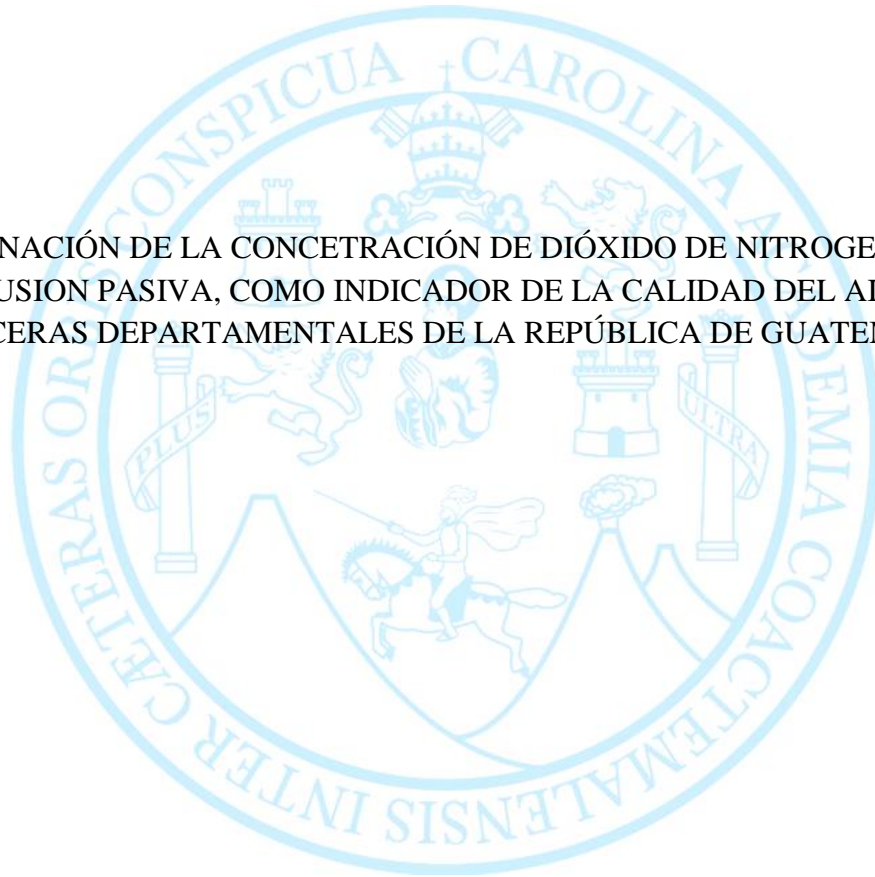


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE NITROGENO ( $\text{NO}_2$ )  
POR DIFUSION PASIVA, COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DEL AIRE EN 8  
CABECERAS DEPARTAMENTALES DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA



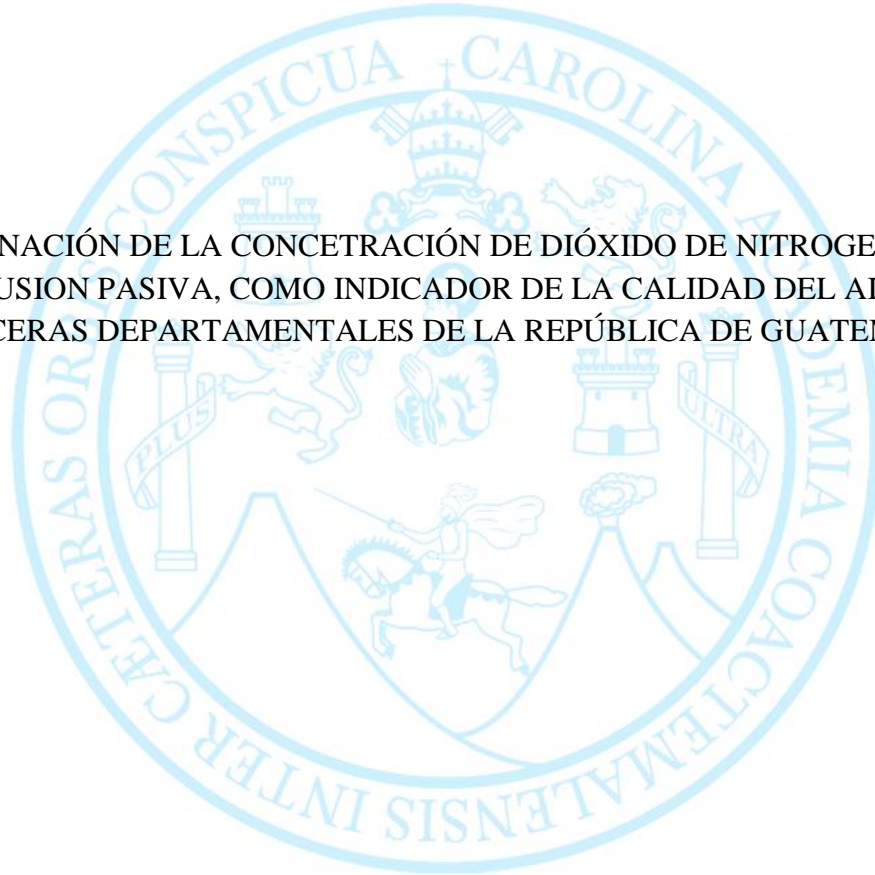
EDUARDO ANTONIO SAQUILMER VÁSQUEZ

QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE NITROGENO (NO<sub>2</sub>)  
POR DIFUSION PASIVA, COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DEL AIRE EN 8  
CABECERAS DEPARTAMENTALES DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA



EDUARDO ANTONIO SAQUILMER VÁSQUEZ

QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE NITROGENO (NO<sub>2</sub>)  
POR DIFUSION PASIVA, COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DEL AIRE EN 8  
CABECERAS DEPARTAMENTALES DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA

INFORME FINAL DE TESIS

PRESENTADO POR

EDUARDO ANTONIO SAQUILMER VÁSQUEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE

QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

## **JUNTA DIRECTIVA**

Dr. Rubén Daniel Velásquez Miranda	Decano
Licda. Elsa Julieta Salazar Meléndez de Ariza, M.A.	Secretaria
MSc. Miriam Carolina Guzmán Quillo	Vocal I
Dr. Juan Francisco Pérez Sabino	Vocal II
Lic. Carlos Manuel Maldonado Aguilera	Vocal III
Br. Andreina Delia Irene López Hernández	Vocal IV
Br. Carol Andrea Betancourt Herrera	Vocal V

## DEDICATORIA A:

- DIOS** Por darme la oportunidad de ser en este plano de la existencia espiritual y material.
- PADRES** Aura Vásquez y Marco Saquilmer, por darme la vida, por mostrarme el camino y otorgarme todo el apoyo para alcanzar mis metas.
- ESPOSA** Delmi Castañeda, tu amor puro ha llenado mi vida de luz, felicidad, sentido e inspiración para culminar las metas de los dos.
- HIJO** José Eduardo Saquilmer, por ser la razón de mi vida, fuerza de cada día y continuidad de mi existencia.
- ABUELOS** Guadalupe Mendoza, Lisandro Saquilmer<sup>†</sup>, Carlota Cruz<sup>†</sup>, Lázaro Vásquez, sus palabras y consejos me otorgaron sabiduría en este camino.
- HERMANOS** Ricardo y Carlos Saquilmer, por su apoyo incondicional y las travesuras de pequeños.
- SOBRINAS** Marisol y Helen Saquilmer, su alegría, cariño y bondad en mi vida.
- CUÑADOS** Maholy, Norma, Flavio, Brenda, por su apoyo para alcanzar las metas en la vida.
- AMIGOS** Mauricio García, Fernando Cotzajay, Julia Jiménez, Danilo Sosa, Balmore Valladares, Luis Saquilmer, José Ixcamparij, Carlos López<sup>†</sup>, Esteban Herrera, Mauricio Fernández, Lázaro Castro, Esmeralda Gutiérrez, Danny Chávez, Marvin Pérez, Karina Suarez, por brindarme su amistad, acompañarme y apoyarme. Por cuidar parte de mi vida a Gris, Oso, Jack, Dante, toby y Gatuna.

## AGRADECIMIENTOS A:

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por enseñar la realidad de Guatemala y brindarme la oportunidad de conocer la ciencia.
<b>Escuela de Química</b>	Por mostrarme los fundamentos del espacio, energía, y materia con la química.
<b>Laboratorio de Monitoreo del Aire LMA</b>	Por formarme en el área de la química del medio ambiente, la calidad del aire el aire en Guatemala y apoyarme con los recursos humanos, teóricos y materiales en la ejecución de este trabajo de investigación.
<b>Laboratorio de Química Ambiental LIQA</b>	Por darme la oportunidad de trabajar en el área de espectrofotometría uv/vis en este estudio.
<b>Unidad de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Delegaciones departamentales del MARN</b>	Por brindarme la oportunidad de recabar la información necesaria para encontrar los fundamentos de este estudio de la calidad del aire en Guatemala.

### **Catedráticos y Personal**

Licda. Nohemí Orozco, Lic. Jhoni Álvarez †, Lic. Pablo Oliva, Licda. Elisandra Hernández, Ing. Abelardo Pérez, Lic. Oswaldo Martínez, Dr. Francisco Pérez, Licda. Bessie Oliva, Lic. Ricardo Veliz, Lic. Eduardo Robles, Lic. Abraham Velázquez, Licda. Idoly Carranza, Lic. Leonel Orozco, Lic. Panchito, Vilma Gómez, Soily, Don Ovidio.

Por comprenderme, apoyarme, y guiarme durante la formación teórica y experimental de mi carrera, y enseñarme todo lo que representan las diferentes ramas de la química en esta realidad.

## INDICE

<b>I.</b>	<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>II.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>III.</b>	<b>ANTECEDENTES</b> .....	5
	<b>A. Área de estudio</b> .....	5
	<b>1. Ubicación y geografía</b> .....	5
	<b>2. Organización</b> .....	5
	<b>3. Clima</b> .....	5
	<b>4. Población</b> .....	6
	<b>5. Consumo energético de Guatemala</b> .....	6
	<b>B. Contaminantes atmosféricos</b> .....	6
	<b>C. Contaminantes criterio</b> .....	6
	<b>D. Estudios previos realizados sobre la contaminación del aire en Guatemala</b> .....	7
	<b>E. El dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub></b> .....	9
	<b>1. Fuentes de origen del NO<sub>2</sub></b> .....	9
	<b>2. Relación con otros contaminantes atmosféricos</b> .....	9
	<b>3. Efectos sobre la salud y el medio ambiente causados por el NO<sub>2</sub></b> .....	10
	<b>F. Situación del parque vehicular en Guatemala</b> .....	11
	<b>G. Método de difusión pasiva para NO<sub>2</sub></b> .....	14
	<b>1. Dispositivo para captación de NO<sub>2</sub></b> .....	15
	<b>2. Teoría de la difusión</b> .....	17
	<b>3. Química de la absorción del NO<sub>2</sub></b> .....	19
	<b>4. Química de la formación del colorante Azo-púrpura</b> .....	19
	<b>5. Representatividad</b> .....	20
<b>IV.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	21
<b>V.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	23
<b>VI.</b>	<b>HIPÓTESIS</b> .....	24
<b>VII.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	25
	<b>A. Universo y Muestra</b> .....	25
	<b>B. Materiales</b> .....	25
	<b>1. Equipo</b> .....	25

2.	Reactivos .....	25
3.	Material de muestreo .....	26
4.	Cristalería .....	26
C.	Métodos .....	27
1.	Preparación de los tubos pasivos .....	27
2.	Determinación del punto de muestreo.....	27
3.	Medición de parámetros Geográficos y Meteorológicos.....	28
4.	Preparación y análisis de las muestras .....	28
D.	Diseño de la Investigación.....	29
VIII.	RESULTADOS.....	30
A.	Ciudad de Guatemala, Guatemala.....	30
B.	Cobán, Alta Verapaz .....	31
C.	Puerto Barrios, Izabal .....	32
D.	Cuilapa, Santa Rosa .....	33
E.	Ciudad de Escuintla, Escuintla.....	34
F.	Ciudad de Quetzaltenango, Quetzaltenango .....	35
G.	Santa Cruz, Quiché.....	36
H.	Flores, Petén .....	37
IX.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	42
X.	CONCLUSIONES.....	48
XI.	RECOMENDACIONES.....	49
XII.	REFERENCIAS .....	50
XIII.	ANEXOS .....	54



## INDICE DE CUADROS

Cuadro No. 1 Medición de parámetros geográficos y meteorológicos en las cabeceras departamentales de Guatemala.....	28
Cuadro No. 2 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de la Ciudad de Guatemala.....	30
Cuadro No. 3 Concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en la Ciudad de Guatemala.....	30
Cuadro No. 4 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de la Ciudad de Cobán, Alta Verapaz.....	31
Cuadro No. 5 Concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en la Ciudad de Cobán, Alta Verapaz.....	31
Cuadro No. 6 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de Puerto Barrios, Izabal.....	32
Cuadro No. 7 Concentraciones de NO <sub>2</sub> determinadas en Puerto Barrios, Izabal.....	32
Cuadro No. 8 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de Cuilapa, Santa Rosa.....	33
Cuadro No. 9 Concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en Cuilapa, Santa Rosa.....	33
Cuadro No. 10 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de la Ciudad de Escuintla.....	34
Cuadro No. 11 Concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en la ciudad de Escuintla.....	34
Cuadro No. 12 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de la Ciudad de Quetzaltenango.....	35
Cuadro No. 13 Concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en la ciudad de Quetzaltenango.....	35
Cuadro No. 14 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de Santa Cruz del, Quiché.....	36
Cuadro No. 15 Concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en Santa Cruz del, Quiché.....	36
Cuadro No. 16 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo Flores, Petén.....	37
Cuadro No. 17 Concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en Flores, Petén.....	37
Cuadro No. 18 Concentraciones de NO <sub>2</sub> , en µg/m <sup>3</sup> por estaciones de monitoreo para cada cabecera departamental comparados con el valor guía de la –OMS–.....	38
Cuadro No. 19 Datos permisibles y no permisibles de acuerdo al valor guía de la –OMS– para NO <sub>2</sub> , por cabecera departamental.....	39
Cuadro No. 20 Cálculos estadísticos en base a los resultados obtenidos para NO <sub>2</sub> , en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala.....	39
Cuadro No. 21 Condiciones observadas de vehículos por hora en los 24 puntos de muestreo de NO <sub>2</sub> , en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala.....	41

## INDICE DE FIGURAS

Figura No. 1 Crecimiento del parque vehicular de Guatemala 1994-2013 .....	12
Figura No. 2 Crecimiento del parque vehicular del departamento de Guatemala 2005-2013 .....	12
Figura No. 3 Parque vehicular de Guatemala por departamento, año base 2013.....	13
Figura No. 4 Parque vehicular de Guatemala por combustible año base 2013 .....	14
Figura No. 5 Tubos pasivos para la captación de NO <sub>2</sub> .....	15
Figura No. 6 Rejillas de acero para la captación de NO <sub>2</sub> . .....	16
Figura No. 7 Contenedor para tubos pasivos de NO <sub>2</sub> .....	17
Figura No. 8 Gráfica de las concentraciones de NO <sub>2</sub> determinadas en la Ciudad de Guatemala, Guatemala. ....	30
Figura No. 9 Gráfica de las concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en la Ciudad de Cobán, Alta Verapaz. ....	31
Figura No. 10 Gráfica de las concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en Puerto Barrios, Izabal. ....	32
Figura No. 11 Gráfica de las concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en Cuilapa, Santa Rosa.....	33
Figura No. 12 Gráfica de las concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en la Ciudad de Escuintla. ....	34
Figura No. 13 Gráfica de las concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en la Ciudad de Quetzaltenango.....	35
Figura No. 14 Gráfica de las concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en Santa Cruz del, Quiché....	36
Figura No. 15 Gráfica de las concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en Flores, Petén. ....	37
Figura No. 16 Gráfica de las concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en los puntos de muestreo en las 8 cabeceras departamentales de Guatemala. ....	38
Figura No. 17 Gráfica del promedio de las concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en 8 cabeceras departamentales de Guatemala.....	40
Figura No. 18 Gráfica de dispersión de las concentraciones de NO <sub>2</sub> , determinadas en 8 cabeceras departamentales de Guatemala.....	40
Figura No. 19 Mapa de la República de Guatemala por regiones.....	54
Figura No. 20 Mapa de la velocidad y dirección del viento promedio anual de Guatemala.....	55
Figura No. 21 Comportamiento de las precipitaciones pluviales durante el año 2014. ....	56
Figura No. 22 Depresión tropical 2E entre el 31 de mayo y 3 de junio del año 2014.....	56
Figura No. 23 Comportamiento de la concentración de dióxido de nitrógeno NO <sub>2</sub> , emitida por fuentes móviles, en función de la altura y la distancia. ....	57
Figura No. 24 Funcionamiento de los tubos de difusión pasiva para dióxido de nitrógeno NO <sub>2</sub> . ....	57
Figura No. 25 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO <sub>2</sub> , en la República de Guatemala. .....	58
Figura No. 26 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO <sub>2</sub> , en la Ciudad de Guatemala, Guatemala. ....	59
Figura No. 27 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO <sub>2</sub> , en la Cabecera Departamental de Cobán, Alta Verapaz. ....	60
Figura No. 28 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO <sub>2</sub> , en la Cabecera Departamental de Puerto Barrios, Izabal. ....	61
Figura No. 29 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO <sub>2</sub> , e la Cabecera Departamental de Cuilapa, Santa Rosa.....	62

Figura No. 30 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO <sub>2</sub> , en la Ciudad de Escuintla, Escuintla.....	63
Figura No. 31 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO <sub>2</sub> , en la Ciudad de Quetzaltenango, Quetzaltenango.....	64
Figura No. 32 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO <sub>2</sub> , en la Cabecera Departamental de Santa Cruz del Quiche.....	65
Figura No. 33 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO <sub>2</sub> , en la Cabecera Departamental de Flores, Petén.....	66
Figura No. 34 Imagen del contenedor de tubos pasivos para NO <sub>2</sub> , en la Ciudad de Guatemala.....	67
Figura No. 35 Imagen del contenedor de tubos pasivos para NO <sub>2</sub> , en la Cabecera Departamental de Cobán, Alta Verapaz.....	68
Figura No. 36 Imagen del contenedor de tubos pasivos para NO <sub>2</sub> , en la Cabecera Departamental de Puerto Barrios, Izabal.....	69
Figura No. 37 Imagen del contenedor de tubos pasivos para NO <sub>2</sub> , en la Cabecera Departamental de Cuilapa, Santa Rosa.....	70
Figura No. 38 Imagen del contenedor de tubos pasivos para NO <sub>2</sub> , en la Ciudad de Escuintla.....	71
Figura No. 39 Imagen del contenedor de tubos pasivos para NO <sub>2</sub> , en la Ciudad de Quetzaltenango.....	72
Figura No. 40 Imagen del contenedor de tubos pasivos para NO <sub>2</sub> , en la Cabecera Departamental de Santa Cruz, Quiche.....	73
Figura No. 41 Imagen del contenedor de tubos pasivos para NO <sub>2</sub> , en la Ciudad de Flores, Petén.....	74
Figura No. 42 Imagen satelital de NO <sub>2</sub> , troposférico sobre México, Guatemala y El Salvador.....	75
Figura 43 Imagen satelital de NO <sub>2</sub> , troposférico sobre México, Guatemala y El Salvador.....	76
Figura No. 44 Imagen satelital de NO <sub>2</sub> , troposférico sobre varias ciudades en la tierra.....	77
Figura No. 45 Hoja de campo (II-01) para la medición de NO <sub>2</sub> , en Cobán, Alta Verapaz.....	78
Figura No. 46 Hoja de campo (III-02) para la medición de NO <sub>2</sub> , en Puerto Barrios, Izabal.....	79
Figura No. 47 Hoja de campo (IV-02) para la medición de NO <sub>2</sub> , en Cuilapa, Santa Rosa.....	80
Figura No. 48 Hoja de campo (V-02) para la medición de NO <sub>2</sub> , en la Ciudad de Escuintla.....	81
Figura No. 49 Hoja de campo (VI-02) para la medición de NO <sub>2</sub> , en la Ciudad de Quetzaltenango.....	82
Figura No. 50 Hoja de campo (VII-01) para la medición de NO <sub>2</sub> , en Santa Cruz del Quiché.....	83
Figura No. 51 Método de difusión pasiva para dióxido de nitrógeno NO <sub>2</sub> . (Hoja – 1).....	84
Figura No. 52 Método de difusión pasiva para dióxido de nitrógeno NO <sub>2</sub> . (Hoja – 2).....	85

## I. RESUMEN

El dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>, es uno de los principales contaminantes atmosféricos producto de actividades antropogénicas. Sin embargo, también se produce por fuentes naturales. La Organización mundial de la salud –OMS– clasifica al NO<sub>2</sub>, como un “contaminante criterio” debido a sus efectos nocivos para la salud de los humanos y deterioro del medio ambiente.

Este trabajo muestra los resultados de la investigación de la contaminación por NO<sub>2</sub>, en 8 cabeceras departamentales (Ciudad de Guatemala, Cobán, Puerto Barrios, Cuilapa, Escuintla, Quetzaltenango, Santa Cruz del Quiche, y Flores, Petén), de la República de Guatemala, por el método de difusión pasiva.

Este es el primer estudio realizado sobre la contaminación por NO<sub>2</sub>, en las ocho regiones (Metropolitana, Norte, Nor-Oriente, Sur-Oriente, Central, Sur-Occidente, Nor-Occidente, y Petén) de la República de Guatemala, basándose en el estudio exploratorio sobre “*Medición de la calidad del aire ambiente en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala 2013*” del –LMA/MARN–.

Este estudio se efectuó con el apoyo y bajo la supervisión del Laboratorio de Monitoreo del Aire –LMA– perteneciente a la Escuela de Química, de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El análisis de las muestras se realizó en el Laboratorio de Investigación y Química Ambiental –LIQA– de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, mediante espectrofotometría a 540 nanómetros.

El muestreo se llevó a cabo durante la época lluviosa por medio del método de difusión pasiva, determinando la presencia de NO<sub>2</sub>, en el cien por ciento de los puntos de muestreo (tres por cabecera departamental). Sin embargo, solo en la Ciudad de Guatemala fueron detectadas concentraciones por encima del valor guía establecido por la –OMS– (40µg/m<sub>3</sub>), para mediciones anuales.

No obstante, existieron puntos de muestreo en las cabeceras departamentales Escuintla, Quetzaltenango, y Santa Rosa que presentaron concentraciones mayores a 20µg/m<sup>3</sup>, lugares donde se evidencia alto flujo vehicular. La época lluviosa pudo haber tenido un impacto determinante en la disminución de la concentración de NO<sub>2</sub>, en el aire durante el tiempo de muestreo (30 días).

Las cabeceras departamentales de Alta Verapaz y Petén, presentaron los valores más bajos en este estudio.

Según los resultados obtenidos es evidente la presencia de NO<sub>2</sub> en la totalidad de los 24 puntos de muestreo en las 8 cabeceras departamentales de la República de Guatemala.

En donde, 22 de los puntos de medición presentan concentraciones de NO<sub>2</sub> que se encuentran dentro del límite permisible establecido por la –OMS– (40µg/m<sub>3</sub>), para mediciones anuales y 2 de los puntos correspondientes a la ciudad de Guatemala se encuentran por encima de este límite permisible.

Por lo tanto, la ciudad de Guatemala presenta un alto grado de contaminación por NO<sub>2</sub> en el ambiente. Las cabeceras departamentales Cobán, Puerto Barrios, Cuilapa, Escuintla, Quetzaltenango, Santa Cruz del Quiché, y Flores, no presentan contaminación significativa por NO<sub>2</sub>, en el ambiente.

Por lo anterior, se recomienda realizar otros estudios sobre el NO<sub>2</sub>, que comprendan otras zonas urbanas de la República de Guatemala, que utilicen otras metodologías o que abarquen la época seca del año, con lo cual se ayude a complementar la información existente del comportamiento del NO<sub>2</sub>, en este país.

## II. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la contaminación atmosférica es un problema que amenaza la salud mundial. El crecimiento poblacional, la industrialización y la urbanización, son las causas principales de este fenómeno atmosférico. La principal fuente de contaminación se debe a procesos de combustión, que generan la emisión de sustancias químicas nocivas al ambiente, en forma de gases, partículas y vapores, los cuales al concentrarse en la atmosfera bajo la radiación solar, interaccionan entre sí, formándose otros contaminantes, que conllevan a la alteración de la atmosfera terrestre (Mage & Zali, 1992).

En Guatemala en los últimos 20 años factores como el crecimiento poblacional y la urbanización han incidido en un aumento acelerado en la cantidad de vehículos. En su mayor parte vehículos usados, los cuales circulan sin ningún tipo de control sobre sus emisiones, además se han ido concentrando en las zonas urbanas, lo que ha ocasionado una mayor afluencia vehicular; esto genera la emisión de una gran cantidad de contaminantes hacia la atmosfera, exponiendo a la población a serios daños en la salud (Alvarado & Paredes, 1996; Oliva, 2008).

Desde el año 1994, mediante el apoyo técnico de Swisscontact, la Escuela de Química perteneciente a la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala inició el monitoreo del aire de forma sistemática en la ciudad de Guatemala, dando origen al Laboratorio de Monitoreo del Aire –LMA–. Otras instituciones como el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología –INSIVUMEH– monitorea la calidad del aire en los departamentos de Guatemala, Quetzaltenango, Puerto Barrios y Escuintla. La información que se ha generado en relación a la calidad del aire ha sido insuficiente y representa solo el 18% de los departamentos de la República de Guatemala. (Alvarado y Paredes, 1996; INSIVUMEH, 2010).

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales –MARN– en coordinación con el Laboratorio de Monitoreo del Aire –LMA– en el año 2013, realizaron el primer estudio exploratorio de la calidad del aire en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala, donde se encontró evidencia de contaminación en el aire, midiendo tres contaminantes; partículas totales en suspensión TPS, partículas menores a 10 micras de diámetro ( $PM_{10}$ ) y dióxido de azufre ( $SO_2$ ). Por lo anterior, es importante realizar la medición de otros contaminantes que complementen la información existente de la calidad del aire en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala (MARN, 2013).

El dióxido de nitrógeno es un contaminante gaseoso producto de procesos a combustión, principalmente de fuentes móviles y estacionarias. El  $NO_2$ , es emitido hacia la atmosfera terrestre, donde sufre transformaciones e interacciones químicas, por ende posee una particular relevancia al mantener una estrecha relación con otros contaminantes

atmosféricos. Su medición puede ser utilizada como un indicativo del grado de contaminación en el aire. Por lo tanto realizar mediciones del contaminante NO<sub>2</sub>, proveerá mayor información de la estimada por un solo contaminante (OMS, 2006).

Además la factibilidad de captación del NO<sub>2</sub>, por el método pasivo y posterior cuantificación por medio de métodos instrumentales, nos brinda una herramienta adecuada para realizar estimaciones del grado de contaminación en el aire de un área urbana.

El NO<sub>2</sub> es uno de los contaminantes atmosféricos de suma importancia para la determinación de la calidad del aire, la Organización Mundial de la Salud –OMS– lo clasifica como un contaminante criterio, debido a sus efectos dañinos para la salud y el bienestar de los seres vivos, por lo que se le considera un indicativo de la calidad del aire en zonas urbanas. El –LMA– ha medido su concentración en la Ciudad de Guatemala basándose en el método de difusión pasiva, otras entidades como el –INSIVUMEH– actualmente realizan mediciones de este contaminante a tiempo real en cuatro estaciones que poseen instrumentos de medición continua, situadas en los Departamentos de Guatemala, Quetzaltenango, Escuintla y Puerto Barrios (tres de las estaciones se ubican en zonas rurales), sin embargo aún no se ha realizado ninguna investigación del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), que comprenda las cabeceras departamentales de la República de Guatemala (OMS, 2006, p. 5, 17-18; INSIVUMEH, 2010).

En base a la información antes mencionada, es necesario realizar un estudio de línea base con el objetivo de determinar la existencia de contaminación por dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), en el aire de las cabeceras departamentales de la República de Guatemala. Cuyo origen se deba posiblemente a las emisiones de vehículos automotores y otras actividades humanas, que en la actualidad están ocasionando daños a la salud de la población y causando graves cambios en el clima que inherentemente afectarán a los ecosistemas (Oliva, 2008, p. 3; Álvarez, 2010, p.7; MARN, 2013, p. 27-28).

Este estudio fué de naturaleza descriptiva, experimental, transversal, donde se tomaron las muestras de aire de las 8 cabeceras departamentales de la República de Guatemala más representativas o contaminadas, correspondientes a las 8 regiones del país, en base al estudio exploratorio de la “calidad del aire en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala” LMA/MARN 2013, utilizando el método de difusión pasiva y estableciendo tres puntos de muestreo por cabecera departamental. En cada punto de muestreo se realizó la medición de los parámetros meteorológicos adecuados para la interpretación de resultados. Las muestras se recolectaron y se llevaron al laboratorio –LMA– donde se analizaron por espectrofotometría UV- Visible a 540 nanómetros. Por último se realizó una comparación con el valor guía de la Organización Mundial de la Salud que ha establecido un promedio anual de 40 µg/m<sup>3</sup> (OMS, 2006, p. 17).

### **III. ANTECEDENTES**

#### **A. Área de estudio**

##### **1. Ubicación y geografía**

Guatemala se ubica en América Central, ocupa el sector septentrional del istmo centroamericano, al sur del trópico de Cáncer en la franja tropical, se sitúa entre los paralelos 13°30' a 18°00' norte y los meridianos 88°00' a 92°30' oeste. Posee una superficie territorial de 108,889 Km<sup>2</sup>, presenta un relieve montañoso en casi el 60% de la superficie, con una altitud máxima de 4220 metros sobre el nivel del mar, limita al norte y oeste con México, al sur con el Océano Pacífico, al este con Belice y el Golfo de Honduras, al sureste con Honduras y el Salvador (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2009, p. 11).

##### **2. Organización**

Guatemala está dividida políticamente en ocho regiones (Metropolitana, Norte, Nor-Oriente, Sur-Oriente, Central, Sur-Occidente, Nor-Occidente, y Petén), 22 departamentos y 338 municipios registrados para 2014. La región metropolitana comprende el Departamento de Guatemala, (Ver anexo I) en donde se sitúa la capital del país. La región Norte comprende los departamentos de Alta Verapaz y Baja Verapaz. La región Nor-Oriente comprende los Departamentos de Chiquimula, El Progreso, Izabal y Zacapa. La región Sur-Oriente comprende los Departamentos de Jutiapa, Jalapa y Santa Rosa. La región Central comprende los Departamentos de Chimaltenango, Sacatepéquez y Escuintla. La región Nor-Occidente comprende los Departamentos de Huehuetenango y Quiché. La región Sur-Occidente comprende los Departamentos de Quetzaltenango, Retalhuleu, San Marcos, Suchitepéquez, Totonicapán y Sololá. La región de Petén comprende el Departamento de Petén (MARN, 2009, p. 13).

##### **3. Clima**

Guatemala alberga seis zonas climáticas, por lo que los parámetros meteorológicos (humedad, presión atmosférica, temperatura, viento y precipitación pluvial) difieren de una zona a otra. Debido a su posición geográfica y topografía el clima adquiere características particulares, variando extremadamente por su relieve y los regímenes de vientos húmedos provenientes del mar Caribe y del océano Pacífico. Posee dos estaciones al año, estación lluviosa conocida como invierno de mayo a octubre y estación seca conocida como verano de noviembre a abril (MARN, 2009, p. 12).



#### **4. Población**

En el año 1,994 la cantidad de habitantes en Guatemala era de aproximadamente 8,3 millones habitantes. Para el año 2002 la cantidad de habitantes era de aproximadamente 11,2 millones de habitantes. Según proyecciones del Instituto Nacional de Estadística para el 2014 la población de Guatemala será de aproximadamente 15,8 millones de habitantes (MARN, 2009, p. 14).

#### **5. Consumo energético de Guatemala**

La población de Guatemala es mayoritariamente rural, sin embargo, en la actualidad existe una tendencia a la urbanización, por lo cual existe un constante incremento en la cantidad de energía para cubrir las necesidades de la población. Según el Ministerio de Energía y Minas tomando como base el año 2009, el balance energético nacional muestra que el consumo de leña constituyó el 48.9%, el diesel con el 13.2%, las gasolinas con el 11.8%, el fuel oil con el 9%, por último el bagazo de caña 7,9% y el gas licuado de petróleo con el 3.8%. El NO<sub>2</sub>, es emitido hacia la atmosfera principalmente por los procesos de combustión en la generación de energía (MARN, 2009, p. 15-17).

##### **B. Contaminantes atmosféricos**

Estos se dividen en dos grupos: contaminantes primarios y contaminantes secundarios. Los contaminantes primarios son emitidos directamente de la fuente de emisión. Por ejemplo el dióxido de azufre SO<sub>2</sub>, los óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>, el monóxido de carbono CO. Los contaminantes secundarios se forman por medio de procesos químicos atmosféricos que actúan sobre los contaminantes primarios o incluso sobre especies químicas pertenecientes a la atmosfera. Generalmente los contaminantes secundarios son producidos por la tendencia natural de la atmosfera a oxidar las sustancias del medio; por ejemplo el ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, el cual es un contaminante secundario que se genera por la oxidación del contaminante primario SO<sub>2</sub>. El ácido nítrico HNO<sub>3</sub>, es el principal responsable de la lluvia acida y el ozono O<sub>3</sub>, en la troposfera (Álvarez, 2002, p. 8).

##### **C. Contaminantes criterio**

Son los contaminantes en el aire que han sido identificados como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres vivos. Estos contaminantes sirven para establecer niveles permisibles de concentraciones máximas de exposición que puedan ocasionar enfermedades de tipo respiratorio en las poblaciones. "Estos contaminantes fueron objeto de evaluaciones publicadas sobre la calidad del aire en los Estados Unidos (EU), con el objetivo de establecer niveles permisibles que protejan la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población". El término "contaminantes criterio" se ha adoptado en varios países, por lo que cada país establece sus normas de acuerdo a sus criterios de evaluación y

legislación. En las normas se establecen las concentraciones máximas de exposición ante estas especies nocivas en el aire para un periodo definido (OMS, 2006, p. 5; Darío Sbarato, Viviana Sbarato y Jose Ortega, 2007, p. 19).

Los contaminantes criterio son: el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, material particulado, monóxido de carbono, plomo y ozono (OMS, 2006; Darío Sbarato y otros, 2007, p. 19-20).

#### **D. Estudios previos realizados sobre la contaminación del aire en Guatemala**

En la década de 1970 se realizan los primeros estudios sobre la calidad del aire en Guatemala, promovidos por la Organización Panamericana de la Salud con el proyecto RED PANAIRE, y bajo la coordinación de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria – ERIS– de la Universidad San Carlos de Guatemala, donde se hace evidente la existencia de contaminación en el aire en la ciudad de Guatemala (Saravia, 1983, p. 2-4).

En el año 1994 nace el proyecto *Monitoreo de emisiones automotores de la ciudad de Guatemala*, desarrollado en la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad San Carlos de Guatemala, con la ayuda de la Fundación Suiza de Cooperación al desarrollo técnico Swisscontact. Durante este proyecto se da origen al Laboratorio de Monitoreo del Aire y se generan las primeras mediciones sistemáticas de los contaminantes atmosféricos: dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), material particulado, monóxido de carbono (CO), y ozono (O<sub>3</sub>), encontrando signos de contaminación y un deterioro en el aire de la ciudad de Guatemala (Alvarado y Paredes, 1996 p. 2).

Desde su inicio el Laboratorio de Monitoreo del Aire –LMA– ha realizado la medición del contaminante atmosférico dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), del cual se han presentado resultados en los informes anuales. En dichas publicaciones se han reportado valores que han sobrepasado el límite de referencia para NO<sub>2</sub>, siendo los años 1996 y 1997 en donde se reportan las mediciones más altas. Según la Organización Mundial de la Salud el valor límite de exposición del NO<sub>2</sub>, para un promedio anual es de 40 µg/m<sup>3</sup> (OMS, 2006; Álvarez, 2009, p. 19).

Oliva, (2008) realizó una compilación de la información existente de la calidad del aire en Guatemala con el objetivo de ordenar dicha información para constituir una herramienta de consulta relacionada con el tema de la calidad del aire. En esta investigación se expone la situación legal, técnico-científica y cultural en relación a la calidad del aire en Guatemala. Se concluyó que la "información existente en Guatemala es escasa y limitada, de poco acceso para la mayoría de la población". Los estudios relacionados en el tema del aire se han generado únicamente en la Ciudad de Guatemala; no existe información acerca de otros centros urbanos del país. Además se denota la falta de iniciativas por parte del Estado de Guatemala, para que controlen o regulen las fuentes de emisión de contaminantes hacia la

atmosfera. Por lo tanto, la indiferencia ante esta situación puede producir alteraciones irreversibles en los ecosistemas y provocar daños significativos para la salud del ser humano (Oliva, 2008, p 3-10, 34-38).

A partir del año 2010 el Laboratorio de Monitoreo del Aire empieza a trabajar en conjunto con la Unidad de Cambio Climático perteneciente al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales –MARN–, con la finalidad de aumentar el número de muestreos en la ciudad Guatemala y generar estudios en otras áreas del país. En el informe anual 2010 del –LMA– se reporta cierta tendencia al incremento en la concentración de NO<sub>2</sub>, (Álvarez, 2010, p. 7, 19-22).

En el año 2010 la Unidad de Cambio Climático del MARN, presentó el informe “Aerosoles Atmosféricos en Guatemala” basándose en imágenes satelitales generadas por la Universidad de Baltimore, Maryland/Centro de Vuelo Espacial Goddard, de la NASA, durante el año 2009, en donde se determinó el parámetro Aerosol Óptico Depth –AOD– que significa *profundidad óptica de aerosoles*, encontrando concentraciones de aerosoles sobre el territorio nacional de Guatemala (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2010, p. 3-24).

Para el año 2013 el Laboratorio de Monitoreo del Aire en coordinación con La Unidad de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales realizaron el primer Estudio exploratorio sobre la “**Medición de la calidad del aire ambiente en las Cabeceras Departamentales de la República de Guatemala 2013**”. Este se realizó de febrero a julio del 2013 en todo el territorio nacional, en los 22 departamentos de la República de Guatemala; comprendido en un 80% en la época seca. En este estudio se determinó la concentración en el aire de los contaminantes: TPS (partículas totales en suspensión), PM-10 (partículas menores a 10 micras) y SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre). Encontrando contaminación en el aire de los departamentos muestreados. En los resultados obtenidos se evidencian valores por arriba del límite máximo permisible, que ha establecido la –OMS– (MARN, 2013, p. 3-28).

Desde el 2009 el Programa de Monitoreo de la Calidad del Aire para la República de Guatemala, del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología –INSIVUMEH– ha realizado mediciones del contaminante criterio dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), mediante cuatro estaciones de medición continua situadas en cuatro departamentos; Guatemala (estación Radiosonda), Quetzaltenango (estación Labor Ovalle), Escuintla (estación Finca La Industria) e Izabal (estación Puerto Barrios). Presentando boletines especiales, diarios y anuales, por ejemplo: los resultados para el día 20 de enero del 2014, reportan niveles aceptables para el NO<sub>2</sub>, tomando como referencia el índice de Calidad del Aire (ICA) (ver anexo-6), que es un indicador de cuan limpio o contaminado está el aire en el sitio de medición, asociado a los efectos que pueda causar la exposición de la población ante tal contaminante. (INSIVUMEH, 2010).

En imágenes satelitales del año 2013 de la Agencia Espacial Europea –ESA– (ver figuras No. 42-43), se puede observar concentraciones de  $\text{NO}_2$ , troposférico sobre las ciudades de México, Guatemala y El Salvador. Esto evidencia contaminación atmosférica por  $\text{NO}_2$ . En la última imagen satelital (ver figura No. 44), del año 2003, se observan concentraciones de  $\text{NO}_2$ , en la atmosfera de distintas partes del mundo, precisamente sobre grandes ciudades, por lo que es evidente la contaminación por  $\text{NO}_2$ , debido a actividades antropogénicas (Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA), 2013).

### **E. El dióxido de nitrógeno $\text{NO}_2$**

El  $\text{NO}_2$ , es un compuesto químico en estado gaseoso de apariencia marrón-amarillento, formado por la reacción entre el oxígeno  $\text{O}_2$ , y nitrógeno  $\text{N}_2$ . Esta especie química es tóxica e irritante y se origina como un subproducto de procesos de combustión a elevadas temperaturas. Por tales motivos es frecuente encontrar concentraciones de  $\text{NO}_2$ , en el aire de zonas urbanas. Siendo de esta forma un contaminante atmosférico de suma importancia para la determinación de la calidad del aire, además posee una estrecha relación con otros contaminantes en el aire (Mage & Zali, 1992, p. 148; OMS, 2006, p. 17).

#### **1. Fuentes de origen del $\text{NO}_2$**

Las principales fuentes antropogénicas de emisión del dióxido de nitrógeno se encuentran asociadas a procesos de combustión a elevadas temperaturas cercanas a los  $1,100\text{ }^\circ\text{C}$ , como por ejemplo: termoeléctricas, refinerías de petróleo, motores de combustión interna, etc. Sin embargo, la mayor fuente de contaminación por  $\text{NO}_2$ , se debe a las emisiones de vehículos automotores. Otra parte del  $\text{NO}_2$ , formado en la atmosfera se debe a fuentes naturales, como por ejemplo: la actividad microbiana en los suelos, los incendios forestales, y fenómenos meteorológicos como los relámpagos. (Mage & Zali, 1992, p. 150; Álvarez, 2010 p. 19).

Una parte del dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ , que se encuentra en la atmósfera, es formado a partir del óxido de nitrógeno  $\text{NO}$ , derivado de procesos de combustión a elevadas temperaturas. El ( $\text{NO}$ ), al entrar en contacto con la atmósfera se oxida rápidamente por reacciones fotoquímicas, transformándose de  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$ . Su formación dependerá de la temperatura del medio y de la concentración de  $\text{NO}$  en el aire (Andrés, 2000, p. 2-4).

#### **2. Relación con otros contaminantes atmosféricos**

El dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ , se encuentra en la atmósfera asociado a otros contaminantes primarios, como por ejemplo: las partículas ultra finas, de esta manera llega a formar parte de los aerosoles atmosféricos. Es un gas precursor del ozono, y coexiste con otros oxidantes generados en procesos fotoquímicos en la atmósfera. Las concentraciones de  $\text{NO}_2$ , captadas en la atmósfera, mantienen una estrecha relación con las concentraciones de otros contaminantes tóxicos. Parte del  $\text{NO}_2$ , atmosférico se emite en forma de óxido nítrico, esto

debido a procesos de oxidación por acción del ozono. El  $\text{NO}_2$  es el principal causante de la formación de ozono troposférico y de aerosoles nitrados producto de reacciones fotoquímicas, estos procesos ocurren cuando el  $\text{NO}_2$  se encuentra en presencia de hidrocarburos y luz ultravioleta. El Ozono troposférico y los aerosoles nitrados contribuyen en una fracción importante de la masa del contaminante criterio, partículas menores a 2.5 micras ( $\text{PM}_{2.5}$ ) en el aire (OMS, 2006, p. 5-6; MARN, 2010, p. 5).

El dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ , es uno de los principales precursores de la precipitación ácida de las zonas urbanas e industrializadas, debido a la oxidación del  $\text{NO}_2$ , que provoca la formación de ácido nítrico  $\text{HNO}_3$ , en la atmosfera. El  $\text{NO}_2$ , puede causar daños a bosques y sistemas acuáticos, así como a edificios y monumentos históricos (Mage & Zali, 1992, p. 151; Álvarez, 2011, p. 19-21).

### **3. Efectos sobre la salud y el medio ambiente causados por el $\text{NO}_2$**

El aire limpio es indispensable para la salud y bienestar de la humanidad, esto se debe a que el Oxígeno es un elemento vital para el funcionamiento bioquímico del organismo humano. Sin embargo, en los últimos años la contaminación en el aire, en las grandes ciudades pone en riesgo la salud de las poblaciones. La Organización Mundial de la Salud –OMS– establece que más de dos millones de muertes prematuras al año son producto de la contaminación del aire. Un estudio deduce que la contaminación del aire es responsable del 1,4 % de todas las muertes anuales en el mundo, relacionado con enfermedades respiratorias. La mitad de este impacto es debido a las emisiones de los vehículos automotores (Regueira, 2009, p. 23-25; OMS, 2006, p. 5).

El dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ , es uno de los "contaminantes criterio" que posee efectos negativos para la salud del ser humano. Este gas se absorbe a través de la mucosa de las vías respiratorias, estudios realizados en personas y animales revelan que durante su inhalación se puede absorber entre un 80 y 90 por ciento. La exposición en concentraciones de corta duración superiores a  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , tiene efectos tóxicos y adversos en la salud. Las exposiciones directas pueden incrementar la susceptibilidad a infecciones respiratorias, puede causar desde una respuesta inflamatoria leve en las mucosas bronquiales hasta una bronquitis. Las exposiciones cortas provocan problemas respiratorios afectando mayormente a niños, los síntomas son tos, resfriados e irritación de garganta. El  $\text{NO}_2$  puede ser tóxico para diversos sistemas biológicos, se ha reportado que la exposición aguda a este gas afecta el sistema inmunológico y humoral, se ha reportado la reducción de linfocitos T, después de una exposición aguda de  $\text{NO}_2$ , lo que ocasiona una alteración del sistema inmune. Los asmáticos son más susceptibles, ante la exposición por  $\text{NO}_2$ , al disminuir la eficiencia respiratoria pulmonar (Mage & Zali, 1992, p. 151; Andrés, 2000, p. 2-3; Hernández, 2013, p. 8).

En la actualidad el valor guía de la –OMS– para el NO<sub>2</sub>, es de 40 µg/m<sup>3</sup>, para una media anual, este valor fue establecido para proteger la salud pública mundial. Las concentraciones de NO<sub>2</sub>, muestran con frecuencia una fuerte correlación con las de otros contaminantes en el aire, por lo tanto, su medición puede ser utilizada para estimar la presencia de otros contaminantes. Dado la factibilidad del método de difusión pasiva para captar el NO<sub>2</sub>, y su posterior cuantificación por métodos instrumentales, su medición brinda información que puede ser utilizada para establecer la calidad del aire en zonas urbanas (OMS, 2006, p. 7-8, 17-18).

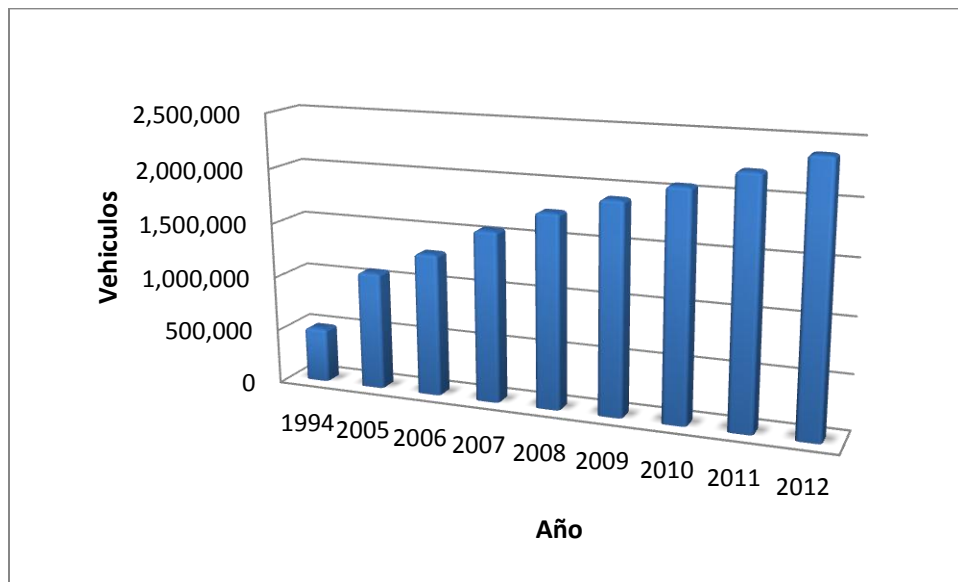
#### **F. Situación del parque vehicular en Guatemala**

Se sabe que la principal fuente de contaminación por dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>, son los vehículos a combustión. Estudios realizados en Centroamérica muestran que del 60 al 70% de los contaminantes que se emiten a la atmosfera provienen de descargas automotoras (Alvarado & Paredes, 1996, p. 3).

En la ciudad de Guatemala el problema de la contaminación en el aire se encuentra asociado directamente a las emisiones vehiculares, esto se debe al alto flujo vehicular que es ocasionado por un millón doscientos mil vehículos que circulan en las horas pico y al aumento acelerado del parque vehicular de Guatemala (ver figura No.1 y No.2). Este problema se ve mayormente agravado debido a la falta de políticas destinadas a verificar o regular las emisiones del parque vehicular del país. Además existe un constante ingreso de vehículos usados sin ningún tipo de control por parte del estado de Guatemala (Alvarado & Paredes, 1996, p. 3; MARN, 2012, p. 1-5).

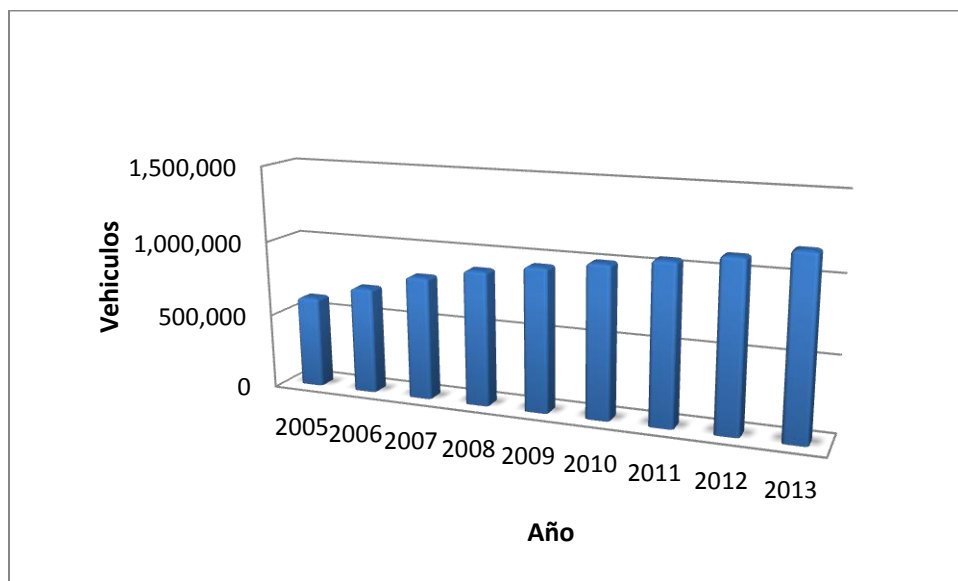
En el año de 1994, en la República de Guatemala el parque vehicular era de aproximadamente medio millón de vehículos, esto según información del registro vehicular de la Superintendencia de Administración Tributaria –SAT– (ver figura No. 1), para el año 2005 la cantidad se duplico, registrándose un millón de vehículos. Actualmente tomando como referencia el año 2013, se registran más de dos millones quinientos mil vehículos distribuidos en todo el territorio Nacional de Guatemala. Según datos de la –SAT– en el año 2005 (ver figura No. 2), se registraron seiscientos mil vehículos en el departamento de Guatemala, y para el año 2013 se registran un millón ciento setenta y seis mil vehículos (MARN, 2012, p. 1-5; SAT, 2014).

Figura No. 1 Crecimiento del parque vehicular de Guatemala 1994-2013



Fuente: Elaboración propia con base en los registros de la –SAT– años 1995-2012.

Figura No. 2 Crecimiento del parque vehicular del departamento de Guatemala 2005-2013

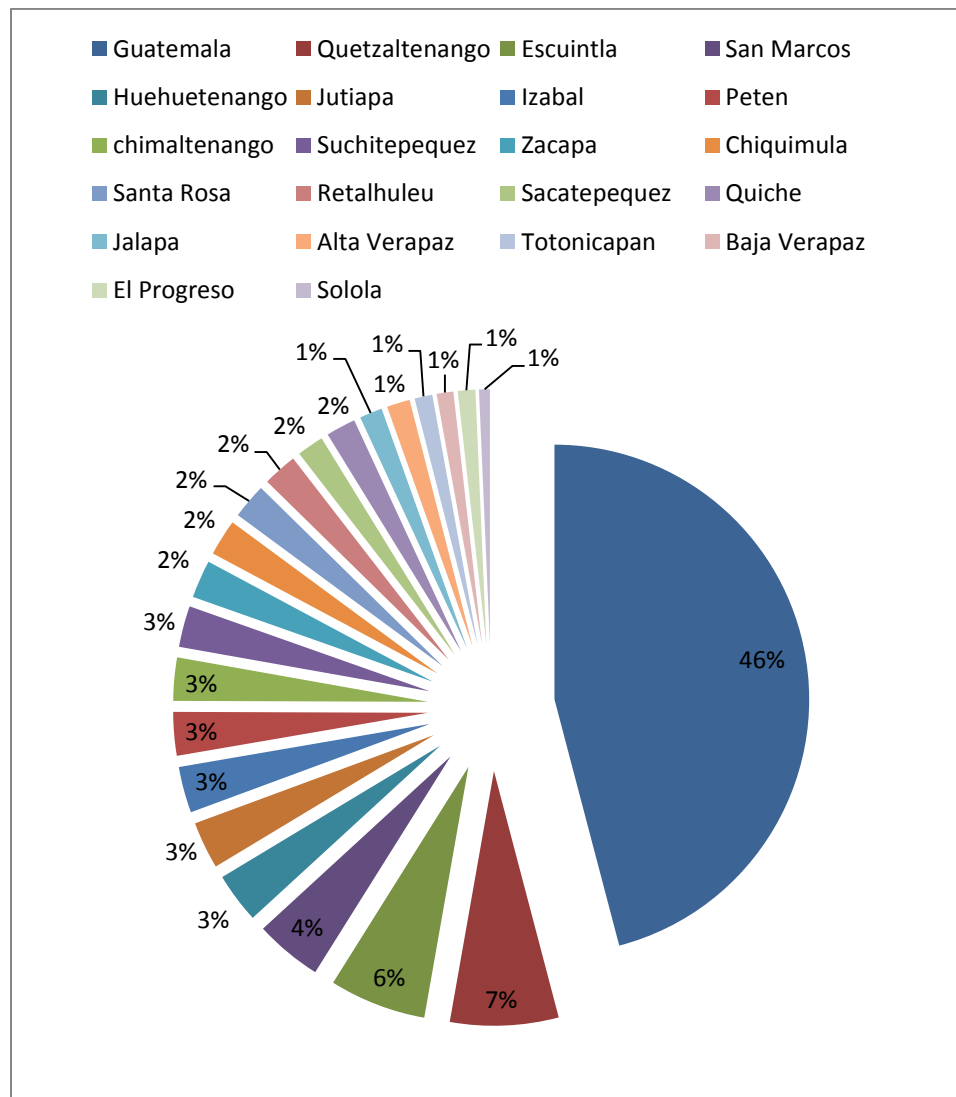


Fuente: Elaboración propia con base en los registros de la –SAT– años 2005-2013.

En los registros de la distribución de vehículos por departamento de la –SAT–, tomando como base el año 2013 (ver figura No. 3), en el departamento de Guatemala se encuentra la

mayor cantidad de vehículos con un millón ciento setenta y seis mil vehículos que representa el 46% del total de vehículos registrados en el país, seguido por el departamento de Quetzaltenango con ciento setenta mil vehículos que representa el 7% del total de vehículos registrados en el país, Escuintla con aproximadamente ciento cincuenta mil vehículos que representa el 6% del total de vehículos registrados en el país y San Marcos con casi ciento diez mil vehículos que corresponde al 4% del total de vehículos registrados en el país. En estos cuatro departamentos se concentra la mayor cantidad de vehículos, representando el 63% del total de vehículos distribuidos en todo el territorio nacional de Guatemala (MARN, 2012, p. 8-9; SAT, 2014).

Figura No. 3 Parque vehicular de Guatemala por departamento, año base 2013

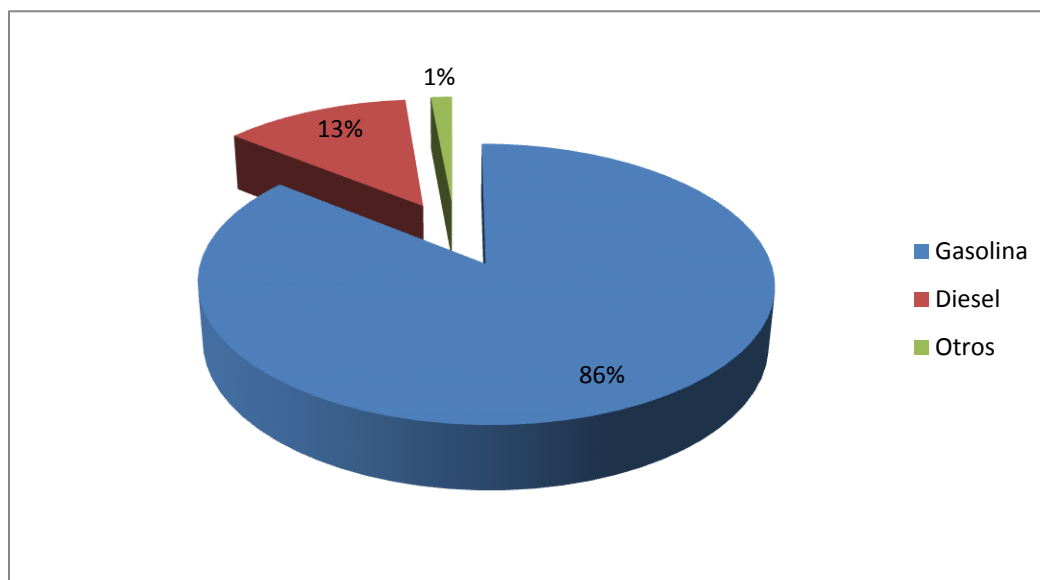


Fuente: elaboración propia con base en los registros de la –SAT– año base 2013.



Según información del registro vehicular de la –SAT– tomando como referencia el año 2013 (ver figura No. 3), en el territorio nacional de Guatemala se reportan aproximadamente dos millones doscientos mil vehículos que utilizan como combustible gasolina, lo que representa el 86% y un poco más de trescientos veinte mil vehículos que utilizan el combustible diesel, lo que representa el 13% del total de vehículos registrados. (MARN, 2012, p. 6-8, 1992; SAT, 2014).

Figura No. 4 Parque vehicular de Guatemala por combustible año base 2013



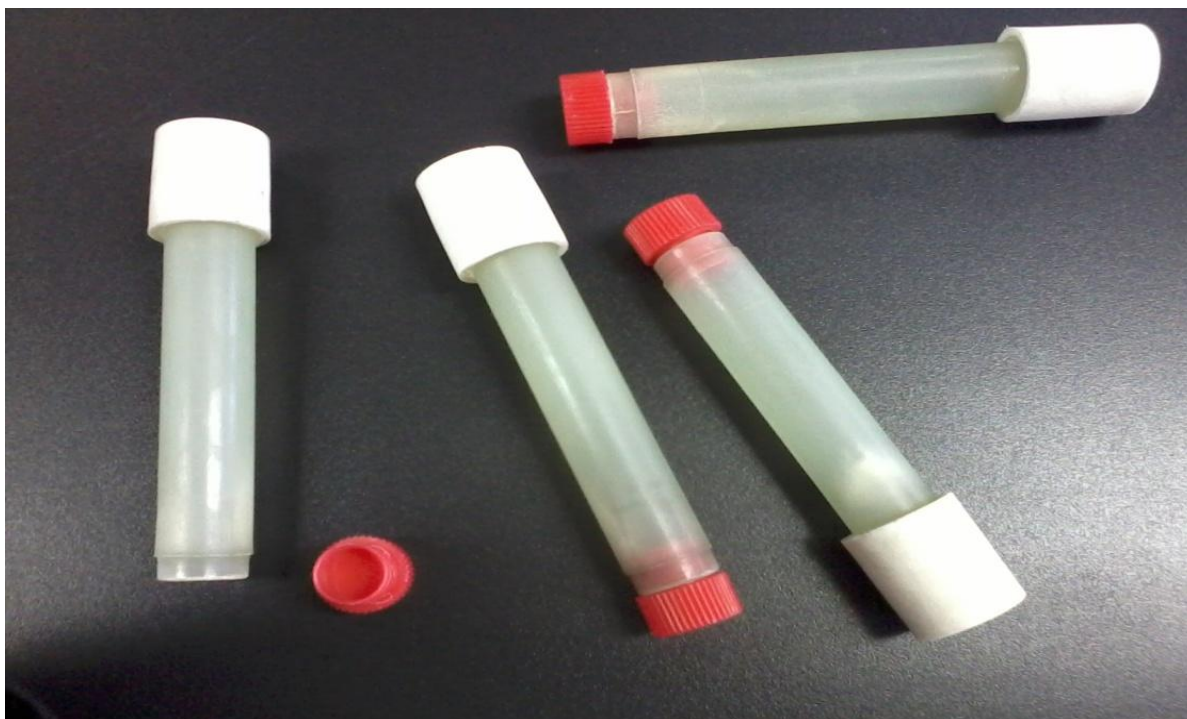
Fuente: elaboración propia con base en los registros de la –SAT– año base 2013.

### G. Método de difusión pasiva para NO<sub>2</sub>

Existen varios métodos instrumentales para la medición de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el ambiente. En la Ciudad de Guatemala el Laboratorio de Monitoreo del Aire –LMA– perteneciente a la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, ha medido el NO<sub>2</sub> por el método de difusión pasiva, basado en el método de Palmes, el cual utiliza colectores pasivos. Es un método bastante sencillo y de bajo costo, no requiere de energía eléctrica durante la captación de NO<sub>2</sub>. Es un método integral apto para el monitoreo de áreas a largo plazo, puede extenderse en muchas unidades de área para proveer información en cuanto a la distribución espacial de los contaminantes, obteniendo buenos resultados. Los dispositivos tienen la forma de tubos (ver figura No. 5), en donde se colectan las moléculas del contaminante que estén presentes en el aire. La captación del contaminante sucede al entrar el aire en el tubo inerte a una velocidad que es controlada por el proceso físico de difusión, hacia un medio absorbente. Luego del tiempo designado de exposición, el cual es de 30 días según el –SOP/LMA– la

muestra se regresa al laboratorio, en donde se realiza la desorción del contaminante y se le analiza cuantitativamente por espectrofotometría uv/vis a 540 nanómetros de longitud de onda (Martínez, 1997, p. 93-105; Laboratorio de Monitoreo del Aire [LMA]. 2001, p. 5-7).

Figura No. 5 Tubos pasivos para la captación de NO<sub>2</sub>



Fuente: Fotografía tomada en –LMA– enero-2014.

### 1. Dispositivo para captación de NO<sub>2</sub>

El dispositivo (tubo pasivo), es un tubo de polipropileno de 9.5 mm de diámetro interno y 7.4 cm de largo (ver figura No. 5), dentro del tubo se colocan tres redcillas de acero inoxidable (ver figura No. 6) recubiertas con trietanolamina, que es el medio absorbente de NO<sub>2</sub>. Los tubos se colocan en un contenedor para tubos (ver figura No. 7), que es expuesto al ambiente por un periodo de 30 días. Las muestras recolectadas son tratadas en el laboratorio en base al método pasivo, utilizando un reactivo de color, para luego leer la absorbancia a 540 nanómetros con celdas de 1.0 cm, y se determina la cantidad captada del contaminante por medio de una curva de calibración (LMA, 2001, p.26).

Figura No. 6 Rejillas de acero para la captación de  $\text{NO}_2$ .



Fuente: Fotografía tomada en –LMA– enero-2014.

Los tubos pasivos deben estar tapados de ambos lados antes de ser colocados en el punto de muestreo (ver figura No. 5), esto para que no exista contaminación previa al muestreo. Estos tubos se colocan retirando el tapón inferior (rojo) dentro del contenedor especial (ver figura No. 6), para protegerlos de la lluvia, minimizar la influencia del viento, y disminuir la exposición a la radiación solar. Este contenedor está fabricado de PVC, de medidas 120 mm de largo, 100 mm de diámetro y a ambos lados una fisura de 5 mm para la libre circulación del aire, debe colocarse a 2 metros sobre el nivel del suelo en ubicaciones sin restricciones del flujo de aire, como columnas libres, postes de luz. No deben de existir árboles o arbustos debido a que producen cambios en las corrientes de aire y por una probable fuente de insectos que puedan ingresar a los tubos pasivos. Se deben colocar cuatro tubos dentro del contenedor en el sitio de muestreo para obtener una mayor representatividad y precisión en los resultados (LMA, 2001, p. 26-28).

Figura No. 7 Contenedor para tubos pasivos de NO<sub>2</sub>.



Fuente: Fotografía tomada en la terraza del edificio T-10 del –LMA– enero 2014.

## 2. Teoría de la difusión

La difusión de un gas a través del aire esta descrita por la Ley de Fick:

$$F = -D \frac{dC}{dz} \quad \text{en} \quad \text{mol cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

(Shooter, 1993, p. 136).

Donde  $F$  es el flujo del gas,  $D$  es el coeficiente de difusión del gas a través del aire en ( $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ),  $C$  es la concentración del gas en ( $\text{mol cm}^{-3}$ ), y  $z$  es la longitud de difusión en (cm).

La cantidad del gas transferido ( $Q$  moles) en  $t$  segundos para un cilindro de radio  $r$  está dada por las ecuaciones:

$$Q = F(\pi r^2)t \text{ en mol}$$

$$Q = \frac{-D(C - C_o)\pi r^2 t}{z} \text{ en mol}$$

(Shooter, 1993, p. 136).

Donde  $(C - C_o)$  es el gradiente de concentración a lo largo de la longitud del cilindro  $Z$ . Si se utiliza un absorbente eficiente para remover el gas, entonces  $C_o$  se vuelve cero.

Cuando se recolecta el  $\text{NO}_2$  con los tubos de difusión pasiva, con las medidas; longitud de 7.1 cm y un radio interno 0.55 cm, el número de moles de  $\text{NO}_2$  recolectados está dado por:

$$Q = \frac{-(0.154) C(0.95)t}{7.1} \text{ en mol}$$

(Shooter, 1993, p. 136).

Donde  $C$  es la concentración de  $\text{NO}_2$  en el aire del ambiente en  $(\text{mol cm}^{-3})$ , se ha utilizado un valor de  $0.154 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para el coeficiente de difusión del  $\text{NO}_2$  en el aire.

Por lo tanto, la cantidad total que se acumula en el absorbente trietanolamina (TEA) se describe por:

$$Q = -72Ct$$

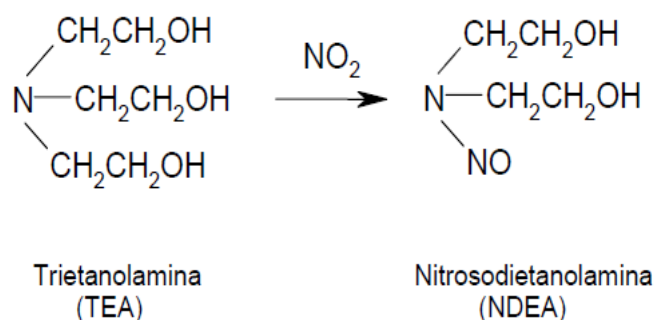
(Shooter, 1993, p. 137).

Donde  $C$  es la concentración de  $\text{NO}_2$  en el aire ambiente en  $\text{mol cm}^{-3}$ .

Esto significa que en 1 hora (3600 s) el tubo de difusión pasiva absorbe  $72C$  mol de  $\text{NO}_2$ , o que se absorbe el  $\text{NO}_2$  de un flujo de aire de  $72 \text{ cm}^3/\text{h}$ . el signo negativo implica que el flujo va de altas a bajas concentraciones (Shooter, 1993, pp. 136-137).

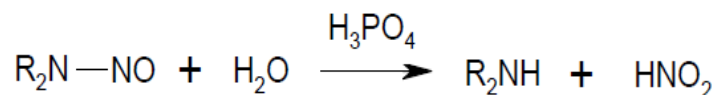
### 3. Química de la absorción del NO<sub>2</sub>

La absorción del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire, por la trietanolamina (TEA), ocurre cuando ambas especies reaccionan por medio de una sustitución nucleofílica SN<sub>2</sub> dando como producto la nitrosodietanolamina (NDEA) (Shooter, 1993, p. 138; Wade, 2005, p. 225-237).



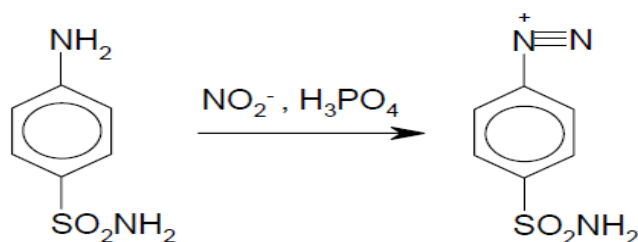
### 4. Química de la formación del colorante Azo-púrpura

La formación del Azo-colorante para la cuantificación del NO<sub>2</sub> captado por los tubos de difusión pasiva, procede de la siguiente manera: Las nitrosaminas se hidrolizan fácilmente para formar nitrito (del ácido nitroso)



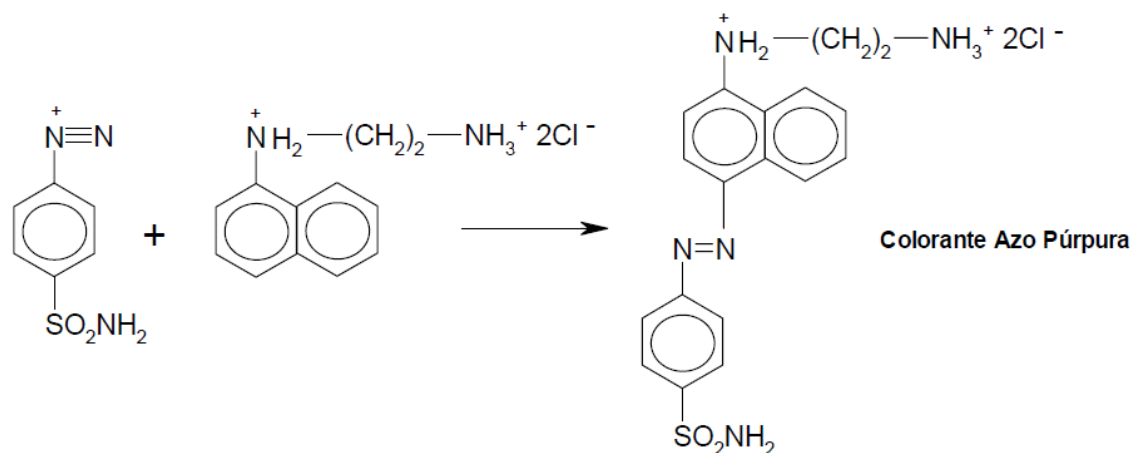
(Shooter, 1993, p. 138)

El proceso inicial en la formación de color es la diazotización de la sulfanilamida por nitrito:



(Shooter, 1993, p. 138)

La sal de diazonio formada se acopla entonces con la nitrosodietanolamina (NDEA) para formar un colorante Azo-púrpura:



(Shooter, 1993, p. 139).

## 5. Representatividad

Las concentraciones detectadas a orillas de una carretera suelen ser representativas para áreas urbanas muy limitadas debido a la influencia significativa que poseen las condiciones locales del lugar. Las mediciones realizadas en zonas urbanas alejadas de las fuentes de emisión de  $\text{NO}_2$ , son las más representativas, estas mediciones se clasifican como "concentraciones urbanas de referencia" (LMA, 2001, p. 6).

Por ejemplo, la medición de  $\text{NO}_2$ , mediante una serie de colectores pasivos situados a diferentes alturas y diferentes distancias de un semáforo sobre una carretera urbana durante un período limitado (ver figura No. 24), demuestra que la contaminación por  $\text{NO}_2$ , varía sustancialmente en función de la distancia del semáforo y de la altura donde fueron colocados los colectores pasivos (LMA, 2001, p.6).

#### IV. JUSTIFICACIÓN

En la Ciudad de Guatemala se han realizado estudios sobre la contaminación del aire, encontrando concentraciones que sobrepasan los valores guía establecidos por la Organización Mundial de la Salud –OMS–, sin embargo, el país posee otras ciudades de las cuales no se conoce acerca del tema de la contaminación en el aire, por lo cual, es necesario generar información de línea base para la calidad del aire en otras cabeceras departamentales de la República de Guatemala.

La Universidad de San Carlos de Guatemala ha realizado estudios en el tema de la contaminación en el aire. Otras instituciones como el –MARN– y el –INSIVUMEH– también han realizado estudios sobre el tema. Sin embargo, la información que se ha generado no es representativa para la totalidad de las áreas urbanas, tanto de la ciudad como de todo el territorio nacional de Guatemala. Por lo tanto, se hace evidente la necesidad de llevar a cabo este tipo de investigaciones técnico-científicas, que posteriormente puedan ser utilizadas como línea base en futuras investigaciones relacionadas con el tema de la contaminación en el aire.

Existe una lista extensa de sustancias químicas que forman parte de la contaminación atmosférica, sin embargo, son los contaminantes criterio los que representan un riesgo para la salud de las personas. Se sabe que la exposición ante estos contaminantes puede ocasionar serias enfermedades que afectan el sistema respiratorio. Por lo tanto, es de suma importancia conocer la situación actual que presentan otros centros urbanos de Guatemala en el tema de la contaminación del aire, con la finalidad de determinar los peligros a los cuales se pueden estar exponiendo dichas poblaciones.

El dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ , es uno de los contaminantes criterio que la –OMS– utiliza para definir la calidad del aire en zonas urbanas, su importancia radica en sus efectos perjudiciales para la salud y el deterioro del medio ambiente, además su principal fuente de origen se debe directamente a las emisiones vehiculares. Sin embargo, es la ciudad de Guatemala el único centro urbano del país en donde se ha medido su concentración en el aire.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fué realizar la medición del  $\text{NO}_2$ , por el método de difusión pasiva, como un indicativo de la calidad del aire en las cabeceras departamentales más representativas o contaminadas, en base al estudio exploratorio de la “Calidad del aire en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala, 2013”. Y comparando con el valor guía establecido por la –OMS– para  $\text{NO}_2$ , para conocer el grado de contaminación en el aire de dichos centros urbanos.

Estudios realizados por –LMA– demuestran que el problema de la contaminación del aire en las zonas urbanas es generado casi en su totalidad por las emisiones vehiculares.



Actualmente Guatemala ha registrado un incremento considerable en la cantidad de vehículos automotores. Por lo tanto, es necesario generar estudios científicos dirigidos a otros centros urbanos del país en donde se ha producido un incremento en el parque vehicular, con la finalidad de brindar información de línea base que pueda ser de utilidad para las autoridades locales en la toma de decisiones que ayuden a disminuir la descarga de contaminantes hacia la atmosfera. (Alvarado & Paredes, 1996 p.2)

En Guatemala lamentablemente se ha hecho muy poco por parte del estado en políticas o leyes que ayuden a contrarrestar las causas de la contaminación atmosférica y minimizar sus efectos nocivos en la salud. No obstante, en la actualidad se ha puesto un mayor interés en el tema, debido a las repercusiones climáticas que ha tenido el calentamiento global en este país, tales como el fenómeno del niño, sequias, tormentas etc.

Por lo cual en el año 2013 el Congreso de la República de Guatemala emitió el Decreto 7-2013 sobre la *“Ley Marco para Regular la Reducción de la Vulnerabilidad, la Adaptación Obligatoria ante los Efectos del Cambio Climático y Mitigación de Gases de Efecto Invernadero”* en donde se pone de manifiesto incentivar la investigación en el país desde los sectores público, académico y privado. Siendo ahora un deber constitucional contribuir a la generación de información científica en el tema de la contaminación atmosférica.

Una de las razones por lo que se presume la existencia de NO<sub>2</sub>, en otros centros urbanos de Guatemala, se debe a que en estudios realizados por Universidad de Baltimore, muestran una evidente presencia de aerosoles atmosféricos sobre el territorio nacional de Guatemala, la fracción más fina de los aerosoles es formada por precursores en estado gaseosos como lo es el NO<sub>2</sub>. Por lo anteriormente expuesto, se consideró adecuado realizar este estudio utilizando el método de difusión pasiva para la determinación de NO<sub>2</sub>, a modo de complementar la información existente.

## V. OBJETIVOS

### A. General:

Determinar la concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) por difusión pasiva, como indicador de la calidad del aire en 8 cabeceras departamentales de la República de Guatemala.

### B. Específicos:

1. Cuantificar la concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en el aire de las 8 cabeceras departamentales de la República de Guatemala por el método de difusión pasiva.
2. Determinar el grado de contaminación en el aire que presentan las 8 cabeceras departamentales de la República de Guatemala por el contaminante atmosférico dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), comparado con las Guías de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2005) como criterio para evaluación de calidad del aire.
3. Determinar los parámetros meteorológicos del ambiente: presión atmosférica, porcentaje de humedad, y temperatura, correspondientes a cada punto de muestreo.
4. Determinar los parámetros geográficos: coordenadas geográficas y la altitud, correspondiente a cada punto de muestreo.
5. Generar información necesaria que ayude a generar políticas para la reducción de la contaminación en el aire de las 8 cabeceras departamentales de la República de Guatemala.

## **VI. HIPÓTESIS**

Debido a la naturaleza descriptiva de este estudio, no se plantea hipótesis.

## VII. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Universo y Muestra

El universo estuvo comprendido por el aire de las 8 cabeceras departamentales de la República de Guatemala, la muestra estuvo comprendida por el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), captado en los tubos pasivos, colocados en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala, por un período de 30 días.

La cantidad de muestra captada fue susceptible a la velocidad del viento y a los cambios de temperatura y humedad.

### B. Materiales

#### 1. Equipo

- Espectrofotómetro Ultravioleta-Visible marca Thermo Scientific®, modelo Evolution 300, con lámpara de xenón y paquete software VISIONPro
- Espectrofotómetro, marca HACH®, modelo DR2800, con lámpara de tungsteno en atmosfera gaseosa (visible)
- Balanza analítica marca METTLER TOLEDO®, modelo AG245, capacidad 210 gramos
- Pipeta manual de volumen variable (10 – 100uL) marca Eppendorf Research®
- Agitador Barnstead Thermolyne, Type 16700 Mixer, modelo M16715, 60 Hz, 120 Volts, 24 Watts
- Estufa CORNING Hot plate, Scholar 170
- Bureta de vidrio marca DIN, de 25 ml (0,03 +/- 0.05 ml a 20°C)
- Higrómetro (medidor de humedad) marca RadioShack®
- IR Termómetro marca RadioShack®
- GPS marca GARMIN eTrex Vista® HCx

#### 2. Reactivos

- Trietanolamina  $\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3$  grado reactivo
- Acetona  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$  grado reactivo
- Sulfanilamida  $\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$  Fluka 86090
- N-1 naftiletildiamina  $\text{C}_{12}\text{H}_{16}\text{Cl}_2\text{N}_2$  (NEDA) Fluka 70720
- Ácido fosfórico  $\text{H}_3\text{PO}_4$  Fluca 79620
- Solución estándar  $\text{NO}_2$  1000 ppm MERK
- Nitrito de sodio  $\text{NaNO}_2$  (grado analítico >99 %)
- Agua destilada  $\text{H}_2\text{O}$  <18M $\Omega$  (ultra pura)

### 3. Material de muestreo

- 120 Tubos pasivos de polipropileno Passam AG, Suiza (diámetro interno 9.5mm, largo 7.4cm)
- 120 Tapones blancos de teflón y tapones de color rojo, para los tubos pasivos
- 360 Redes de acero inoxidable (diámetro 12mm)
- 12 Contenedor de policloruro de vinilo (diámetro 11.5 cm, largo 12 cm)
- 100 Sujetadores plásticos
- 10 Sujetadores de metal
- 1 Hielera marca Rubbermaid con capacidad de 4 Litros
- 1 caja de Bolsas marca Ziploc

### 4. Cristalería

- 10 Balones aforados de 100 ml
- 3 Balones aforados de 250 ml
- 5 Beakers de vidrio de 50 ml
- 5 Beacker de vidrio de 100 ml
- 2 Beacker de vidrio de 250 ml
- 100 Tubos de ensayo marca PYREX® No. 9820
- 2 Sujetador de bureta marca FISHER CASTALOY®-R
- 100 Puntas para Pipeta de volumen variable, maraca Eppendorf Research®, de 10 a 100uL
- 2 Celdas de cuarzo de 1cm
- 1 Agitador magnético
- 3 Agitadores de vidrio
- 3 Espátulas de metal
- 3 Probetas marca PYREX® No. 3076 de 10 ml
- 3 Probetas marca PYREX® No. 3076 de 25 ml
- 2 Rejillas para tubos de ensayo

## C. Métodos

### 1. Preparación de los tubos pasivos

Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

Método: Difusión pasiva

- 1.1. Se mezcla 1 parte de trietanolamina con 8 partes de acetona (la cantidad de solución deberá ser según la cantidad de redecillas de acero a sumergir).
- 1.2. Se sumergen las redecillas de acero (superficie de absorción del NO<sub>2</sub>) en la solución de trietanolamina/acetona por 25 minutos, luego se secan sobre papel filtro.
- 1.3. Se colocan 3 redecillas de acero inoxidable dentro de la tapa blanca de teflón, y se introduce el tubo pasivo (ver figura No. 6), con lo cual quedan sujetas las redecillas.
- 1.4. Luego se tapa el otro extremo del tubo pasivo con el tapón de color rojo (ver figura No. 6), para que no ingrese aire que pueda ocasionar resultados erróneos.
- 1.5. Los tubos deben prepararse con 24 horas de anticipación al muestreo. Una vez preparados deben colocarse en el refrigerador para su preservación. Durante el transporte al sitio de muestreo los tubos pasivos se deben colocar dentro de una hielera a temperatura <4°C.

### 2. Determinación del punto de muestreo

- 2.1. El punto donde se colocará el contenedor con los tubos pasivos, debe reunir ciertas características, como: estar en un espacio abierto, no deben existir árboles o edificaciones que ocasionen un cambio en la corriente del viento.
- 2.2. Ya designado el punto de muestreo, debe colocarse el contenedor amarrado con los sujetadores plásticos o de metal, en un lugar a una distancia superior a 5 metros del nivel del suelo.
- 2.3. Se colocan dentro del contenedor los tubos pasivos, retirándoles antes la tapa roja, con la parte destapada hacia abajo.
- 2.4. Los tubos deben permanecer por 30 días, según el método de difusión pasiva para dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) perteneciente a Procedimientos de Operación Estándar (SOP) del Laboratorio Monitoreo de Aire, de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

2.5.Después de exposición de 30días, los tubos son recolectados, colocándoles la tapadera de color rojo, esto para impedir el ingreso de más aire.

2.6.Los tubos ya recolectados y debidamente cerrados, deben colocarse en una nevera a una temperatura de (0 a 4°C), bajo estas condiciones la estabilidad de los tubos pasivos, es suficiente para su posterior análisis en el laboratorio. (estas muestras pueden permanecer por un periodo de 15 días en el refrigerador antes de analizarlas)

### 3. Medición de parámetros Geográficos y Meteorológicos

Cuadro No. 1 Medición de parámetros geográficos y meteorológicos en las cabeceras departamentales de Guatemala.

No. de estación	Dirección del punto de muestreo	Coordenadas	Fecha del muestreo	Altitud	Presión atmosférica	Temperatura	% humedad

Fuente: Elaboración propia enero-2014.

### 4. Preparación y análisis de las muestras

4.1.Remove la tapa, y trasladar las 3 redes de acero, con una pinza a un tubo de ensayo.

4.2.Con la Bureta de 25 ml, agregar 4 ml del reactivo de color a cada tubo de ensayo que contenga la muestra.

4.3.Tapar el tubo de ensayo y agitar con el Bortex, dejar pasar 15 minutos para que se desarrolle el color.

4.4.Para leer las muestras se utiliza un espectrofotómetro UV/vis a 540 nanómetros de longitud de onda.

4.5.Leer el cero con la celda conteniendo agua destilada y el reactivo de color.

4.6. Se lee la absorbancia de las soluciones de la curva de calibración y de las muestras a 540 nm.

4.7.Interpretar los resultados obtenidos y expresar la concentración en micro gramos de NO<sub>2</sub> por metro cubico de aire (ug/m<sup>3</sup>).

#### **D. Diseño de la Investigación**

Esta investigación fue de naturaleza descriptiva, experimental, transversal, donde se determinó la presencia del contaminante atmosférico dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire de las 8 cabeceras departamentales de la República de Guatemala, utilizando espectrofotometría UV- Visible.

El muestreo se realizó por conveniencia, muestreando el departamento más contaminado por región (Metropolitana, Norte, Nor-Oriente, Sur-Oriente, Central, Sur-Occidente, Nor-Occidente, y Petén) de la República de Guatemala, basándose en el estudio exploratorio sobre *“Medición de la calidad del aire ambiente en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala 2013”* del –LMA/MARN–.

Se establecieron tres puntos de muestreo por Cabecera Departamental representativa de cada región (Metropolitana, Norte, Nor-Oriente, Sur-Oriente, Central, Sur-Occidente, Nor-Occidente, y Petén), para obtener replicas en los resultados. Se consideró uno de los puntos de muestreo previamente establecido en el estudio exploratorio LMA/MARN anteriormente mencionado, como lugar de muestreo previamente establecido.

Los 8 departamentos en los cuales se realizó la medición de NO<sub>2</sub>, fueron: Escuintla, Quiché, Petén, Quetzaltenango, Santa Rosa, Alta Verapaz, Izabal, y Guatemala.

En cada punto de muestreo de los departamentos (designados por región) de la República de Guatemala, se colocó un contenedor donde se captará el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) por un periodo de 30 días, según el método de NO<sub>2</sub> para difusión pasiva incluido en los Procedimientos de Operación Estándar (SOP) del Laboratorio de Monitoreo de Aire perteneciente a la Universidad San Carlos de Guatemala.

A los resultados obtenidos se les realizó un análisis estadístico descriptivo, que comprende el cálculo de la media, desviación estándar y coeficiente de variación. Luego cada uno de los resultados se comparó con la norma o criterio establecido por la –OMS– para el NO<sub>2</sub>, y se clasificaron como permisibles o no permisibles según sea el caso, además se reportó la frecuencia en que las muestras se ubican en cada categoría.

Se tomaron las coordenadas específicas del sitio, la altitud, así como los parámetros meteorológicos; presión atmosférica, porcentaje de humedad y temperatura. Además se recopilaron los parámetros de dirección y velocidad de viento, en la base de datos del –INSIVUMEH– correspondientes a los días de medición. Estos datos nos proporcionaron información necesaria para la interpretación de resultados.



## VIII. RESULTADOS

### A. Ciudad de Guatemala, Guatemala

Cuadro No. 2 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de la Ciudad de Guatemala.

No. de estación	Dirección del punto de muestreo	Coordenadas	Fecha del muestreo	Altitud	Presión atmosférica	Temperatura	% humedad
I-01	INCAP Calzada Roosevelt, 6-25 Zona 11	N 140 36.968' W 900 32.393'	Julio 2014	1527 msnm	641 mm Hg	25 °C	65 %
I-02	Edificio T-10, Facultad de Ciencias Químicas, Ciudad Universitaria Zona 12	N 140 35.101' W 900 33.284'	Julio 2014	1522 msnm	639 mm Hg	24°C	67%
I-03	Museo de la Universidad de San Carlos -MUSAC- 9ª. Av. Y 10ª. Calle, Zona 1	N 140 38.326' W 900 30.657'	Julio 2014	1508 msnm	641 mm Hg	24°C	58%

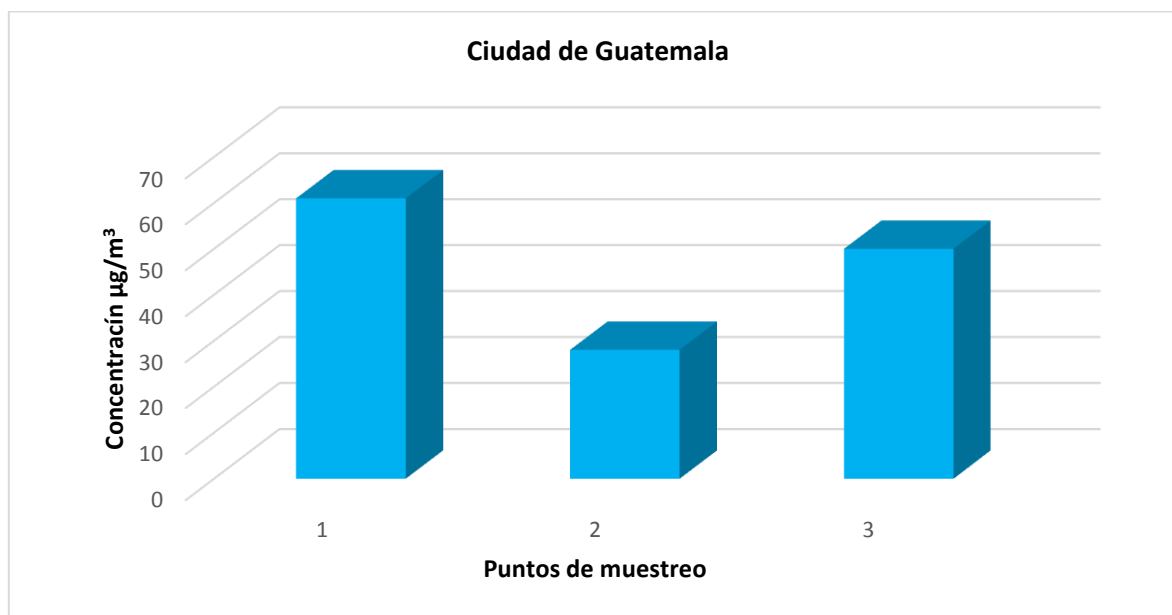
Fuente: Datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 3 Concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en la Ciudad de Guatemala.

No de estación	Concentración de NO <sub>2</sub> en µg/m <sup>3</sup>
I-01	61
I-02	28
I-03	50

Fuente: datos de laboratorio

Figura No. 8 Gráfica de las concentraciones de NO<sub>2</sub> determinadas en la Ciudad de Guatemala, Guatemala.



Fuente: Datos interpretados en el laboratorio de Monitoreo del aire.

## B. Cobán, Alta Verapaz

Cuadro No. 4 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de la Ciudad de Cobán, Alta Verapaz.

No. de estación	Dirección del punto de muestreo	Coordenadas	Fecha del muestreo	Altitud	Presión atmosférica	Temperatura	% humedad
II-01	Delegación regional del MARN, 5 Av. 1-31 Zona 1, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala	N 15°28'144" W 90°22'424"	Julio 2014	1333 msnm	650 mm Hg	24°C	28 %
II-02	Municipalidad, 1er Av. 1-11 Zona 1, Cobán, Alta Verapaz, Guatemala	N 15°28'432" W 90°22'496"	Julio 2014	1331 msnm	649 mm Hg	24°C	28 %
II-03	Casa Particular, 6Av. 5-48 Zona 3 de Cobán, Alta Verapaz, Guatemala	N 15°27'936" W 90°22'364"	Julio 2014	1307 msnm	652 mm Hg	25°C	27 %

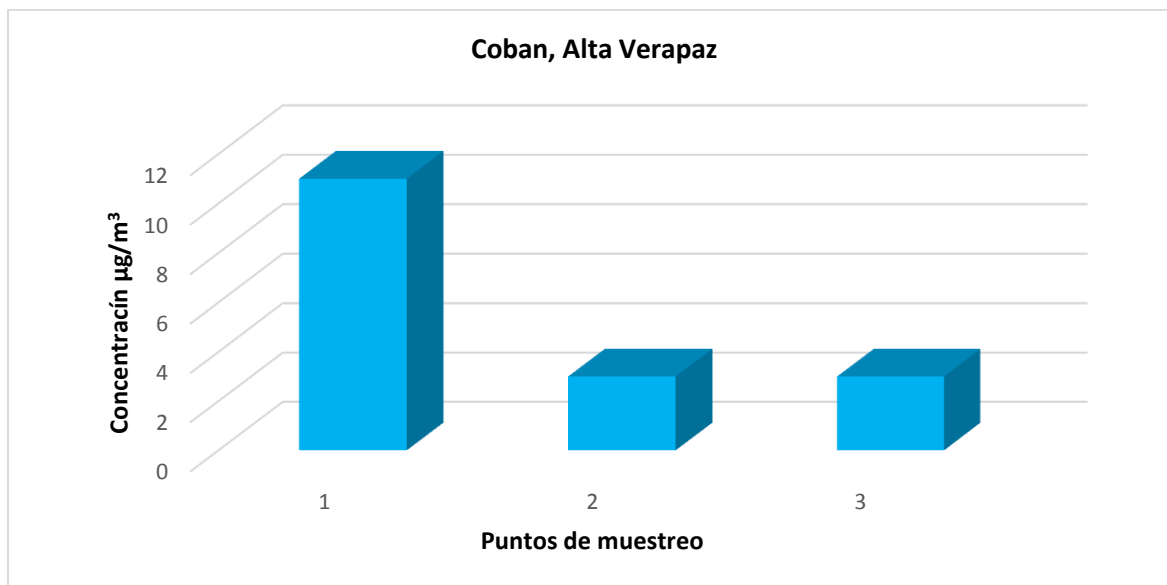
Fuente: Datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 5 Concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en la Ciudad de Cobán, Alta Verapaz

No de estación	Concentración de NO <sub>2</sub> en µg/m <sup>3</sup>
II-01	11
II-02	3
II-03	3

Fuente: datos de laboratorio

Figura No. 9 Gráfica de las concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en la Ciudad de Cobán, Alta Verapaz.



Fuente: Datos interpretados en el laboratorio de Monitoreo del aire.

### C. Puerto Barrios, Izabal

Cuadro No. 6 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de Puerto Barrios, Izabal.

No. de estación	Dirección del punto de muestreo	Coordenadas	Fecha del muestreo	Altitud	Presión atmosférica	Temperatura	% humedad
III-01	Portuaria Santo Tomas de Castilla, 3ª calle, Puerto Barrios Izabal, Guatemala	N 15°41'356" W 88°37'976"	Agosto 2014	2 msnm	760 mm Hg	28°C	64 %
III-02	Hotel Pala Real 20 Y 21 calle, Calzada Justo Rufino Barrios, Puerto Barrios Izabal, Guatemala	N 15°43'248" W 88°35'852"	Agosto 2014	3 msnm	758 mm Hg	30°C	58 %
III-03	Casa Particular 6ta Av. Entre 12 y 13 calle, Puerto Barrios Izabal, Guatemala	N 15°43'968" W 88°35'204"	Agosto 2014	5 msnm	757 mm Hg	28°C	62 %

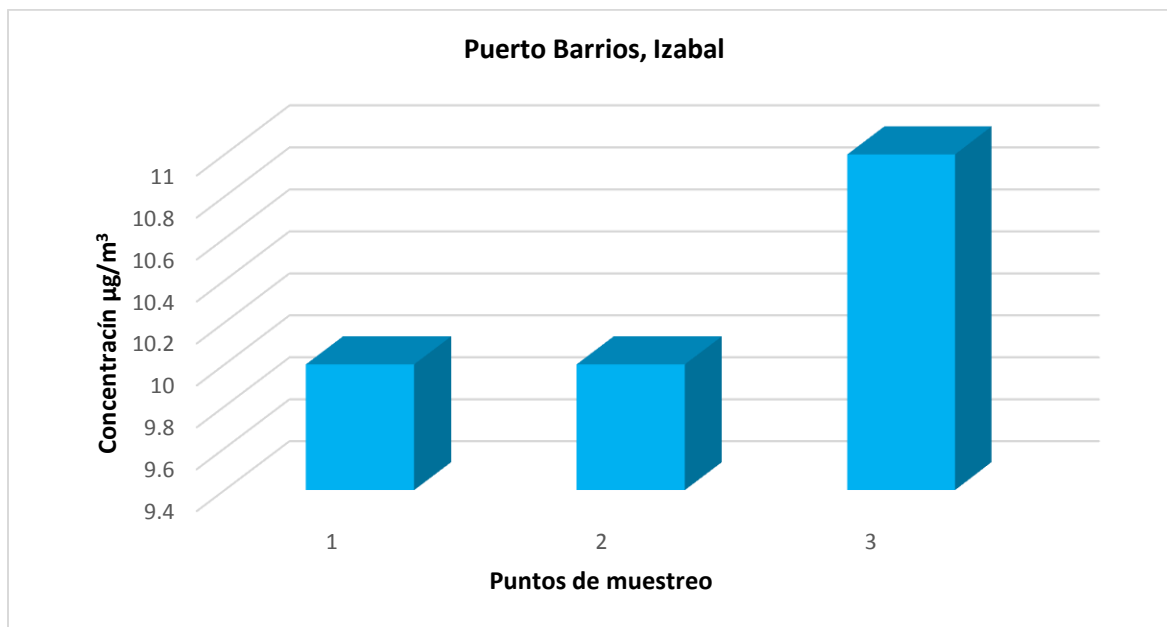
Fuente: Datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 7 Concentraciones de NO<sub>2</sub> determinadas en Puerto Barrios, Izabal

No de estación	Concentración de NO <sub>2</sub> en µg/m <sup>3</sup>
III-01	10
III-02	10
III-03	11

Fuente: datos de laboratorio

Figura No. 10 Gráfica de las concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en Puerto Barrios, Izabal.



Fuente: Datos interpretados en el laboratorio de Monitoreo del aire.

### D. Cuilapa, Santa Rosa

Cuadro No. 8 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de Cuilapa, Santa Rosa.

No. de estación	Dirección del punto de muestreo	Coordenadas	Fecha del muestreo	Altitud	Presión atmosférica	Temperatura	% humedad
IV-01	Delegación regional del MARN, 4ta calle 2-09 Zona 3 Cuilapa Santa Rosa, Guatemala	N 14°16'798" W 90°17'903"	Junio 2014	939 msnm	685 mm Hg	38°C	45 %
IV-02	Casa Particular, 3er Av. 2-20 Zona 2 de Cuilapa Santa Rosa, Guatemala	N 14°16'588" W 90°17'936"	Junio 2014	895 msnm	687 mm Hg	31°C	46 %
IV-03	Casa Particular, 1er calle 2-93 Zona 4 Cuilapa Santa Rosa, Guatemala	N 14°16'927" W 90°18'638"	Junio 2014	904 msnm	686 mm Hg	32°C	45 %

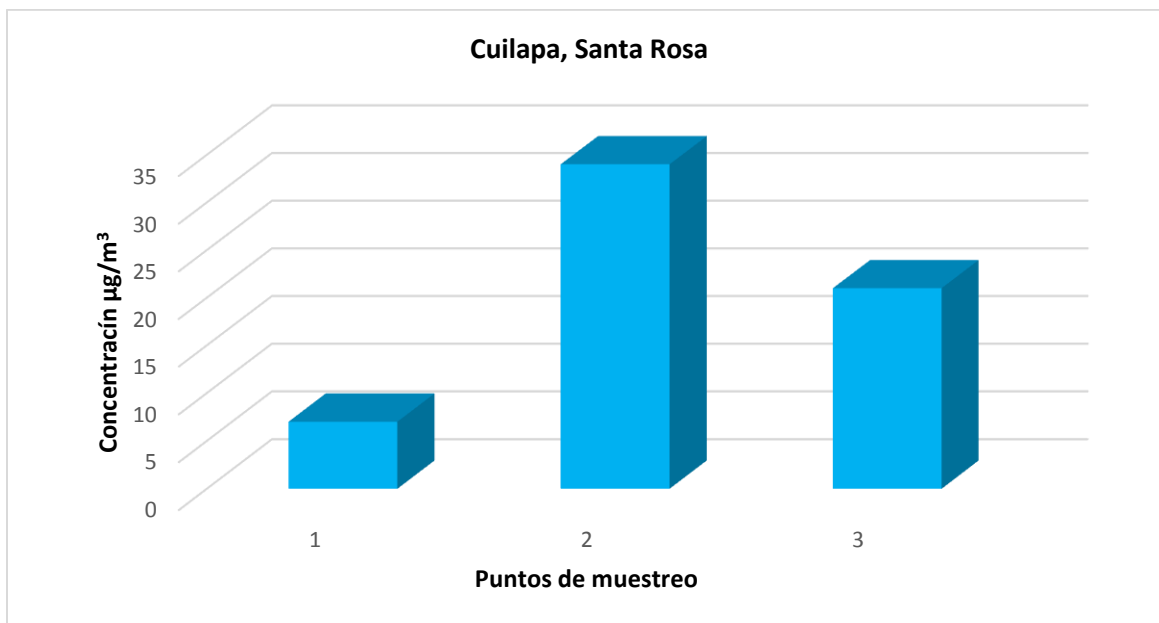
Fuente: Datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 9 Concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en Cuilapa, Santa Rosa.

No de estación	Concentración de NO <sub>2</sub> en µg/m <sup>3</sup>
IV-01	7
IV-02	34
IV-03	21

Fuente: datos de laboratorio

Figura No. 11 Gráfica de las concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en Cuilapa, Santa Rosa.



Fuente: Datos interpretados en el laboratorio de Monitoreo del aire.

### E. Ciudad de Escuintla, Escuintla

Cuadro No. 10 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de la Ciudad de Escuintla.

No. de estación	Dirección del punto de muestreo	Coordenadas	Fecha del muestreo	Altitud	Presión atmosférica	Temperatura	% humedad
V-01	Gobernación Departamental, 9 Calle 3-41 zona 1 de Escuintla, Guatemala	N 14°18'025" W 90°47'145"	Mayo 2014	344 msnm	749 mm Hg	36°C	48 %
V-02	Sanatorio Lima, 14 Calle 1-41 zona 3 de Escuintla, Guatemala	N 14°17'697" W 90°47'016"	Mayo 2014	346 msnm	745 mm Hg	38°C	51 %
V-03	Casa Particular 1 Av. 3-22 zona 1 de Escuintla, Guatemala	N 14°18'476" W 90°47'776"	Mayo 2014	361 msnm	747 mm Hg	36°C	52 %

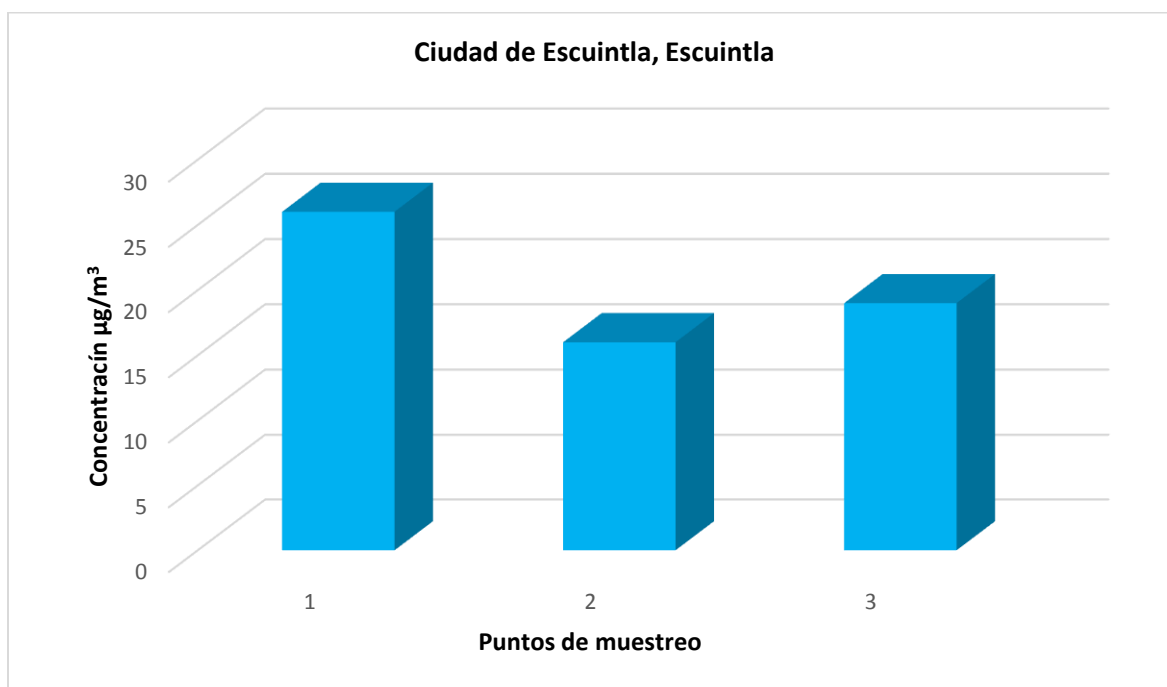
Fuente: Datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 11 Concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en la ciudad de Escuintla.

No de estación	Concentración de NO <sub>2</sub> en µg/m <sup>3</sup>
V-01	26
V-02	16
V-03	19

Fuente: datos de laboratorio

Figura No. 12 Gráfica de las concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en la Ciudad de Escuintla.



Fuente: Datos interpretados en el laboratorio de Monitoreo del aire.

## F. Ciudad de Quetzaltenango, Quetzaltenango

Cuadro No. 12 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de la Ciudad de Quetzaltenango.

No. de estación	Dirección del punto de muestreo	Coordenadas	Fecha del muestreo	Altitud	Presión atmosférica	Temperatura	% humedad
VI-01	Hostal Nativo, 13 Av. Pasaje Enríquez Zona 1, Ciudad de Quetzaltenango	N 14°50'089" W 91°31'137"	Mayo 2014	2342 msnm	594 mm Hg	23°C	29 %
VI-02	Estación de Apoyo, Bomberos Voluntarios, 29 Av. 7-25 Zona 3, Ciudad de Quetzaltenango	N 14° 50'59" W 91° 32'21"	Mayo 2014	2371 msnm	601 mm Hg	21°C	32 %
VI-03	Quinta Compañía, Estación de Bomberos Voluntarios, 1 Calle 12-89 zona 3 Ciudad de Quetzaltenango	N 14°50'470" W 91°31'038"	Mayo 2014	2351 msnm	599 mm Hg	22°C	29 %

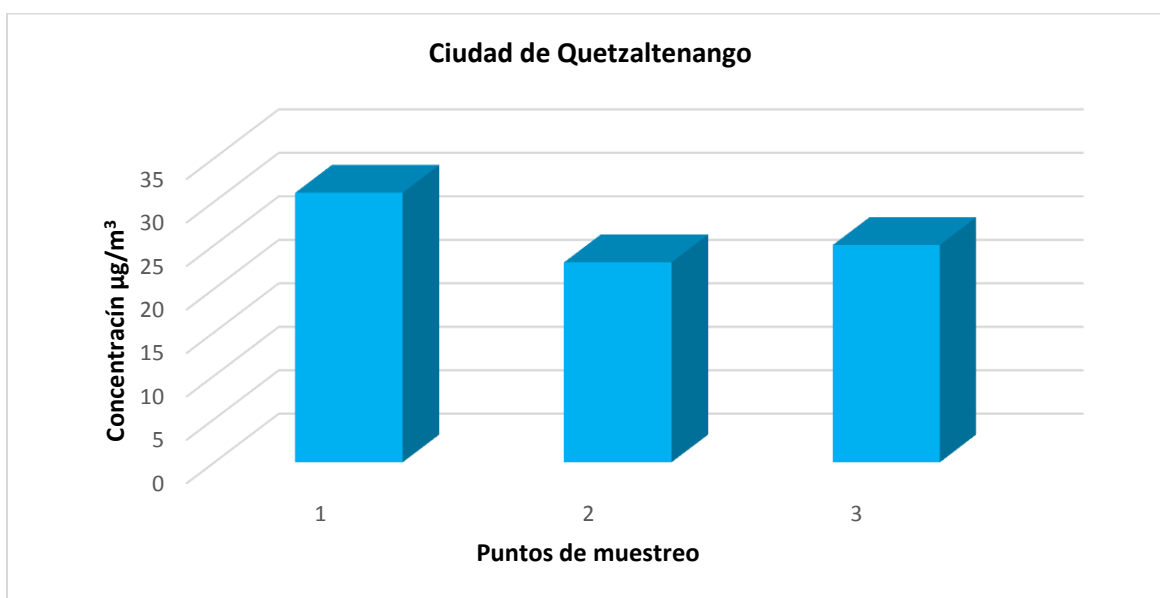
Fuente: Datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 13 Concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en la ciudad de Quetzaltenango.

No de estación	Concentración de NO <sub>2</sub> en µg/m <sup>3</sup>
VI-01	26
VI-02	16
VI-03	19

Fuente: datos de laboratorio

Figura No. 13 Gráfica de las concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en la Ciudad de Quetzaltenango.



Fuente: Datos interpretados en el laboratorio de Monitoreo del aire.

### G. Santa Cruz, Quiché

Cuadro No. 14 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo de Santa Cruz del, Quiché.

No. de estación	Dirección del punto de muestreo	Coordenadas	Fecha del muestreo	Altitud	Presión atmosférica	Temperatura	% humedad
VII-01	12ª Estación de Bomberos Voluntarios, 5ta Av. entre 2a y 3a calle, Santa Cruz del Quiché, Guatemala	N 15°01'843" W 91°08'065"	Junio 2014	2019 msnm	599 mm Hg	19°C	20 %
VII-02	44ª Bomberos Municipales, 2a Av. 10 Calle Zona 5, Santa cruz del Quiché, Guatemala	N 15°01'605" W 91°08'803"	Junio 2014	2015 msnm	603 mm Hg	15°C	33 %
VII-03	Casa Particular, 9Av. 0-55 Zona 3 del Quiché, Guatemala	N 14°01'356" W 91°08'415"	Junio 2014	2011 msnm	602 mm Hg	16°C	29 %

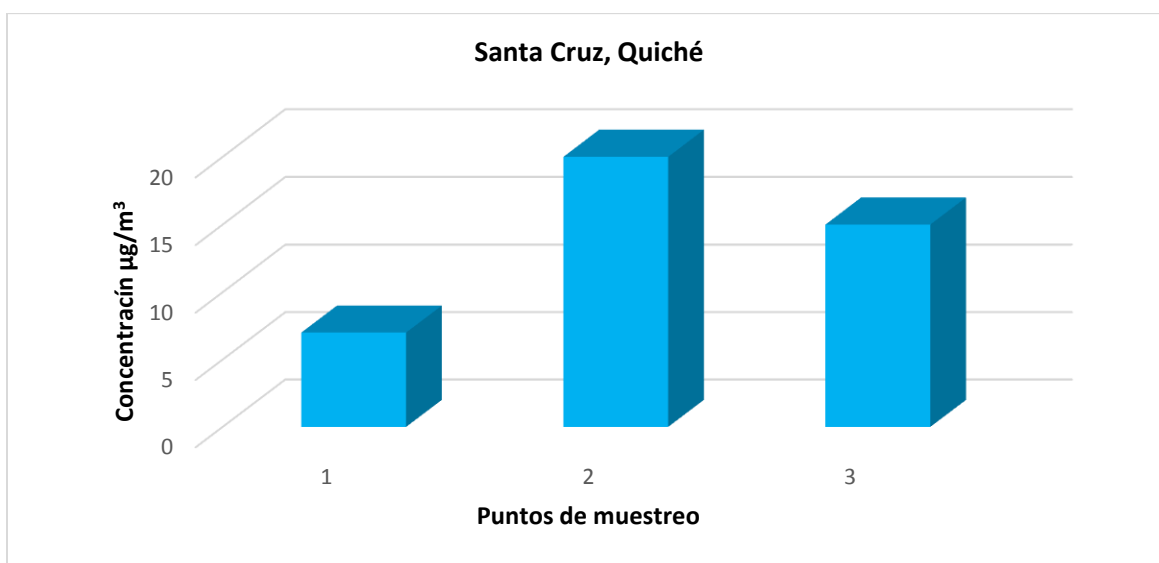
Fuente: Datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 15 Concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en Santa Cruz del, Quiché.

No de estación	Concentración de NO <sub>2</sub> en µg/m <sup>3</sup>
VII-01	7
VII-02	20
VII-03	15

Fuente: datos de laboratorio

Figura No. 14 Gráfica de las concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en Santa Cruz del, Quiché.



Fuente: Datos interpretados en el laboratorio de Monitoreo del aire.

## H. Flores, Petén

Cuadro No. 16 Parámetros geográficos y meteorológicos de los puntos de muestreo Flores, Petén.

No. de estación	Dirección del punto de muestreo	Coordenadas	Fecha del muestreo	Altitud	Presión atmosférica	Temperatura	% humedad
VIII-01	Hotel San Telmo, Calle la unión Flores Petén, Guatemala	N 15°55'988" W 89°53'336"	Mayo 2014	117 msnm	750 mm Hg	25 °C	55 %
VIII-02	Avenida limite y 1era Calle, Flores, Petén, Guatemala	N 16°55'788" W89°53'792"	Mayo 2014	119 msnm	750 mm Hg	24°C	53 %
VIII-03	Hotel Ave Indiana, Calle centro médico zona 2, Flores, Petén, Guatemala	N 15°41'868" W 88°37'156"	Mayo 2014	131 msnm	749 mm Hg	24°C	49 %

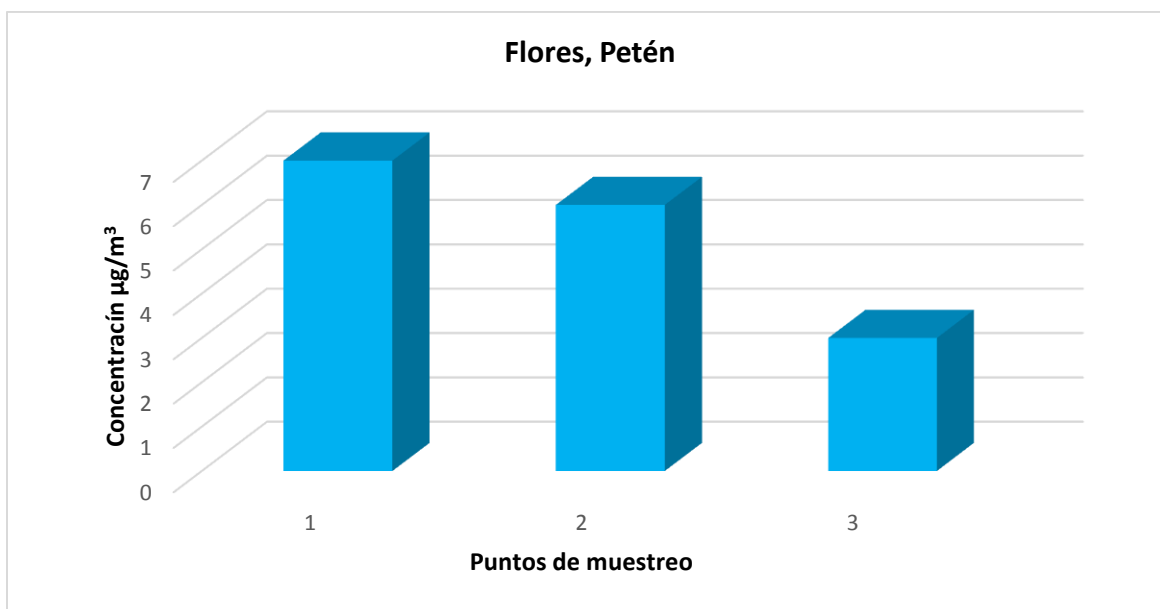
Fuente: Datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 17 Concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en Flores, Petén.

No de estación	Concentración de NO <sub>2</sub> en µg/m <sup>3</sup>
VIII-01	7
VIII-02	6
VIII-03	3

Fuente: datos de laboratorio

Figura No. 15 Gráfica de las concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en Flores, Petén.



Fuente: Datos interpretados en el laboratorio de Monitoreo del aire.



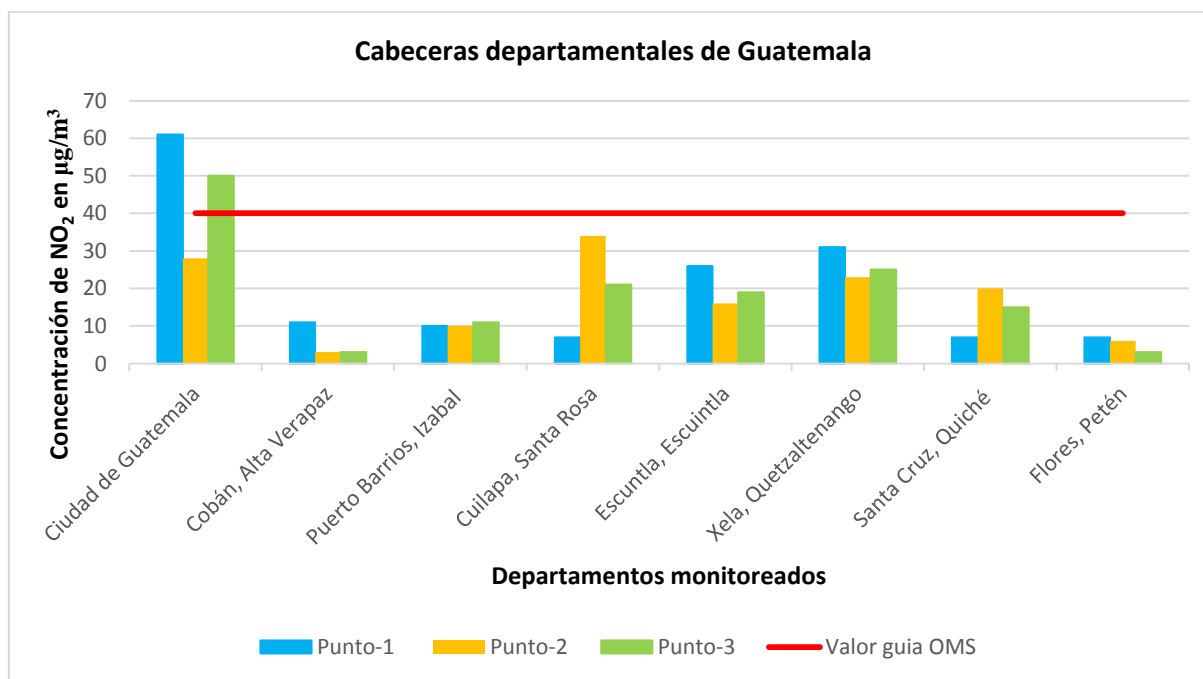
Cuadro No. 18 Concentraciones de NO<sub>2</sub>, en µg/m<sup>3</sup> por estaciones de monitoreo para cada cabecera departamental comparados con el valor guía de la –OMS–

Región	Cabecera departamental	Concentraciones de NO <sub>2</sub> en µg/m <sup>3</sup>			
		Punto-1	Punto-2	Punto-3	Valor guía sugerido por la -OMS- para NO <sub>2</sub>
I	Ciudad de Guatemala	61	28	50	40µg/m <sup>3</sup> , media anual
II	Cobán, Alta Verapaz	11	3	3	
III	Puerto Barrios, Izabal	10	10	11	
IV	Cuilapa, Santa Rosa	7	34	21	
V	Escuintla, Escuintla	26	16	19	
VI	Ciudad de Quetzaltenango	31	23	25	
VII	Santa Cruz del, Quiché	7	20	15	
VIII	Ciudad de Flores, Petén	7	6	3	

Nota: los datos en rojo sobrepasan el valor guía sugerido por la –OMS–

Fuente: Datos interpretados en el laboratorio de Monitoreo del aire.

Figura No. 16 Gráfica de las concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en los puntos de muestreo en las 8 cabeceras departamentales de Guatemala.



Fuente: Datos interpretados en el laboratorio de Monitoreo del aire.

Cuadro No. 19 Datos permisibles y no permisibles de acuerdo al valor guía de la –OMS– para NO<sub>2</sub>, por cabecera departamental.

Región	Cabecera departamental	Permissible según guía –OMS–					
		Si			No		
		Punto-1	Punto-2	Punto-3	Punto-1	Punto-2	Punto-3
I	Ciudad de Guatemala		X		X		X
II	Cobán, Alta Verapaz	X	X	X			
III	Puerto Barrios, Izabal	X	X	X			
IV	Cuilapa, Santa Rosa	X	X	X			
V	Ciudad de Quetzaltenango	X	X	X			
VI	Ciudad de Escuintla	X	X	X			
VII	Santa Cruz del, Quiché	X	X	X			
VIII	Flores, Petén	X	X	X			

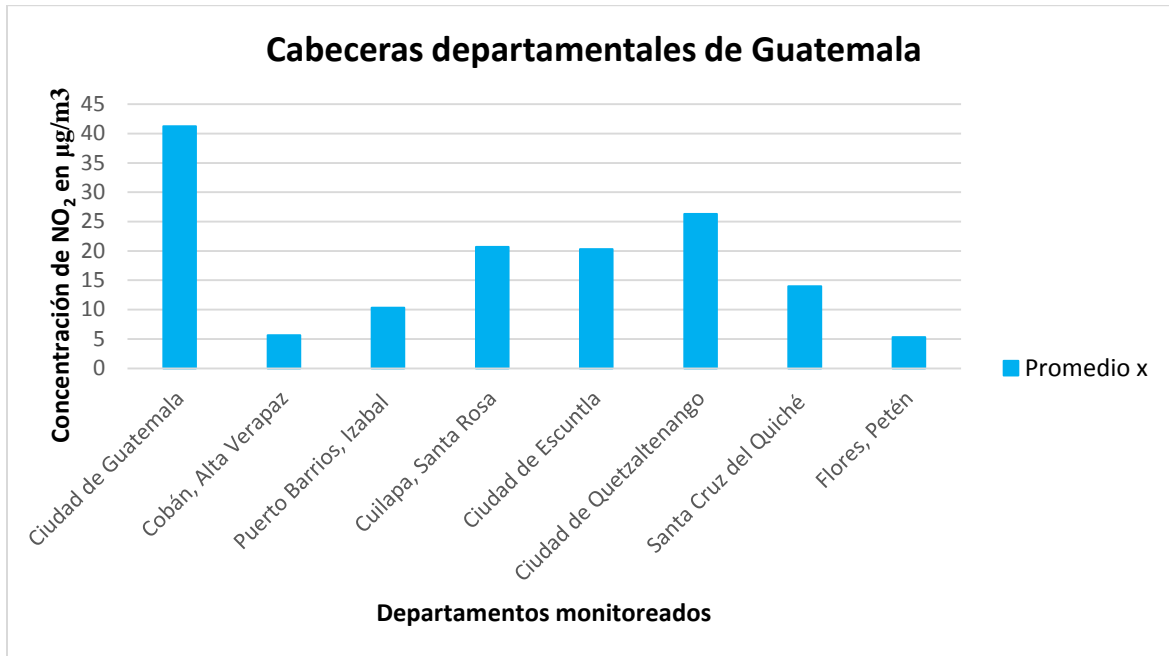
Fuente: Datos interpretados en el laboratorio de Monitoreo del aire.

Cuadro No. 20 Cálculos estadísticos en base a los resultados obtenidos para NO<sub>2</sub>, en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala.

Región	Cabecera departamental	Cálculos estadísticos		
		Promedio X	Desviación estándar s	Coefficiente de variación CF
I	Ciudad de Guatemala	46	16.803	0.362
II	Cobán, Alta Verapaz	6	4.618	0.815
III	Puerto Barrios, Izabal	10	0.577	0.056
IV	Cuilapa, Santa Rosa	21	13.503	0.653
V	Ciudad de Escuintla	20	5.132	0.252
VI	Ciudad de Quetzaltenango	26	4.163	0.158
VII	Santa Cruz del, Quiché	14	6.557	0.468
VIII	Flores, Petén	5	2.082	0.390

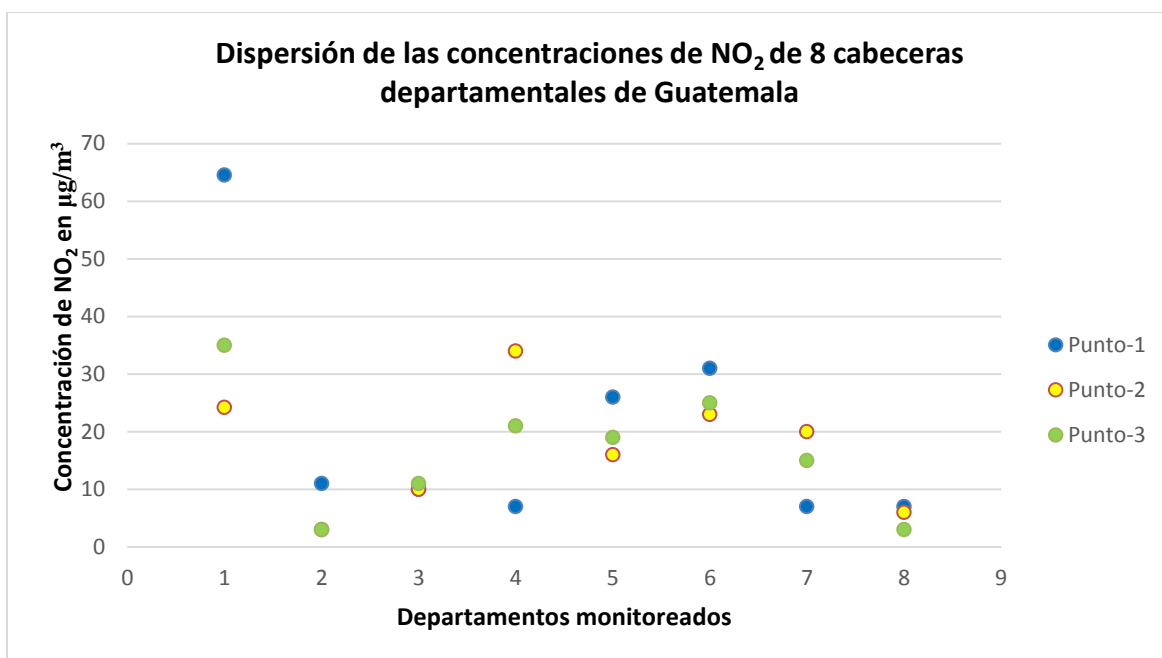
Fuente: Datos calculados en el laboratorio de Monitoreo del aire.

Figura No. 17 Gráfica del promedio de las concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en 8 cabeceras departamentales de Guatemala.



Fuente: datos interpretados en el Laboratorio de Monitoreo del aire.

Figura No. 18 Gráfica de dispersión de las concentraciones de NO<sub>2</sub>, determinadas en 8 cabeceras departamentales de Guatemala.



Fuente: datos interpretados en el Laboratorio de Monitoreo del aire.

Cuadro No. 21 Condiciones observadas de vehículos por hora en los 24 puntos de muestreo de NO<sub>2</sub>, en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala.

Región	Cabecera departamental	No. de estación	Condiciones de transporte		
			Alto	Medio	Bajo
I	Ciudad de Guatemala	I-01	X		
		I-02		X	
		I-03	X		
II	Cobán, Alta Verapaz	II-01	X		
		II-02		X	
		II-03		X	
III	Puerto Barrios, Izabal	III-01			X
		III-02	X		
		III-03		X	
IV	Cuilapa, Santa Rosa	IV-01			X
		IV-02	X		
		IV-03		X	
V	Ciudad de Escuintla	V-01		X	
		V-02	X		
		V-03		X	
VI	Ciudad de Quetzaltenango	VI-01		X	
		VI-02	X		
		VI-03		X	
VII	Santa Cruz del, Quiché	VII-01			X
		VII-02		X	
		VII-03			X
VIII	Flores, Petén	VIII-01		X	
		VIII-02		X	
		VIII-03		X	

Fuente: datos de campo

## IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- Por medio del método de difusión pasiva se determinó la concentración de dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ , en 8 cabeceras departamentales (Ciudad de Guatemala, Cobán, Puerto Barrios, Cuilapa, Escuintla, Quetzaltenango, Santa Cruz del Quiche, y Ciudad de Flores) de la República de Guatemala, encontrando la presencia de  $\text{NO}_2$ , en la totalidad de los puntos de monitoreo. Sin embargo, el 90% de los puntos de muestreo evidencian concentraciones que se encuentran por debajo del límite establecido por la Organización Mundial de la Salud –OMS– (ver figura No. 16).
- El muestreo se realizó en época lluviosa (ver figura No. 21), esto pudo afectar la concentración de  $\text{NO}_2$ , en el aire. Durante la época seca la cantidad de gases y partículas en el aire tienden a concentrarse en el ambiente, mientras que en época lluviosa estas partículas y gases tienden a dispersarse en el ambiente e incluso a interactuar entre sí. Por ejemplo, durante las lluvias el  $\text{NO}_2$ , al entrar en contacto con el agua, reacciona formando ácido nítrico  $\text{HNO}_3$ , el cual forma parte de la lluvia ácida.
- Debido a la época lluviosa posiblemente existió una disminución en la concentración de  $\text{NO}_2$ , en el ambiente urbano durante el tiempo de muestreo que es de 30 días aproximadamente, (ver cuadro No. 10), ya que en ambientes muy húmedos y por la influencia de bajas temperaturas se puede afectar la capacidad de absorción del absorbente por la condensación del agua dentro de los tubos captadores o en las rejillas de acero inoxidable obstaculizando la absorción de  $\text{NO}_2$ .
- Los datos obtenidos en las mediciones realizadas en la ciudad de Guatemala indican niveles de contaminación (ver cuadro No.18) por dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ , en I-01 y I-03 dos de los tres puntos de monitoreo (ver figura No. 8), que sobrepasan los valores guía establecidos por la Organización Mundial de la Salud –OMS– ( $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ , media anual), este problema se debe principalmente a las emisiones vehiculares. Por lo tanto, estos resultados se consideran como no permisibles, siendo peligroso el aire para las personas que se encuentren expuestas en los alrededores de los puntos de medición.
- Los dos puntos de monitoreo en la ciudad de Guatemala que reportan los valores más altos de  $\text{NO}_2$  (ver cuadro No. 2), son la estación INCAP y MUSAC que actualmente utiliza la Universidad de San Carlos de Guatemala por medio del Laboratorio de Monitoreo del Aire –LMA–, ambos puntos constantemente presentan altos índices de contaminación en el aire, según los informes anuales del –

LMA–, la posición geográfica de estos dos puntos de muestreo indica que se encuentran en áreas de alto flujo vehicular.

- En el departamento de Guatemala se encuentra la mayor cantidad del parque vehicular de todo el país con el 46 por ciento (ver figura No. 3), esto ocasiona congestión vehicular en las calles y avenidas más transitadas de esta ciudad, lo cual representa la principal fuente de emisión de  $\text{NO}_2$ , en el ambiente urbano. Es evidente el riesgo para la salud de las personas que se encuentran en las áreas más transitadas por vehículos en la ciudad de Guatemala.
- Las mediciones realizadas en la cabecera departamental Cobán, indican la existencia de concentraciones por  $\text{NO}_2$ , que se encuentran por debajo del valor guía sugerido por la –OMS– ( $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ , media anual) (ver cuadro No. 18). Con el segundo valor promedio más bajo registrado ( $6\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (ver cuadro No. 20), es posible que la temporada de lluvia ocasionara una disminución del  $\text{NO}_2$ , en el aire durante el tiempo de captación por el método de difusión pasiva. Además la cantidad de vehículos registrados en el departamento de Alta Verapaz, corresponden al 1% del total de vehículos registrados en el país (ver figura No. 3).
- Las mediciones realizadas en la cabecera departamental Puerto Barrios, indican la existencia de concentraciones por  $\text{NO}_2$ , que se encuentran por debajo del valor guía sugerido por la –OMS– ( $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ , media anual) (ver cuadro No. 18). Con el segundo valor promedio más bajo registrado ( $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (ver cuadro No. 20), es probable que la temporada de lluvia (ver figura No. 21) (ver figura No 46), ocasionara una disminución del  $\text{NO}_2$ , en el aire durante el tiempo de captación por el método de difusión pasiva. Además la cantidad de vehículos registrados en el departamento de Izabal, corresponden al 3% del total de vehículos registrados en el país (ver figura No. 3).
- La medición de  $\text{NO}_2$ , en la estación IV-01 de la cabecera departamental Cuilapa, indica el valor más bajo ( $7\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de las tres mediciones realizadas (ver cuadro No. 9), esto se debe a la posición dentro de la urbe (ver figura No. 22), la cual se encuentra en el límite Noreste de la cabecera departamental de Cuilapa, lugar donde el flujo vehicular es bajo (ver cuadro No. 21).
- La medición de  $\text{NO}_2$ , realizada en la estación IV-02 en la cabecera departamental Cuilapa, indica la existencia de concentraciones significativas por  $\text{NO}_2$ , el valor ( $37\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) se encuentra muy cercano al valor guía sugerido por la –OMS– ( $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ , media anual), este punto de medición se colocó en una de las avenidas principales en dirección al parque municipal, en donde circulan buses, microbuses y

vehículos livianos, siendo estos la principal fuente de contaminación en el aire observada en el lugar de medición.

- El tercer punto de medición de NO<sub>2</sub>, IV-03 en la cabecera departamental Cuilapa, corresponde a una de las calles de moderado flujo vehicular (ver cuadro No.21), obteniendo un resultado (21µg/m<sup>3</sup>), adecuado al flujo vehicular observado. Por lo tanto, las tres mediciones realizadas en la cabecera departamental de Cuilapa, Santa Rosa, expresan una relación directamente proporcional entre la carga vehicular del sitio de medición y la concentración de NO<sub>2</sub>, determinada.
- La medición de NO<sub>2</sub>, en la estación V-01 de la cabecera departamental de Escuintla, indica el valor más alto (26µg/m<sup>3</sup>) de las tres mediciones realizadas (ver cuadro No. 11), este punto de medición se colocó en la terraza de la Gobernación departamental de Escuintla, frente al parque municipal, este lugar presento moderado flujo vehicular y congestiónamiento, siendo estos los factores principales de la emisión de NO<sub>2</sub>, observados en el área de medición.
- La medición de NO<sub>2</sub>, en la estación V-02 de la cabecera departamental de Escuintla, representa el valor más bajo (16µg/m<sup>3</sup>) de las tres mediciones realizadas (ver cuadro No. 11), este punto de medición se colocó en el tercer nivel de un sanatorio local (ver cuadro No. 6), en los alrededores de este sitio de medición se observó alto flujo vehicular y congestiónamiento debido a la cercanía con la terminal de buses y la carretera principal CA9A. Por lo tanto, es probable que las condiciones meteorológicas (ver figura No. 21) como la lluvia, humedad y viento (ver figura No. 20) tuvieran un impacto en el resultado obtenido. Además el punto de muestreo se instaló en el lado sur de la ciudad de Escuintla, en donde la dirección del viento es predominantemente de sur a norte (ver figura No. 26).
- El punto de muestreo V-03 se situó en el lado norte de la ciudad de Escuintla (ver cuadro No. 11), este punto de medición de NO<sub>2</sub>, fue colocado en una calle en donde la carga vehicular es moderada. Por lo que el valor obtenido 19µg/m<sup>3</sup> evidencia una relación con la carga vehicular observada en el sitio de medición (ver cuadro No. 21).
- Las mediciones realizadas en la cabecera departamental de Escuintla se mantienen por debajo del valor guía sugerido por la –OMS– (40µg/m<sup>3</sup>, media anual) (ver cuadro No 18). Por lo que estos resultados se consideran como permisibles, siendo adecuado el aire con relación a la concentración de NO<sub>2</sub> para las personas que se encuentren en los alrededores de los puntos de medición. Sin embargo, condiciones

meteorológicas como la temporada de lluvia y dirección del viento, pudieron afectar el resultado obtenido (ver figura No. 21).

- La medición de  $\text{NO}_2$ , en la cabecera departamental de Quetzaltenango, presentó el segundo promedio (ver cuadro No. 18) más alto después de la ciudad de Guatemala, coincidentemente en este departamento se encuentra la segunda cantidad de vehículos registrados en la base de datos de la –SAT– por lo que tiende a ocasionarse congestión vehicular en algunas arterias de la ciudad de Quetzaltenango siendo probablemente la causa de emisión de contaminantes en el aire urbano.
- La medición de  $\text{NO}_2$  en la estación VI-1 presentó un valor ( $31\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) considerable para su ubicación, este punto de medición se situó a un costado del parque Centro América en la ciudad de Quetzaltenango (ver cuadro No. 12), en donde existe una moderada afluencia vehicular. Sin embargo, se observó que durante las horas pico tiende a producirse congestión vehicular lo que posiblemente incremente la cantidad de contaminantes en el aire repercutiendo en este resultado.
- La medición de  $\text{NO}_2$  en el punto VI-2 presentó un valor ( $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) considerable para su ubicación, este punto de medición se situó a un costado de la terminal de buses de la ciudad de Quetzaltenango (ver cuadro No. 12), en donde se observó congestión vehicular debido al transporte extraurbano, siendo la causa principal de la emisión de contaminantes como el  $\text{NO}_2$  en el ambiente.
- La medición de  $\text{NO}_2$  en el punto VI-03 presentó un valor ( $23\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) que corresponde al comportamiento vehicular observado. Este punto de medición se ubicó en la cornisa de la Quinta Estación de Bomberos Voluntarios (ver figura No. 39) presentando un flujo vehicular moderado.
- Las mediciones realizadas en la cabecera departamental de Quetzaltenango se mantienen por debajo del valor guía sugerido por la –OMS– ( $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ , media anual) (ver cuadro No 18). Por lo tanto, estos resultados se consideran como permisibles, siendo adecuado el aire con relación a la concentración de  $\text{NO}_2$  para las personas que se encuentren en los alrededores de los puntos de medición. Sin embargo, condiciones meteorológicas como la temporada de lluvia y la humedad pudieron afectar el resultado obtenido (ver figuras No. 21 y 22).
- Los puntos de medición VII-01 y VII-03, de la cabecera departamental Santa Cruz del Quiché, se caracterizaron por una baja carga vehicular, lo cual es coherente con el resultado obtenido ( $7\mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La medición en el punto VII-02 presentó



el valor ( $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) más alto de las tres mediciones, se situó en la 44<sup>a</sup> compañía de Bomberos Municipales (ver cuadro No. 14), la cual se encuentra a un costado de la terminal de buses de Quiche, lugar que se caracteriza por poseer una alta carga vehicular mayoritariamente transporte de buses.

- Las mediciones realizadas en la cabecera departamental de Quiché (ver cuadro No. 14) indican la presencia de  $\text{NO}_2$  en el ambiente, no obstante, los resultados (ver cuadro No 18) se encuentran por debajo del valor guía establecido por la –OMS– ( $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ , media anual). Por lo tanto, estos resultados se consideran como permisibles, siendo adecuado el aire con relación a la concentración de  $\text{NO}_2$  para las personas que se encuentren en los alrededores de los puntos de medición. Sin embargo, se debe considerar la temporada como la depresión tropical 2E que provoco precipitaciones intensas y toco tierra en el suroeste de Guatemala (ver figura No. 21 y 22).
- La medición de  $\text{NO}_2$ , en la cabecera departamental de Flores, Petén, presentó el valor ( $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) promedio más bajo (ver cuadro No.18), de las 8 cabeceras departamentales evaluadas en este estudio. Por lo tanto, estos resultados se consideran como permisibles, siendo adecuado el aire en relación con la concentración de  $\text{NO}_2$  para las personas que se encuentren en los alrededores de los puntos de medición. Sin embargo, las estaciones de medición VIII-01, VIII-02, VIII-03 se situaron en lugares de moderado flujo vehicular (ver cuadro No. 14), esta cabecera departamental se caracteriza por poseer extensas áreas planas en su superficie, por lo cual los contaminantes en el aire son susceptibles al arrastre por el viento mayoritariamente en dirección Este-oeste (ver figura No. 20).
- El método de difusión pasiva es un método susceptible a cambios meteorológicos como la lluvia, y el viento, esto se debe principalmente a que es un método mecánico, que funciona por la difusión de  $\text{NO}_2$ , en el ambiente (ver figura No. 24). Este método no utiliza energía eléctrica para su funcionamiento, como los métodos activos para la captación de  $\text{NO}_2$  en el ambiente. Por lo tanto, deben realizarse otros estudios que utilicen metodologías puntuales como la medición de  $\text{NO}_2$ , por ejemplo el método activo, o estudios que comprendan la época seca para complementar la información generada en este estudio.
- La presencia de  $\text{NO}_2$ , en el aire de las 8 cabeceras departamentales de la República de Guatemala, nos da una idea de la cantidad de otros contaminantes nocivos que puedan estar presentes en el aire, esto se debe a que el  $\text{NO}_2$ , se encuentra asociado con otros contaminantes atmosféricos, como la lluvia acida, las partículas menores a

2.5 micras de diámetro y la generación de ozono troposférico. Por lo tanto, es importante el grado de contaminación que representa la existencia de concentraciones de NO<sub>2</sub> en el medio ambiente.

- Los resultados en la medición de NO<sub>2</sub> que se consideran como permisible en comparación con el valor guía establecido por la Organización Mundial de la Salud –OMS– (40µg/m<sup>3</sup>, media anual), representan el 90% de los puntos evaluados en este estudio (ver figura No. 16). Por lo tanto, se considera adecuado el aire en relación con la concentración de NO<sub>2</sub> para las poblaciones que se encuentren en los alrededores de estos puntos de medición.
- La época de lluvia en el 2014 comprendió los meses de abril a octubre (ver figura No. 21), produciendo precipitaciones y depresiones tropicales (ver figura No. 22), Sin embargo, en el mes de julio existió un déficit de lluvia en comparación con los otros meses pero no significó una ausencia total de lluvias. Este estudio se llevó a cabo de mayo a septiembre del 2014 por lo que es probable que la interacción de factores meteorológicos como la lluvia, viento y exceso de humedad con las mediciones de NO<sub>2</sub>, en las 8 cabeceras departamentales evaluadas.
- La desviación estándar y el coeficiente de variación (ver cuadro No. 20) nos indican que existe cierto grado de dispersión en los datos obtenidos (ver figura No. 18) en la medición de NO<sub>2</sub>, por medio del método de difusión pasiva, esto se debe posiblemente a condiciones meteorológicas y a las condiciones de flujo vehicular propias de cada punto de medición.
- Sin embargo, las mediciones en las cabeceras departamental de Petén y Alta Verapaz presenta la menor dispersión en los datos (ver cuadro No. 20) presentando mayor representatividad en los resultados lo que posiblemente se deba a condiciones meteorológicas más estables o de similar flujo vehicular (ver cuadro No. 21) durante el tiempo de muestreo.

## X. CONCLUSIONES

- La calidad del aire del 90% de las estaciones evaluadas en este estudio se encuentra dentro de los límites permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud –OMS– para  $\text{NO}_2$ , a excepción de la ciudad de Guatemala que presenta problemas de contaminación en dos de las tres estaciones monitoreadas.
- Los resultados obtenidos en las mediciones de  $\text{NO}_2$ , realizadas en las cabeceras departamentales Cobán, Puerto Barrios, Cuilapa, Escuintla, Quetzaltenango, Santa Cruz del Quiché, y Flores, no representan ningún peligro para la salud de las personas que se encuentren en los alrededores de los puntos de medición.
- El estudio demuestra que el método de difusión pasiva para  $\text{NO}_2$ , es un método adecuado para la captación de  $\text{NO}_2$ , en el ambiente de las cabeceras departamentales evaluadas en este estudio. Sin embargo, deben realizarse estudios que comprendan otras épocas del año, que utilicen metodologías puntuales en la captación de  $\text{NO}_2$ , así como la medición de flujos vehiculares.
- La existencia de concentraciones de  $\text{NO}_2$  en los puntos de muestreo en las 8 cabeceras departamentales evaluadas en este estudio demuestra indirectamente la presencia de otros contaminantes nocivos para la salud de las personas.
- Considerando los resultados obtenidos en la ciudad de Guatemala, se refuerza el hecho que los vehículos a combustión son la principal fuente de contaminación por  $\text{NO}_2$ , en el aire urbano. Por lo tanto, deben generarse políticas que regulen o disminuyan los problemas de contaminación en el aire debido al tráfico vehicular, ya que indirectamente afecta la salud de las personas, mayormente las poblaciones que se encuentren en cercanías de los puntos de contaminación.

## **XI. RECOMENDACIONES**

- Los resultados obtenidos en la ciudad de Guatemala sobrepasan los valores permisibles por la Organización Mundial de la Salud –OMS– para NO<sub>2</sub>, poniendo en riesgo la salud de la población aledaña a los puntos de mayor contaminación en relación a las concentraciones de NO<sub>2</sub>, por lo que deben generarse acciones y políticas que sean destinadas a disminuir las concentraciones de NO<sub>2</sub> en el aire de la ciudad y mitigar los efectos de este contaminante.
- Completar la información obtenida en este estudio sobre la contaminación en el aire por NO<sub>2</sub>, con estudios que se enfoquen en la medición de flujos vehiculares en los alrededores de los puntos de medición evaluados en este estudio.
- Debido a que los valores registrados en la concentración de NO<sub>2</sub> en las 8 cabeceras departamentales evaluadas en este estudio presentan bajos niveles, se recomienda realizar monitoreos utilizando metodologías puntuales como la medición por difusión activa para NO<sub>2</sub>.
- Considerando la existencia de concentraciones de NO<sub>2</sub> en la totalidad de los puntos de muestreo en las 8 cabeceras departamentales de Guatemala, es indudable la presencia de otros contaminantes en el aire que mantienen relación con el NO<sub>2</sub> como lo son la lluvia acida, las partículas menores a 2.5 micras y el ozono troposférico, siendo necesario realizar un estudio en todas las cabeceras de la República de Guatemala.
- Existe evidencia de la presencia de condiciones meteorológicas como la lluvia y humedad durante el tiempo de medición de NO<sub>2</sub> en las 8 cabeceras departamentales evaluadas en este estudio. Por lo que se recomienda completar el estudio con la medición de NO<sub>2</sub> por el método de difusión pasiva en la época seca de noviembre a abril.
- Fomentar el interés en las investigaciones técnico-científicas que aborden el tema de la contaminación en el aire en la República de Guatemala.

## XII. REFERENCIAS

Andrés, D., Ferrero, E., Mackler, C., Santambrosio, E., y Caminos, J. (2000). Comparación de los niveles de Contaminación por dióxido de nitrógeno entre el ambiente interno de las viviendas familiares y ambiente exterior. Universidad Tecnológica Nacional de la Argentina, Argentina, p. 1-4.

Alvarado, T., Paredes, A. (1996) Informe anual 1995 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, p. 3-16.

Álvarez, J. (2002). Simulación por computación de la dispersión de partículas totales en suspensión en su fracción respirable (PM10), en la ciudad de Guatemala (Tesis de Licenciatura). Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, p. 7-9.

Álvarez, J. (2008). Informe anual 2009 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, p. 3-21.

Álvarez, J. (2009). Informe anual 2010 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, p. 19.

Álvarez, J. (2010). Informe anual 2011 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, p. 19-21.

Álvarez, J. (2011). Informe anual 2012 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, p. 19-21.

Cuesta, O. (1995). Caracterización de las concentraciones de los principales compuestos del nitrógeno atmosférico en Cuba y su relación con los tipos de situaciones sinópticas (Tesis de Doctorado). Ciencias Meteorológicas. Ciudad de La Habana. Cuba, p. 2-6.

ESA. (2014). Recuperado el 02 de Febrero de 2014, de Agencia Espacial Europea: <http://www.temis.nl/airpollution/no2.html>

Hernández, E. (2013). Informe anual 2013 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, p. 8, 29-37.

*INSIVUMEH*. (2010). Recuperado el 11 de Febrero de 2014, de *INSIVUMEH*: <http://www.insivumeh.gob.gt:8080/calidadaire/index.html>

Laboratorio de Monitoreo del Aire [LMA]. 2001. Manual de Laboratorio. Guatemala, p. 1-9, 26-30, 49-50.

Mage, D. Zali, O. (1992). Contaminación Atmosférica por Vehículos Automotores "Impacto en la salud pública y medidas de control". Suiza, p. 148-155.

Martínez, A. Romieu, I. (1997). Introducción al Monitoreo Atmosférico. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. ECO/OPS. México, p. 93-105

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2009). Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del aire. Guatemala año 2009. Guatemala: Herrera, J.

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2010). Aerosoles Atmosféricos en Guatemala año base 2009. Guatemala: Perez, A.

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2011). Perfil de la caracterización del parque vehicular de Guatemala año base 2010. Guatemala: Perez, A.

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2012). Perfil de la caracterización del parque vehicular de Guatemala año base 2009. Guatemala: Perez, A.

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Primer informe indicativo de la calidad del aire en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala, Guatemala: Perez, A.

NASA. (2015). Recuperado el 08 de Octubre de 2015, de Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/juno/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/juno/main/index.html)

Oliva, P. (2000). Monitoreo del Aire en Ciudad de Guatemala, Informe Anual. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Oliva, P. (2001). Informe anual 2001 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Oliva, P. (2002). Informe anual 2002 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Oliva, P. (2003). Informe anual 2003 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Oliva, P. (2004). Informe anual 2004 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Oliva, P. (2005). Informe anual 2005 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Oliva, P. (2006). Informe anual 2006 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Oliva, P. (2007). Informe anual 2007 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Oliva, P. (2008). Calidad del aire en Guatemala Compilación de la Información Existente (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Oliva, P. (2013). Informe anual 2013 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías de Calidad del Aire de la OMS. Actualización Mundial 2005. Organización Panamericana de la Salud.

Regueira, M. Schlatter, S. Díaz, G. Portilla, C. (2009). Determinación de la concentración de dióxido de nitrógeno en la atmósfera de Ciudad de La Habana mediante captadores pasivos. Revista CENIC Ciencias Químicas, 40(1) p. 23-25.

Roberts, E. & Associates, Inc. (2000). Manual de control de la calidad del aire. McGraw-Hill. México.

Saravia, P. (1983). Investigación de la contaminación del aire en el área central de la ciudad de Guatemala (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

SAT. (2014). Recuperado el 14 de Febrero de 2014, de SAT: <http://portal.sat.gob.gt/sitio/indicadores-tributarios>

SERVIR. (2015). Recuperado el 08 de Octubre de 2015, de Servir Aire: <http://www.servir.net/aire/62-satelite/465-evaluacion-de-calidad-de-aire,-ozono-troposferico.html>

Sbarato, D. Sbarato, V. Ortega, J. (2007). Predicción y evaluación de impactos ambientales sobre la atmosfera. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina, p, 19.

Shooter, D. (1993). Nitrogen dioxide and its Determination in the Atmosphere. A Simple Method for Surveying Ambient Pollution Concentrations. *J. Chem. Educ.*

Wade, L. (2005). *Química Orgánica* (5a ed). México: Mc Graw Hill, p. 225-237.

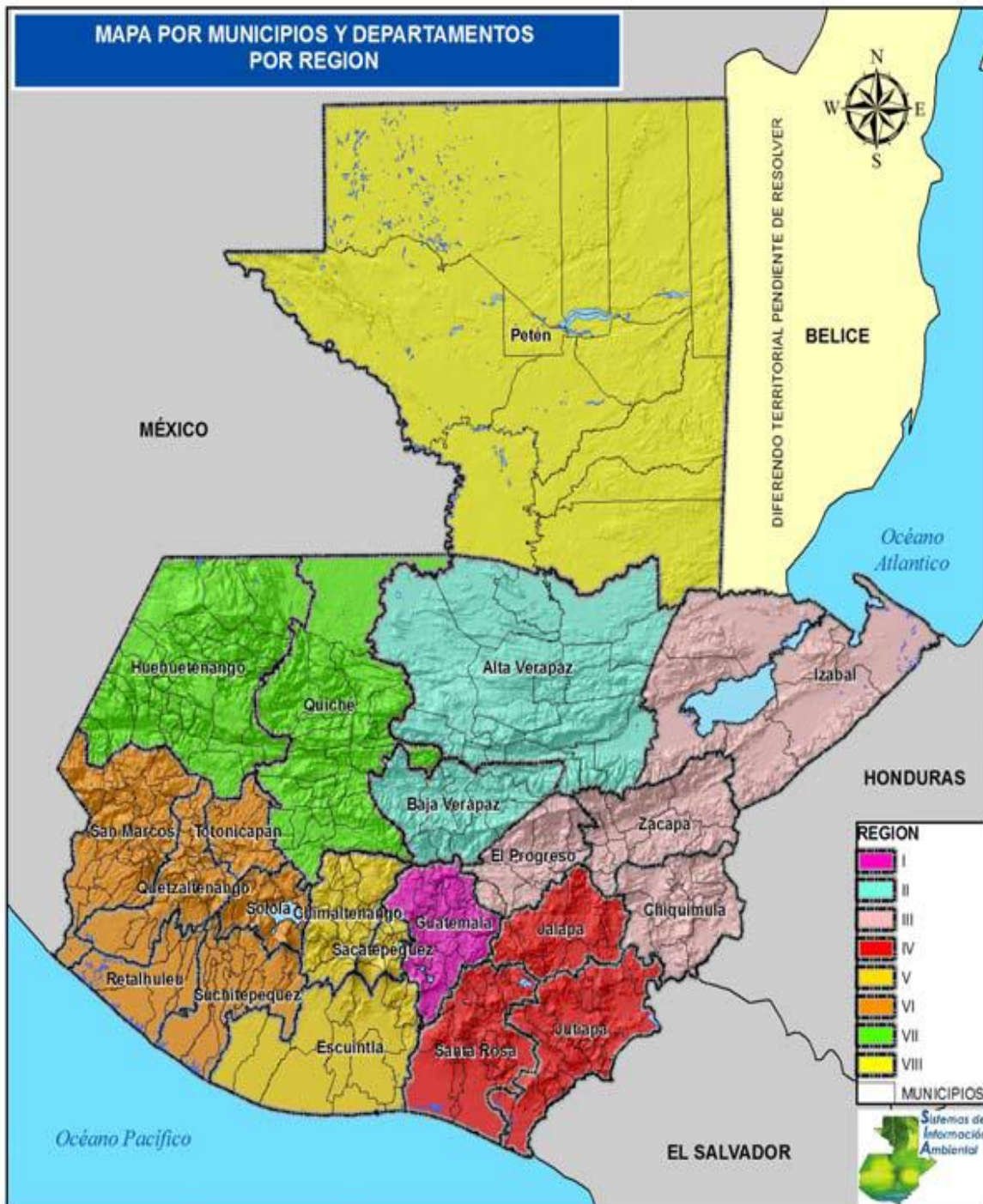
WHO. (2000). World Health Organization. Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark "Oxides of Nitrogen".



### XIII. ANEXOS

#### 1. Anexo

Figura No. 19 Mapa de la República de Guatemala por regiones.



Fuente: SEGEPLAN

2. Anexo

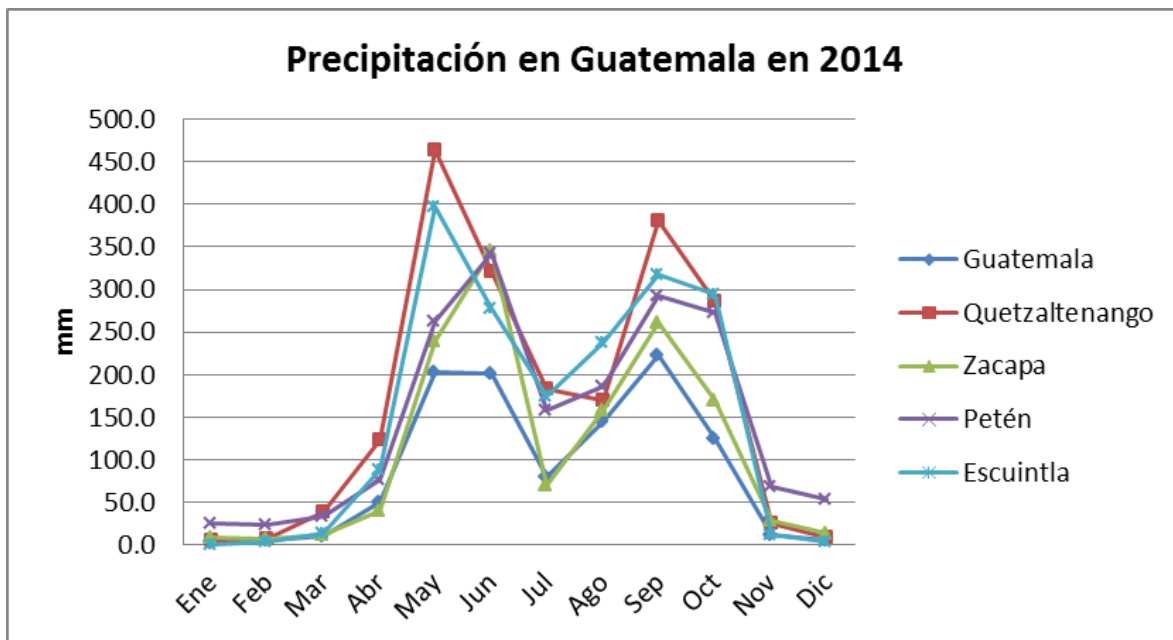
Figura No. 20 Mapa de la velocidad y dirección del viento promedio anual de Guatemala.



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología,  
-INSIVUMEH-

### 3. Anexo

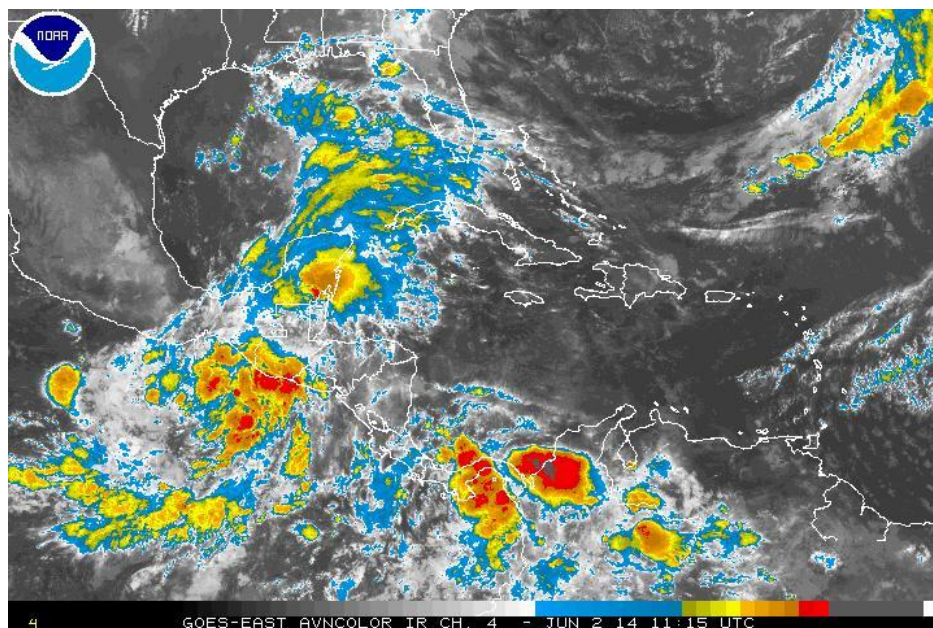
Figura No. 21 Comportamiento de las precipitaciones pluviales durante el año 2014.



Fuente: Tiempo y clima de Centroamérica

### 4. Anexo

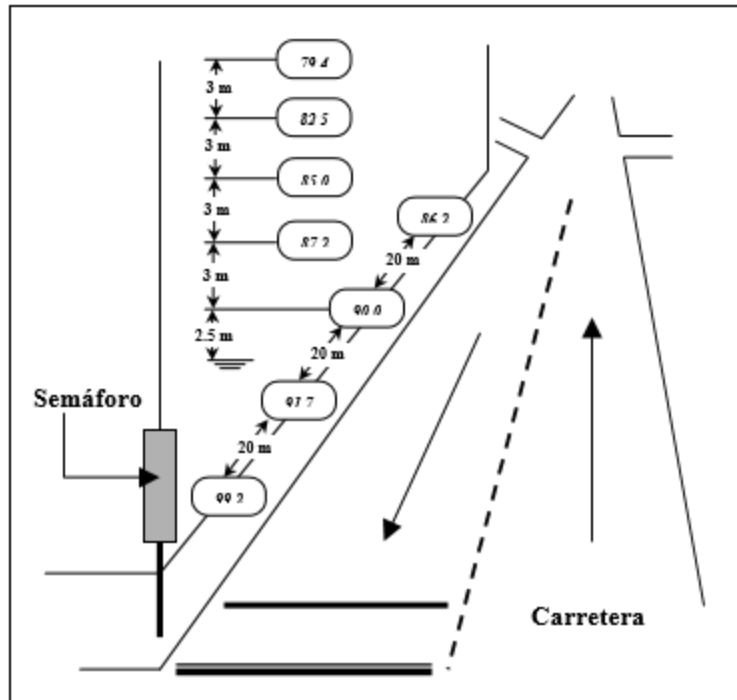
Figura No. 22 Depresión tropical 2E entre el 31 de mayo y 3 de junio del año 2014.



Fuente: Tiempo y clima de Centroamérica

## 5. Anexo

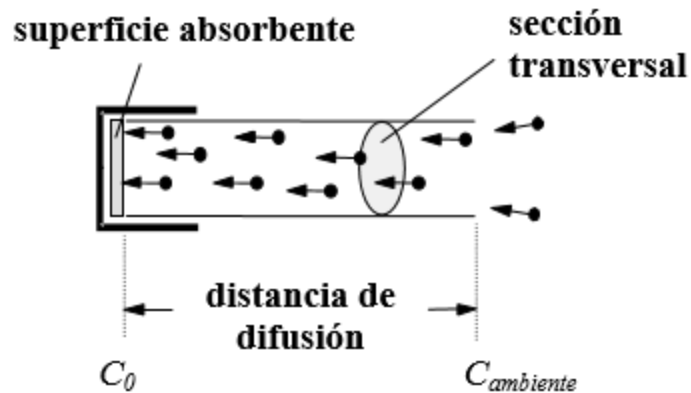
Figura No. 23 Comportamiento de la concentración de dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ , emitida por fuentes móviles, en función de la altura y la distancia.



Fuente: Manual de Laboratorio de Monitoreo del Aire –LMA–

## 6. Anexo

Figura No. 24 Funcionamiento de los tubos de difusión pasiva para dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ .



Fuente: Manual de Laboratorio de Monitoreo del Aire –LMA–

## 7. Anexo

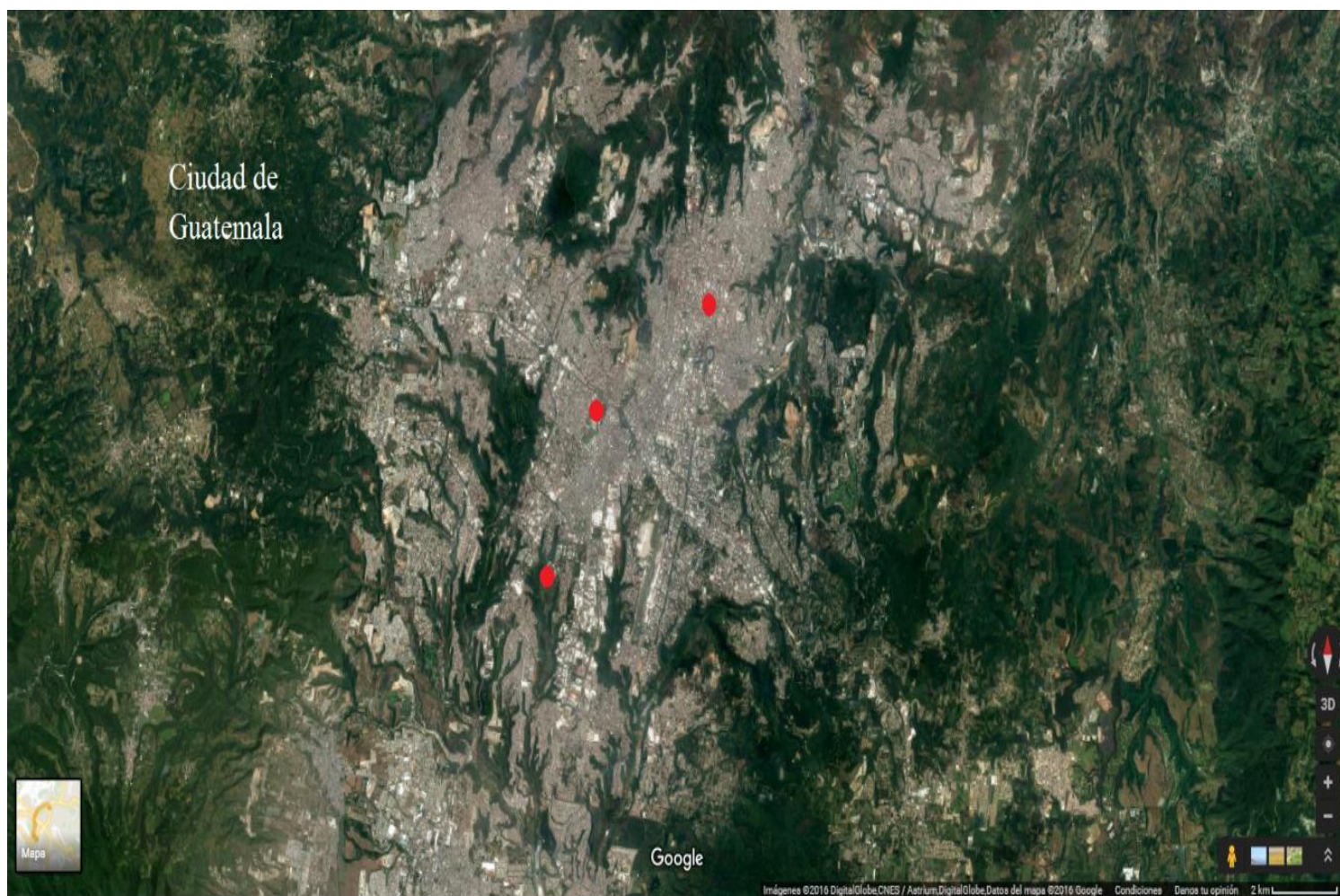
Figura No. 25 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO<sub>2</sub>, en la República de Guatemala.



Fuente: Google map 2016.

## 8. Anexo

Figura No. 26 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO<sub>2</sub>, en la Ciudad de Guatemala, Guatemala.



Fuente: Google map 2016.

## 9. Anexo

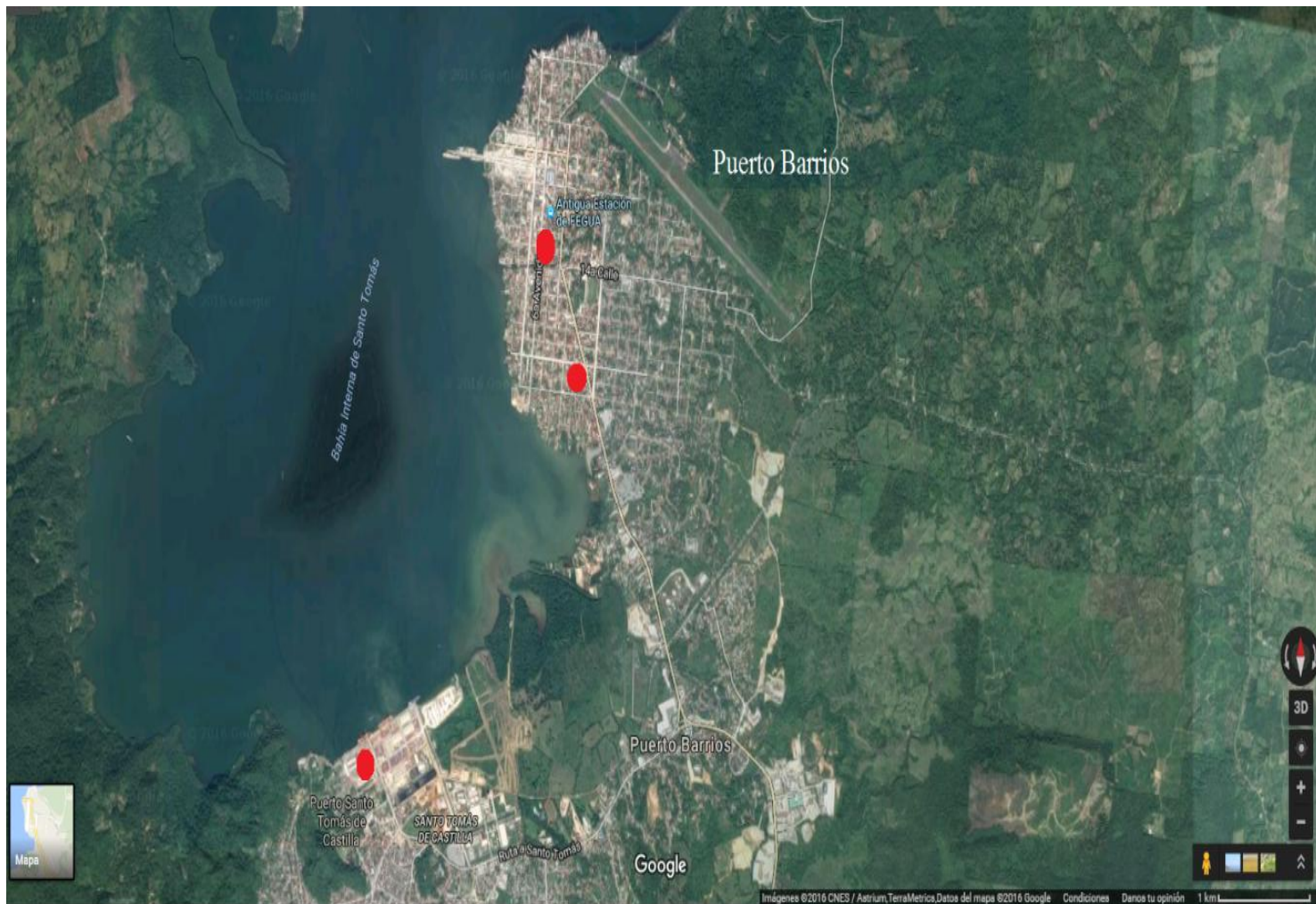
Figura No. 27 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO<sub>2</sub>, en la Cabecera Departamental de Cobán, Alta Verapaz.



Fuente: Google map 2016.

## 10. Anexo

Figura No. 28 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO<sub>2</sub>, en la Cabecera Departamental de Puerto Barrios, Izabal.

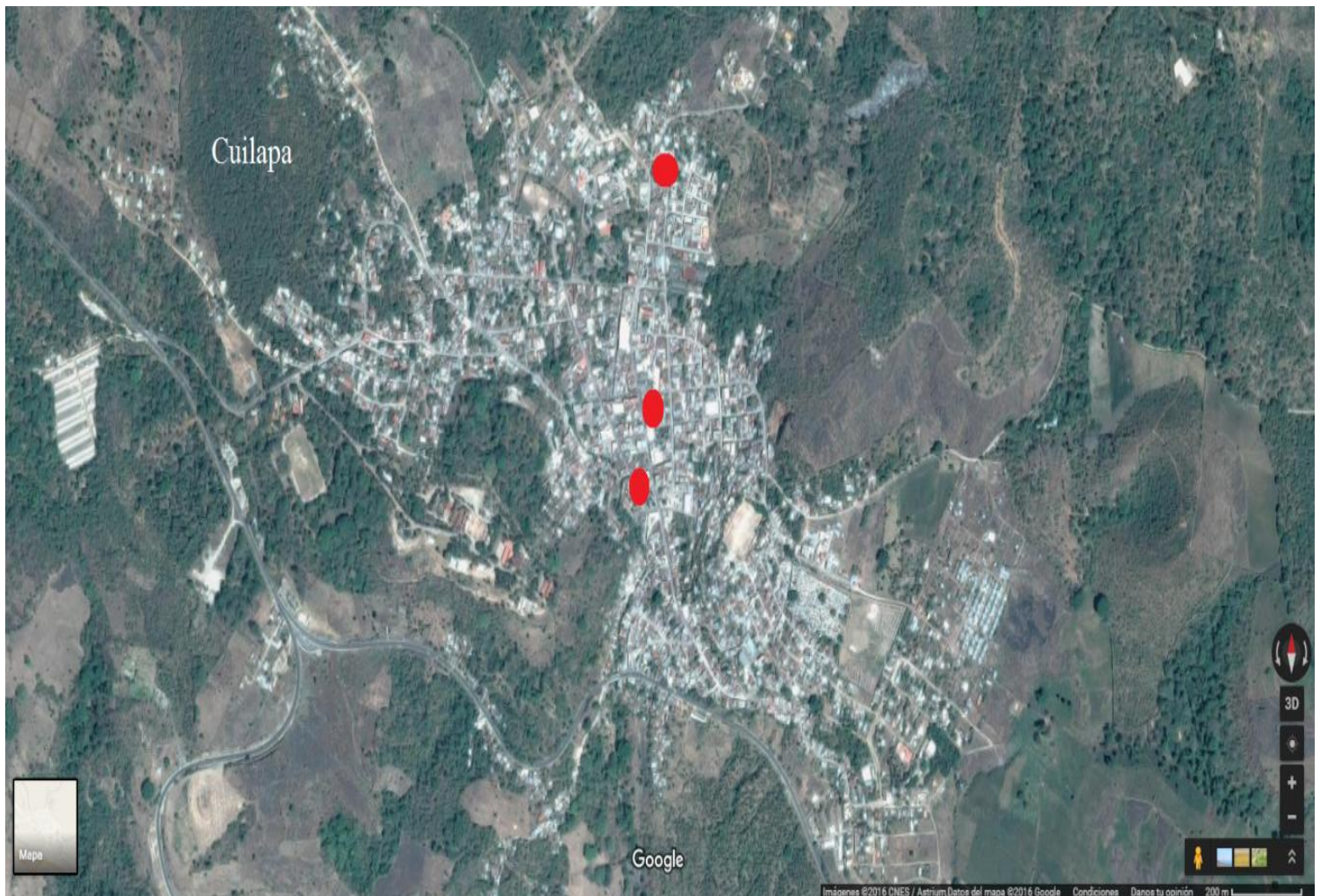


Fuente: Google map 2016.



## 11. Anexo

Figura No. 29 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para  $\text{NO}_2$ , e la Cabecera Departamental de Cuilapa, Santa Rosa.



Fuente: Google map 2016.

## 12. Anexo

Figura No. 30 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para  $\text{NO}_2$ , en la Ciudad de Escuintla, Escuintla.



Fuente: Google map 2016.

### 13. Anexo

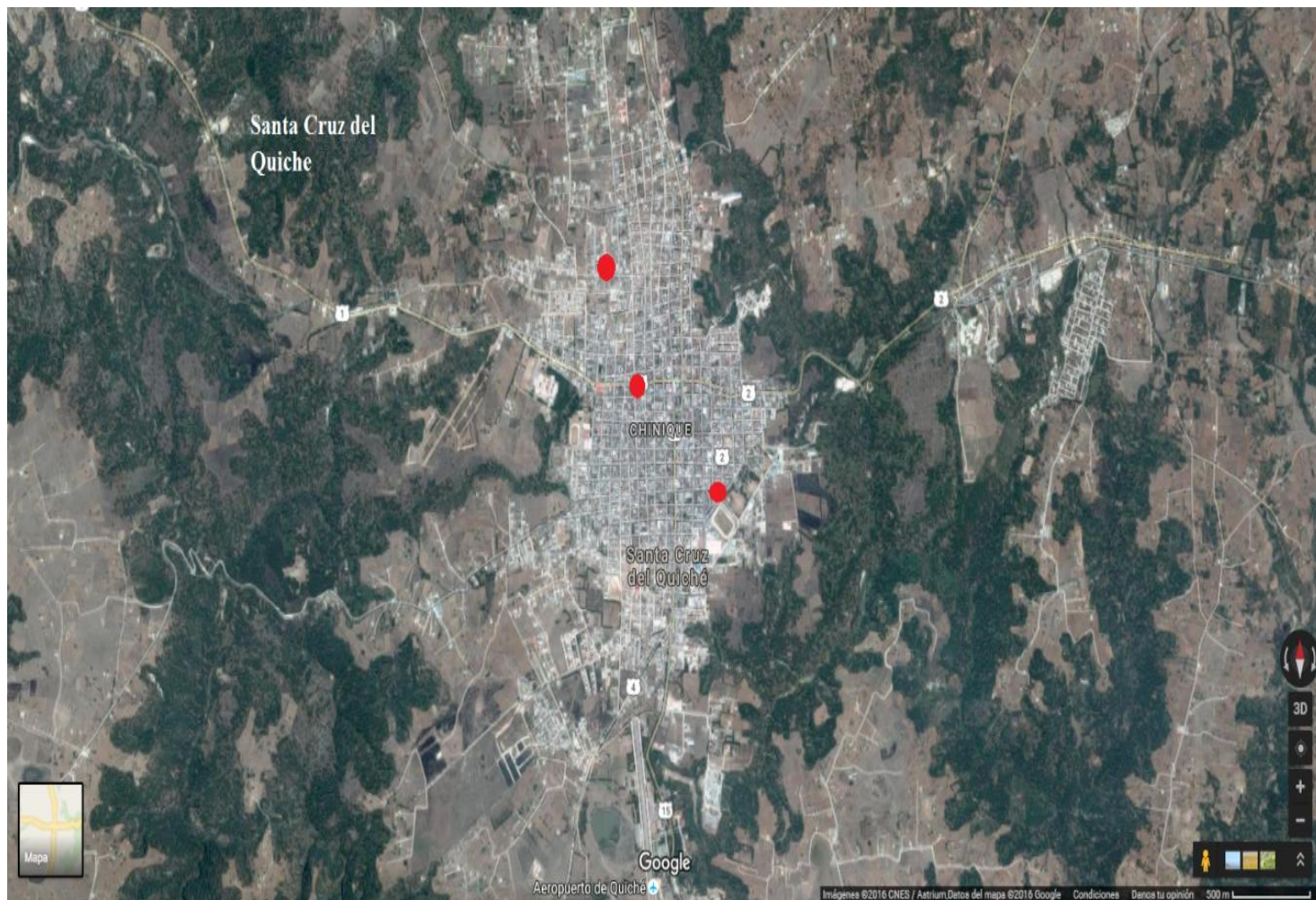
Figura No. 31 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para  $\text{NO}_2$ , en la Ciudad de Quetzaltenango, Quetzaltenango.



Fuente: Google map 2016.

## 14. Anexo

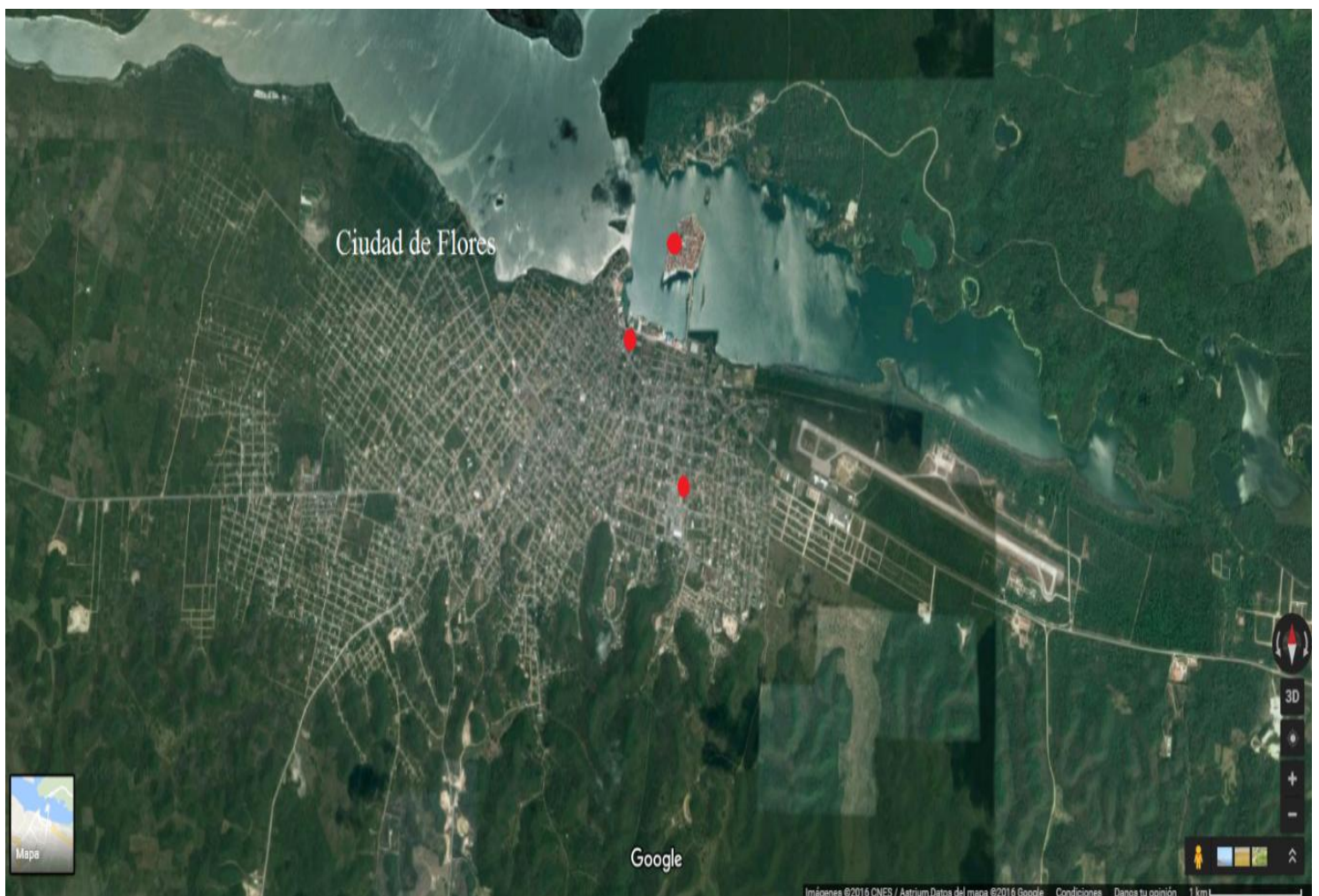
Figura No. 32 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO<sub>2</sub>, en la Cabecera Departamental de Santa Cruz del Quiché.



Fuente: Google map 2016.

## 15. Anexo

Figura No. 33 Imagen satelital de los puntos de monitoreo para NO<sub>2</sub>, en la Cabecera Departamental de Flores, Petén.



Fuente: Google map 2016.

## 16. Anexo

Figura No. 34 Imagen del contenedor de tubos pasivos para  $\text{NO}_2$ , en la Ciudad de Guatemala.



Fuente: Fotografía tomada en la terraza del edificio T-10 del –LMA– situado en la USAC zona 12, enero 2014.

### 17. Anexo

Figura No. 35 Imagen del contenedor de tubos pasivos para  $\text{NO}_2$ , en la Cabecera Departamental de Cobán, Alta Verapaz.



Fuente: Fotografía tomada en la Delegación departamental del –MARN– Julio 2014.

## 18. Anexo

Figura No. 36 Imagen del contenedor de tubos pasivos para NO<sub>2</sub>, en la Cabecera Departamental de Puerto Barrios, Izabal.



Fuente: Fotografía tomada en el Hotel Palma Real octubre 2014.



## 19. Anexo

Figura No. 37 Imagen del contenedor de tubos pasivos para  $\text{NO}_2$ , en la Cabecera Departamental de Cuilapa, Santa Rosa.



Fuente: Fotografía tomada en la 3ra. Avenida de la zona 2 de Cuilapa, junio 2014.

## 20. Anexo

Figura No. 38 Imagen del contenedor de tubos pasivos para  $\text{NO}_2$ , en la Ciudad de Escuintla.



Fuente: Fotografía tomada en la Gobernación Departamental de Escuintla, mayo 2014.

## 21. Anexo

Figura No. 39 Imagen del contenedor de tubos pasivos para NO<sub>2</sub>, en la Ciudad de Quetzaltenango.



Fuente: Fotografía tomada en la Quinta Compañía, Estación de Bomberos Voluntarios, zona 3 de Quetzaltenango, mayo 2014.

## 22. Anexo

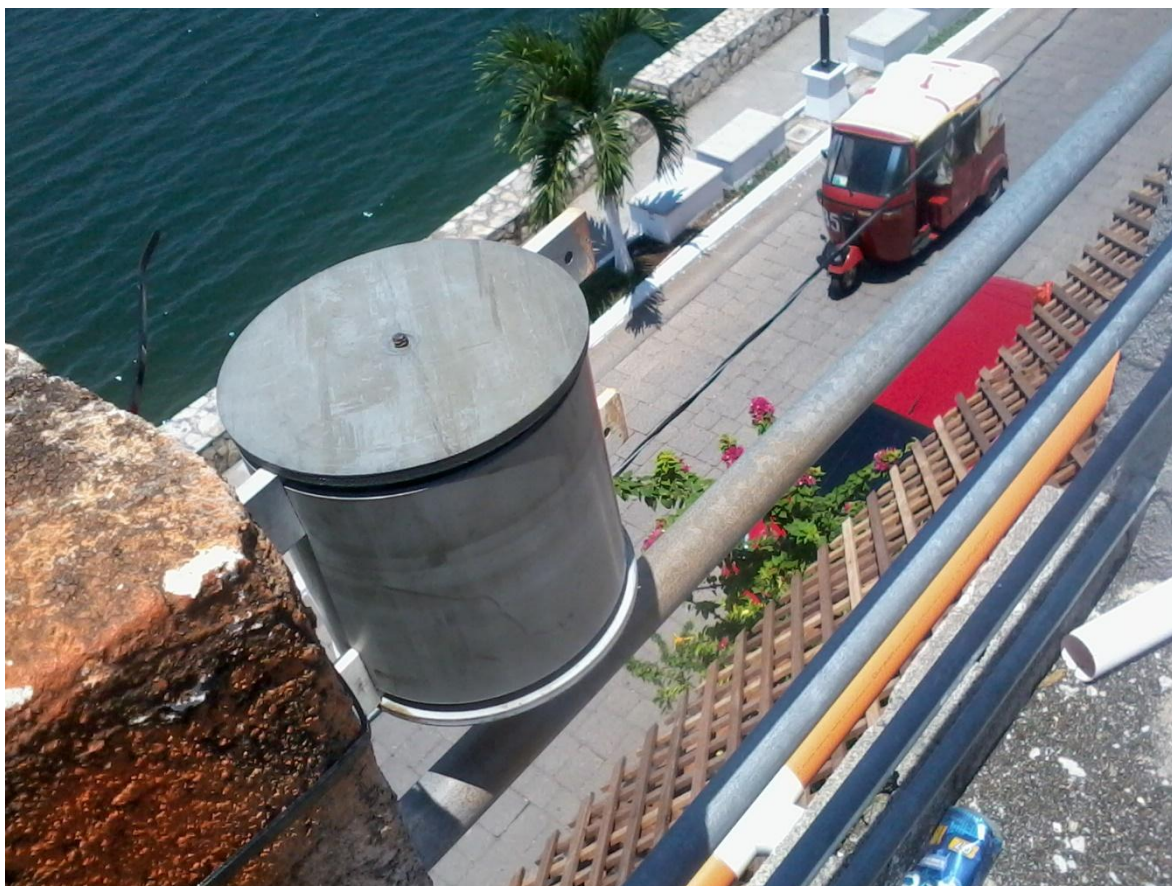
Figura No. 40 Imagen del contenedor de tubos pasivos para NO<sub>2</sub>, en la Cabecera Departamental de Santa Cruz, Quiche.



Fuente: Fotografía tomada en la 44<sup>a</sup> Estación de Bomberos Municipales, Santa Cruz del Quiche, Junio 2014.

### 23. Anexo

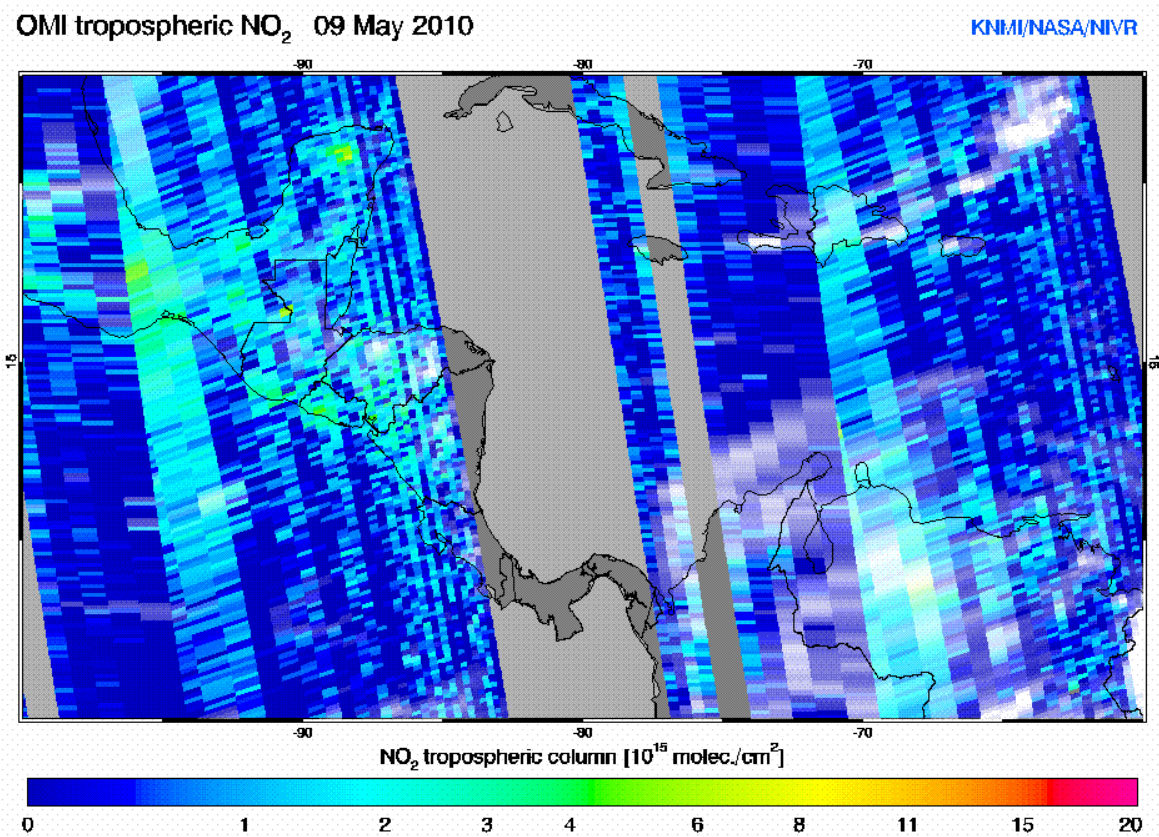
Figura No. 41 Imagen del contenedor de tubos pasivos para  $\text{NO}_2$ , en la Ciudad de Flores, Petén.



Fuente: Fotografía tomada en la terraza del restaurante "San Telmo" Isla de Flores, Mayo 2014.

## 24. Anexo

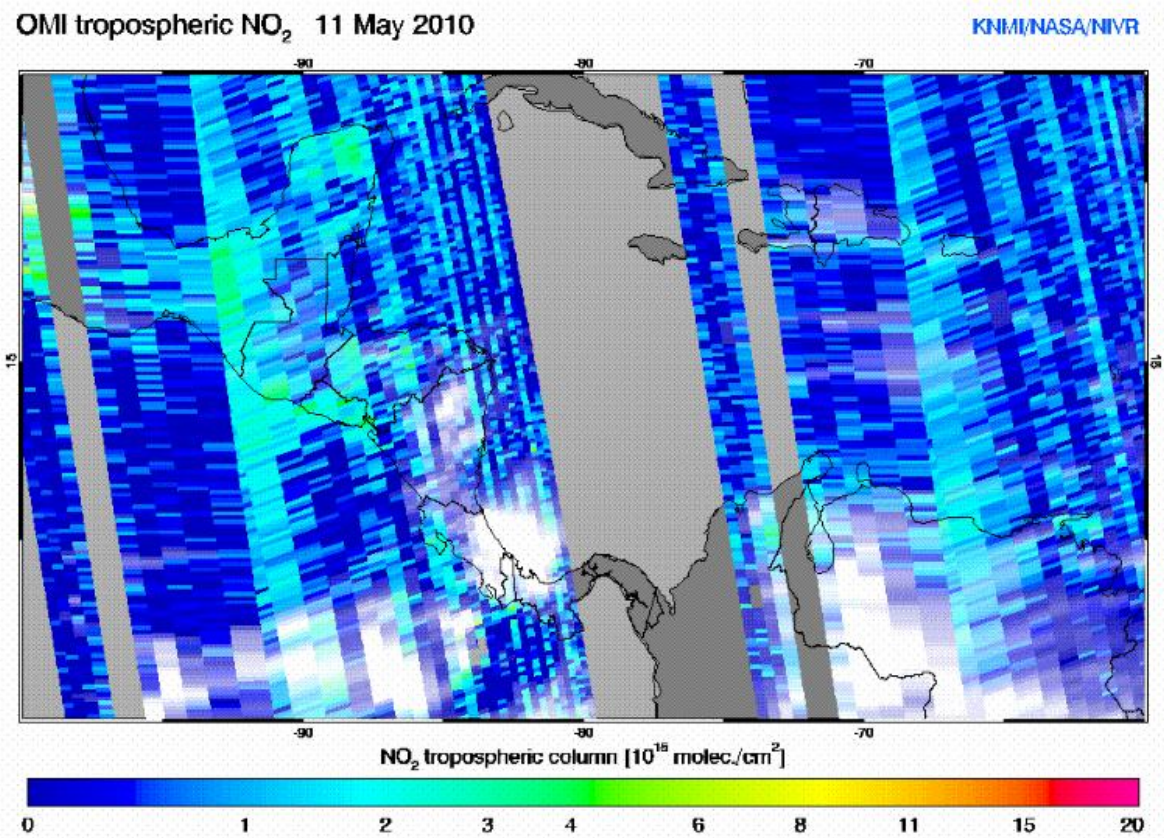
Figura No. 42 Imagen satelital de NO<sub>2</sub>, troposférico sobre México, Guatemala y El Salvador.



Fuente: KNMI/NASA

## 25. Anexo

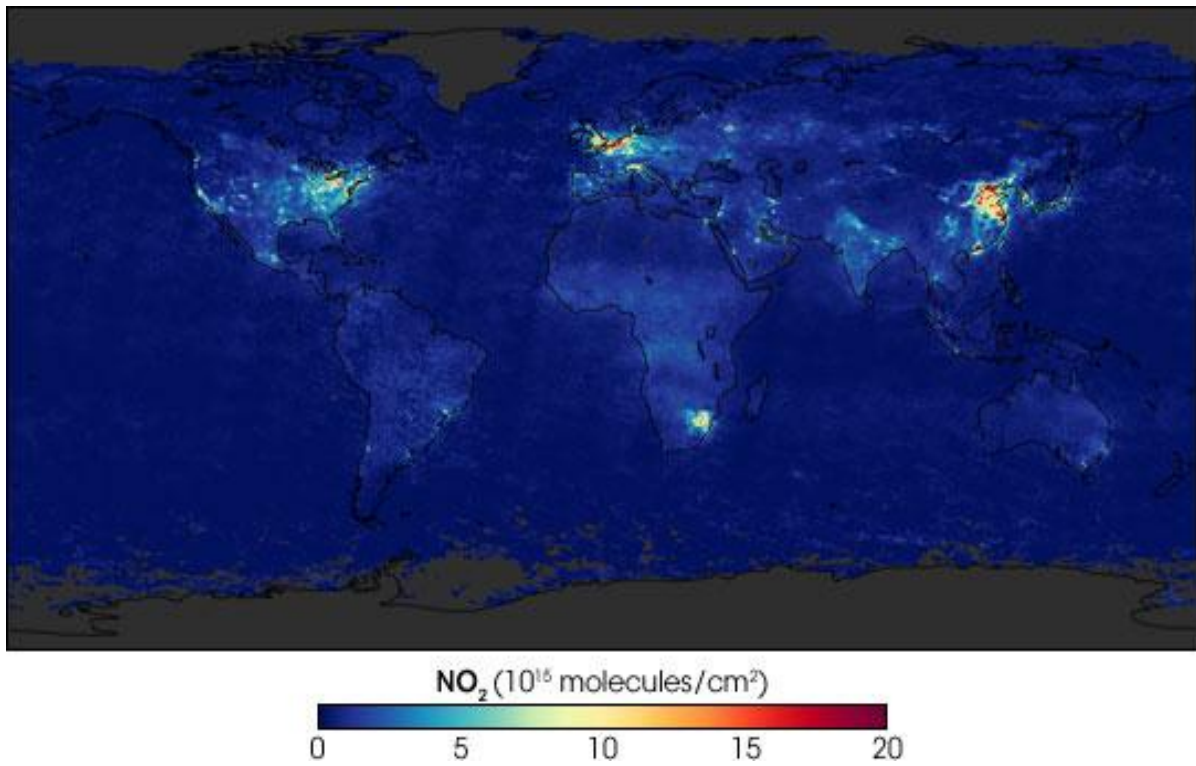
Figura 43 Imagen satelital de NO<sub>2</sub>, troposférico sobre México, Guatemala y El Salvador.



Fuente: KNMI/NASA

## 26. Anexo

Figura No. 44 Imagen satelital de NO<sub>2</sub>, troposférico sobre varias ciudades en la tierra.




Fuente: NASA




27. Anexo

Figura No. 45 Hoja de campo (II-01) para la medición de NO<sub>2</sub>, en Cobán, Alta Verapaz.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA  
ESCUELA DE QUIMICA  
LABORATORIO DE MONITOREO DEL AIRE

Registro: TF-04 Versión: 1  
Fecha de Actualización: 02/05/2012



*Cobam*

DETERMINACIÓN DE NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y OTROS

Estación No:	Fecha:	Presión Promedio:	Temperatura:	% Humedad:
<i>Delegación</i>	<i>4/7/2014</i>	<i>650mmHg</i>	<i>24°C</i>	<i>28%</i>
Responsable de la medición:				
<i>MARN</i>				

PARAMETROS A MEDIR

	Pasivo (NO <sub>2</sub> )	Activo (NO <sub>2</sub> )	Activo (SO <sub>2</sub> )	Pasivo (O <sub>3</sub> )	Activo (O <sub>3</sub> )	Lluvia ácida	Otro:
No. De tubos	<i>4 + 2</i>						
mL Solución absorbente inicial							
mL Solución absorbente final							
Equipo No.							
Bomba No.							
Orificio Crítico No.							
pH inicial							

CONDICIONES AMBIENTALES


CONDICIÓN	BASTANTE	POCO	NADA
SOLEADO	<i>X</i>		
LLUVIOSO			<i>X</i>
SECO	<i>X</i>		
NIEBLA			<i>X</i>
CONSTRUCCIÓN			<i>X</i>
TRANSPORTE	<i>X</i>		
INCENDIO			<i>X</i>
FUENTES NATURALES			<i>X</i>
OTROS			<i>X</i>

OBSERVACIONES: *Equipo se coloca en la delegación del MARN, se abre celda muestreo.*

*Carretera* ←

*Sav 7-37 Zona 1*

*Cobam*





1

Fuente: Datos de campo muestreo 2014

## 28. Anexo

Figura No. 46 Hoja de campo (III-02) para la medición de NO<sub>2</sub>, en Puerto Barrios, Izabal.

	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA ESCUELA DE QUIMICA LABORATORIO DE MONITOREO DEL AIRE	
	Registro: TF-04 Versión: 1 Fecha de Actualización: 02/05/2012	

*Puerto Barrios* DETERMINACIÓN DE NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y OTROS

Estación No:	Fecha:	Presión Promedio:	Temperatura:	% Humedad:
	<i>2/9/2014</i>	<i>758 mmHg</i>	<i>30°C</i>	<i>58%</i>
Responsable de la medición: <i>Edando Sigüenza</i>				

*Hotel Palma Real* PARAMETROS A MEDIR

	Pasivo (NO <sub>2</sub> )	Activo (NO <sub>2</sub> )	Activo (SO <sub>2</sub> )	Pasivo (O <sub>3</sub> )	Activo (O <sub>3</sub> )	Lluvia ácida	Otro:
No. De tubos	<i>4</i>						
mL Solución absorbente inicial							
mL Solución absorbente final							
Equipo No.							
Bomba No.							
Orificio Crítico No.							
pH inicial							

CONDICIONES AMBIENTALES

CONDICIÓN	BASTANTE	POCO	NADA
SOLEADO		<input checked="" type="checkbox"/>	
LLUVIOSO	<input checked="" type="checkbox"/>		
SECO			<input checked="" type="checkbox"/>
NIEBLA			<input checked="" type="checkbox"/>
CONSTRUCCIÓN			<input checked="" type="checkbox"/>
TRANSPORTE	<input checked="" type="checkbox"/>		
INCENDIO			<input checked="" type="checkbox"/>
FUENTES NATURALES			<input checked="" type="checkbox"/>
OTROS			<input checked="" type="checkbox"/>

OBSERVACIONES: *El equipo se instaló en la terraza del Hotel Palma Real en Puerto Barrios, Izabal. Buen tiempo.*



*Cordenadas*  
*N 15° 43.248'*  
*W 88° 35.852'*

1

Fuente: Datos de campo muestreo 2014

## 29. Anexo

Figura No. 47 Hoja de campo (IV-02) para la medición de NO<sub>2</sub>, en Cuilapa, Santa Rosa.

	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA ESCUELA DE QUIMICA LABORATORIO DE MONITOREO DEL AIRE		
	Registro: TF-04 Versión: 1 Fecha de Actualización: 02/05/2012		

*Santa Rosa* DETERMINACIÓN DE NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y OTROS

Estación No:	Fecha:	Presión Promedio:	Temperatura:	% Humedad:
<i>Cuilapa</i>	<i>12/06/14</i>	<i>685 mmHg</i>	<i>30.2</i>	<i>15%</i>
Responsable de la medición:				

PARAMETROS A MEDIR


	Pasivo (NO <sub>2</sub> )	Activo (NO <sub>2</sub> )	Activo (SO <sub>2</sub> )	Pasivo (O <sub>3</sub> )	Activo (O <sub>3</sub> )	Lluvia ácida	Otro:
No. De tubos	<i>4</i>						<i>+ 4</i>
mL Solución absorbente inicial							
mL Solución absorbente final							
Equipo No.							
Bomba No.							
Orificio							
Crítico No.							
pH inicial							

CONDICIONES AMBIENTALES

CONDICIÓN	BASTANTE	POCO	NADA
SOLEADO		<input checked="" type="checkbox"/>	
LLUVIOSO			<input checked="" type="checkbox"/>
SECO		<input checked="" type="checkbox"/>	
NIEBLA			<input checked="" type="checkbox"/>
CONSTRUCCIÓN			<input checked="" type="checkbox"/>
TRANSPORTE			<input checked="" type="checkbox"/>
INCENDIO			<input checked="" type="checkbox"/>
FUENTES NATURALES			<input checked="" type="checkbox"/>
OTROS			

OBSERVACIONES: *El equipo no calza en la delegación dependiente del MARN, se abrepa para medido.*

*Cordemadas*  
*N 14° 16.798'*  
*W 90° 17.903'*





1

Fuente: Datos de campo muestreo 2014

## 30. Anexo

Figura No. 48 Hoja de campo (V-02) para la medición de NO<sub>2</sub>, en la Ciudad de Escuintla.

	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA ESCUELA DE QUIMICA LABORATORIO DE MONITOREO DEL AIRE			
	Registro: TF-04 Versión: 1 Fecha de Actualización: 02/05/2012			

14 Calle 1-47 2-3  
Escuintla

**DETERMINACIÓN DE NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y OTROS**

Estación No:	Fecha:	Presión Promedio:	Temperatura:	% Humedad:
	23/5/2014	745 mm Hg	39.8°C	51%
Responsable de la medición: <i>Edwada Squiter</i>				

**PARAMETROS A MEDIR**

	Pasivo (NO <sub>2</sub> )	Activo (NO <sub>2</sub> )	Activo (SO <sub>2</sub> )	Pasivo (O <sub>3</sub> )	Activo (O <sub>3</sub> )	Lluvia ácida	Otro:
No. De tubos	4						
mL Solución absorbente inicial							
mL Solución absorbente final							
Equipo No.							
Bomba No.							
Orificio							
Critico No.							
pH inicial							

**CONDICIONES AMBIENTALES**

CONDICIÓN	BASTANTE	POCO	NADA
SOLEADO	X		
LLUVIOSO			X
SECO		X	
NIEBLA			X
CONSTRUCCIÓN			X
TRANSPORTE		X	
INCENDIO			X
FUENTES NATURALES		X	
OTROS			X



**OBSERVACIONES:** *Días de lluvia, zona volcánica al equipo se cubre por la lluvia.*

N 14° 17, 097'  
W 90° 49, 076'  
altura 346 m sobre el nivel del mar  
*Susana Lima*

Fuente: Datos de campo muestreo 2014

## 31. Anexo

Figura No. 49 Hoja de campo (VI-02) para la medición de NO<sub>2</sub>, en la Ciudad de Quetzaltenango.

	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA ESCUELA DE QUIMICA LABORATORIO DE MONITOREO DEL AIRE		
	Registro: TF-04 Versión: 1 Fecha de Actualización: 02/05/2012		

**DETERMINACIÓN DE NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y OTROS**

Estación No:	Fecha:	Presión Promedio:	Temperatura:	% Humedad:
Xela	31/4/2014	601 mmHg	22.3 °C	32%
Responsable de la medición:				
Barbara Tenorio				

**PARAMETROS A MEDIR**

	Pasivo (NO <sub>2</sub> )	Activo (NO <sub>2</sub> )	Activo (SO <sub>2</sub> )	Pasivo (O <sub>3</sub> )	Activo (O <sub>3</sub> )	Lluvia ácida	Otro:
No. De tubos	4						
mL Solución absorbente inicial							
mL Solución absorbente final							
Equipo No.							
Bomba No.							
Orificio Crítico No.							
pH inicial							

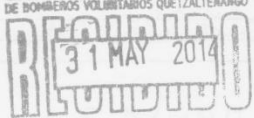
**CONDICIONES AMBIENTALES**

CONDICIÓN	BASTANTE	POCO	NADA
SOLEADO		X	
LLUVIOSO			X
SECO		X	
NIEBLA			X
CONSTRUCCIÓN			X
TRANSPORTE	X		
INCENDIO			
FUENTES NATURALES			X
OTROS			X

**OBSERVACIONES:** El equipo se coloca en la estación de trabajo voluntarios, se asegura que no haya presencia de actividad de lluvia.

Coordenadas:


N: 14°50'59"  
W: 91°32'21"

CAMPO ESCUELA Y ESTACIÓN DE APOYO DE BOMBEROS VOLUNTARIOS QUETZALTENANGO  
  
 HORA: \_\_\_\_\_


Fuente: Datos de campo muestreo 2014

32. Anexo

Figura No. 50 Hoja de campo (VII-01) para la medición de NO<sub>2</sub>, en Santa Cruz del Quiché.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA  
ESCUELA DE QUIMICA  
LABORATORIO DE MONITOREO DEL AIRE



Registro: TF-04 Versión: 1  
Fecha de Actualización: 02/05/2012

**DETERMINACIÓN DE NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y OTROS**

Quiché  
Santa Cruz

Estación No:	Fecha:	Presión Promedio:	Temperatura:	% Humedad:
	1/6/2014	599 mmHg	20.3	20%
Responsable de la medición: <i>CS</i>				

**PARAMETROS A MEDIR**


	Pasivo (NO <sub>2</sub> )	Activo (NO <sub>2</sub> )	Activo (SO <sub>2</sub> )	Pasivo (O <sub>3</sub> )	Activo (O <sub>3</sub> )	Lluvia ácida	Otro:
No. De tubos	4 + 2						
mL Solución absorbente inicial							
mL Solución absorbente final							
Equipo No.							
Bomba No.							
Orificio Crítico No.							
pH inicial							

**CONDICIONES AMBIENTALES**

CONDICIÓN	BASTANTE	POCO	NADA
SOLEADO	X		
LLUVIOSO			X
SECO	X		
NIEBLA			X
CONSTRUCCIÓN			X
TRANSPORTE		X	
INCENDIO			X
FUENTES NATURALES			X
OTROS			X

**OBSERVACIONES:** *El equipo se instaló en la estación # 12 de las personas voluntarias de Santa Cruz del Quiché, se observa poca actividad de lluvia.*

N 15° 01.843'  
W 91° 09.065'



**XII Cia. Quiché**  
Selvin de la Cruz  
SECRETARIO

1

Fuente: Datos de campo muestreo 2014

### 33. Anexo

Figura No. 51 Método de difusión pasiva para dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>. (Hoja – 1)

Capítulo 5: Procedimientos de Operación Estándar (SOP)

swisscontact

---

#### SOP 5.3.1

**Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

Método: Difusión pasiva

#### Equipos y Materiales

Trietanolamina	
Acetona	
Sulfanilamida	Fluka 86090
N-1 naftiletildiamina (NEDA)	Fluka 70720
o- ácido fosfórico	Fluka 79620
Solución estándar NO <sub>2</sub> 1000 ppm	Merck
NaNO <sub>2</sub> (grado analítico >99%)	
Agua destilada	< 18 MOhm
Tubos colector de polipropileno (diámetro interno 9.5 mm, largo 7.4 cm)	Passam AG, Suiza
Tubos de ensayo de 5 ml con tapa	
Balanza analítica	
Espectrofotómetro UV-visible	

#### Preparación del tubo pasivo

- Se mezclan 1 parte de trietanolamina con 8 partes de acetona.
- Se sumergen las tres redcillas de acero (superficie de absorción) en este líquido, luego se secan con papel de filtro.
- Las redcillas se colocan en los tubos colectores, entre el tubo y la tapa blanca de teflon.

#### Preparación del reactivo de color

- Solución A:** Se disuelven 2 gramos de sulfanilamida en 5 ml de ácido fosfórico 85%. Diluir a 100 ml con agua destilada. Calentar el líquido hasta que hierva.
- Solución B:** Se disuelven 70 mg de N-1 naftiletildiamina (NEDA) en 50 ml de agua destilada.
- Después de enfriar la solución A hasta temperatura ambiente, las soluciones A y B se combinan (1:1) y el reactivo está listo para usar en 24 horas. El reactivo de color se mantiene estable durante un mes, si está protegido de la luz y guardado en refrigeración.

#### Calibración

- Solución patrón:** Se recomienda utilizar el estándar (líquido) de NO<sub>2</sub> 1000 ppm de Merck, el cual contiene 1000 mg NO<sub>2</sub> en 1000 ml, lo que es equivalente a 1 mg NO<sub>2</sub>/ml. En caso de no disponer de este estándar, la solución patrón se produce disolviendo 1.5 gramos NaNO<sub>2</sub> (grado analítico >99%) en 1 litro de agua destilada.
- Solución estock:** 10 ml de la solución patrón se diluyen en 250 ml agua destilada, lo que da una concentración de 40 µg NO<sub>2</sub>/ml (= 40 ng NO<sub>2</sub>/µl). Proteger la solución de la luz y guardarla en refrigeración. La misma se mantiene estable por 90 días.
- Preparar la curva de calibración:** 10, 20, 40 y 80 µl se combinan respectivamente con 4 ml del reactivo de color. 20 µl son iguales a 0.8 µg NO<sub>2</sub> por muestra.

#### Ejemplo

µl por 4 ml react. de color	µg NO <sub>2</sub> /4ml	nmoles NO <sub>2</sub> (en 4 ml)	absorbancia
10	0.4	8.7	0.097
20	0.8	17.4	0.183
40	1.6	34.8	0.353
80	3.2	69.6	0.701

**Curva de calibración**

absorbancia (λ = 540 nm)

NO<sub>2</sub> [nmol]

$y = 0.0099x + 0.01$

$R^2 = 1$


#### Análisis de la muestra

- Remueva la tapa, traslade las tres redes con una pinzeta a un tubo de ensayo y agregue 4 ml del reactivo de color. Tape el tubo de ensayo y agite. Deje pasar 15 minutos para que se desarrolle el color.
- Se lee la absorbancia de las soluciones de la curva de calibración y de las muestras a 540 nm utilizando un es-

49

### 34. Anexo

Figura No. 52 Método de difusión pasiva para dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>. (Hoja – 2)



Capítulo 5: Procedimientos de Operación Estándar (SOP)

pectrofotómetro, llevado a cero con una celda de referencia, conteniendo el blanco (agua destilada con la que se preparó la curva de calibración y el reactivo de color).

**Cálculo**

---

Del gráfico de calibración se obtienen los nanomoles de NO<sub>2</sub> colectados por el muestreador y luego la concentración de dióxido de nitrógeno en microgramos por metro cúbico aire (µg/m<sup>3</sup>).

$$\text{NO}_2 [\mu\text{g}/\text{m}^3] = \frac{[\text{nanomoles}] \text{NO}_2 \cdot 46 \cdot 1000}{0.9047[\text{ml}/\text{min}] \cdot \text{horas} \cdot 60}$$

**Medidas de mantenimiento**

---

Es factible reutilizar los tubos pasivos, siempre y cuando se les dé una buena limpieza, la cual consiste en:

- Acido sulfúrico de cromo (1 x)
- Agua del grifo (3 x)
- Agua destilada (4 x)
- Secar durante 2 horas a 130 °C.

**Fechas de vencimiento**

---

Los reactivos utilizados para este análisis se conservan durante el período indicado abajo, si están protegidos de la luz y guardados en refrigeración:

- Reactivo de color: 30 días
- Solución estock para curva de calibración: 90 días

El tiempo de vida de los tubos blancos es de 6 meses antes de usarlos.

**Aseguramiento de calidad**

---

Los pasos del aseguramiento de calidad interno están descritos en el apartado 7.4.2, a partir de página 76.

50

Fuente: Procedimientos de operación estándar (SOP) / LMA