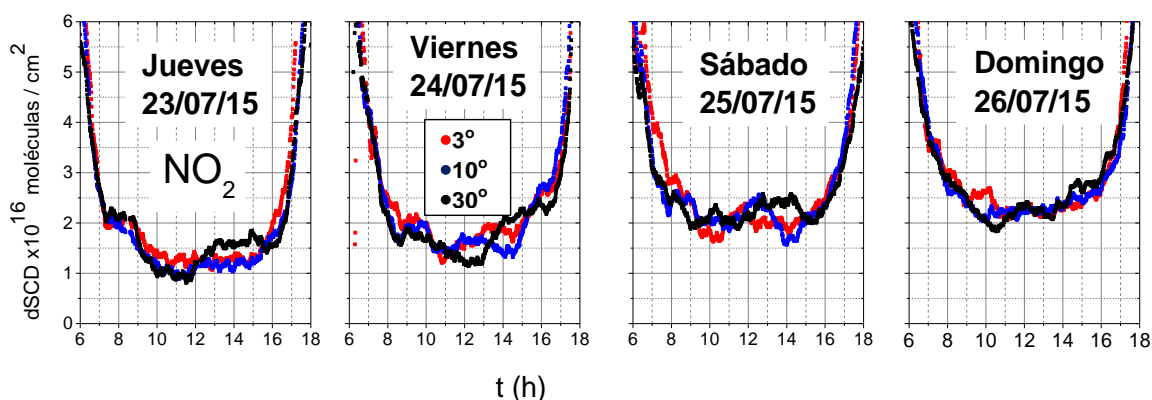


Figura 5. 10 Variación diurna del NO<sub>2</sub> período de no zafra

Para jueves 23 de julio se obtuvo un valor promedio de dSCD de  $1.4 \times 10^{16}$  moléculas/cm<sup>2</sup>, se observaron incrementos para las 8:00 AM, 13:00 y 17:00 horas. Para el viernes 24 de julio se obtuvo un valor promedio de dSCD de  $1.5 \times 10^{16}$  moléculas/cm<sup>2</sup>, se observaron incrementos para las 9:00 AM, 12:00 y 14:00 horas. Para el sábado 25 de julio se obtuvo un valor promedio de dSCD de  $2.5 \times 10^{16}$  moléculas/cm<sup>2</sup>, se observaron incrementos de las 10:00 a 14:00 horas. Para el domingo 26 de julio se obtuvo un valor promedio de dSCD de  $2.1 \times 10^{16}$  moléculas/cm<sup>2</sup>, se observaron incrementos de las 10:00 AM, 12:00 y a 15:00 horas

Los valores promedios mostrados en la tabla 5.8 se evidencia que la mayor concentración ocurrió para el día 26/07/15 y que la menor concentración fue para el 23/07/15.

Para la campaña de no zafra se observa una leve separación en los ángulos de elevación en las dSCD, lo que indica que la atmósfera estaba un poco limpia porque ya no estaba funcionando la fuente industrial.

En la tabla 5.8 se muestran los valores promedios obtenidos para el período de no zafra.

Tabla 5. 8

Valores promedios de moléculas /cm<sup>2</sup> de NO<sub>2</sub> período de no zafra

Angulo (°)	23/07/2015	24/07/2015	25/07/2015	26/07/2015
3	1.26E+16 ±5.52E+14	1.64E+16 ±7.75E+14	2.00E+16 ±5.38E+14	2.27E+16 ±2.54E+15
10	1.10E+16 ±5.22E+14	1.58E+16 ±4.34E+15	2.11E+16 ±3.16E+15	2.24E+16 ±1.36E+15
30	1.22E+16 ±3.81E+15	1.46E+16 ±2.68E+15	2.22E+16 ±2.32E+15	2.17E+16 ±1.88E+15

Los valores promedios de las dSCD se calcularon de 10:00 a las 14:00 horas, en la tabla 5.8 el día 25 y 26 de julio tienen un comportamiento similar.

Al graficar las dSCD y VCD se evidencia que hay una mayor cantidad de moléculas en las dSCD y menor valor en las VCD como se ilustra en la figura 5.11.

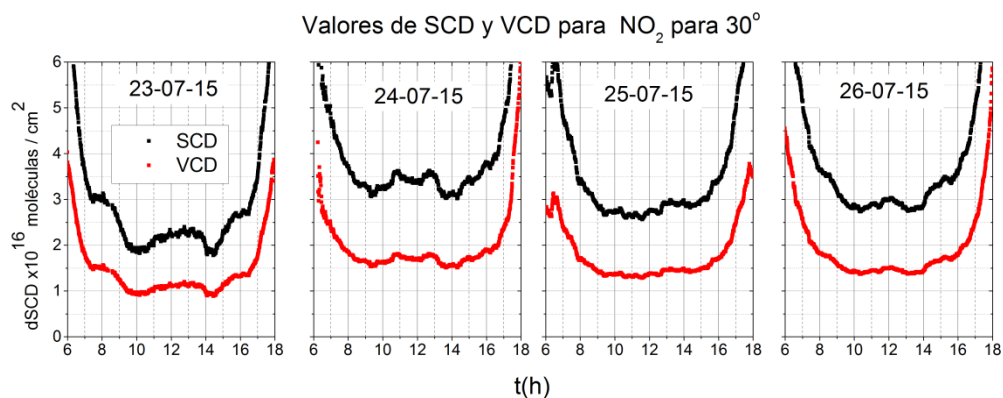


Figura 5. 11 Comparación de valores de SCD y VCD para NO<sub>2</sub> período de no zafra

En la figura 5.11 se muestra una mayor cantidad de moléculas en la columna inclinada y las curvas se observan separadas, lo que indica que la atmósfera estaba bastante limpia.

El comportamiento del HCHO se ilustra en la figura 5.12.

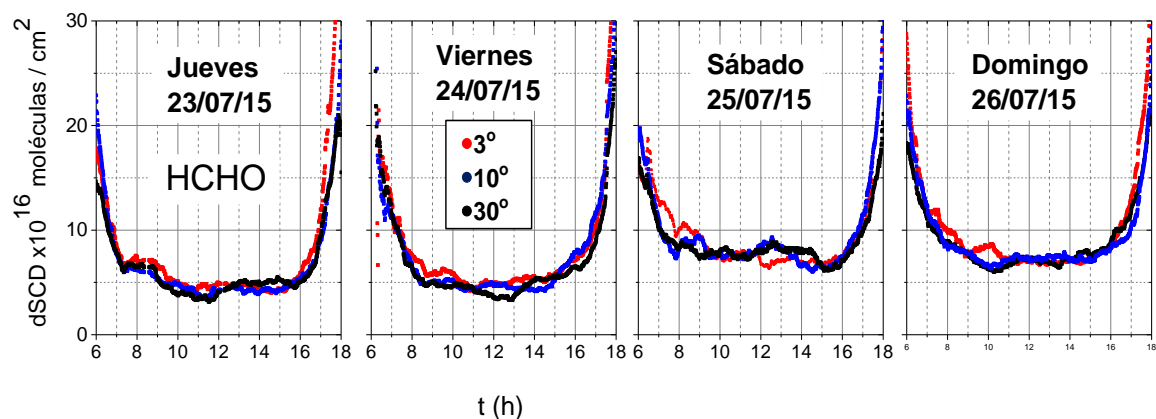


Figura 5. 12 Variación diurna del HCHO período de no zafra

Para el día sábado 25 de julio se determinó un valor de  $8 \times 10^{16}$  moléculas/cm<sup>2</sup> y se aprecian incrementos a 8:00 y 13:00 horas. Para los días 23 y 24/07/15 presentan



comportamiento similar con incrementos a las 9:00 horas. El valor mayor en concentraciones para HCHO se dio para el 25/07/15 y el de menor fue para el 23/07/15.

En la tabla 5.9 se muestran los valores promedios de las dSCD para el HCHO

Tabla 5. 9

Valores promedios de moléculas /cm<sup>2</sup> de HCHO período de no zafra

Angulo (°)	23/07/2015	24/07/2015	25/07/2015	26/07/2015
3	4.62E+16 ±4.49E+15	5.00E+16 ±2.38E+15	7.30E+16 ±5.08E+15	7.19E+16 ±9.72E+15
10	4.20E+16 ±5.46E+15	4.55E+16 ±7.18E+15	7.88E+16 ±8.17E+15	7.22E+16 ±3.62E+15
30	4.19E+16 ±6.60E+15	4.17E+16 ±4.27E+15	7.98E+16 ±1.75E+15	6.84E+16 ±4.98E+15

De la tabla 5.9 se muestra que las mayores concentraciones de las dSCD se dieron para el día 25 de julio.

En la figura 5.13 se muestra la variación del HONO

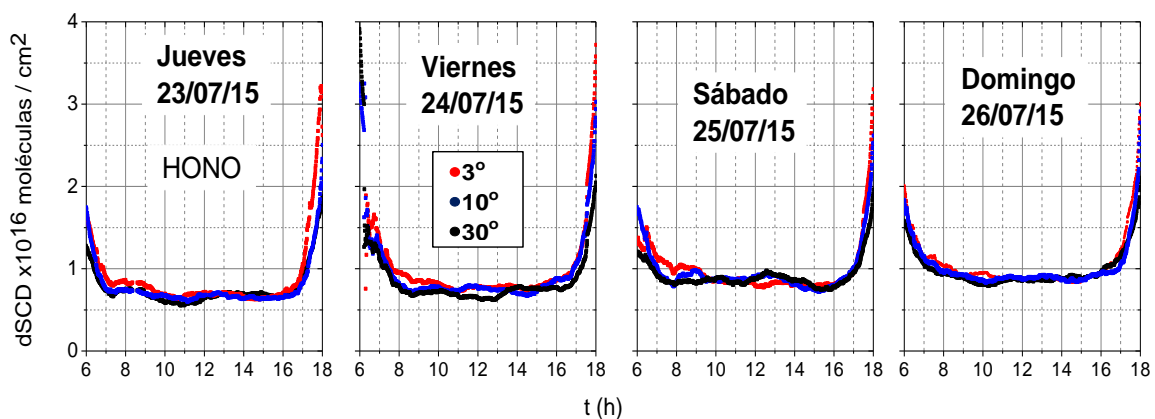


Figura 5. 13 Variación diurna del HONO período de no zafra

El HONO para el día sábado 25 julio presentó una concentración de  $0.9 \times 10^{16}$  moléculas/  $\text{cm}^2$ , con incrementos a las 13:00 horas, el día 26 de julio tuvo un comportamiento parecido al 25 de julio de 2015. Los valores promedios de la tabla 5.10 indican que el día donde se observó una mayor concentración fue el 26/07/15 y la menor el 23/07/15

Tabla 5. 10

Valores promedios de moléculas / $\text{cm}^2$  de HONO período de no zafra

Angulo ( $^{\circ}$ )	23/07/2015	24/07/2015	25/07/2015	26/07/2015
3	$6.84\text{E}+15$ $\pm 2.07\text{E}+14$	$7.71\text{E}+15$ $\pm 3.26\text{E}+14$	$8.31\text{E}+15$ $\pm 3.93\text{E}+14$	$8.86\text{E}+15$ $\pm 5.56\text{E}+14$
10	$6.58\text{E}+15$ $\pm 2.36\text{E}+14$	$7.49\text{E}+15$ $\pm 5.96\text{E}+14$	$8.83\text{E}+15$ $\pm 4.64\text{E}+14$	$8.86\text{E}+15$ $\pm 1.30\text{E}+13$
30	$6.35\text{E}+15$ $\pm 6.45\text{E}+14$	$6.80\text{E}+15$ $\pm 3.89\text{E}+14$	$8.81\text{E}+15$ $\pm 6.29\text{E}+13$	$8.54\text{E}+15$ $\pm 4.43\text{E}+14$

En la figura 5.14 se muestra la variación diurna del  $\text{O}_4$

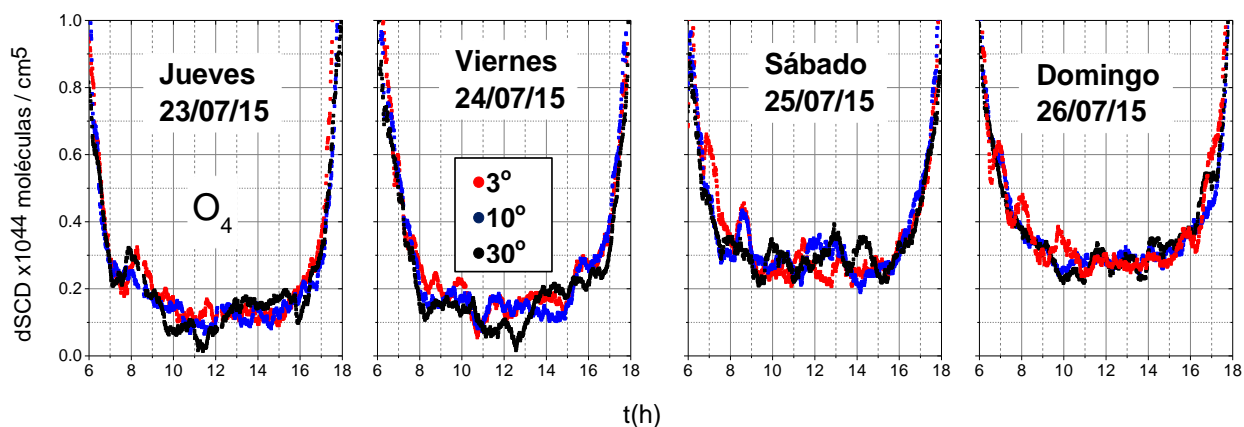


Figura 5. 14 Variación diurna del O<sub>4</sub> período de no zafra

El jueves 23 de julio presentó un valor promedio en las dSCD de  $0.3 \times 10^{44}$  moléculas/cm<sup>5</sup>, para el sábado 25 se obtuvo un valor de  $0.4 \times 10^{44}$  moléculas/cm<sup>5</sup>. En la tabla 5.11 se muestran los promedios para el O<sub>4</sub>

Tabla 5. 11

Valores promedios de moléculas /cm<sup>2</sup> de O<sub>4</sub> período de no zafra

Angulo (°)	23/07/2015	24/07/2015	25/07/2015	26/07/2015
3	1.24E+43 ±4.70E+42	1.48E+43 ±3.29E+42	2.60E+43 ±1.91E+42	2.79E+43 ±3.02E+42
10	1.13E+43 ±2.44E+41	1.41E+43 ±3.20E+42	2.89E+43 ±3.67E+42	2.85E+43 ±3.23E+42
30	1.03E+43 ±5.26E+42	1.07E+43 ±4.41E+42	2.92E+43 ±1.06E+42	2.66E+43 ±6.51E+42

En la figura 5.15 se muestra la variación del BrO

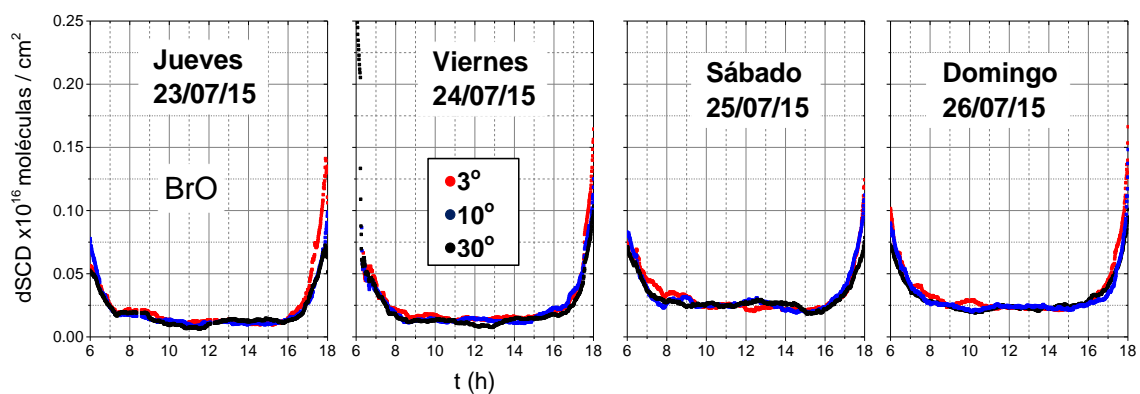


Figura 5. 15 Variación diurna del BrO período de no zafra

El BrO presentó una variación similar los días jueves 23 y viernes 24 de julio. El día con mayor concentración fue el 26/07/15 y el de menor concentración fue el 23/07/15.

En la tabla 5.12 se muestran los valores promedios de las dSCD para el BrO

Tabla 5. 12

Valores promedios de moléculas /cm<sup>2</sup> de BrO período de no zafra

Angulo (°)	23/07/2015	24/07/2015	25/07/2015	26/07/2015
3	1.20E+14 ±1.69E+13	1.46E+14 ±9.40E+12	2.37E+14 ±2.27E+13	2.37E+14 ±4.54E+13
10	1.09E+14 ±2.20E+13	1.29E+14 ±2.41E+13	2.59E+14 ±3.20E+13	2.35E+14 ±9.61E+12
30	1.03E+14 ±1.92E+13	1.11E+14 ±1.02E+13	2.63E+14 ±8.65E+12	2.24E+14 ±1.51E+13

En la tabla 5.13 se muestran los valores promedios de cada uno de los contaminantes para los diferentes días de la campaña de medición realizada en el período de no zafra.

Tabla 5. 13

Valores promedios de moléculas /cm<sup>2</sup> para los contaminantes atmosféricos período de no zafra

Fecha	Angulo (°)	Concentraciones (moléculas/cm <sup>2</sup> )				
		NO <sub>2</sub>	HCHO	HONO	O <sub>4</sub>	BrO
	3	1.26E+16	4.62E+16	6.84E+15	1.24E+43	1.20E+14
23/07/2015	10	1.10E+16	4.20E+16	6.58E+15	1.13E+43	1.09E+14
	30	1.22E+16	4.19E+16	6.35E+15	1.03E+43	1.03E+14
	3	1.64E+16	5.00E+16	7.71E+15	1.48E+43	1.46E+14
24/07/2015	10	1.58E+16	4.55E+16	7.49E+15	1.41E+43	1.29E+14
	30	1.46E+16	4.17E+16	6.80E+15	1.07E+43	1.11E+14
	3	2.00E+16	7.30E+16	8.31E+15	2.60E+43	2.37E+14
25/07/2015	10	2.11E+16	7.88E+16	8.83E+15	2.89E+43	2.59E+14
	30	2.22E+16	7.98E+16	8.81E+15	2.92E+43	2.63E+14
	3	2.27E+16	7.19E+16	8.86E+15	2.79E+43	2.37E+14
26/07/2015	10	2.24E+16	7.22E+16	8.86E+15	2.85E+43	2.35E+14
	30	2.17E+16	6.84E+16	8.54E+15	2.66E+43	2.24E+14

Nota: O<sub>4</sub> (moléculas/cm<sup>5</sup>)

### 5.2.3 Comparación de la campaña de zafra y no zafra.

Para realizar la comparación se determinó el valor promedio de moléculas/ cm<sup>2</sup> para cada ángulo de los días evaluados, se analizó el intervalo de tiempo de 10:00 horas hasta las 14:00 horas. Este proceso se realizó para el NO<sub>2</sub>.

## Evaluación del NO<sub>2</sub>

Tabla 5. 14

Comparación de los valores promedios de moléculas /cm<sup>2</sup> de NO<sub>2</sub>

Día/ ángulo	zafra moléculas / cm <sup>2</sup>	no zafra moléculas / cm <sup>2</sup>	Diferencia moléculas/cm <sup>2</sup> $\hat{Z} - \text{no}\hat{Z}$	Probabilidad P(T<=t) t student	Incremento ( %)	Conclusión
jueves	19/03/2015	23/07/2015				
3°	1.89E+16 ± .56E+15	1.26E+16 ±5.52E+14	6.24E+15	0.0051	49%	Zafra > no zafra
10°	2.02E+16 ± .74E+15	1.10E+16 ±5.22E+14	9.30E+15		85%	Zafra > no zafra
30°	2.41E+16 ±3.54E+15	1.22E+16 ±3.81E+15	1.19E+16		97%	Zafra > no zafra
viernes	20/03/2015	24/07/2015				
3°	2.33E+16 ±1.63E+15	1.64E+16 ±7.75E+14	6.90E+15	0.0091	42%	Zafra > no zafra
10°	2.14E+16 ±1.64E+15	1.58E+16 ±4.34E+15	5.59E+15		35%	Zafra > no zafra
30°	2.71E+16 ±1.20E+15	1.46E+16 ±2.68E+15	1.24E+16		85%	Zafra > no zafra
sábado	21/03/2015	25/07/2015				
3°	2.28E+16 ±1.66E+15	2.00E+16 ±5.38E+14	2.75E+15	0.2141	14%	Zafra > no zafra
10°	2.16E+16 ±1.87E+15	2.11E+16 ±3.16E+15	4.72E+14		2%	Zafra > no zafra
30°	2.76E+16 ±1.95E+15	2.22E+16 ±2.32E+15	5.37E+15		24%	Zafra > no zafra
domingo	22/03/2015	26/07/2017				
3°	4.53E+16 ±3.16E+15	2.27E+16 ±2.54E+15	2.26E+16	0.0101	100%	Zafra > no zafra
10°	3.97E+16 ±2.65E+15	2.24E+16 ±1.36E+15	1.74E+16		77%	Zafra > no zafra
30°	3.93E+16 ±2.88E+15	2.17E+16 ±1.88E+15	1.76E+16		81%	Zafra > no zafra

Los valores en las concentraciones de moléculas /cm<sup>2</sup> para NO<sub>2</sub> en el período de zafra muestran un incremento en relación a los del período de no zafra. Ese incremento ha alcanzado valores del 100% en relación al período de no zafra. Por ejemplo el mayor incremento se dio el día 22/03/15 en relación al 25/07/2015 para el ángulo de elevación.

Para comprobar el nivel de significancia de los datos obtenidos en el período de zafra y no zafra se aplicó la Prueba t de Student, asignándole un nivel de significancia de 0.05 y al hacer al análisis de la muestra se obtienen probabilidades menores al nivel de significancia, lo que indica que la diferencia entre las muestras es significativa.

En los siguientes gráficos se evidencia que los niveles de NO<sub>2</sub> en periodo de zafra y no zafra son diferentes. Para el 19/03/15 se ilustra en la figura 5.16.

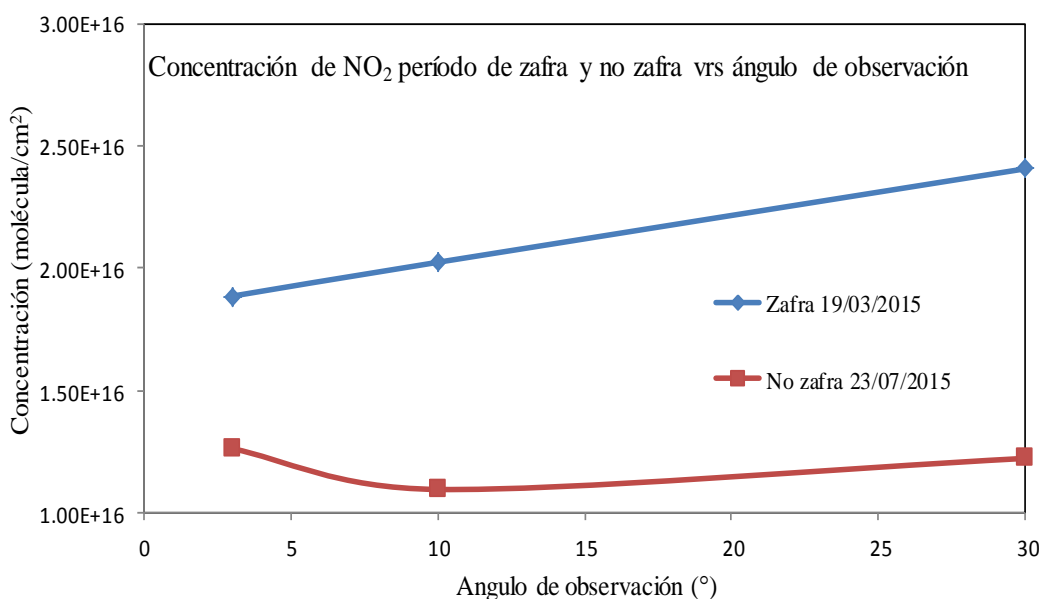


Figura 5. 16 Comparación de valores promedios de moléculas/cm<sup>2</sup> de NO<sub>2</sub> para período de zafra y no zafra (19/03/15 y 23/07/15).

En las figuras 5.17, 5.18 y 5.19 se evidencia que los valores obtenidos para el período de zafra son mayores que los de no zafra.

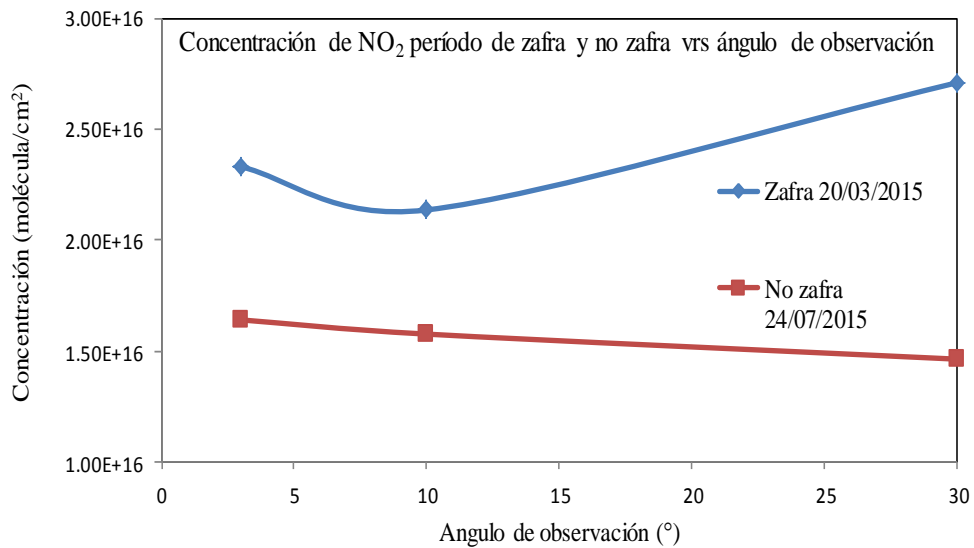


Figura 5. 17 Comparación de valores promedios de moléculas/cm<sup>2</sup> de NO<sub>2</sub> para período de zafra y no zafra, al compararlos se ve incrementados en zafra (20/03/15 y 24/07/15).

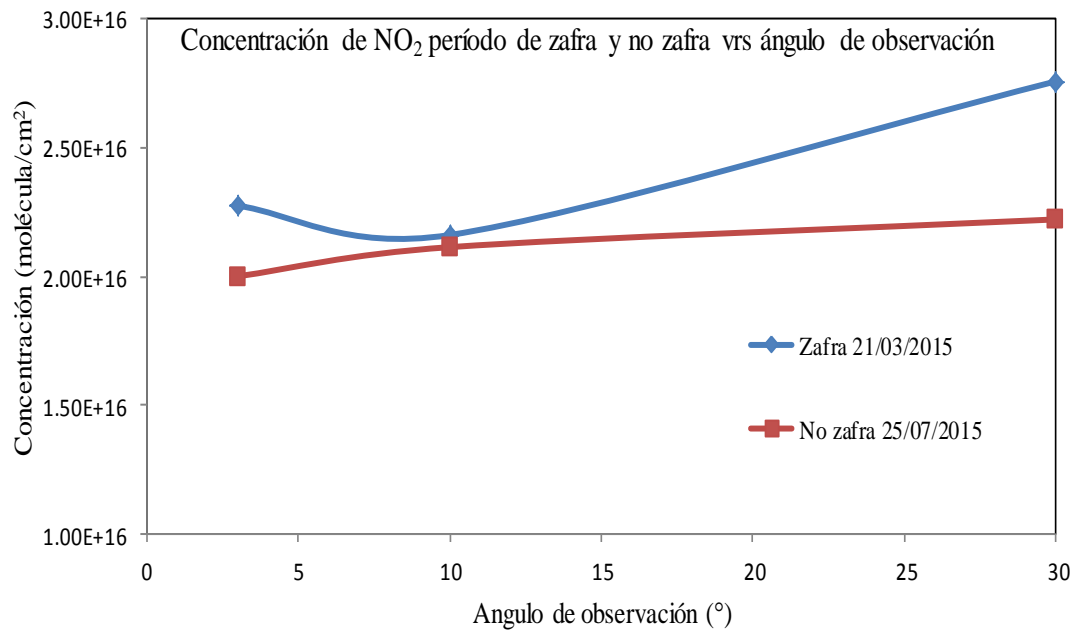


Figura 5. 18. Comparación de valores promedios de moléculas/cm<sup>2</sup> de NO<sub>2</sub> para período de zafra y no zafra (21/03/15 y 25/07/15)



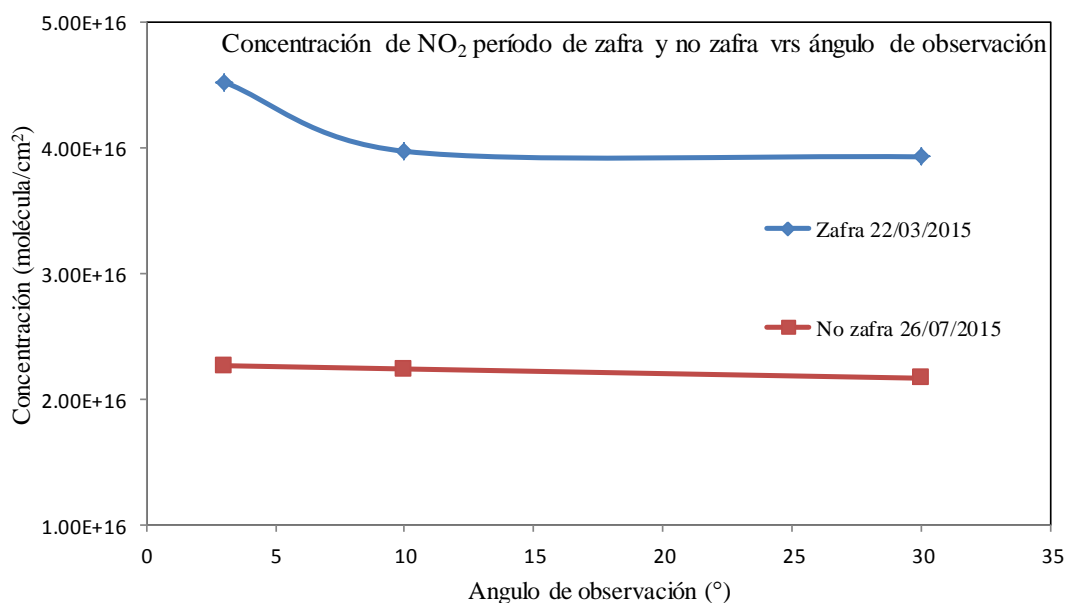


Figura 5. 19 Comparación de valores promedios de moléculas/cm<sup>2</sup> de NO<sub>2</sub> para período de zafra y no zafra (22/03/15 y 26/07/15)

### Evaluación del O<sub>4</sub>

El comportamiento del O<sub>4</sub> fue el siguiente para el 19/03/15 las concentraciones fueron mayores que el periodo de no zafra específicamente en relación al 23/07/15. En período de zafra para ese día se dieron incrementos del 216%, 152% y 117%. Ese comportamiento de que el O<sub>4</sub> en algunos días se vea disminuido podría estar asociado a un incremento de los aerosoles.

## 5.2.4 Comparación de la campaña de zafra con otras ciudades.

### 5.2.4.1 Comparación de los niveles de $\text{NO}_2$ de la Ciudad de San Miguel y la Ciudad de San Salvador.

Cuando se realizaron las mediciones de la campaña de zafra en la ciudad de San Miguel, una semana antes se realizó una campaña en la Ciudad de San Salvador específicamente en la Col. Escalón de la Ciudad de San Salvador. Para la Colonia Escalón se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la tabla 5.15

Tabla 5. 15

Valores promedios de moléculas / $\text{cm}^2$  de  $\text{NO}_2$  obtenidos en Col Escalón.

Angulo ( $^\circ$ )	12/03/2015	13/03/2015	14/03/2015	15/03/2015
3	2.95E+16	1.38E+16	3.18E+16	4.38E+16
10	2.76E+16	1.37E+16	3.41E+16	4.26E+16
30	2.95E+16	1.36E+16	3.25E+16	4.27E+16

Se compararon los valores promedios de moléculas/ $\text{cm}^2$  obtenidos para ambas ciudades en el intervalo de tiempo de las 10:00 horas hasta las 14:00 horas. Los resultados se muestran en la tabla 5.16. Los valores obtenidos muestran que en la Colonia Escalón se obtuvieron mayores concentraciones de  $\text{NO}_2$  en el período de zafra que los medidos en San Miguel. Una situación que se debe considerar es que la Ciudad de San Salvador superficialmente es más pequeña que San Miguel pero tiene una mayor densidad poblacional

y que las actividades antropogénicas podrán estar generando un incremento en los niveles de NO<sub>2</sub>.

Tabla 5. 16

Comparación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> para la Ciudad de San Miguel y Colonia Escalón de la Ciudad de San Salvador

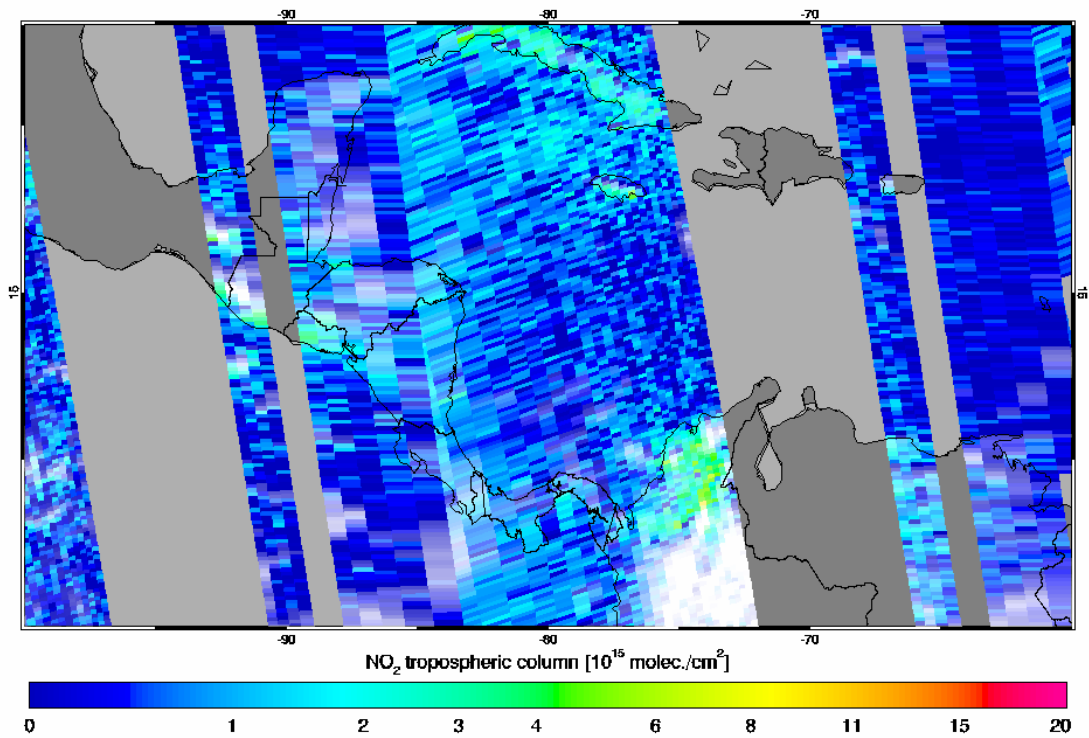
<b>Día/ ángulo</b>	<b>Campaña zafra (moléculas / cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Col. Escalón (moléculas / cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Diferencia (moléculas/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Incremento</b>
<b>jueves</b>	<b>19/03/2015</b>	<b>12/03/2015</b>	<b>Ź- Col.E</b>	<b>( %)</b>
3°	1.89E+16	2.95E+16	-1.07E+16	-36%
10°	2.02E+16	2.76E+16	-7.30E+15	-27%
30°	2.41E+16	2.95E+16	-5.41E+15	-18%
<b>viernes</b>	<b>20/03/2015</b>	<b>13/03/2015</b>		
3°	2.33E+16	1.38E+16	9.54E+15	69%
10°	2.14E+16	1.37E+16	7.67E+15	56%
30°	2.71E+16	1.36E+16	1.35E+16	99%
<b>sábado</b>	<b>21/03/2015</b>	<b>14/03/2015</b>		
3°	2.28E+16	3.18E+16	-9.04E+15	-28%
10°	2.16E+16	3.41E+16	-1.25E+16	-37%
30°	2.76E+16	3.25E+16	-4.88E+15	-15%
<b>domingo</b>	<b>22/03/2015</b>	<b>15/03/2015</b>		
3°	4.53E+16	4.38E+16	1.43E+15	3%
10°	3.97E+16	4.26E+16	-2.85E+15	-7%
30°	3.93E+16	4.27E+16	-3.36E+15	-8%

#### ***5.2.4.2 Comparación de los niveles de NO<sub>2</sub> de la Ciudad de San Miguel y la Ciudad de Sonsonate.***

Los datos obtenidos en la Ciudad de San Miguel en período de zafra también se compararon con los datos recuperados por OMI que está ubicado en el satélite Aura de la NASA. Aura está dedicada a la observación de ozono, la calidad del aire y el clima.

El OMI fue lanzado el 15 de julio de 2004 y es una contribución de la Agencia de los Países Bajos para Programas Aeroespaciales (NIVR) en colaboración con el Instituto Meteorológico de Finlandia (FMI). (Wilson, 2007). OMI capta información sobre contaminación atmosférica en casi todas las regiones de la tierra.

Para determinar los valores de concentración proporcionados por OMI se seleccionó el mapa de El Salvador y en él las ciudades en estudio, se compararon los colores de la ciudad seleccionada con la escala de colores que aparece en la parte inferior de cada figura y se asigna el valor. Se seleccionó la ciudad de Sonsonate y se evaluaron los días: 19, 20, 21 y 22 de marzo de 2015. Para el día 19/03/15, el OMI reportó una concentración de  $2.0 \times 10^{15}$  moléculas/cm<sup>2</sup> (figura 5. 20)



*Figura 5. 1*

*Figura 5. 20* Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 19/03/2015.  
(Regional Tropospheric NO<sub>2</sub> columns from OMI, 2015)

Para el día 20/03/15, el OMI reportó una concentración de  $2.5 \times 10^{15}$  moléculas/cm<sup>2</sup>.

Como se muestra en la figura. 5. 21

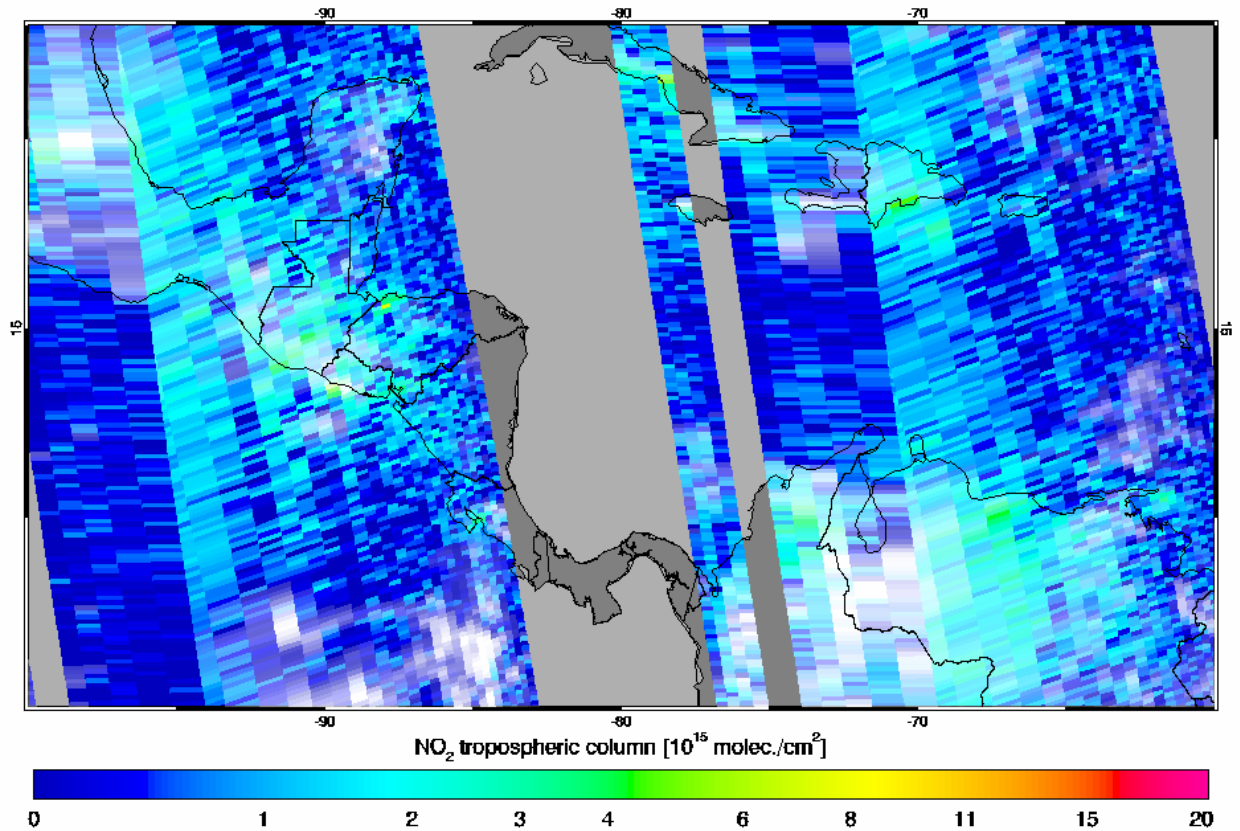


Figura 5. 21 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 20/03/2015

(Regional Tropospheric NO<sub>2</sub> columns from OMI, 2015)

Para el día 21/03/15, el OMI no recuperó concentración de NO<sub>2</sub> para Sonsonate como se ilustra en la figura 5. 22

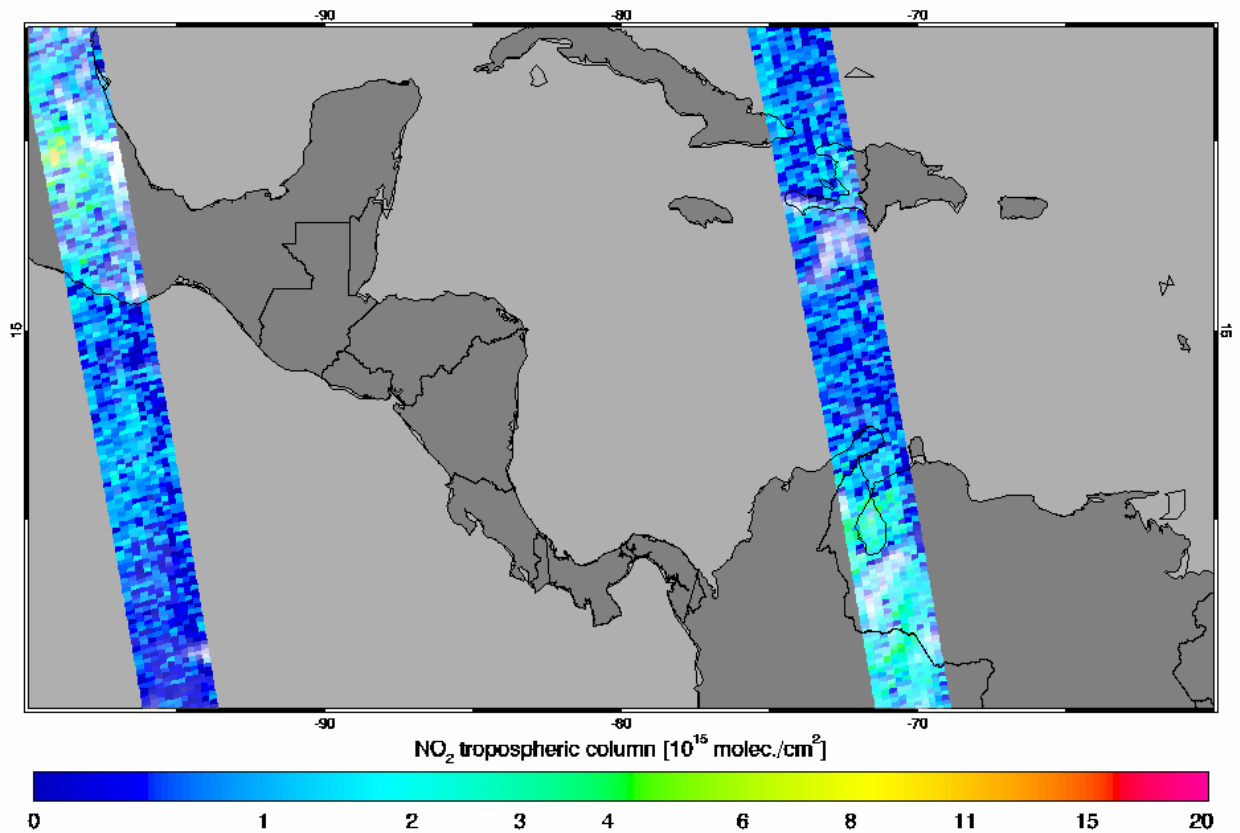


Figura 5. 22 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 21/03/2015  
(Regional Tropospheric NO<sub>2</sub> columns from OMI, 2015)

Para el día 22/03/15, el OMI reportó una concentración de  $1.0 \times 10^{15}$  moléculas/cm<sup>2</sup>.

Como se muestra en la figura 5. 23

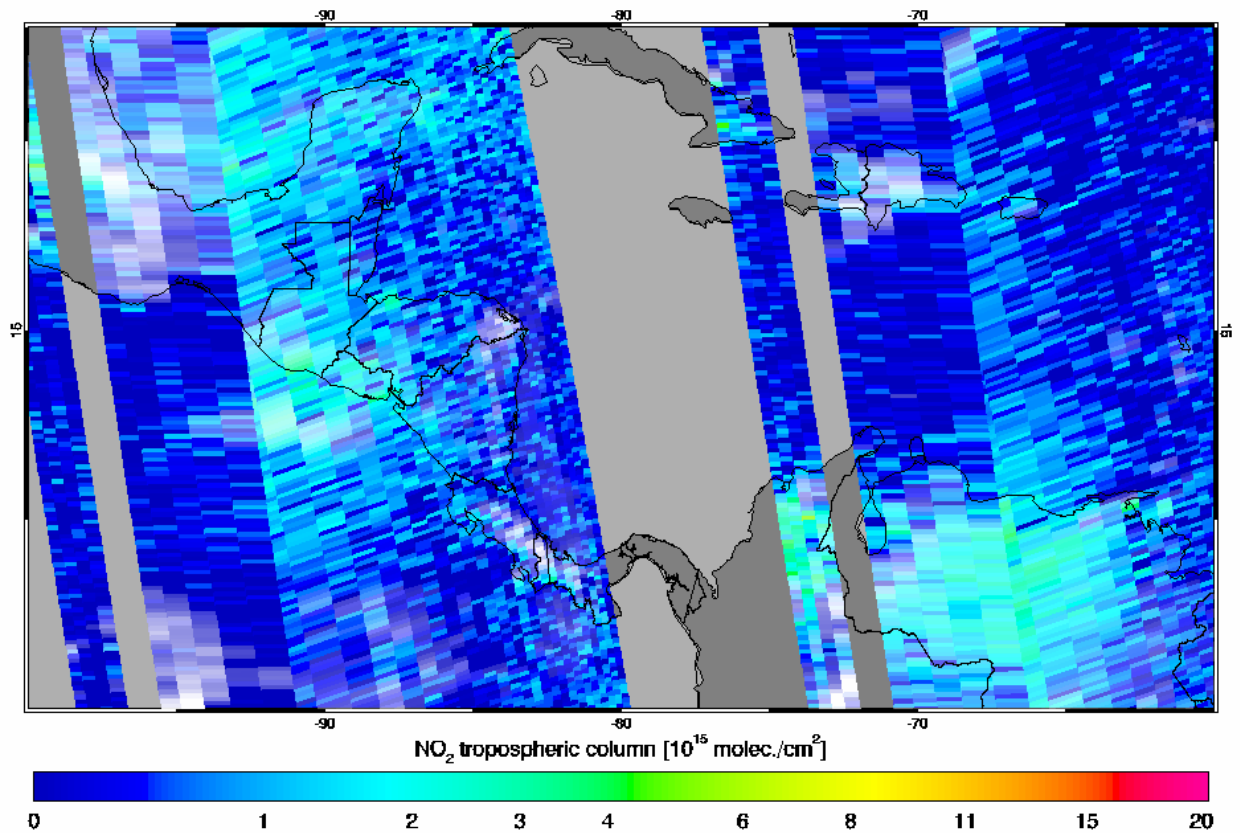


Figura 5. 23 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 22/03/2015

(Regional Tropospheric NO<sub>2</sub> columns from OMI, 2015)

El OMI no reporta los datos por ángulos de observación, sino que lo reportan como el valor de la columna del NO<sub>2</sub> para la tropósfera. Los resultados de las comparaciones se muestran en la tabla 5.17



Tabla 5. 17

Comparación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> (VCD) para las ciudades de San Miguel y Sonsonate (OMI)

Día/ ángulo	Campaña zafra	OMI, Sonsonate
	moléculas / cm <sup>2</sup>	moléculas / cm <sup>2</sup>
<b>jueves</b>	<b>19/03/2015</b>	<b>19/03/2015</b>
30°	1.205E+16	2.00 E+15
<b>viernes</b>	<b>20/03/2015</b>	<b>20/03/2015</b>
30°	1.355E+16	2.50E+15
<b>sábado</b>	<b>21/03/2015</b>	<b>21/03/2015</b>
30°	1.38E+16	No reportaron datos
<b>domingo</b>	<b>22/03/2015</b>	<b>22/03/2015</b>
30°	1.965E+16	1.00E+15

Al comparar las mediciones realizadas en la Ciudad de San Miguel en la superficie con los reportados por OMI desde el espacio son diferentes. Los valores obtenidos en San Miguel son mayores, que los obtenidos por OMI.

### 5.2.5 Comparación de la campaña de no zafra con otras ciudades.

#### 5.2.5.1 Comparación con la Ciudad de San Miguel con Santa Ana y Santa Tecla.

Para el día 23/07/15, el OMI reportó una concentración de  $0.5 \times 10^{15}$  moléculas/cm<sup>2</sup> para Santa Ana y  $0.6 \times 10^{15}$  moléculas/cm<sup>2</sup> para Santa Tecla, como se muestra en la figura 5. 24.

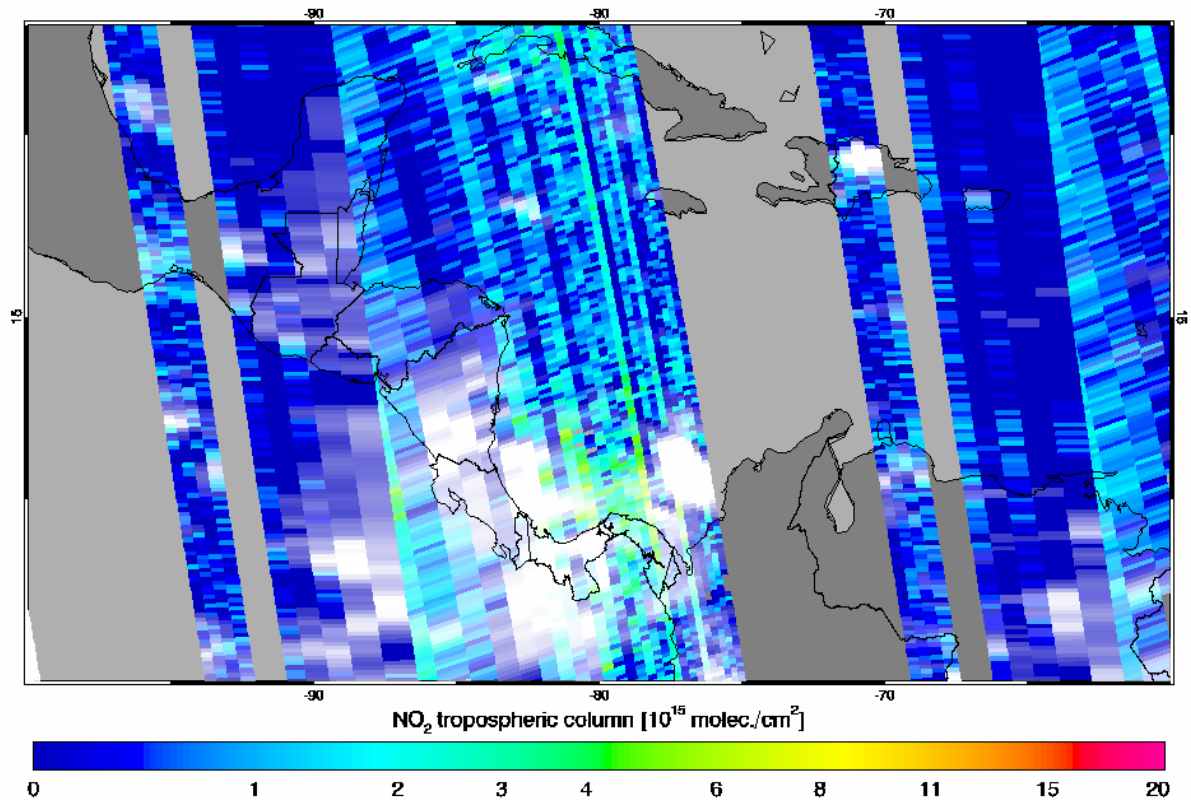
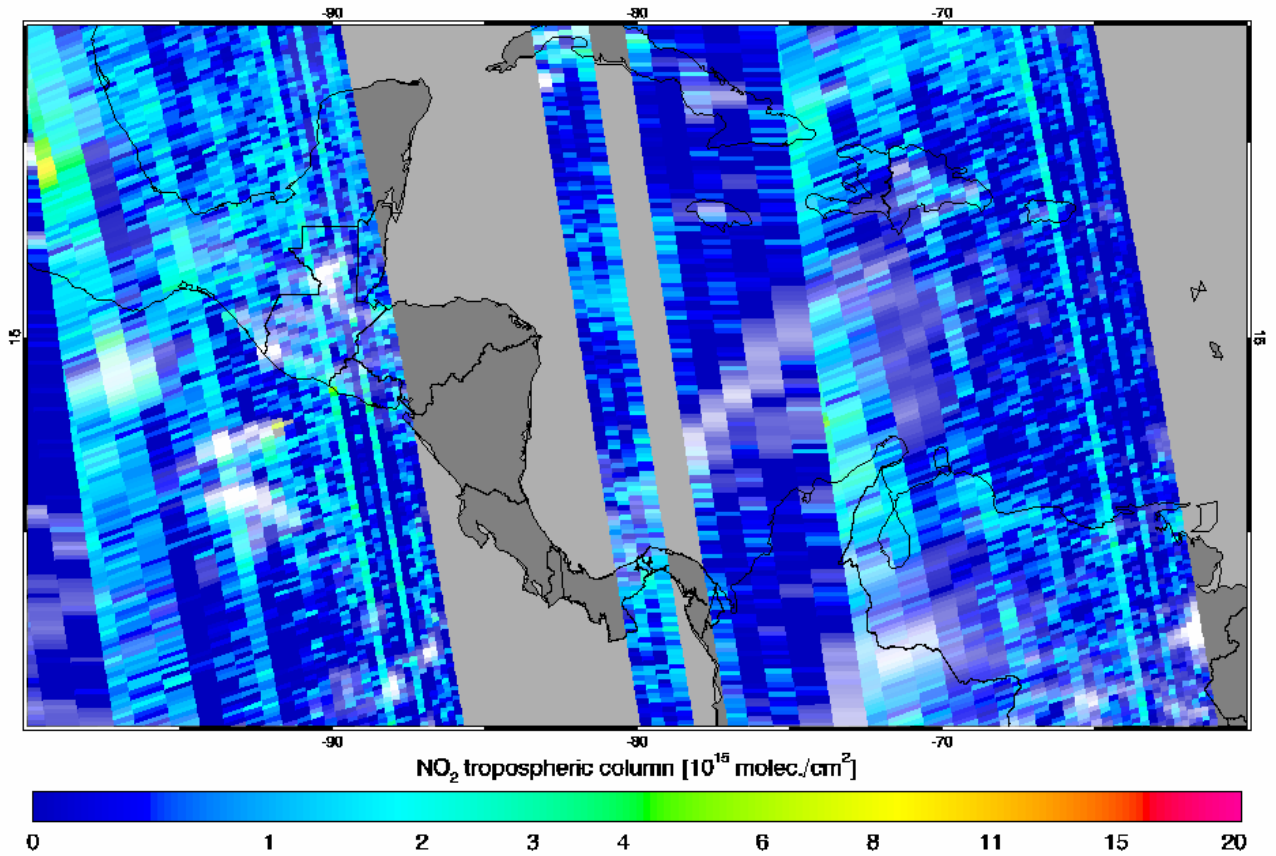


Figura 5. 24 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 23/07/2015

(Regional Tropospheric NO<sub>2</sub> columns from OMI, 2015)

Para el día 24/07/15, el OMI reportó una concentración de  $2.0 \times 10^{15}$  moléculas/cm<sup>2</sup> para Santa Ana y  $0.6 \times 10^{15}$  moléculas/cm<sup>2</sup> para Santa Tecla, como se ilustra en la figura 5. 25.



*Figura 5. 25* Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 24/07/2015

(Regional Tropospheric NO<sub>2</sub> columns from OMI, 2015)

Para el día 25/07/15, el OMI reportó una concentración de  $2.0 \times 10^{15}$  moléculas/cm<sup>2</sup> para Santa Ana y  $2.5 \times 10^{15}$  moléculas/cm<sup>2</sup> para Santa Tecla, figura 5. 26.

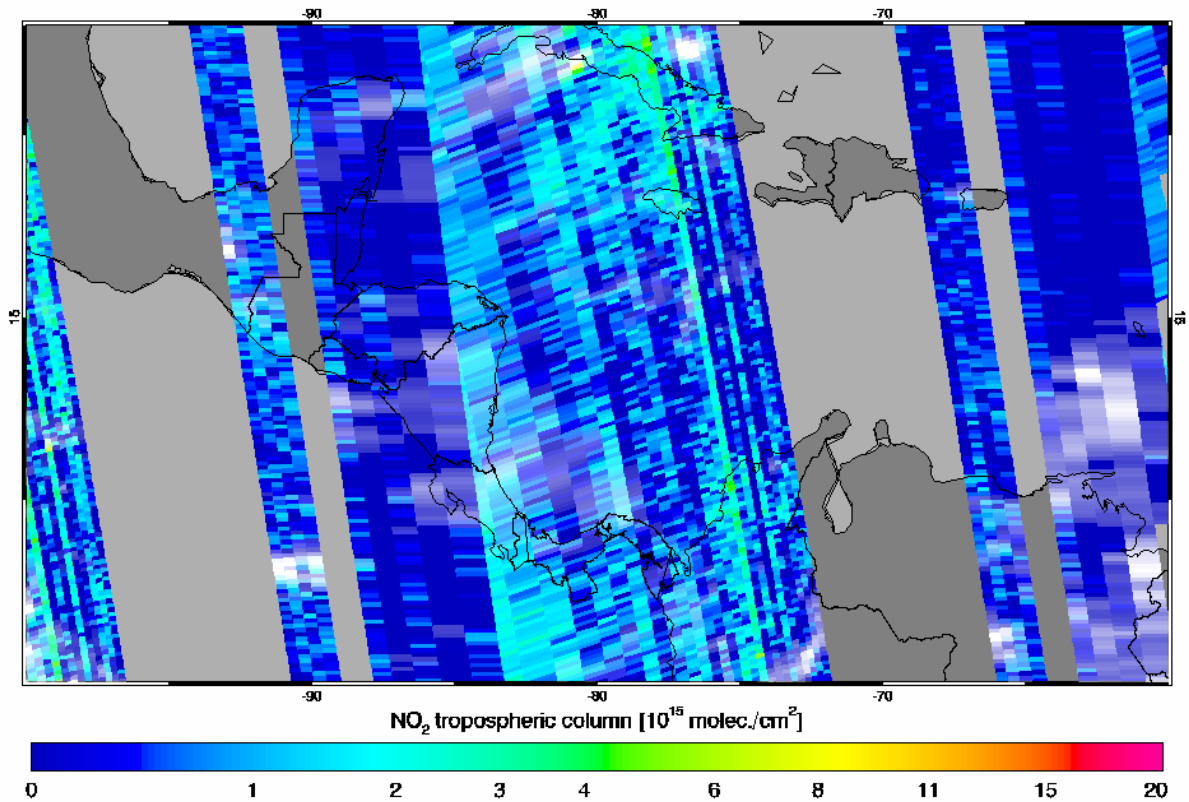


Figura 5. 26 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 25/07/2015

(Regional Tropospheric NO<sub>2</sub> columns from OMI, 2015)

Para el día 26/07/15, el OMI reportó una concentración de  $2.0 \times 10^{15}$  moléculas/cm<sup>2</sup> para Santa Ana y  $2.0 \times 10^{15}$  moléculas/cm<sup>2</sup> para Santa Tecla, figura 5. 27

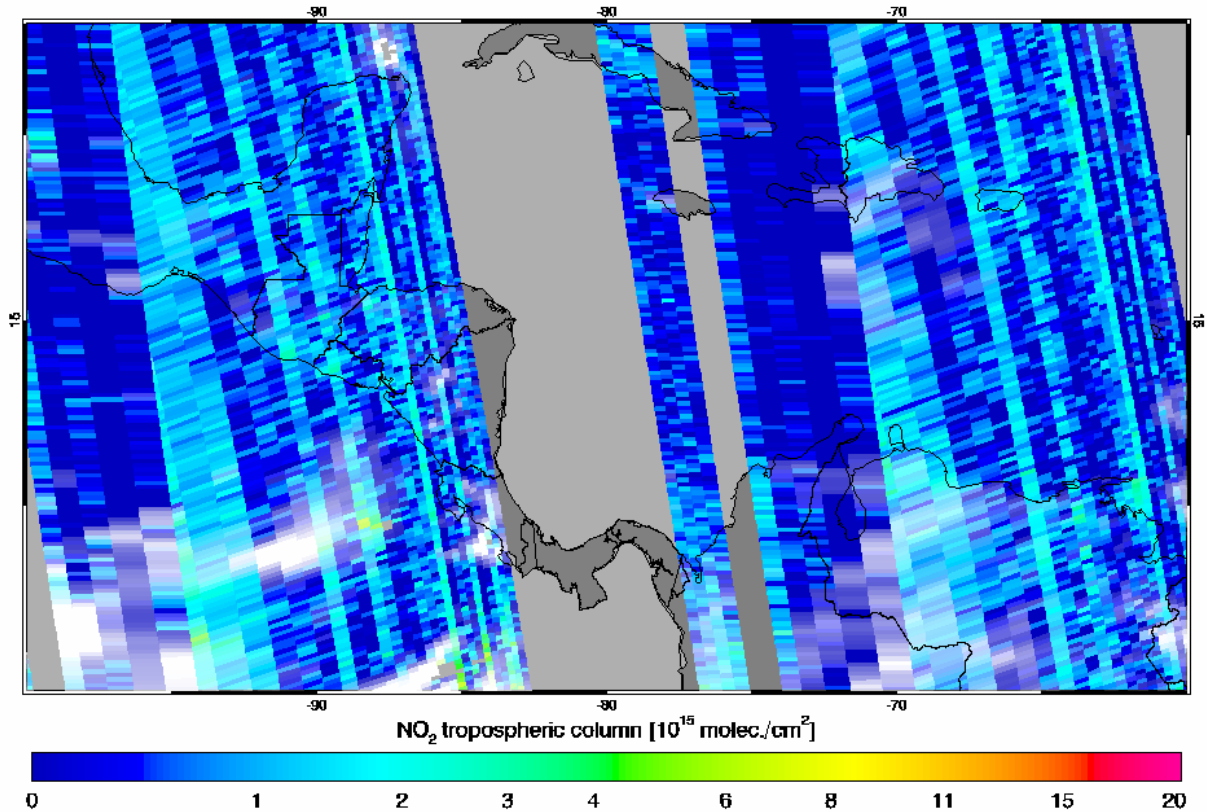


Figura 5. 27 Valores de la columna de NO<sub>2</sub> troposférico para El Salvador 26/07/2015

(Regional Tropospheric NO<sub>2</sub> columns from OMI, 2015)

Las comparaciones de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en período de no zafra se muestran en la tabla 5.18. Al comparar los valores medidos en la Ciudad de San Miguel son diferentes a los reportados por OMI para la misma fecha. Los valores obtenidos para San Miguel son mayores que los que recuperó OMI para Santa Ana y para Santa Tecla.

Tabla 5. 18

Comparación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> (VCD) para las ciudades de San Miguel con Santa Ana (OMI) y Santa Tecla (OMI)

<b>Día/ ángulo</b>	<b>Campaña no zafra</b>	<b>Santa Ana</b>	<b>Santa Tecla</b>
	<b>moléculas / cm<sup>2</sup></b>	<b>moléculas / cm<sup>2</sup></b>	<b>moléculas / cm<sup>2</sup></b>
<b>jueves</b>	<b>23/07/2015</b>	<b>23/07/2015</b>	<b>23/07/2015</b>
30°	6.10+15	0.50 E+15	0.60 E+15
<b>viernes</b>	<b>24/07/2015</b>	<b>24/07/2015</b>	<b>24/07/2015</b>
30°	7.30E+15	2.00 E+15	0.60 E+15
<b>sábado</b>	<b>25/07/2015</b>	<b>25/07/2015</b>	<b>25/07/2015</b>
30°	1.11E+16	2.00 E+15	2.50 E+15
<b>domingo</b>	<b>26/07/2017</b>	<b>26/07/2017</b>	<b>26/07/2017</b>
30°	1.08E+16	2.00 E+15	2.00E+15

### 5.3 Análisis de datos metrológicos para época de zafra

La concentración de contaminantes en la atmósfera depende de la relación de fuerzas entre las fuentes contaminantes y de las condiciones atmosféricas como la temperatura, humedad relativa, nubosidad, velocidad y dirección del viento. Las condiciones atmosféricas pudieron afectar la rapidez con que los contaminantes se acercaran o alejaran de la zona donde se recolectaron los datos. La velocidad del viento afectó la concentración de contaminantes en la Ciudad de San Miguel, mientras mayor era la velocidad del viento menor fue la concentración de contaminantes. La dirección del viento modificó el comportamiento de las dSCD cuando la dirección fue Suroeste o Sureste los contaminantes provenientes de la zona industrial eran arrastrados para el área donde se estaban recolectando los datos. La nubosidad afectó en algunos momentos la absorción de fotones, la presencia de la nubosidad fue variada durante la campaña, cuando estaba nublado la absorción disminuyó, la presencia

de nubes modifica el camino óptico de los fotones y con ello cambia la densidad óptica de los contaminantes. La temperatura tiene efectos significativos sobre las secciones transversales de absorción diferencial, el valor de éstas aumentan con la disminución de la temperatura.

### Jueves 19/03/15

**Temperatura** durante la mañana fue incrementándose hasta alcanzar un valor máximo de 35.7 °C y una temperatura mínima de 21 °C cómo se ilustra en la figura 5.28.

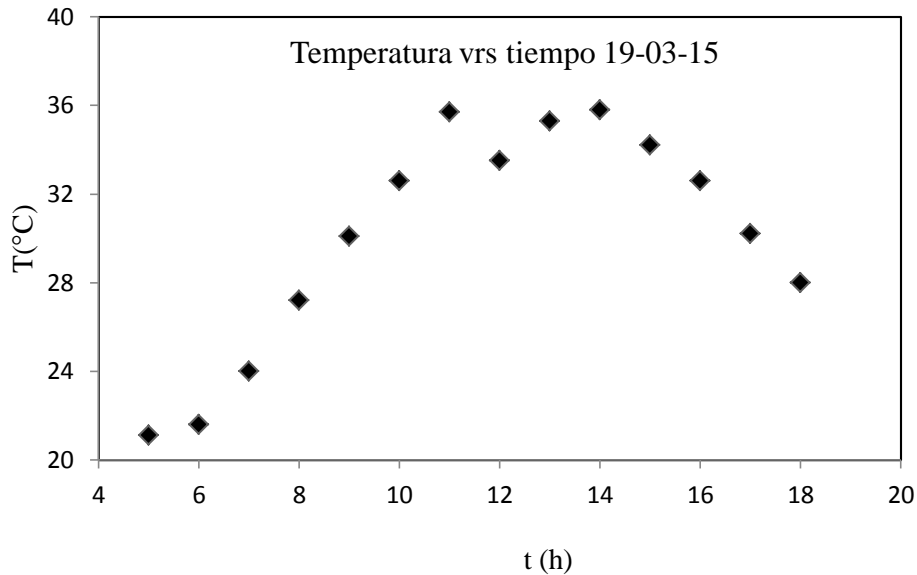


Figura 5. 28 Variación de la temperatura 19/03/15

**Nubosidad** se observó un cielo con nubosidad variada, en instantes fue parcialmente nublados y otro despejado, como se ilustra en la figura 5.29



Figura 5. 29 Nubosidad observada 13:21 pm 19/03/15

**Humedad relativa** alcanzó un valor máximo de 90% durante la madrugada, en el día disminuyó considerablemente hasta alcanzar 30%, como se ilustra en la figura 5.30.

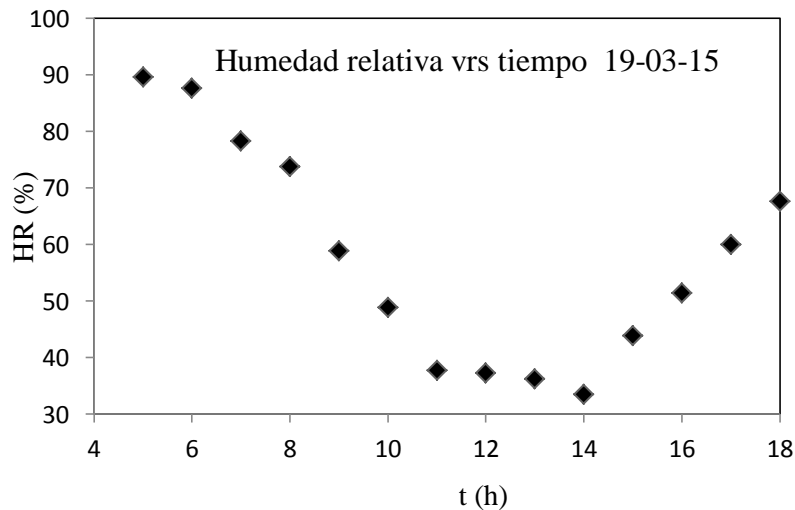


Figura 5. 30 Variación de la humedad relativa 19/03/15

**Velocidad del viento**, a las 14:00 horas su tendencia se mantuvo por los 3.7 km/h, de las 14:00 horas se incrementó hasta alcanzar un valor promedio máximo de 15.0 km/h, como se ilustra en la figura 5.31.



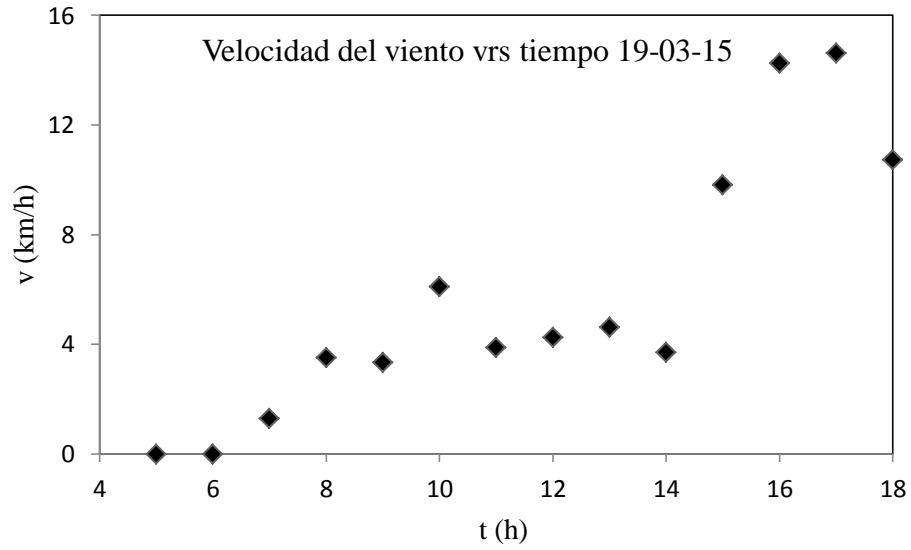


Figura 5. 31 Variación de la velocidad del viento 19/03/15

**Dirección del viento**, el viento por la mañana se desplazaba en dirección Noreste, desplazándose en horas del mediodía en dirección Suroeste y Sureste y manteniéndose en horas de la tarde, específicamente a partir de las 14.00 horas en dirección Suroeste, como se ilustra en la figura 5.32.

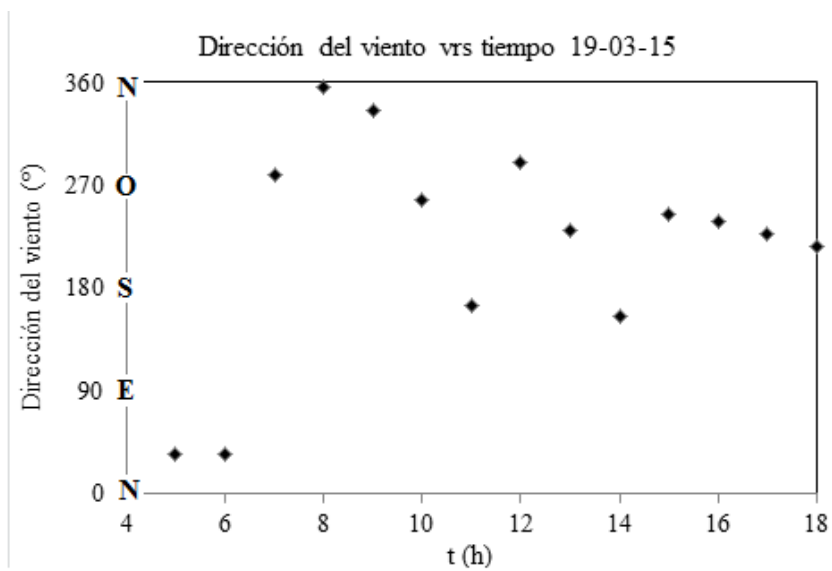
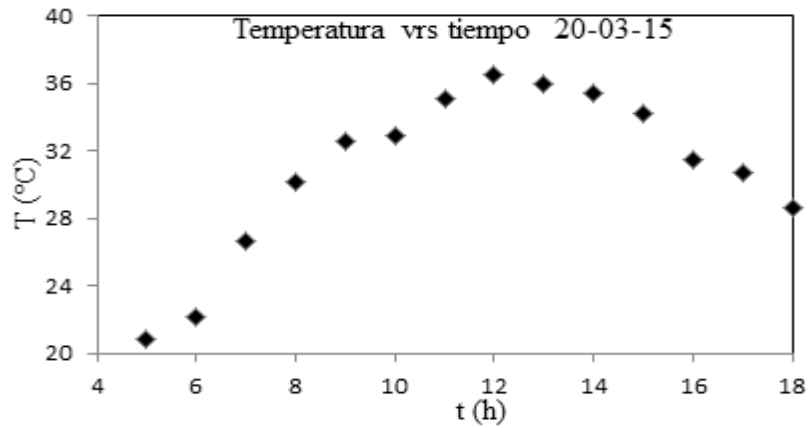


Figura 5. 32 Variación de la dirección del viento 19/03/15

**Viernes 20/03/15**

**Temperatura** durante la mañana fue incrementándose hasta alcanzar un valor máximo de 36.5 °C y una temperatura mínima de 21 °C, como se ilustra en la figura 5.33.



*Figura 5. 33 Variación de la temperatura 20/03/15*

**Nubosidad** se observó un cielo con nubosidad variada en instantes fue parcialmente nublados y otro despejado, como se ilustra en la figura 5.34.



*Figura 5. 34 Nubosidad observada 13:34 pm 20/03/15*

**Humedad relativa** alcanzó un valor máximo de 97.5 % durante las primeras siete horas del día, de 12:00 a las 14:00 descendió hasta alcanzar 20%, como se ilustra en la figura 5.35.

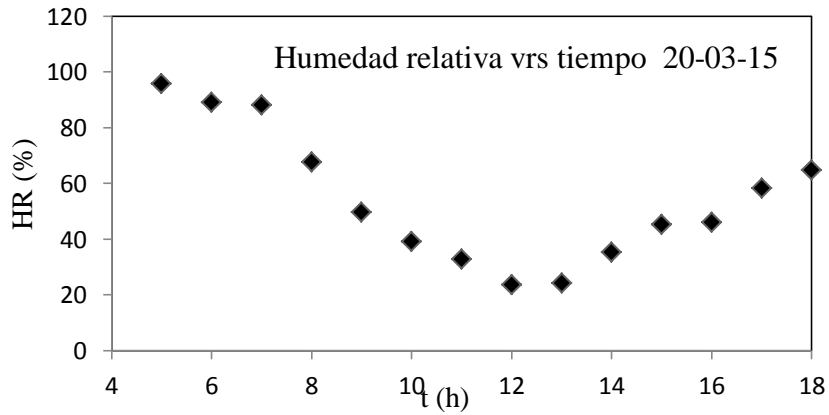


Figura 5. 35 Variación de la humedad relativa 20/03/15

**Velocidad del viento**, a partir de las 7:00 horas aumentó su tendencia hasta alcanzar un valor promedio máximo de 20.37 km/h, después empezó a descender, figura 5.36.

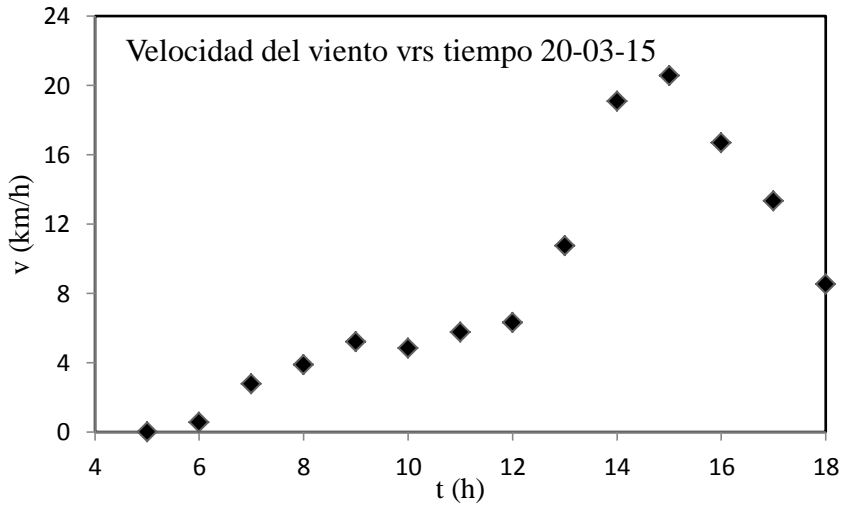


Figura 5. 36 Variación de la velocidad del viento 20/03/15

**Dirección del viento.** Desde las 5:00 horas hasta las 9:00 horas, el viento presenta dirección Nor-Oeste y Sur-Este y a partir de las 10:00 horas mantuvo dirección Sur-Oeste hasta las 18:00 horas, como se ilustra en la figura 5.37.

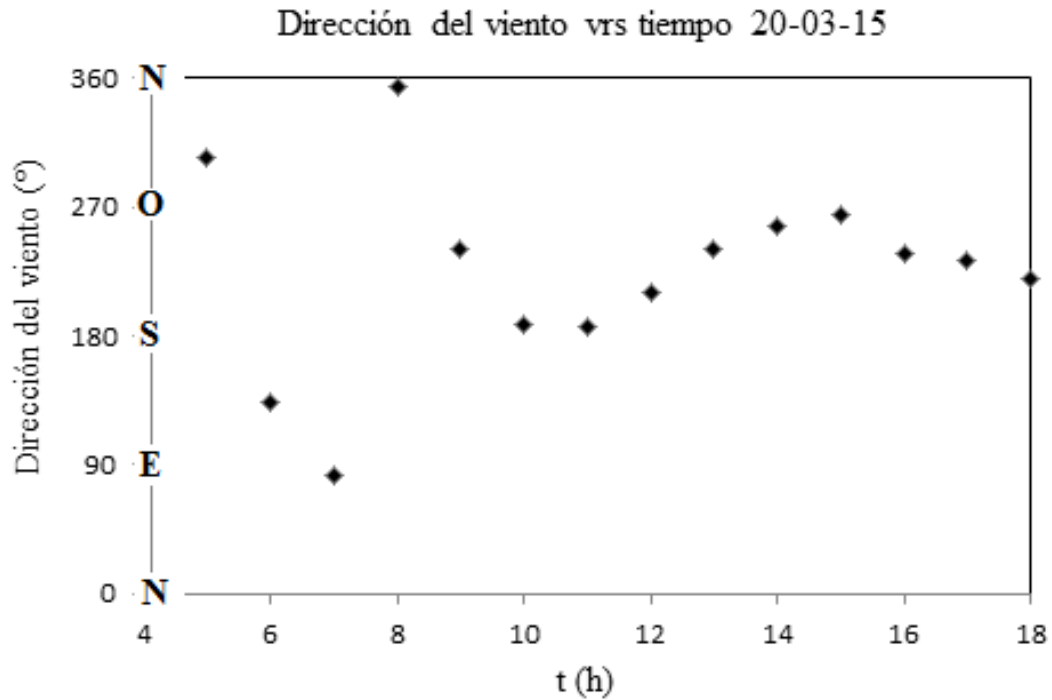


Figura 5. 37 Variación de la dirección del viento 20/03/15

### Sábado 21/03/15

**Temperatura** durante la mañana fue incrementándose hasta alcanzar un valor máximo de 37. °C y una temperatura mínima de 22.5 °C, como se ilustra en la figura 5.38.

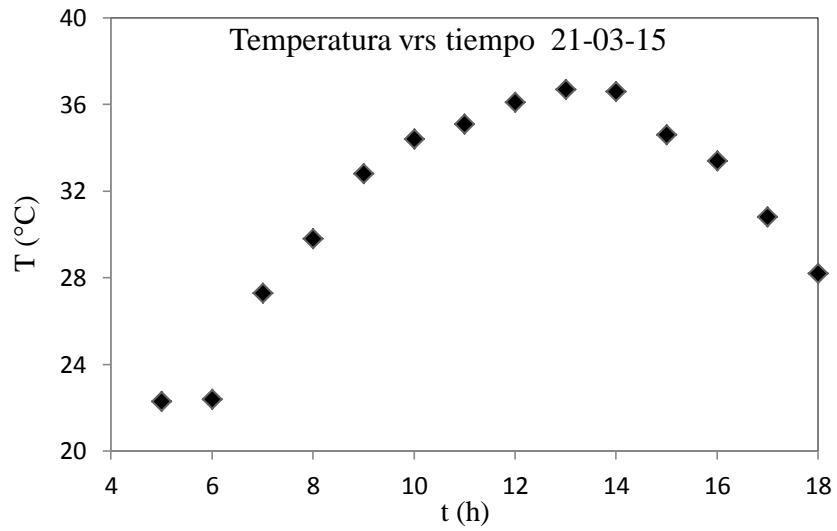


Figura 5. 38 Variación de la dirección del viento 20/03/15

**Nubosidad** se observó un cielo con nubosidad variada en instantes nubes dispersas, parcialmente nublado y otro despejado, como se ilustra en la figura 5.39.



Figura 5. 39 Nubosidad observada 14:33 pm 21/03/15

**Humedad relativa** alcanzó un valor máximo de 97.0 % durante las primeras horas del día, en el periodo comprendido de 12:00 horas a las 14:00 horas descendió hasta alcanzar 24%, como se ilustra en la figura 5.40.

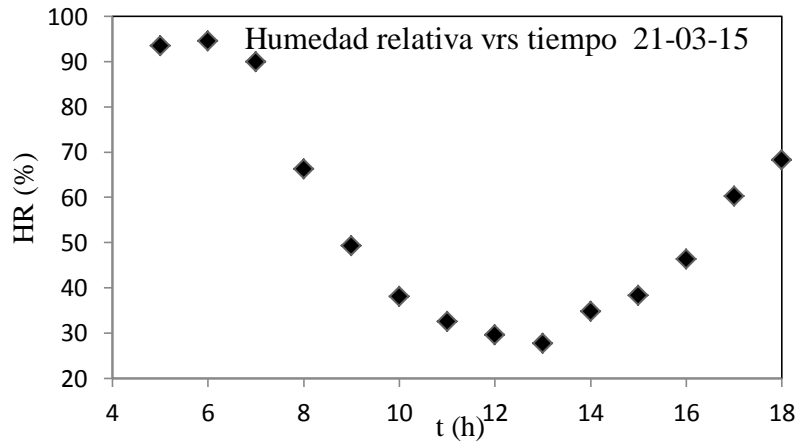


Figura 5. 40 Variación de la humedad relativa 21/03/15

**Velocidad del viento**, a partir de las 7:00 horas aumentó su tendencia hasta alcanzar un valor promedio máximo 16.67 km/h, después empezó a descender, figura 5.41.

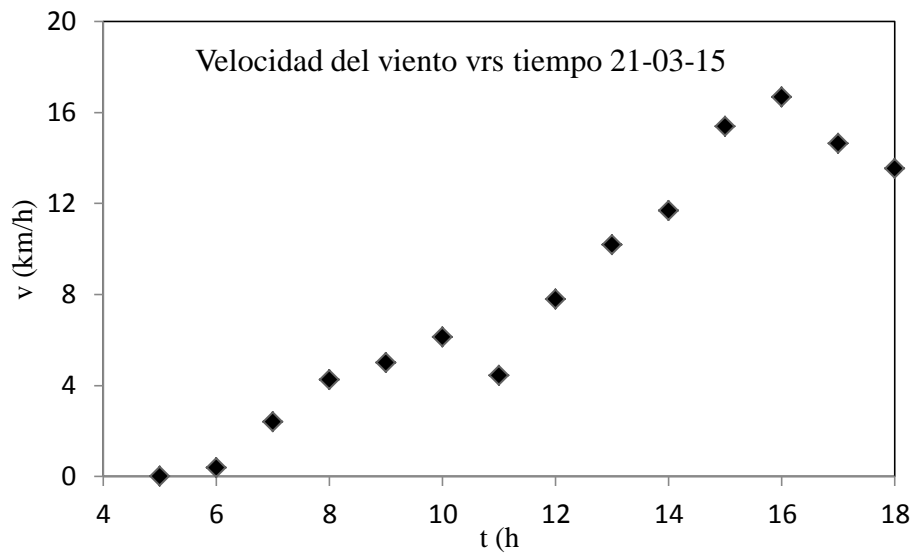


Figura 5. 41 Variación de la velocidad del viento 21/03/15

**Dirección del viento**, por la mañana se desplazó en la dirección Norte, y a partir de las 7.00 horas mantuvo dirección Suroeste, permaneciendo en esa dirección durante toda la tarde, como se ilustra en la figura 5.42.

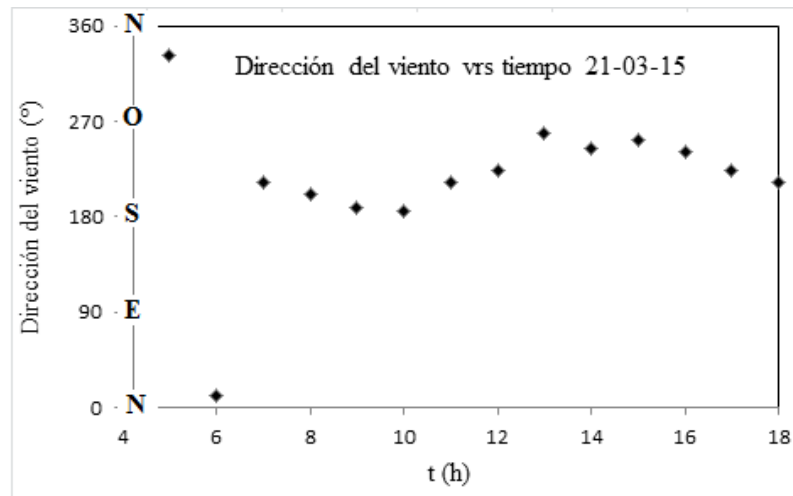


Figura 5. 42 Variación de la dirección del viento 21/03/15

**Domingo 22/0/15**

**Temperatura** durante la mañana fue incrementándose hasta alcanzar un valor máximo de 34.5 °C y una temperatura mínima de 27.0 °C, como se ilustra en la figura 5.43.

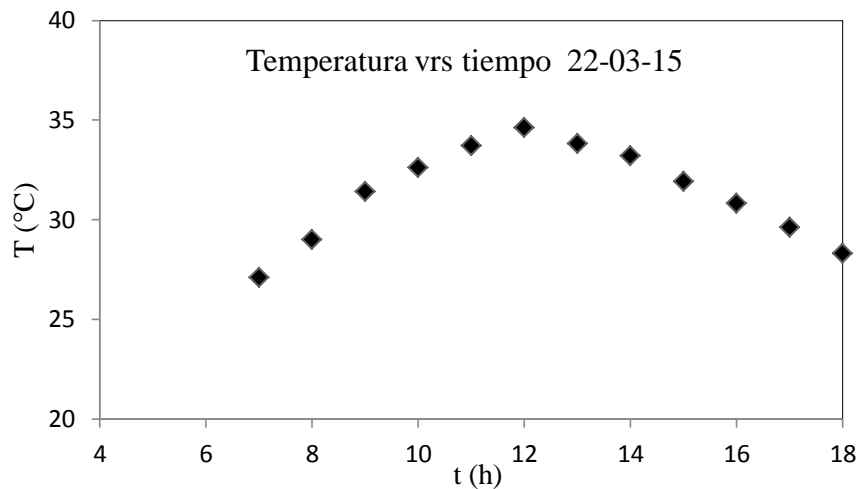


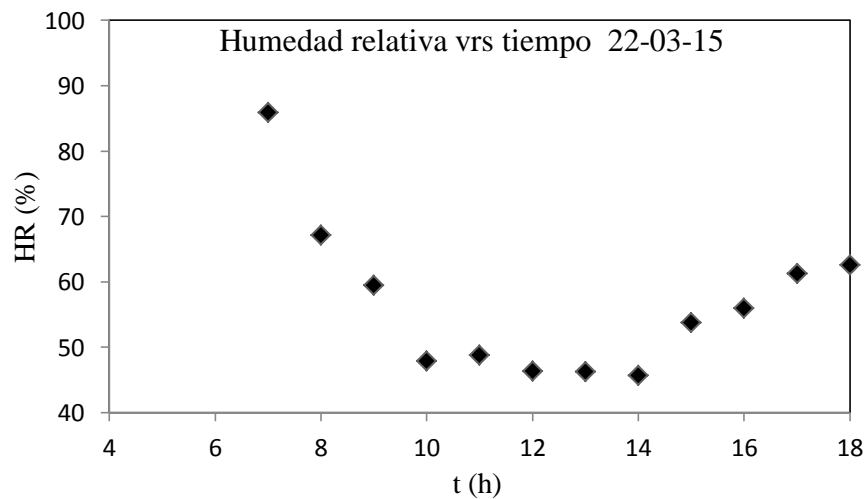
Figura 5. 43 Variación de la temperatura 22/03/15

**Nubosidad** se observó un cielo con nubosidad variada en instantes nubes dispersas, parcialmente nublado y otro despejado, como se ilustra en la figura 5.44.



*Figura 5. 44 Nubosidad observada 13:51 pm 22/03/15*

**Humedad relativa** alcanzó un valor máximo de 94.0 %, de 12:00 horas a las 14:00 horas descendió hasta alcanzar 24%, como se ilustra en la figura 5.45.



*Figura 5. 45 Variación de la humedad relativa 22/03/15*



**Velocidad del viento**, a partir de 5:00 horas se incrementó hasta alcanzar un valor promedio máximo de 18.71 km/h, después empezó a descender, como se ilustra en la figura 5.46

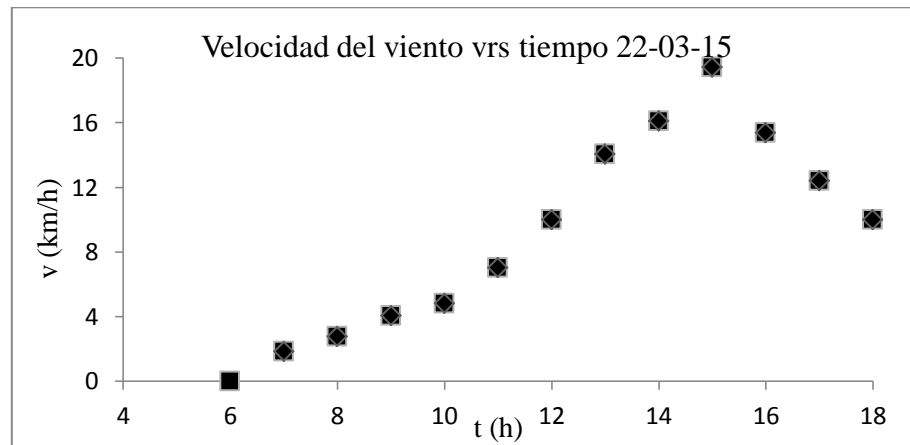


Figura 5. 46 Variación de la velocidad del viento 22/03/15

**Dirección del viento** permaneció con dirección Noroeste hasta las 10.00 horas, y a partir de esa hora cambia a dirección Suroeste, manteniéndose así toda la tarde hasta la finalización de la toma de datos, como se ilustra en la figura 5.47.

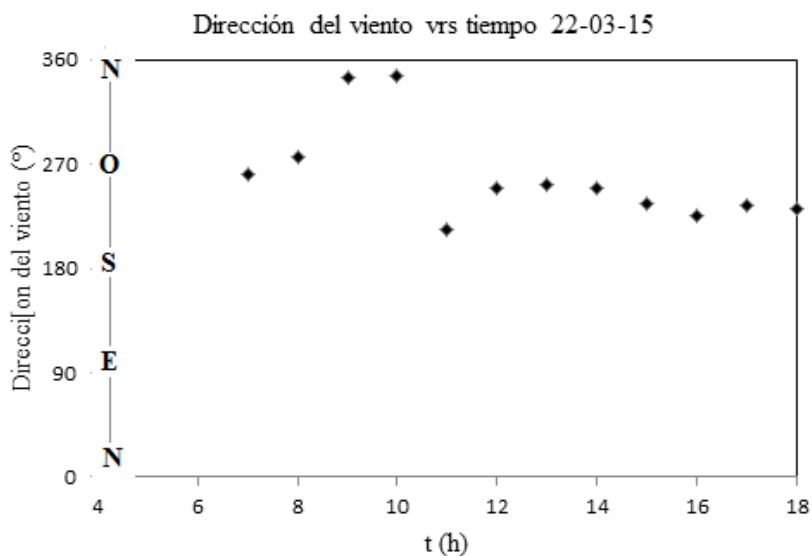


Figura 5. 47 Variación de la dirección del viento 22/03/15

#### 5.4 Análisis de datos meteorológicos para el período de no zafra

Las condiciones atmosféricas temperatura, humedad relativa, nubosidad, velocidad y dirección del viento pudieron afectar los valores de las dSCD. La baja velocidad del viento afectó la concentración de contaminantes en la Ciudad de San Miguel por esa razón se muestra un incremento aparente en las dSCD. La dirección del viento fue Suroeste o Sureste los contaminantes provenientes de la zona industrial eran arrastrados para el área donde se estaban recolectando los datos. Se observó poca nubosidad favoreciendo la absorción de fotones.

#### Jueves 23/07/15

**Temperatura** durante el día fue incrementándose desde 23.9 °C hasta alcanzar un valor máximo de 37.4 °C y descendiendo en horas de la tarde hasta un valor de 30.4 °C, como se ilustra en la figura 5.48.

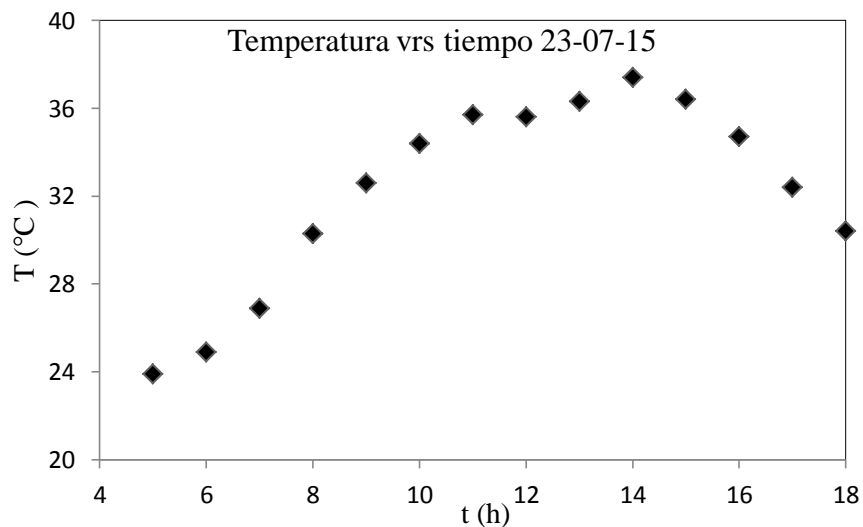


Figura 5. 48 Variación de la temperatura 23/07/15

**Nubosidad** el cielo permaneció de medio nublado a nublado, figura 5.49.



Figura 5. 49 Nubosidad observada a las 10:30 AM 23/07/15

**Humedad relativa** alcanzó un valor máximo de 99.9 % durante las primeras horas de la mañana, descendiendo a un valor mínimo de 36% a las 14:00 horas, y comenzó a crecer hasta el 66% alrededor de las 18:00 horas, como se ilustra en la figura 5.50.

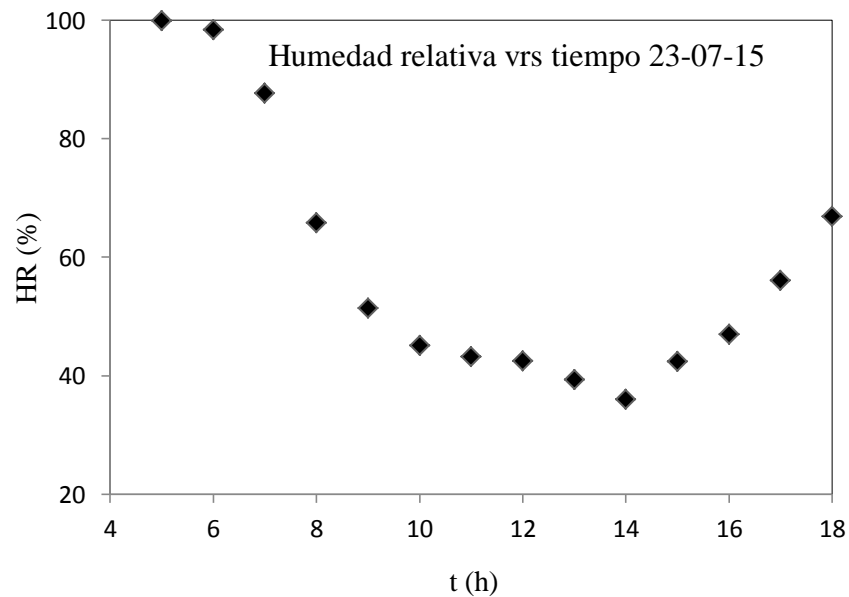


Figura 5. 50 Variación de la humeada relativa 23/07/15

**Velocidad del viento** inicia a 0.55 km/h y fue incrementando hasta alcanzar un valor promedio máximo de 3.15 km/h a las 15:00 horas, después de ello empezó a descender hasta un valor de 1.85 km/h a las 18:00 horas, como se ilustra en la figura 5.51.

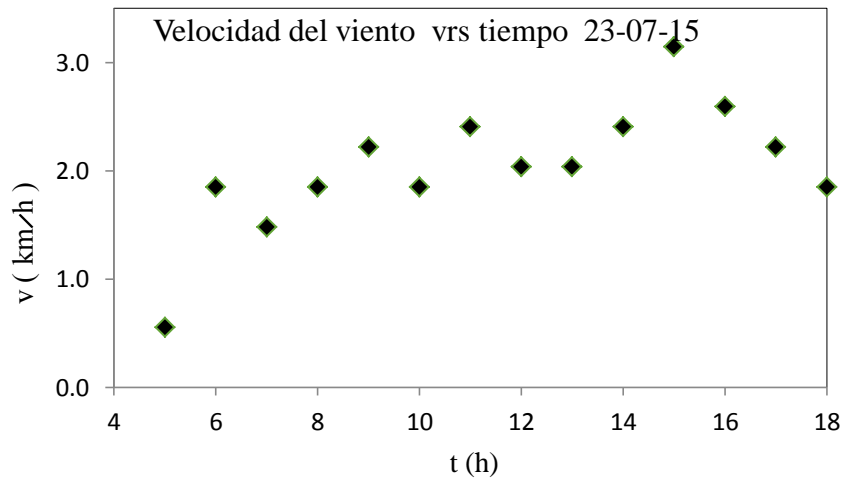


Figura 5. 51 Variación de la velocidad del viento 23/07/15

**Dirección del viento** El viento se manturvo en dirección Norte hasta las 6:00 horas, y a partir de las 7:00 horas cambia a dirección Sureste hasta las 14:00 horas, y a partir de allí se mantiene en dirección Suroeste durante toda la tarde, como se ilustra en la figura 5.52.

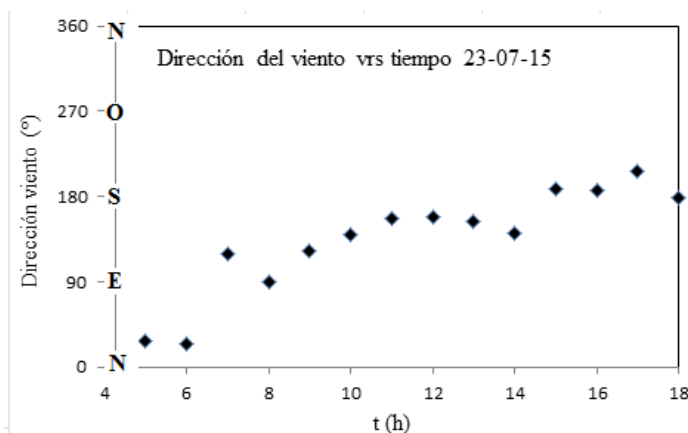
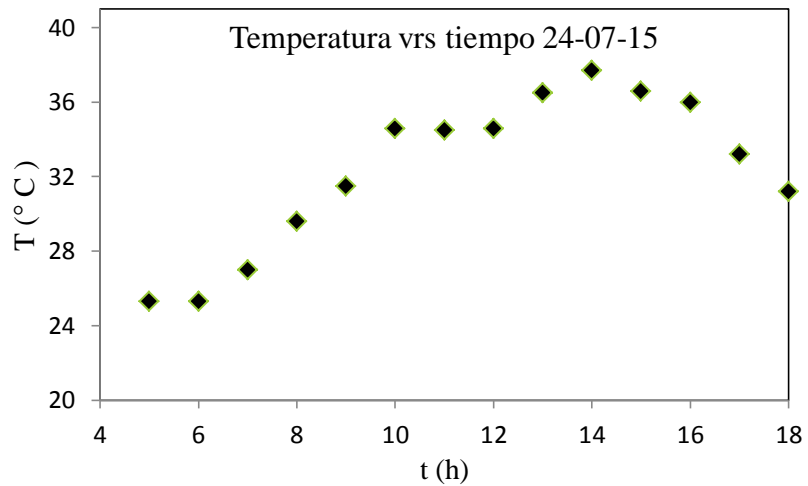


Figura 5. 52 Variación de la dirección del viento 23/07/15

**Viernes 24/07/15**

**Temperatura** durante el día fue incrementándose desde 25.3 °C hasta alcanzar un valor máximo de 37.7 °C y descendiendo en horas de la tarde hasta 31.2 °C, como se ilustra en la figura 5.53.



*Figura 5. 53 Variación de la temperatura 24/07/15*

**Nubosidad** el cielo permaneció de medio nublado a nublado, como se ilustra en la figura 5.54.



*Figura 5. 54 Nubosidad observada a las 10:50 AM 24/07/15*

**Humedad relativa** alcanzó un valor máximo de 94.1 %, descendiendo a un valor mínimo de 31.4% a las 14:00 horas y aumenta hasta el 56.7% alrededor de las 18:00 horas, figura 5.55.

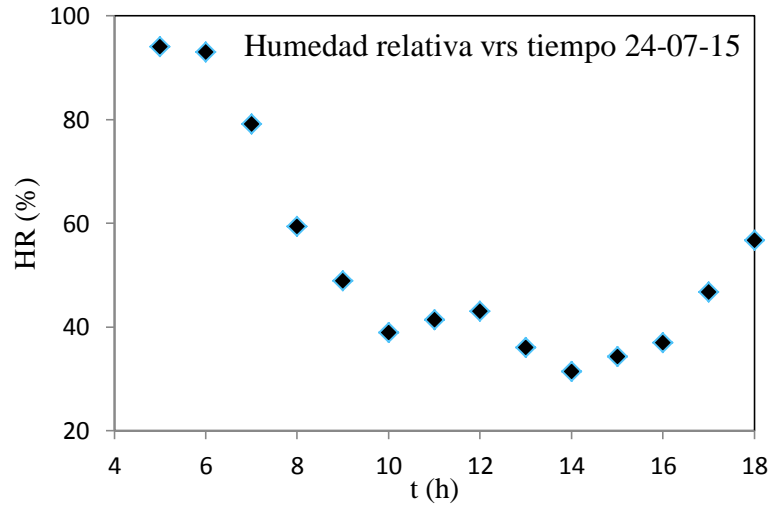


Figura 5. 55 Variación de la humedad relativa 24/07/15

**Velocidad del viento** inicia a 0.37 km/h y fue incrementando hasta alcanzar un valor promedio máximo de 3.15 km/h a las 14:00 horas, después descendió hasta un valor de 0.18 km/h a las 18:00 horas, figura 5.56.

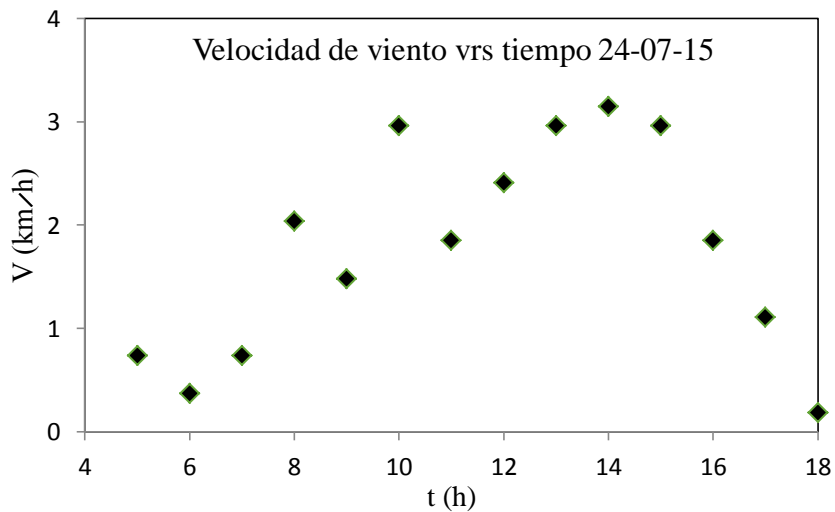


Figura 5. 56 Variación de la velocidad del viento 24/07/15

**Dirección del viento** varió durante las horas de la mañana, a las 9:00 horas con direcciones Noreste, Sureste y Suroeste, a partir de las 10:00 horas se estabiliza con dirección Sureste manteniéndose así durante toda la tarde, como se ilustra en la figura 5.57.

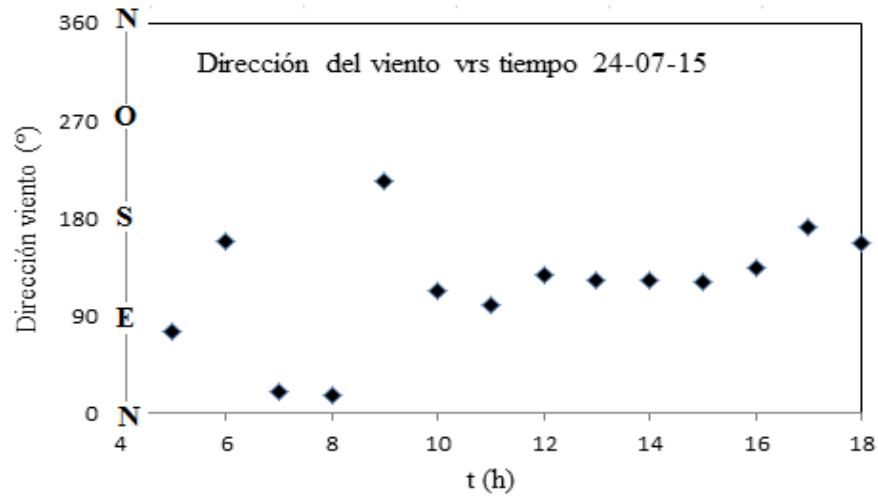


Figura 5. 57 Variación de la dirección del viento 24/07/15

**Sábado 25/07/15**

**Temperatura** fue incrementándose desde 23.9 °C hasta alcanzar un valor máximo de 38.8 °C y descendiendo en horas de la tarde hasta un valor de 33.3 °C, como se ilustra en la figura 5.58.

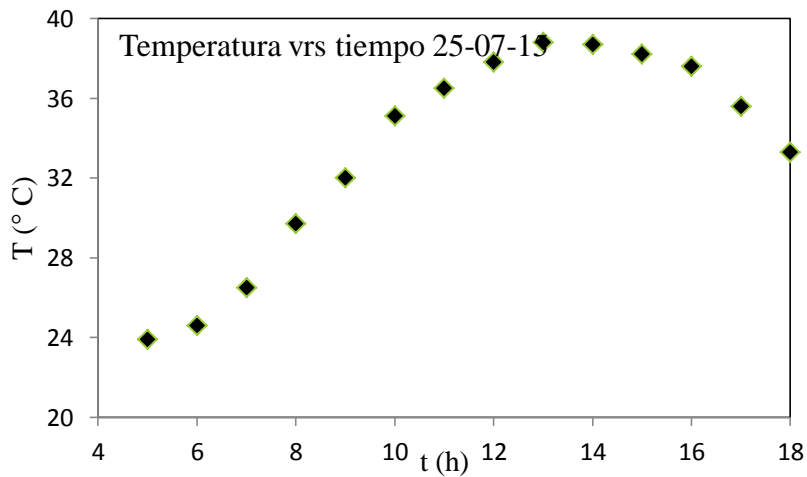


Figura 5. 58 Variación de la temperatura 25/07/15

**Nubosidad** se observó un cielo parcialmente despejado de poco a medio nublado, como se ilustra en la figura 5.59.



Figura 5. 59 Nubosidad observada a las 12:14 M 25/07/15

**Humedad relativa** alcanzó un valor máximo de 89.8 % durante las primeras horas de la mañana, descendiendo a un valor mínimo de 23.8% entre las 14:00 horas y 16:00 horas, y comenzó a descender, como se ilustra en la figura 5.60.

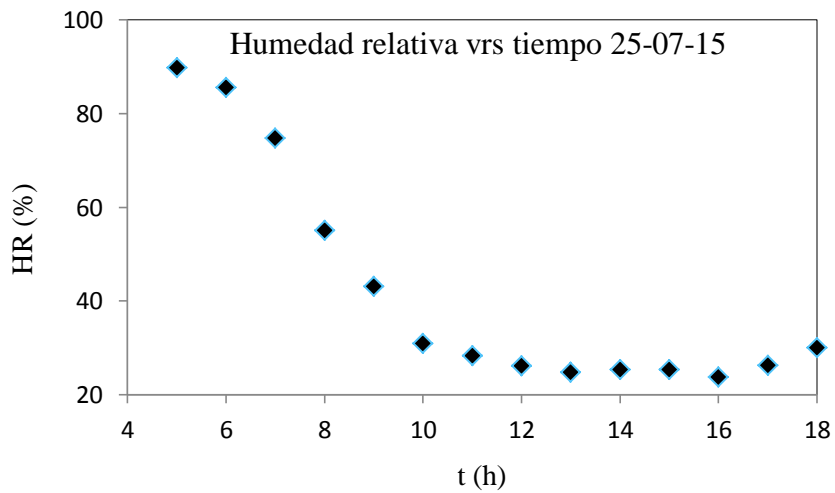


Figura 5.60 Variación de la humedad relativa 25/07/15



**Velocidad del viento** a las 6:00 horas alcanza 1.11 km/h y descendió hasta 0.55 km/h a las 8:00 horas, después se incrementó hasta 3.51 km/h a las 13:00 horas y desciende hasta 2.41 km/h a las 18:00 horas, como se ilustra en la figura 5.61.

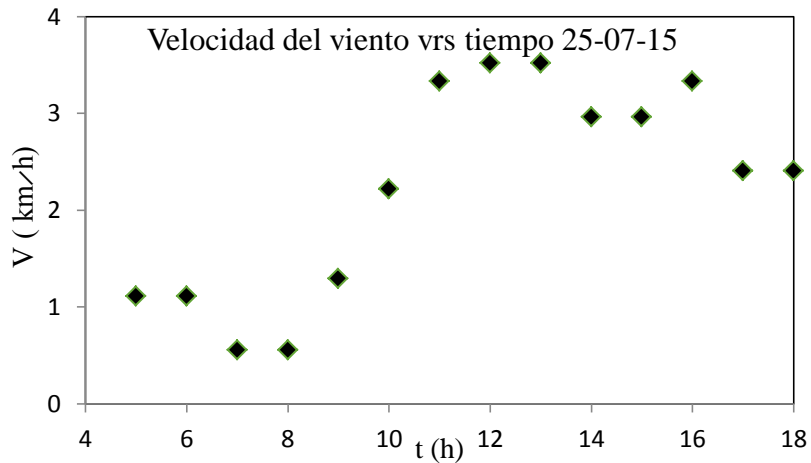


Figura 5. 61 Variación de la velocidad del viento 25/07/15

**Dirección del viento**, durante la mañana, el viento mantuvo dirección Norte hasta las 6:00 horas, cambiando a dirección Sureste y manteniéndose en esa dirección durante toda la tarde, como se ilustra en la figura 5.62.

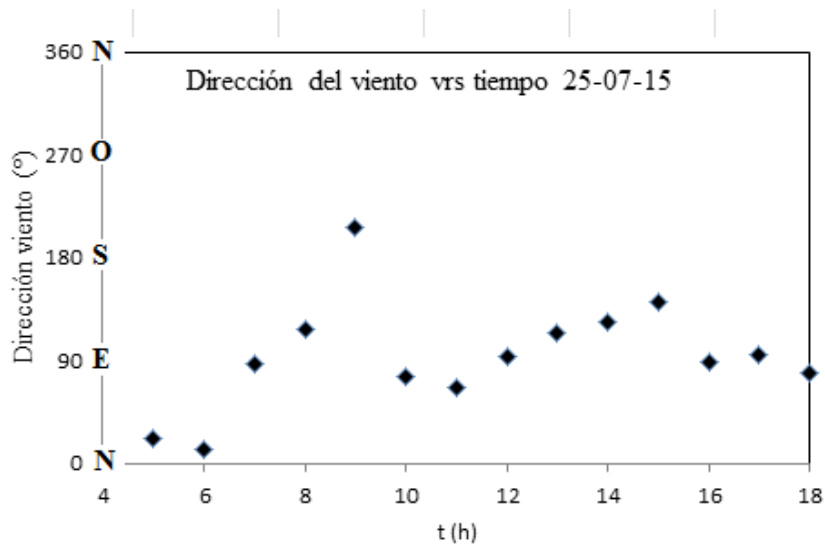
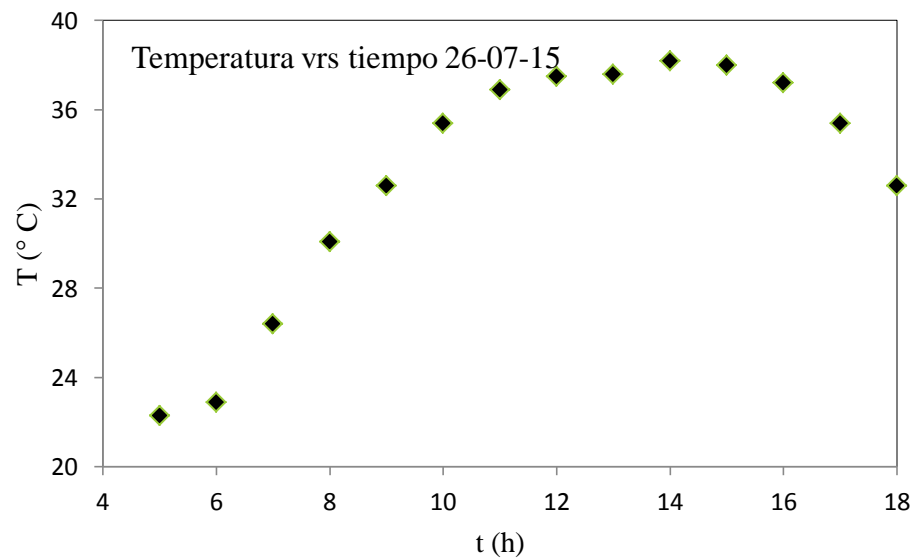


Figura 5. 62 Variación de la dirección del viento 25/07/15

**Domingo 26/07/15**

**Temperatura** durante este día fue incrementándose desde 22.3 °C hasta alcanzar un valor máximo de 38.2 °C y descendiendo en horas de la tarde hasta un valor de 32.6 °C, como se ilustra en la figura 5.63.



*Figura 5. 63 Variación de la temperatura 26/07/15*

**Nubosidad** se observó un cielo parcialmente despejado de poco a medio nublado, como se ilustra en la figura 5.64.



Figura 5. 64 Nubosidad observada a las 11:10 AM 26/07/15

**Humedad relativa** alcanzó un valor máximo de 71.8 % durante las primeras horas, descendiendo a 26.5% entre las 12:00 horas y 16:00 horas, y comenzó a crecer hasta el 40.9% alrededor de las 18:00 horas, como se ilustra en la figura 5.65.

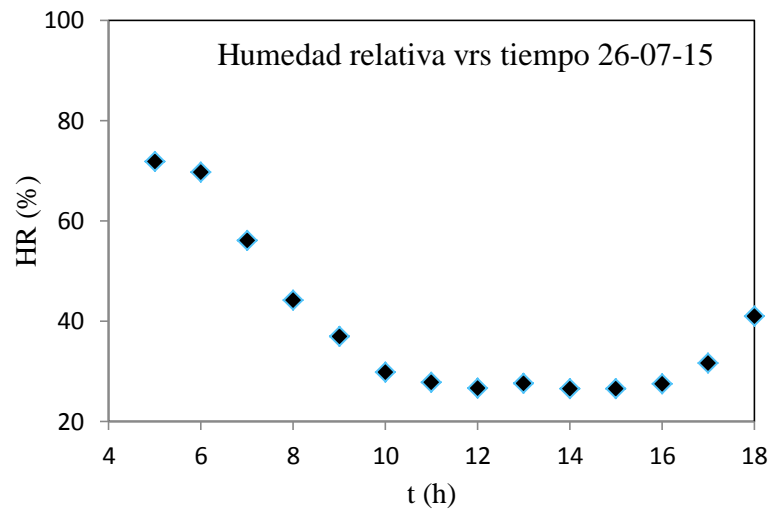
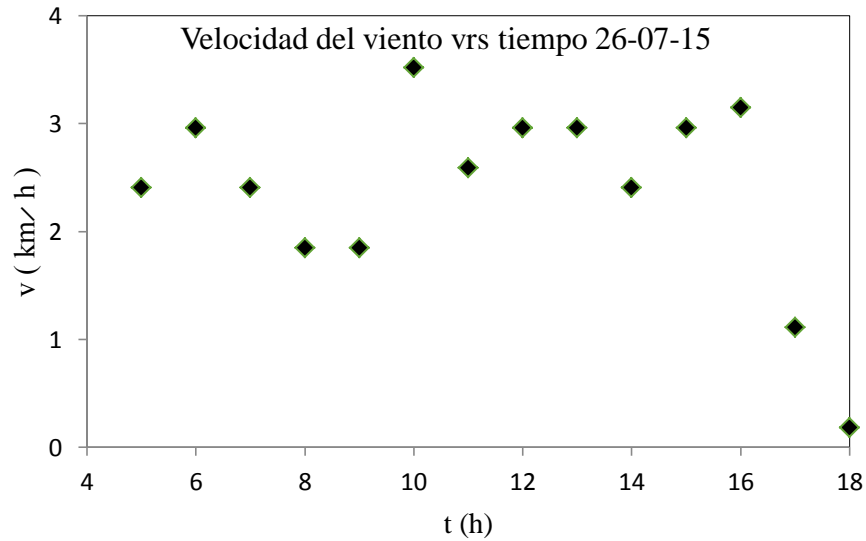


Figura 5. 65 Variación de la humedad relativa 26/07/15

**Velocidad del viento** estuvo oscilando entre 1.85 km/h y 3.52 km/h hasta las 16:00 horas, después empezó a descender hasta un valor de 0.18 km/h a las 18:00 horas, figura 5.66.



*Figura 5. 66* Variación de la velocidad del viento 26/07/15

**Dirección del viento**, se mantuvo en dirección Noreste durante la mañana, a partir de las 8:00 horas cambia a dirección Sureste, llegando así hasta las 10:00 horas, para después cambiar a dirección Suroeste, manteniéndose durante toda la tarde, como se ilustra en la figura 5.67.

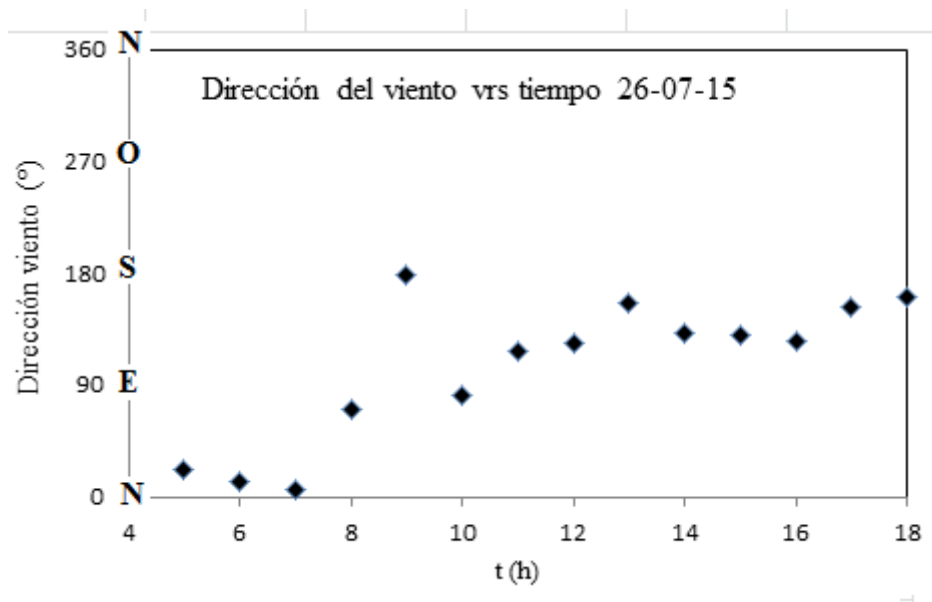


Figura 5. 67 Variación de la dirección del viento 26/07/15

## CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

- Los niveles de NO<sub>2</sub> para ciudad de San Miguel en período de zafra son mayores que los registrados en no zafra, generando una mayor contaminación en la atmósfera y con ello se expone a un aumento en las enfermedades respiratorias en los seres humanos, también este aumento en el NO<sub>2</sub> genera externalidades negativas en las plantas, los animales, los cuerpos de agua, poniendo en riesgo los beneficios ecosistémicos de aprovisionamiento, soporte, de regulación o de apoyo y los culturales, contribuyendo con ello a la aceleración del cambio climático.
- Existe una debilidad en la gestión ambiental de parte de instituciones afectadas por las emanaciones de gases contaminantes que provienen de la planta industrial. Se tiene conocimiento que la FMO nombró una comisión (Acuerdo No. 13-99-03-VIII-3 de fecha 02/02/2000) de enlace entre la Universidad y el Ingenio Chaparrastique para darle seguimiento al Problema del Impacto Ambiental. Se desconoce la funcionalidad de la Comisión o si existe modificación de sus integrantes y si ellos han interpuesto sus buenos oficios para que la planta industrial cumpla con lo establecido en el Reglamento Especial de Normas Técnicas de El Salvador relacionadas con la Calidad del Aire en las fuentes fijas, chimeneas.
- Los niveles de NO<sub>2</sub> (moléculas/cm<sup>2</sup>) en período de zafra y no zafra para la Ciudad de San Miguel son diferentes. Los valores obtenidos en zafra son mayores que la no zafra. Al hacer el análisis de los dos períodos de estudio, asumiendo un nivel de

significancia de  $P < 0.05$  y se obtuvieron valores de 0.0051, 0.0091, 0.0101, menores al nivel propuesto, lo que indica que la diferencia es significativa.

- Los niveles del  $\text{NO}_2$  durante el período de zafra para la ciudad de San Miguel son menores a los datos obtenidos en un estudio realizado en la Colonia Escalón de San Salvador en un 20%, esta diferencia podría estar asociada al tráfico vehicular.
- Los niveles de  $\text{NO}_2$  para el período de zafra son mayores en la ciudad de San Miguel que los reportados por OMI para la ciudad de Sonsonate.
- Los niveles en las concentraciones de  $\text{NO}_2$  para el período de no zafra son mayores para la ciudad de San Miguel que los que reportó OMI para las ciudades de Santa Ana y Santa Tecla.

## **6.2 Recomendaciones**

- Realizar campañas de medidas en diferentes orientaciones de la ciudad, para obtener más información para realizar un mapeo.
- Realizar campañas de mediciones alrededor de la fuente industrial aplicando la técnica DOAS móvil, para tener información del comportamiento de los contaminantes en varias direcciones y variar la distancia a la fuente de emanación de gases.

- Realizar campañas simultáneas de mediciones puntuales con otros instrumentos por ejemplo con una analizador de gases portátil y con los de la técnica DOAS para poder hacer comparaciones con las Normas Técnicas de Calidad Ambiental
- Hacer campañas que duren lapsos de tiempo no menores de un año, para comparar con los datos obtenidos con los que proporcionan algunos satélites.
- Automatizar el telescopio para que gire de  $0^0$  a  $180^0$ , de esa forma se puede tener información para dos puntos cardinales.



## BIBLIOGRAFIA

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (1999). *Toxic Substances Portal Formaldehyde*. Recuperado el 10 de enero de 2015, de Toxicological Profile for Formaldehyde: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp.asp?id=220&tid=39>
- Agroindustria Azucarera de El Salvador. (2010). [www.asociacionazucarera.net/industria.html](http://www.asociacionazucarera.net/industria.html). Recuperado el 6 de enero de 2015, de <http://www.asociacionazucarera.net/industria.html#mas3>
- Alberti et al. (2012). Ground based MAX-DOAS observations of tropospheric trace gases in San Salvador, El Salvador. *62nd Annual Meeting of the Austrian Physical Society*, 165.
- Alfaro et al. (2011). *Propuesta para la solución del congestionamiento vehicular en la intersección de la Avenida Roosevelt y la Carretera Ruta Militar, San Miguel*. Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil, Universidad de El Salvador, San Miguel.
- Alicke et al. (1999). Iodine oxide in the marine bound-. *Nature*, 397, 572-573.
- Alicke et al. (2002). Impact of nitrous acid photolysis on the total hydroxyl radical budget during the Limitation of Oxidant Production/Pianura Padana Produzione di Ozono study in Milan. *Journal of Geophysical Research*, 107(D22), 8196  
doi:10.1029/2000JD000075.
- Alvarado, L. (2011). *Determinación de niveles de formaldehído en San Salvador con espectroscopia óptica de absorción diferencial (DOAS)*. Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Asamblea Legislativa. (4 de mayo de 1998). Ley de Medio Ambiente. *Diario Oficial*, pág. 79 Tomo 339.
- Balin, I. (1998). "DOAS-Differential Optical Absorption Spectroscopy for Air Pollution Measurements. <http://dgrwww.epfl.ch/GECOS/CPSE/recherches/mars99/doas.html> .
- Barrie et al. (1988). Ozone destruction and photochemical reactions at polar sunrise in the lower Arctic atmosphere. *Nature*, 334.
- Beckett et al. (1995). Effect of nitrous acid on lung function in asthmatics: a chamber study. *Environ. Health. Perspect*, 103, 372-375.
- Bell, E. (6 de noviembre de 2015). *blogecologista.com*. Recuperado el 28 de enero de 2016, de <http://blogecologista.com/consecuencias-de-la-lluvia-acida/>

- Bobrowski et al. (2003). Detection of bromine monoxide in a volcanic plume. *Nature*, 423(6937), 273 - 276.
- Bogumil et al. (5 de May de 2003). Measurements of molecular absorption spectra with the SCIAMACHY pre-flight model: instrument characterization and reference data for atmospheric remote-sensing in the 230–2380 nm region. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 157, 167–184.
- Burrows et al. (1998). Atmospheric remote-sensing reference data from gome: part 1. Temperature-dependent absorption cross-sections of NO<sub>2</sub> in the 231 - 794 nm range. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 60(6), 1025 -1031.
- Carrier et al. (1986). The chemistry of carbonyl compounds in the atmosphere. *A review Atmos. Env., Part A General Topics* 20, 2079-2099.
- Carranza, J. A. (20 de octubre de 2014). *www.tribunadequeretaro.com*. Recuperado el 1 de Diciembre de 2014, de <http://www.tribunadequeretaro.com/index.php/opinion/4468-las-particulas-atmosfericas-y-la-calidad-del-aire-en-queretaro>
- Castillo y Rivera. (2004). *Diagnóstico de las emisiones atmosféricas generadas por los Ingenios Azucareros de El Salvador*. Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Castillo y Vides. (2001). *Estudio de calidad del aire y síntomas de enfermedades respiratorias en la Facultad Multidisciplinaria Oriental*. Tesis de Maestra , Universidad de El Salvador y Universidad Autónoma de Barcelona, San Miguel.
- Comité de Calidad del Aire, H. (2010). *CESCCO - SERNA*. (Padilla, Ed.) Recuperado el 15 de Noviembre de 2014, de Conceptos Básicos Acerca de Contaminación Atmosférica: <http://calidadairehonduras.blogspot.com/p/contaminacion-atmosferica.html>
- Consejería de Educación, (6 de Octubre de 2013). *educastur.princast.es*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2014, de [http://web.educastur.princast.es/proyectos/formadultos/unidades/latierra/udos\\_capuno\\_pauno.htm](http://web.educastur.princast.es/proyectos/formadultos/unidades/latierra/udos_capuno_pauno.htm)
- De Campos, M. (28 de marzo de 1995). Plaguicidas en Guatemala. Recuperado el 16 de marzo de 2015
- Diario Oficial. (26 de agosto de 2003). NSO 13.11.01:01 Calidad del Aire Ambiental Inmisiones Atmosféricas. *Diario Oficial*(Tomo 360), págs. 16-20.

- Díaz y Romero (2004). *Caracterización del Cultivo de la Caña de Azúcar (Saccharum officinarum) en El Salvador*. Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Dieke y Kistiakowsky. (1934). The Structure of the Ultraviolet Absorption Spectrum of Formaldehyde. *Physical Review Letters, Physical Review, and Reviews of Modern Physics*, 4, 45.
- Dix, B. (2007). *Spectroscopic Measurements of Atmospheric Trace Gases on Long-Distance Flights*. Ph.D.thesis, University of Heidelberg, Germany.
- Dorf, M. (2005). *Investigation of Inorganic Stratospheric Bromine using Balloon-Borne DOAS Measurements and Model Simulations*. Tesis Ph.D, Universitat Heidelberg., Combined Faculties for the Natural Sciences and for Mathematics, Alemania.
- Echarri, L. (1998). *Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente*. Espana: Teide.
- EcuRed. (12 de abril de 2011). *EcuRed*. Recuperado el 28 de enero de 2016, de [http://www.ecured.cu/Di%C3%B3xido\\_de\\_Nitr%C3%B3geno](http://www.ecured.cu/Di%C3%B3xido_de_Nitr%C3%B3geno)
- EcuRed. (21 de febrero de 2013). *EcuRed: Enciclopedia Cuba*. Recuperado el 13 de Diciembre de 2014, de [http://www.ecured.cu/index.php/Dispersi%C3%B3n\\_de\\_Rayleigh](http://www.ecured.cu/index.php/Dispersi%C3%B3n_de_Rayleigh)
- El Diario de Hoy. (10 de Diciembre de 2013). Cerca de 200,000 personas trabajan en zafra azucarera.
- ESA Earth Online. (26 de julio de 2015). Recuperado el 5 de enero de 2016, de TEMIS: Tropospheric Emission Monitoring Internet Service: [http://www.temis.nl/airpollution/no2col/data/omi/2015/07/no2trop20150726\\_r17.png](http://www.temis.nl/airpollution/no2col/data/omi/2015/07/no2trop20150726_r17.png)
- ESA Earth Online. (23 de julio de 2015). Recuperado el 5 de enero de 2016, de TEMIS: Tropospheric Emission Monitoring Internet Service: [http://www.temis.nl/airpollution/no2col/data/omi/2015/07/no2trop20150723\\_r17.png](http://www.temis.nl/airpollution/no2col/data/omi/2015/07/no2trop20150723_r17.png)
- ESA Earth Online. (24 de julio de 2015). Recuperado el 5 de enero de 2016, de TEMIS: Tropospheric Emission Monitoring Internet Service: [http://www.temis.nl/airpollution/no2col/data/omi/2015/07/no2trop20150724\\_r17.png](http://www.temis.nl/airpollution/no2col/data/omi/2015/07/no2trop20150724_r17.png)
- ESA. Earth Online. (19 de marzo de 2015). Recuperado el 5 de enero de 2016, de TEMIS: Tropospheric Emission Monitoring Internet Service: [http://www.temis.nl/airpollution/no2col/data/omi/2015/03/no2trop20150320\\_r17.png](http://www.temis.nl/airpollution/no2col/data/omi/2015/03/no2trop20150320_r17.png)

- EUROLATINA, S. (2006). *Diagnóstico de la Calidad del Aire, Levantamiento de Fuentes Contaminantes y Diseño de Red de Monitoreo*. Informe de Auditoría, San Salvador, El Salvador.
- Ferrer y Escalante. (Septiembre-Octubre de 2009). Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud en la Zona Metropolitana del Valle de México. México. Recuperado el 16 de noviembre de 2015, de <http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/360/03escalanteyjim y.pdf>
- Finlayson-Pitts y Pitts Jr. (1986). *Atmospheric chemistry. Fundamentals and experimental techniques*. New York,: John Wiley & Sons.
- Fleischmann et al. (1 de November de 2004). New ultraviolet absorption cross-sections of BrO at atmospheric temperatures measured by time-windowing Fourier transform spectroscopy. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 168, 117–132.
- Fuentes, R. A. (2012). *Implementación de Instrumentación Óptica para el Monitoreo Remoto de la Calidad del Aire*. Tesis Doctoral, Universidad de Concepción, Chile.
- Gámez, K. R. (12 al 16 de marzo de 2015). Observaciones de O<sub>4</sub> como un indicador de la presencia de aerosoles utilizando MAX- DOAS en El Salvador. San Salvador, El Salvador.
- Garzona, E. (1996). *Perfil de Análisis Comparativo de Riesgo de la República de El Salvador*. Chemonics International y Asociados, El Salvador.
- González, M. (7 de julio de 2010). *La Guía Química*. Recuperado el 7 de enero de 2016, de <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/ciclo-del-nitrogeno>
- González, M. (14 de septiembre de 2010). *La Guía de Química*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2014, de <http://quimica.laguia2000.com/general/dioxido-de-nitrogeno>
- González, M. (12 de Noviembre de 2010). *La Guía Química*. Recuperado el 16 de Enero de 2015, de Fluorescencia: <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/fluorescencia>
- Granby et al. (1997). Urban and semi-rural observations of carboxylic acids and. *Atmos. Environ.*, 31, 1403-1415.

- Gruter, et al. (2007). Evaluación del riesgo por contaminantes criterio y formaldehído en la Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 23, núm. 4, 169-175,.
- Grutter et al. (2005). Formaldehyde levels in downtown Mexico City during 2003. *Atmospheric Environmen*, Vol 39, 1027–1034.
- GTZ/IICA. (1996). *El Salvador: Degradación y Perspectivas de Manejo de los Recursos Naturales Renovables*. Dirección de Planeamiento, Programación, Proyectos, y Auditoría Técnica , San José, Costa Rica.
- Heckel et al. (2005). MAX-DOAS measurements of formaldehyde in the Po-Valley. *Atmos. Chem. Phys*, 5, 909–918.
- Heckel, A. (2003). *MSc Thesis*. University of Bremen. Germany
- Hermans, C. (2002). *Belgian Institute for Space Aeronomy*. Recuperado el 10 de february de 2011, de <http://spectrolab.aeronomie.be/o2.htm>
- Herndon et al. (2005). Determination of line strengths for selected transitions in the  $\nu_2$  band relative to the U1 and N<sub>2</sub> bands of H<sub>2</sub>CO. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 90, 207-216.
- Honninger et al. (2004). Multi axis differential optical absorption spectroscopy. *Atmospheric Chemistry and Physics, EGU Journals*, 4, 231–254.
- Honninger, G. (2002). *Halogen Oxide Studies in the Boundary Layer by Multi Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy and Active Longpath-DOAS*. PhD. Thesis, University of Heidelberg, Germany.
- Inche, J. L. (2004). *Gestión de la calidad del aire: causas, efectos y soluciones*. Lima Perú: Instituto de Investigación de Ingeniería Industrial-UNMSM.
- INECC. (5 de Julio de 2013). [www.inecc.gob.mx/mapsite](http://www.inecc.gob.mx/mapsite). Recuperado el 15 de novimebre de 2014, de Contaminantes criterio: [www.inecc.gob.mx/dica/523-calaire-cont-criterio?format=pdf](http://www.inecc.gob.mx/dica/523-calaire-cont-criterio?format=pdf)
- Ji, Z. (10 de noviembre de 2014). *Foro Económico Mundial*. Recuperado el 6 de febrero de 2016, de <https://agenda.weforum.org/espanol/2014/11/10/la-contaminacion-en-los-mercados-emergentes-es-una-preocupacion-principal-para-2015/>
- Jiménez, E. (2007). *Estudio, Diseño y Gestión de Sistemas de Medición de la Contaminación Atmosférica de Tarragona*. Tarragona.

- Kern, C. (20 de marzo de 2014). Recuperado el 8 de enero de 2015, de <http://www.physi.uni-heidelberg.de/Einrichtungen/FP/anleitungen/F18.pdf>
- Kraus, S. (2006). DOASIS, A Framework Design for DOAS, PhD-thesis, University of Mannheim, Shaker Verlag, Heidelberg. Germany.
- Lee et al. (3 de junio de 1997). Estimations of global NO<sub>x</sub> emissions and their uncertainties. *Atmospheric Environment*, 31(12), 1735–1749.
- Lenntech. (s.f.). Recuperado el 6 de enero de 2016, de <http://www.lenntech.es/ciclo-nitrogeno.htm>
- Luventicus, A. d. (2013). *Luventicus*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2015, de <http://www.luventicus.org/mapas/elsalvador.html>
- MARN. (2002). *Reglamento Especial de Normas Técnicas de Calidad Ambiental*.
- MARN. (2011). Recuperado el 28 de enero de 2016, de [http://www.marn.gob.sv/descarga/documentos/Catalogo\\_Mapas\\_Zonas\\_Criticas\\_Prioritarias\\_Humedales\\_RAMSAR\\_El\\_Salvador.pdf](http://www.marn.gob.sv/descarga/documentos/Catalogo_Mapas_Zonas_Criticas_Prioritarias_Humedales_RAMSAR_El_Salvador.pdf)
- MARN. (2011). [www.marn.sv/documentos/sistema.../EAE%20BIOCOMBUSTIBLES.pdf](http://www.marn.sv/documentos/sistema.../EAE%20BIOCOMBUSTIBLES.pdf). Recuperado el 6 de enero de 2015, de <http://www.marn.sv/documentos/sistema-evaluacion-ambiental/EAE%20BIOCOMBUSTIBLES.pdf>
- Martínez, A. P. (1997). *Biblioteca virtual para el desarrollo sostenible*. Recuperado el 23 de Enero de 2016, de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/intromon/cap5.pdf>
- Meade y Spencer. (1967). *Manual del Azúcar de Caña* (9 a. ed.). Barcelona.España.: J. Wiley. Trad. Montaner y Simón S.A.
- Ministerio de Educación, (2011). *Educación Digital a Distancia- Recursos*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2014, de <http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/1esobiologia/1quincena5/paginas/composicion.htm>
- Mount, H. G. (Abril de 2002). Measurement of atmospheric ammonia at a dairy using. *Atmospheric Environment*, 36, 1799-1810.
- Müller, K. (1997). Determination of aldehydes and ketones in the atmosphere. A comparative long-time study at an urban and a rural site in Eastern Germany. *Chemosphere*, 35, 2096-2106.

- National Geographic. (s.f.). Recuperado el 8 de enero de 2016, de <http://nationalgeographic.es/medio-ambiente/calentamiento-global/acid-rain-overview>
- Natureduca. (s.f.). *Natureduca*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2015, de [http://www.natureduca.com/cienc\\_gen\\_ciclonitrogeno.php](http://www.natureduca.com/cienc_gen_ciclonitrogeno.php)
- Nave, C. R. (2008). *HyperPhysics*. Recuperado el 13 de Diciembre de 2014, de Luz y visión: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/atmos/blusky.html>
- Ocean Optics Inc, M. d. (2008). *Ocean Optics Inc*. Recuperado el 13 de Diciembre de 2014, de <http://oceanoptics.com/wp-content/uploads/USB4000OperatingInstructions.pdf>
- OMS. (2003). Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. *Facts of Health and the Environment*, 1.
- OMS. (2005). La OMS considera cancerígeno el formaldehído. *Revista Espanola de Patología*, 38, 62-63.
- OMS. (marzo de 2014). *Centro de prensa Nota descriptiva 313*. Recuperado el 1 de enero de 2015, de Calidad del aire (exterior) y salud: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- OPS. (2005). *Evaluación de los Efectos de la Contaminación del Aire en la Salud de América Latina y el Caribe*. Washington, D.C: OPS, : Biblioteca Sede OPS.
- Organización Meteorológica Mundial. (1996). *m e t e o*. (P. Maicas, Editor) Recuperado el 16 de Febrero de 2015, de <http://meteo.maicas.net/articulos/circula.html>
- Orphal, J. C. (8 de marzo de 2003). Ultraviolet and visible absorption cross-sections for HITRAN. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 82, 491–504.
- Perner et al. (1976). Oh Radicals in the lower Troposphere. *Geophysical Research Letters*, 3(8), 466-468.
- Perner y Platt. (1979). Detection of Nitrous Acid in the Atmosphere by Differential. *Geophysical Research Letters*, 6(12), 917-920.
- Platt et al. (1980 (b)). Observations of nitrous acid in an urban atmosphere by differential optical absorption. *Nature*, 285, 312-314.
- Platt et al. (1980). Detection of NO<sub>3</sub> in the Polluted Troposphere by Differential Optical Absorption. *Geophysical Research Letters*, 7, 89-92.
- Platt y Stutz. (2008). *Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles and Applications*. Springer, Heidelberg.

- Platt, U. (8 de Noviembre de 1999). Modern methods of the measurement of atmospheric trace gases Invited Lecture. *Phys. Chem. Chem. Phys*, 1, 5409-5415.
- Portal Sanitario de la Región de Murcia. (s.f.). *Murcia Salud*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2014, de <http://www.murciasalud.es/pagina.php?id=180252&idsec=1573>
- Pratt y Pérez. (1997). *Industria Azucarera en El Salvador: Análisis de Sostenibilidad*. Septiembre.
- Rivas, H. (10 de mayo de 2012). Ordenamiento vehicular sin implementarse. *La Prensa Gráfica*.
- Rodríguez, R.(2004). *Meteorología y climatología*. Espana: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.
- Rudamas Carlos. (10-11 de Noviembre de 2015). Estudio de aplicaciones de la espectroscopia óptica en diferentes sistemas relacionados con la generación de energía renovable, el medio ambiente y el diagnóstico temprano de enfermedades importantes en El Salvador. *III Congreso Universitario de Investigaciones Científicas*. San Salvador.
- Satsumabayashi et al. (1995). Photochemical formations of lower fatty acids under long-range transport. *Atmos Environ*, 29, 255-266.
- Shapley, D. (1976). Nitrosamines: scientists on the trail of prime suspect in. urban cancer. *Science*, 191, 268-270.
- Sorgorb, M. A. (s.f.). *Toxicología Ambiental y Salud Pública*. Recuperado el 9 de enero de 2015, de Universitas Miguel Hernández de Elche: [http://repositorio.innovacionumh.es/Proyectos/P\\_22CursoMateriales/Miguel\\_Angel\\_Sogorb/Wimba/Espectroscopia\\_08.htm](http://repositorio.innovacionumh.es/Proyectos/P_22CursoMateriales/Miguel_Angel_Sogorb/Wimba/Espectroscopia_08.htm)
- Stutz et al. (16 de June de 2000). UV-visible absorption cross sections of nitrous acid. *Journal of Geophys Research Atmospheres*, 105, 14585–14592.
- Tarbuck, E. J. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. Madrid: Pearson Educación S.A.
- Tolcachier, A. (2006). *Libro Intramed La Salud de los Niños y el Medio Ambiente*. Argentina: Roemmers, Intramed.
- Trejo, R. M. (17 de Diciembre de 2003). *Opinandoenelsalvador.com*. (Asociación Pro Desarrollo Local (PRODESA)) Recuperado el 6 de Diciembre de 2014, de



<http://www.opinandoenelsalvador.com/wp-content/uploads/2009/06/propuestapoliticaairemarn1.pdf>

- UCM. (2006). *Universidad Complutense de Madrid*. (U. C. Madrid, Editor, & D. D. Experimentales, Productor) Recuperado el 28 de enero de 2016, de [http://pendientedemigracion.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/contaminacion\\_aerea.html](http://pendientedemigracion.ucm.es/info/diciex/proyectos/agua/contaminacion_aerea.html)
- Valeur, B. (2003). *Molecular Fluorescencia: Principles and Applications*. Toronto: Wiley-VCH.
- Viskari et al. (2000). Seasonal and diurnal variation in formaldehyde and acetaldehyde concentrations along a highway in Eastern Finland. *Atmos. Env.*, 34, 917-923.
- Voigt, S. O. (2001). The temperature dependence (203–293 K) of the absorption cross sections of O<sub>3</sub> in the 230–850 nm region measured by Fourier-transform spectroscopy. *Journal of Photochemistry and Photobiology A Chemistry*, 143, 1-9.
- Wagner et al. (2004). MAX-DOAS O<sub>4</sub> measurements: A new technique to derive information on atmospheric aerosols—Principles and information content. *Journal of Geophysical Research*, 109, D22205.
- Wagner et al. (2001). Retrieval and analysis of stratospheric NO<sub>2</sub> from the Global Ozone Monitoring Experiment. *Journal of Geophysical Research*, 106(24225).
- Wilson, J. (22 de november de 2007). *National Aeronautics and Space Administration*. Recuperado el 20 de diciembre de 2015, de [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/aura/spacecraft/omi.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/aura/spacecraft/omi.html)