



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**CONTROL, MONITOREO Y SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN
LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Ing. Kenneth Lubeck Corado Esquivel

Asesorado por el Mtro. Ing. Flavio Welmer Reyes Rodas

Guatemala, junio de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONTROL, MONITOREO Y SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN
LA CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. KENNETH LUBECK CORADO ESQUIVEL

ASESORADO POR EL MTRO. ING. FLAVIO WELMER REYES RODAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, JUNIO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Mtro. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Mtra. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
SECRETARIA	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a consideración mi trabajo de graduación titulado:

CONTROL, MONITOREO Y SIMULACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que fuera asignado por la dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de Ingeniería, con fecha 29 de mayo de 2019.

Ing. Kenneth Lubeck Corado Esquivel

Ref.APT-2019-021

En mi calidad como Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente titulado: **"CONTROL Y MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE GUATEMALA"** presentado por el Ingeniero Agroindustrial **Kenneth Lubeck Corado Esquivel** quien se identifica con Carné **100024331**, procedo a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"

guilas
Maestro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, junio de 2019.

Cc archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2019-021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado "CONTROL Y MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE GUATEMALA" presentado por el Ingeniero Agroindustrial Kenneth Lubeck Corado Esquivel quien se identifica con Carné 100024331 correspondiente al programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, junio de 2019.

Cc archivo/L.Z.L.A.

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado "CONTROL Y MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE GUATEMALA" presentado por el Ingeniero Agroindustrial Kenneth Lubeck Corado Esquivel quien se identifica con Carné 100024331.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Maestro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, junio de 2019.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2019-021

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Agroindustrial **Kenneth Lubeck Corado Esquivel** quien se identifica con carné No. **200611139** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado **"CONTROL Y MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE GUATEMALA"** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Maestro, Ing. Flavia Welmer Reyes Rodas
Asesor(a)

MSc. Ing. Flavia Welmer Reyes Rodas
COLEGIADO No. 838
COLEGIO DE INGENIEROS QUIMICOS DE GUATEMALA

Guatemala, junio de 2019.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme sabiduría en culminar esta meta.
- Mi padre** Julio Héctor Corado Mancio, por su ejemplo de dedicación y amor. Por enseñarme a ser un hombre de bien con principios y valores.
- Mi madre** Adelia Mancio de Corado (QEPD), por haber sido mi mayor ejemplo de ser humano en la vida, sin tu amor jamás estuviera acá alcanzando este meta, este triunfo es tuyo para siempre en mi mente y corazón.
- Mis hermanos** Julio, Yessenia y Mayra, porque juntos hemos crecido bajo toda circunstancia adversa.
- Mi esposa** María Alejandra del Águila Lara de Corado, por su paciencia y templanza. Gracias por estar allí siempre, todo mi amor para usted.
- Mis hijos** Cináed Alessandro y Ethan Patricio, por ser la luz que ilumina todos los días de mi vida. Mi mayor orgullo son ustedes dos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Mi alma máter, mi casa principal de sueños, por haberme formado en ser el profesional que hoy soy.

Facultad de Ingeniería Por haberme brindado todo el conocimiento que he logrado en este postgrado.

Mi asesor Flavio Reyes, por su apoyo, comprensión y paciencia en la constante revisión y asesoría en esta investigación.

Mis amigos Gracias por formar parte de mi vida y ayudarme cuando lo he necesitado.

Todos los que han colaborado con mi formación Por su apoyo muchas gracias.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	I
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XI
OBJETIVOS	XIII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	1
1.1. Aire	1
1.2. Atmósfera	3
1.3. Calidad del aire	4
1.4. Cálculo del índice de calidad del aire (ICA)	6
1.5. Contaminantes del aire atmosférico	8
1.5.1. Partículas menores a 10 micrómetros	9
1.6. Dióxido de azufre	11
1.6.1. Efectos por exposición	11
1.7. Óxidos de nitrógeno	13
1.7.1. Fuentes de emisión y aplicaciones de los óxidos de nitrógeno	13
1.7.2. Efectos sobre la salud humana y el medio ambiente	14
1.8. Monitoreo del aire	14
1.9. Método de quimiluminiscencia para óxidos de nitrógenos NO-NOx	15

1.10.	Determinación de NO _x y NO ₂	17
1.11.	Método de atenuación de radiación beta PM10.....	19
1.12.	Método de fluorescencia por radiación UV SO ₂	20
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	25
3.	RESULTADOS	27
3.1.	Partículas menores a 2.5 micrómetros	27
3.1.1	Proyección de partículas suspendidas 2.5 micrómetros.....	30
3.2.	Partículas menores a 10 micras	31
3.2.1	Proyección de partículas suspendidas 10 micrómetros.....	33
3.3.	Dióxido de nitrógeno NO ₂	34
3.3.1	Proyección de dióxido de nitrógeno	37
3.4.	Dióxido de azufre SO ₂	38
3.4.1	Proyección de dióxido de azufre.....	40
3.5.	Calidad del aire	42
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
	CONCLUSIONES	47
	RECOMENDACIONES	49
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
	ANEXOS	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Tamaño del material particulado	10
2.	Los óxidos nitrogenados en ambiente y su daño en la salud.....	13
3.	Sensibilidad del espectro en óxidos nitrogenados	17
4.	Absorción de UV	22
5.	Partículas totales en suspensión 2.5 micras.....	28
6.	Promedio de partículas en suspensión 2.5 micras del 2012 al 2017.....	29
7.	Proyección partículas en suspensión 2.5 micras, para el año 2018.....	30
8.	Partículas totales en suspensión 2.5 micras.....	31
9.	Promedio de partículas en suspensión 10 micras del 2009 al 2014.....	32
10.	Proyección de partículas en suspensión 10 micras al año 2018.....	33
11.	Dióxido de nitrógeno NO ₂	35
12.	Dióxido de nitrógeno NO ₂ anual.....	36
13.	Proyección del dióxido de nitrógeno, para el año 2018	37
14.	Dióxido de azufre	38
15.	Dióxido de azufre anual.....	39
16.	Proyección de dióxido de azufre.....	40
17.	Valores anuales de SO ₂ de 2006 a 2017.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Composición de la atmósfera terrestre	2
II.	Índice de calidad del aire	5
III.	Puntos de corte para ICA.....	7
IV.	Efectos sobre la salud por exposición respiratoria al dióxido de azufre.....	12
V.	Índice de calidad del aire	42
VI.	Valores anuales de pm_{10} de 1996 a 2014	57
VII.	Valores de promedio anual de NO_2 de 1995 a 2017	58
VIII.	Valor de promedio anual de $PM_{2.5}$ de 2013 a 2017	59

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
μ	Micro
g	Gramo
m³	Metro cúbico
PPM	Parte por millón
PPB	Parte por billón
PM₁₀	Partícula suspendida de 10 micrómetros
PM_{2.5}	Partícula suspendida de 2,5 micrómetros
SO₂	Dióxido de azufre
NO₂	Dióxido de nitrógeno
EPA	Agencia de protección ambiental
ICA	Índice de calidad del aire
μg	Microgramos
CCQQFAR	Ciencias Químicas y Farmacia.
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala.

GLOSARIO

Calidad del aire	Está definida como la medida de la condición del aire con respecto a los requerimientos de una o más especies bióticas o necesidad de humanos.
Concentración	Es la proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolución o de disolvente, donde el soluto es la sustancia que se disuelve, el solvente es la sustancia que disuelve al soluto, y la disolución es el resultado de la mezcla homogénea de las dos anteriores..
Emisión	Es la liberación de una sustancia (generalmente de un gas), hacia la atmósfera.
Mitigar	Se usa para referirse a que algo debe ser contrarrestado, moderado. Es decir, suavizado, tanto en el aspecto material de las cosas como en otros intangibles como los sentimientos o las sensaciones.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Organismo adscrito al Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda de la República de Guatemala.

Material particulado

Pequeñas piezas de material sólido o líquido, tal es el caso de partículas de hollín, polvo, gases, neblina y aerosoles.

RESUMEN

La contaminación del aire ambiente crea un riesgo potencial para la salud de los humanos y animales, siendo más vulnerables los grupos sensibles (niños y ancianos).

El presente trabajo de investigación trata sobre la calidad del aire en la ciudad de Guatemala, con el objetivo de controlar, monitorear y simular el estado de la calidad del aire del área metropolitana.

Para realizar el estudio, se analizaron las estaciones de muestreo de calidad del aire de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, se utilizaron los contaminantes PM_{10} , $PM_{2.5}$, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre, se determinó los factores que afectan principalmente a los contaminantes presentes en el aire ambiente son: la alta densidad poblacional de la ciudad y el cambio climático; generando un impacto negativo a nivel ambiental; además, se presentan las alternativas y recomendaciones, para mitigar el problema de contaminación del aire ambiente.

En la investigación se logró establecer que el contaminante material particulado de 2.5 micrómetros se encuentra en un nivel alto de contaminación, lo cual es dañino para los niños y adultos mayores. También se determinó que el índice de calidad del aire en tres de los cuatro contaminantes estudiados, se encuentran en estado bueno como lo denomina la Organización Mundial de la Salud.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación del aire ambiente constituye un importante riesgo ambiental para la salud de los humanos, sin importar la clase, edad, sexo o estrato social, siendo más vulnerables los niños y las personas de la tercera edad.

A lo largo de los años se ha atribuido estas enfermedades a la contaminación del aire: accidentes cerebrovasculares, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas y agudas. El asma es una de ellas, cuantos menos contaminantes existan en el aire ambiente, mejor será la salud cardiovascular y respiratoria de la población, tanto a corto como a largo plazo.

Según la OMS: “ Se estima que un 72 % de las defunciones prematuras relacionadas con la contaminación del aire exterior en 2012 se debieron a cardiopatía isquémica y accidente cerebrovascular, mientras que un 14 % se debieron a neumopatía obstructiva crónica o infección aguda de las vías respiratorias inferiores, y un 14 % a cáncer de pulmón”. (s/r, 2012).

Una investigación realizada por la Organización Mundial de la Salud, en el año 2012, dice que: “Además de la contaminación del aire exterior, el humo en interiores representa un grave riesgo para la salud de unos 3 000 millones de personas que cocinan y calientan sus hogares con combustibles de biomasa y carbón. Unos 4,3 millones de defunciones prematuras ocurridas en 2012 eran atribuibles a la contaminación del aire en los hogares. Casi todas se produjeron en países de ingresos bajos y medianos.”

Guatemala por ser un país en vías de desarrollo, cuenta con un mayor número de personas en el área rural que en el área urbana, siendo muy común, el uso de leña para la preparación de alimentos en sus hogares.

Los contaminantes presentes en el aire guardan relación con la cantidad de habitantes de la ciudad de Guatemala, lo que conlleva en forma directamente proporcional al aumento de energía eléctrica, combustible, comida, etc. Esto se refleja en la contaminación del aire causada por las chimeneas de las fábricas, las plantas generadoras de energía que queman combustibles y por la combustión de cualquier tipo de automotor, entre otros.

¿Existe en la ciudad de Guatemala una línea de base científica para el control y monitoreo de la calidad de aire?

¿Cuáles serían las ventajas de monitorear la contaminación del aire, en la población de la ciudad?

¿Estadísticamente se puede determinar un modelo estadístico para la calidad de aire?

OBJETIVOS

General:

Determinar el estado de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala, mediante las estaciones de monitoreo de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la USAC y su comportamiento a mediano plazo.

Específicos:

1. Establecer una línea de base científica, como instrumento de gestión ambiental en la calidad del aire ambiente de la ciudad de Guatemala.
2. Evaluar el estado de la calidad del aire ambiente en la ciudad de Guatemala, para los años comprendidos entre 2012 y 2017.
3. Realizar una proyección mediante un modelo estadístico que determine el comportamiento en un año del estado de la calidad del aire, en la ciudad de Guatemala.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación plantea la interrogante central siguiente:

Utilizando los datos recopilados de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la USAC, ¿existe en la ciudad de Guatemala una línea de base científica para el control y monitoreo de la calidad del aire?

De lo anterior, se estableció el objetivo general: determinar el estado de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala, mediante las estaciones de monitoreo de la USAC y su comportamiento a mediano plazo.

En el trabajo realizado, se adoptó una línea de investigación aplicada experimental, de tipo mixto, determinando variables que fueron tratadas, mediante análisis inferencial de datos en un marco temático de gestión ambiental de control de la calidad de aire ambiente en la ciudad de Guatemala.

En la presente investigación se dividió en las siguientes etapas metodológicas para dar respuesta a la interrogante principal y sus auxiliares planteadas para su desarrollo:

1. Recopilación de la información: la recopilación de la información, se realizó por medio de la base de datos desarrollado por el la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Esta recopilación fue acompañada por el jefe de la sección de análisis de la calidad de aire de dicha Facultad.

2. Clasificación de información: se clasificó la información por el tipo de contaminante obtenido, asimismo se realizó una diferenciación por el mes y año de la toma del dato, esto para facilitar el control llevado a cabo.
3. Cuantificación de concentración de contaminante: se procedió en la identificación, recopilación y el monitoreo por tipo de contaminante. En esta misma etapa, se realizó la evaluación del nivel de impacto del riesgo, considerando las escalas de la Organización Mundial de la Salud para ello.
4. Determinación de la línea base científica: consistió en elaborar y establecer una la línea base de datos de cada contaminante, con lo anterior se definieron prioridades para determinar la calidad del aire en efectos negativos al ambiente, según su magnitud.
5. Establecimiento del índice de la calidad del aire: consistió en la obtención del ICA, mediante las mediciones de las concentraciones de los contaminantes del aire, a través de los parámetros ambientales establecidos por la Organización Mundial de la Salud, con el fin de establecer los indicadores y el verificar el cumplimiento de los criterios ambientales aceptados en el aire ambiente de la ciudad de Guatemala.
6. Modelación de la calidad del aire: éste se realizó mediante dos análisis estadísticos, con mínimos cuadrados se obtuvo el valor promedio anual para cada contaminante; posteriormente se realizó una simulación Montecarlo con los datos obtenidos a través de los años y se modeló una gráfica para determinar el comportamiento de la calidad del aire en el año posterior a la toma de datos de esta investigación.

INTRODUCCIÓN

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, ha implementado el sistema de evaluación final denominado investigación final de tesis, previo a optar el grado académico de postgrado en Energía y Ambiente, el mismo tiene como objeto, realizar un estudio a nivel regional, del análisis en ambiente, en el control, monitoreo y simulación de la calidad del aire. Esto permitirá poner al servicio de la población alertas ambientales que se pondrán en práctica como resultado del estudio. Esto permitirá en primera instancia poner al servicio de la población los conocimientos adquiridos al realizar un estudio técnico-ambiental en el área geográfica delimitada, que para el presente estudio es la ciudad de Guatemala, siendo el período de investigación del mes de mayo del año 2018.

El informe denominado: “Control, monitoreo y simulación de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala”. Se espera que las estaciones ubicadas en los diferentes puntos de la ciudad de Guatemala, se obtengan los datos y se cumpla con el objetivo del estudio evaluar el estado de la calidad del aire ambiente en la ciudad de Guatemala, con el fin de garantizar el estado del aire ambiente de la ciudad.

El informe está conformado por cuatro capítulos:

En la presente investigación, se encuentra una introducción que tiene como fin que, el lector se interese en el tema; posteriormente se encuentra la justificación en la cual se hizo referencia del porqué de la investigación, las

bases científicas y tecnológicas para el desarrollo de la misma; así mismo, se mencionan los logros académicos, para el área específica de investigación.

El planteamiento del problema incluye los efectos de los contaminantes al tener contacto con seres humanos en altas concentraciones, también se colocan estadísticas de la Organización Mundial de la Salud OMS y la delimitación y se formula la pregunta central.

Se plantearon tres objetivos acorde a la investigación, con el fin de tener una línea base de contaminación y determinar la calidad de aire que se respira en la ciudad de Guatemala, utilizando los recursos necesarios y disponibles para llevarlos a cabo, se planteó una hipótesis científica, y dos hipótesis estadísticas, utilizando un valor de confianza del 95 %; en la sección, se realizó una revisión crítica de las hipótesis formuladas. Además, se realizó un análisis de mínimos cuadrados para determinar el comportamiento del fenómeno, de la misma manera se realizará una simulación para el año 2018, con el objetivo de establecer la calidad del aire.

En el marco teórico, se presentan los fundamentos bibliográficos, para llevar a cabo la investigación en los que se menciona: el aire, atmósfera, calidad del aire, los contaminantes que afectan a la calidad del aire y serán lo que se evaluarán, los problemas de salud que causan los contaminantes cuando están presentes en la atmósfera, etc.

Adicionalmente, se presentaron los métodos, técnicas, instrumentos y materiales de la investigación, así como también se describen los diseños experimentales propuestos relacionados con las concentraciones de los diferentes contaminantes presentes en el aire de la ciudad de Guatemala.

Se presentan los resultados por cada tipo de contaminante del aire, ellos son: partículas de 2,5 micrómetros, partículas de 10 micrómetros, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno; también se realizó una gráfica por cada contaminante con cada estación, una gráfica del comportamiento anual con base al análisis de mínimos cuadrados; luego se aplicó la simulación Montecarlo para obtener los datos y se graficaron los resultados de la simulación.

Se tiene una sección de discusión de resultados, en la cual se hace énfasis del estado de la calidad del aire por contaminante, se determina los riesgos conllevados por la exposición prolongada de los contaminantes y se define el grupo sectorial que tiende a ser sensible con el estado del aire.

Por último, se presentan las referencias utilizadas como soporte científico de este estudio, en el cual se incluyeron tesis de estudio relacionadas con este tema: artículos científicos de nivel doctorado, maestrías, journals relacionadas con el tema, y páginas webs de instituciones gubernamentales con controles de calidad del aire en sus países respectivos.

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

La calidad del aire es un parámetro que se utiliza para medir los contaminantes presentes en el ambiente, estos pueden estar presentes de forma natural o por alguna actividad humana e industrial.

1.1. Aire

Se denomina aire a la mezcla homogénea de gases que constituye la atmósfera terrestre, que permanecen alrededor del planeta Tierra por acción de la fuerza de gravedad. El aire es esencial para la vida en el planeta y transparente a simple vista. (Rapin, Jacquard, & Jacquard, 1997).

Es una combinación de gases en proporciones ligeramente variables, compuesto por nitrógeno (78 %), oxígeno (21 %), y otras sustancias (1 %), como ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles (como Kriptón y Argón). (Rapin, Jacquard, & Jacquard, 1997).

Tabla I. **Composición de la atmósfera terrestre (aire seco, porcentajes por volumen)**

Gas	Volumen
Nitrógeno (N ₂)	780 840 ppmv (78,084 %)
Oxígeno (O ₂)	209 460 ppmv (20,946 %)
Argón (Ar)	9 340 ppmv (0,934 %)
Dióxido de Carbono (CO ₂)	400 ppmv (0,040 %)
Neón (Ne)	18,18 ppmv (0,001818 %)
Helio (He)	5,24 ppmv (0,000524 %)
Metano (CH ₄)	1,79 ppmv (0,000179 %)
Kriptón (Kr)	1,14 ppmv (0,000114 %)
Hidrógeno (H ₂)	0,55 ppmv (0,000055 %)
Óxido Nitroso (N ₂ O)	0,30 ppmv (0,00003 %)
Xenón (Xe)	0,09 ppmv (9x10 ⁻⁶ %)
Ozono (O ₃)	0,0-0,07 ppmv (0 % a 7x10 ⁻⁶ %)
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	0,02 ppmv (2x10 ⁻⁶ %)
Yodo (I)	0,01 ppmv (1x10 ⁻⁶ %)
Monóxido de Carbono (CO)	0,10 ppmv
Amoniaco (NH ₃)	trazas
Excluido por ser aire en seco	
Agua (vapor) (H ₂ O)	-0,40 % a nivel atmosférico, en superficie: 1 % - 4 %

ppmv: partes por millón por volumen

Fuente: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/221.htm#tab61. Copiright 1998.

1.2. **Atmósfera**

Atmósfera (del griego *ἀτμός* (atmos), que significa 'vapor' y *σφαῖρα* (sphaira), que significa 'esfera') es una capa de gases que rodea a un planeta u otro cuerpo material, que se mantiene en su lugar por la gravedad de ese cuerpo.

El oxígeno es utilizado por la mayoría de los organismos para la respiración, el nitrógeno es fijado por las bacterias y el rayo para producir amoníaco utilizado en la construcción de nucleótidos y aminoácidos y el dióxido de carbono es utilizado por las plantas, algas y cianobacterias para la fotosíntesis.

La atmósfera terrestre es la parte gaseosa de la Tierra, siendo por esto la capa más externa y menos densa del planeta. Está constituida por varios gases que varían en cantidad, según la presión a diversas alturas. Esta mezcla de gases que forma la atmósfera recibe genéricamente el nombre de aire. El 75 % de masa atmosférica se encuentra en los primeros 11 km de altura, desde la superficie del mar. Los principales gases que la componen son: el oxígeno (21 %) y el nitrógeno (78 %), seguidos del argón, el dióxido de carbono y el vapor de agua (véase tabla I).

1.3. Calidad del aire

En el año de 1985, Albert determinó que: “la calidad del aire es una indicación de cuánto el aire está exento de polución atmosférica y, por lo tanto apto para ser respirado, esto depende de la concentración de contaminantes que son dañinos a la salud humana y se encuentran diluidos en un área determinada, a esto se le llama inmisiones; la expulsión, a la atmósfera, de sustancias líquidas, sólidas o gaseosas procedentes de fuentes fijas o móviles producto de la combustión o del proceso de una producción se le llama emisión”. (Albert, 46 p.)

En el año 2017, el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Metrología e Hidrología indica en su página web, “el índice de calidad del aire (ICA) es un indicador de cuan limpio o contaminado está el aire en el sitio de medición, asociado a los efectos sobre la salud que la población puede experimentar en unas pocas horas o días después de respirar ese aire.

El ICA es calculado de acuerdo a la forma de cálculo establecida para el AQI (Air Quality Index) de la EPA, considerando los siguientes parámetros: Ozono, Partículas, Monóxido de carbono, Dióxido de azufre y Dióxido de nitrógeno.

El ICA varía entre 0 y 500, donde 500 representa el nivel más alto de contaminación y por tanto, el de mayor riesgo para la salud. Generalmente, un valor de 100 corresponde al límite de calidad del aire, por lo que los valores menores a 100 son considerados como satisfactorios.

Tabla II. **Índice de calidad del aire**

Valor de ICA	Color	Calidad del aire	Significado
0 - 50	Verde	Buena	La calidad del aire es considerada satisfactoria.
51 - 100	Amarillo	Moderada	La calidad del aire es aceptable, sin embargo, algunos contaminantes pueden generar un efecto moderado en la salud de un muy pequeño número de personas usualmente sensibles a la contaminación del aire.
101 - 150	Naranja	No saludable para grupos sensibles	Miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos sobre su salud. El público general no es usualmente afectado.
151 - 200	Rojo	Insalubre	Cualquier persona comienza a experimentar efectos sobre su salud. Miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos más serios sobre su salud.
201 – 300	Púrpura	Muy Insalubre	Alerta de salud: cualquier persona puede experimentar efectos serios sobre su salud.
301 - 500	Granate	Peligrosa	Advertencia de condición de emergencia: La salud de la población entera está en riesgo de ser afectada.

Fuente: https://www3.epa.gov/airnow/aqikids/spanish/pdf/files/spanish_aqirefer.pdf

1.4. Cálculo del índice de calidad del aire (ICA)

El índice de calidad del aire se calcula para cada uno de los parámetros medidos en cada estación de muestreo (ozono, partículas, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno).

El ICA se divide en cinco categorías, marcadas cada una de ellas por concentraciones de corte superior e inferior para cada parámetro. En cada categoría el ICA es una función lineal de la concentración, siguiendo la siguiente ecuación:

$$ICA = \frac{ICA_{sup} - ICA_{inf}}{C_{sup} - C_{inf}} (C - C_{inf}) + ICA_{inf}$$

Donde:

ICA = Es el índice de calidad del aire para el contaminante P de una estación de monitoreo de la calidad del aire j durante el período de tiempo t, el cual corresponde al período de exposición previsto en la norma para cada uno de los contaminantes que se está midiendo. (Ver tabla III)

C = Es la concentración del contaminante P medida en la estación de monitoreo de la calidad del aire j durante el período de tiempo t, el cual corresponde al período de exposición previsto en la norma para cada uno de los contaminantes que se está midiendo.

C_{inf} = Es el punto de corte menor o igual a la concentración del contaminante P medida. $\leq C$, (ver tabla III)

C_{sup} = Es el punto de corte mayor o igual a la concentración del contaminante P medida. $> C$, (ver tabla III)

ICA_{inf} = Índice ICA de corte correspondiente a C_{inf} , (ver tabla III)

ICA_{sup} = Índice ICA de corte correspondiente a C_{sup} , (ver tabla III)

Para calcular el ICA de cada parámetro, se ubica la concentración C del contaminante dentro de la categoría correspondiente de ICA, en función de las concentraciones de corte de cada categoría, y se aplica la ecuación con los valores correspondientes. Para mayor información sobre el tema, refiérase a documentación más especializada.

Tabla III. **Puntos de corte para ICA**

Rangos ICA	Clasificación	O ₃ , 8 h, (ppm)	O ₃ , 1 h, (ppm) ¹	PM ₁₀ 24 h (µg/m ³)	PM _{2.5} 24 h (µg/m ³)	CO 8h (ppm)	SO ₂ 24h (ppm)	NO ₂ 1 h (ppm)
0 ≤ ICA ≤ 50	Verde	0,000 0,059	-	0 54	0,0 15,4	0,0 4,4	0,0000 0,0034	(2)
51 ≤ ICA ≤ 100	Amarillo	0,060 0,075	-	55 154	15,5 40,4	4,5 9,4	0,035 0,144	(2)
101 ≤ ICA ≤ 150	Anaranjado	0,076 0,095	0,125 0,164	155 254	40,5 65,4	9,5 12,4	0,154 0,224	(2)
151 ≤ ICA ≤ 200	Rojo	0,096 0,115	0,165 0,204	255 354	65,5 150,4	12,5 15,4	0,225 0,304	0,65 1,24
201 ≤ ICA ≤ 300	Morado	0.116 0.374 (0.155 0.404) (4)	0,205 0,404	355 424	150,5 250,4	15,5 30,4	0,305 0,604	0,65 1,24
301 ≤ ICA ≤ 400	Marrón	(3)	0,405 0,504	425 504	205,5 350,4	30,5 40,4	0,605 0,804	1,25 1,64
401 ≤ ICA ≤ 500	Marrón	(3)	0,505 0,604	505 604	350,5 500,4	40,5 50,4	0,805 1,004	1,65 2,04

Fuente: Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad de aire del protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, pág. 134.

(1) Para O₃ se calcula el Índice usando promedio de 8 horas y 1 hora.

(2) Para NO₂ se tienen en cuenta únicamente los valores por encima de 200 teniendo en cuenta que han sido tomados de valores y parámetros EPA.

- (3) Valores de concentraciones de 8 horas de ozono no definen valores del ICA superiores a 300. Los valores del ICA superiores a 300 se calculan con concentraciones de 1 hora del contaminante.
- (4) Los números citados entre paréntesis se refieren a valores de 1 hora que se utilizan en esta categoría sólo si se superponen.

NOTA: Para efectos del reporte e interpretación del índice, no se mostrará el cálculo para cada una de las muestras individuales, sino que se mostrará el porcentaje del total de datos distribuidos entre los niveles del ICA.

1.5. Contaminantes del aire atmosférico

La Organización Mundial de la Salud OMS sobre la calidad del aire publicadas en el año 2005 dice: “se ofrece una orientación general relativa a umbrales y límites para contaminantes atmosféricos clave que entrañan riesgos sanitarios. Las Directrices señalan que mediante la reducción de la contaminación con partículas (PM₁₀) de 70 a 20 microgramos por metro cúbico (µg/m³) es posible reducir en un 15 % el número de defunciones relacionadas con la contaminación del aire” (Organización Mundial de la Salud, 2017).

“Las directrices se aplican en todo el mundo y se basan en la evaluación, realizada por expertos, de las pruebas científicas actuales concernientes a:

- Partículas (PM)
 - Ozono (O₃)
 - Dióxido de Nitrógeno (NO₂) y
 - Dióxido de Azufre (SO₂), en todas las regiones de la OMS”.
- (Organización Mundial de la Salud, 2017)

Generalmente, las mediciones de la calidad del aire se notifican como concentraciones medias diarias o anuales de partículas PM₁₀ por metro cúbico (m³) de aire.

1.5.1. Partículas menores a 10 micrómetros

Según la National Aeronautics and Space Administration en el año 2011, “Las partículas más perjudiciales para la salud son las de 10 micrones de diámetro, o menos ($\leq PM_{10}$), que pueden penetrar y alojarse en el interior profundo de los pulmones. La exposición crónica a las partículas agrava el riesgo de desarrollar cardiopatías y neumopatías, así como cáncer de pulmón.

Dichas partículas provienen de los procesos de combustión de fuentes, tanto móviles como fijas y de fenómenos naturales. La composición química del material particulado varía de acuerdo a la fuente”.

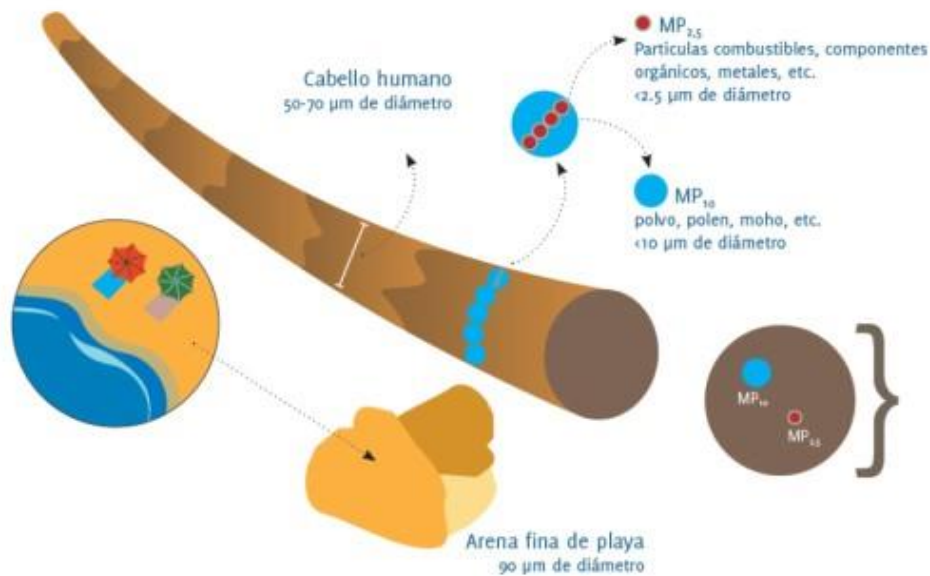
“El material particulado se clasifica, según su tamaño: $PM_{2.5}$ corresponde a las partículas cuyo diámetro aerodinámico es menor a $2.5 \mu m$ y PM_{10} , a las menores de $10 \mu m^3$.” (Determinacion of O_3 , CO and PM10 transport in the metropolitan area of São Paulo, Brazil through synoptic-scale analysis of back trajectories, 2006)

“Las partículas son eliminadas de la atmósfera mediante dos mecanismos: la deposición en la superficie de la Tierra (deposición seca) y la incorporación a gotas de las nubes durante la formación de la lluvia (deposición húmeda)”. (Seinfeld & Pandis, 2006).

La agencia de protección ambiente de Estados Unidos especifica: “estas partículas ($\leq PM_{10}$) se producen junto con los contaminantes gaseosos del aire, debido a diferentes actividades. Los principales emisores industriales son: la fabricación de hierro y acero, la producción de cemento, la extracción de rocas y minerales, el almacenamiento y la manipulación de granos y la elaboración de pulpa y papel, las pequeñas gotas esféricas entran en este grupo de contaminantes. Estas gotas pueden absorber moléculas de gases tóxicos como

el anhídrido sulfuroso y los óxidos de nitrógeno, con lo que una neblina inofensiva se puede transformar en un agente letal". (Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS) , 2017)

Figura 1. **Tamaño del material particulado**



Fuente: <http://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.particle>.

En la figura 1, se realiza una comparación entre un cabello humano (mide entre 50-70 µm de diámetro), y las partículas de 10 y 2,5 micrones, fragmentado una partícula de 10 micras cabe cinco veces en un cabello humano y nueve veces en una unidad de arena fina de playa.

La corporación ambiental de América (ECA por sus siglas en inglés), en su página web, determina los límites permisibles para material particulado PM₁₀ como los siguientes 20 µg/m³ de media anual y 50 µg/m³ de media en 24 h y para material particulado PM_{2.5} 10 µg/m³ de media anual y 25 µg/m³ de media en 24 h.

1.6. Dióxido de azufre

El dióxido de azufre es uno de los gases más comúnmente liberados durante erupciones volcánicas (después de agua y dióxido carbónico), y es preocupante a escala global, debido a su potencial influencia en el clima.

“El dióxido de azufre (SO₂) es un gas incoloro con un olor irritante característico. Este olor es perceptible a diferentes niveles, dependiendo de la sensibilidad individual, pero generalmente se percibe entre 0.3-1.4 ppm y es fácilmente notable a 3 ppm” (Wellburn, 1994).

Típicamente, la concentración de SO₂ en fumarolas volcánicas diluidas es <10 ppm, tan poco como 10 Km con viento a favor desde su origen, comparado con el antecedente troposférico de 0,00001-0,07 ppm (Brimblecombe, 1996; Oppenheimer *et al.*, 1998).

1.6.2. Efectos por exposición

El dióxido de azufre es irritante a los ojos, garganta y vías respiratorias. La sobre exposición en el corto tiempo causa inflamación e irritación, provocando ardor en los ojos, tos, dificultades respiratorias y sensación de tensión en el pecho, una muestra de los umbrales por efectos a la salud se describe en la tabla IV.

Tabla IV. **Efectos sobre la salud por exposición respiratoria al dióxido de azufre**

Límite de exposición (ppm)	Efectos sobre la salud
1-5	Umbral de respuesta respiratoria al ejercicio o respiración profunda en individuos sanos.
3-5	El gas es fácilmente detectable. Caída de la función respiratoria en reposo y resistencia a la corriente de aire.
5	Aumento de la resistencia en individuos sanos.
6	Inmediata irritación en ojos nariz y garganta.
10	Empeora la irritación en ojos, nariz y garganta.
10-15	Umbral de toxicidad por exposición prolongada.
>20	Parálisis o muerte después de exposición prolongada.
150	Máxima concentración que puede ser resistida durante algunos minutos por individuos sanos.

Fuente: Baxter, 2000; Nemery, 2001; NIOSH 1981; Wellburn, 1994

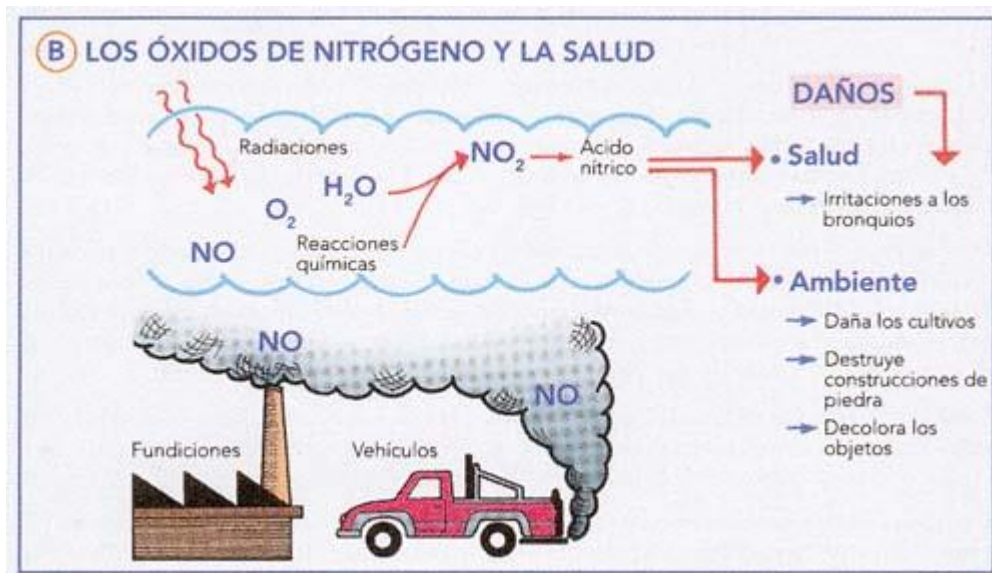
“Se ha demostrado que la presencia de altos niveles de SO₂ en el ambiente puede causar diversos problemas de salud en niños (Ware *et al.*, 1986). Aún así, los estudios realizados en el Mt. Sakurajima no indican una correlación entre la prevalencia de asma en niños y la exposición prolongada a los gases volcánicos” (Uda, Akiba, & Shinkuro, 1999).

1.7. Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno son un grupo de gases compuestos por óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). El término NO_x se refiere a la combinación de ambas sustancias (Gobierno de España, 2017).

El dióxido de nitrógeno es el principal contaminante de los óxidos de nitrógeno, y se forma como subproducto en todas las combustiones llevadas a cabo a altas temperaturas. (Gobierno de España, 2017).

Figura 2. Los óxidos nitrogenados en ambiente y su daño en la salud



Fuente: http://www.peruecologico.com.pe/lib_c24_t03_imag.htm, 2017.

1.7.1. Fuentes de emisión y aplicaciones de los óxidos de nitrógeno

Las fuentes más comunes de óxidos de nitrógeno en la naturaleza, son la descomposición bacteriana de nitratos orgánicos, los incendios forestales, quema de rastrojos y la actividad volcánica.

Las principales fuentes antropogénicas de emisión se producen en los escapes de los vehículos motorizados y en la quema de combustibles fósiles. Otros focos de menor relevancia, se llevan a cabo en los procesos biológicos de los suelos, en los que se produce la emisión de nitritos (NO_2) por parte de los microorganismos.

1.7.2. Efectos sobre la salud humana y el medio ambiente

Es una sustancia corrosiva para la piel y el tracto respiratorio, provocando enrojecimiento y quemaduras cutáneas graves. (Gobierno de España, 2017)

Con respecto a los impactos producidos en el medio ambiente, se trata de una sustancia que tiene una gran trascendencia en la formación del *smog* fotoquímico, influye en las reacciones de formación de ozono en la superficie de la tierra (Gobierno de España, 2017).

Por otra parte, el NO_2 se forma a partir de la oxidación del óxido nítrico (NO), y tiene una vida corta en la atmósfera, ya que se oxida rápidamente a nitratos (NO_3^-) o a HNO_3 (ácido nítrico). En este último caso, se produce el fenómeno de la lluvia ácida que consiste en la reacción de los nitratos (NO_3^-) con la humedad existente en el ambiente, dando lugar a ácido nítrico (HNO_3), que precipita causando grandes destrozos en los bosques y la acidificación de las aguas superficiales (Gobierno de España, 2017).

1.8. Monitoreo del aire

“La actividad diaria de la ciudad genera una gran cantidad de sustancias que modifican la composición natural del aire. La quema de combustibles fósiles

para el transporte y la generación de energía, tanto a nivel industrial como doméstico, produce miles de toneladas de contaminantes que diariamente son emitidos a la atmósfera. Los vehículos son la principal fuente de emisión, le siguen en importancia las fuentes de área, la industria, los hogares y las emisiones de fuentes naturales (biogénicas)". (Aire en México, s.r.)

Existen esencialmente dos tipos de técnicas de muestreo: la recolección de gases y recolección de partículas.

Entre los métodos de recolección de partículas se encuentra la filtración e impactación.

En la recolección de gases se encuentran la absorción, adsorción, contenedor evacuado y condensación.

En el programa de monitoreo de calidad del aire se utiliza la recolección de gases y para el análisis del contaminante en el aire se utilizan los métodos aprobados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), los cuales son:

- NO₂ método de quimiluminiscencia.
- PM₁₀ método de atenuación de radiación beta o beta-atenuación.
- SO₂ método de fluorescencia por radiación ultravioleta.

1.9. Método de quimiluminiscencia para óxidos de nitrógenos NO-NO_x

"Luminiscencia, basado en la reacción con ozono en fase gas. La rápida reacción en fase gas entre el NO y el ozono produce moléculas excitadas de NO₂, las cuales pueden desexcitarse por dos caminos, emisión de luz

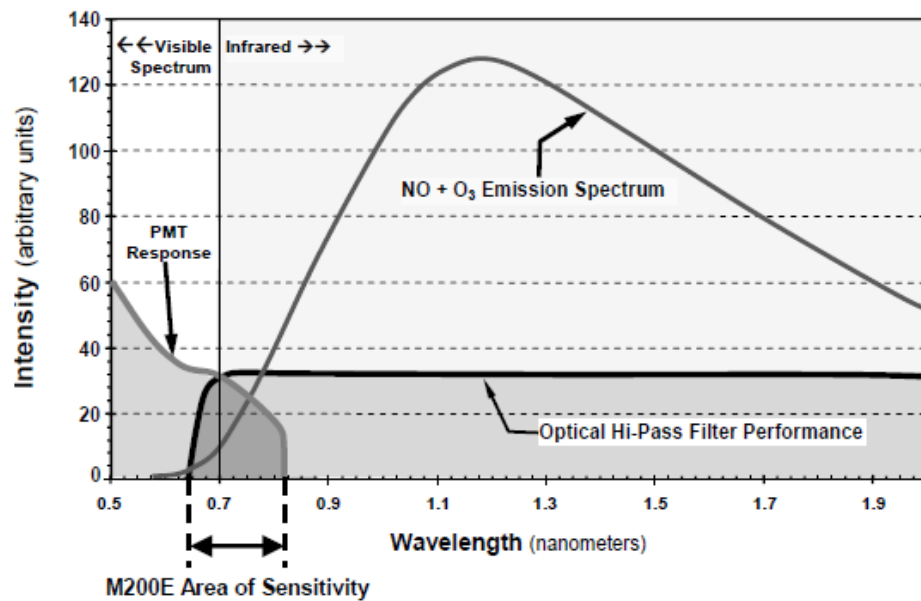
(quimioluminiscencia) o relajación por colisiones con otras moléculas presentes (N_2 , O_2 , H_2O). En el primer caso, la intensidad de luz emitida es proporcional a las concentraciones de ozono y NO_x a una presión determinada. Si uno de estos gases se encuentra en exceso, la emisión de luz es proporcional a la concentración del otro gas. La radiación de banda ancha emitida por las moléculas excitadas de NO_2 para longitudes de onda mayores a 600 nm y centrada en 1200 nm, se detecta mediante un tubo fotomultiplicador sensible al rojo, con filtro ópticos para evitar el paso de radiación de longitud de onda menor a 600 nm, producida por reacciones de ozonólisis de otras moléculas presentes en aire, fundamentalmente alquenos". (CIEMAT, 2002)

"La muestra de aire ambiental y una corriente de aire de ozono en exceso se mezcla en la cámara de reacción adyacente a la ventana del fotomultiplicador. La señal de salida del sistema es una tensión proporcional a la cantidad de NO que pasa por la cámara de reacción. La respuesta es lineal en un amplio rango (hasta 1 000 PPM) y el límite de detección puede llegar a ser del orden de decenas de PPT, lo que se consigue minimizando por enfriamiento el ruido térmico del tubo fotomultiplicador." (CIEMAT, 2002)

"La medida de la concentración de NO_2 , mediante esta técnica es indirecta. Para su medida se descompone catalíticamente este gas a NO antes de la detección, obteniéndose de modo secuencial, si el analizador tienen una sola cámara o de modo continuo, si existen dos cámaras en paralelo, señales de NO y de NO_x ($NO+NO_2$) y por diferencia entre ellas la señal neta de NO_2 . Para obtener la reducción del NO_2 a NO se utilizan varios catalizadores: Acero inoxidable con alto contenido en carbón a $700^\circ C$; existe la posibilidad de oxidación de NH_3 a NO Molibdeno calentado a $300-400^\circ C$; es el sistema más ampliamente usado, aunque algunos estudios han mostrado que se descomponen otros compuestos de nitrógeno además del NO_2 (ácido nítrico,

pentóxido de dinitrógeno, nitrito, nitratos y nitratos orgánicos) oro calentado a 300 °C en corriente de CO (0,3 %); este sistema convierte todos los compuestos de NO_y (nitrato de peroxiacetilo, HNO_3 , HNO_2 y alquil-nitratos) a NO. Los más recientes analizadores comerciales que implementan esta técnica tienen un límite de detección y una precisión de 0,5 ppb y una linealidad de +/- 1 % del fondo de escala, para un tiempo promedio de la señal de 60 s” (CIEMAT, 2002).

Figura 3. **Sensibilidad del espectro en óxidos nitrogenados**

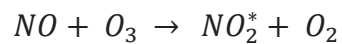


Fuente: M200E NO_x Analyzer Operation Manual, p. 219

1.10. Determinación de NO_x y NO_2

El equipo de medición M200E mide la cantidad de NO presente en un gas detectando la quimioluminiscencia que se produce cuando el óxido de nitrógeno (NO) está expuesto al ozono (O_3). Esta reacción es un proceso de dos pasos: En el primer paso, una molécula de NO y una molécula de O_3 chocan y

reaccionan químicamente para producir una molécula de oxígeno (O₂) y una molécula de dióxido de nitrógeno (NO₂). Algunas de las moléculas de NO₂, creado por esta reacción retienen el exceso de energía de la colisión y existen en un estado excitado, donde uno de los electrones de la molécula de NO₂ reside en un estado de energía superior al normal (denotado por un Asterisco en la siguiente ecuación). (Teledyne Technologies Company, 2010)



El único gas que realmente se mide por el equipo M200E es NO. NO₂, y por lo tanto, NO_x (que se define aquí como la suma de NO y NO₂ en el gas de muestra), contenido en el gas no se detecta porque NO₂ no reacciona con O₃ para crear quimioluminiscencia. Con el fin de medir la concentración de NO₂, y por lo tanto, la concentración de NO_x, el equipo M200E periódicamente conmuta la corriente de gas de muestra de modo que la bomba lo tire, a través de un cartucho de convertidor especial lleno de Molibdeno (Mo, "moly") que se calientan a una temperatura de 315 °C. (Teledyne Technologies Company, 2010).

El molibdeno calentado reacciona con NO₂ en el gas de muestra y produce un gas NO y una variedad de Molibdeno.



Una vez que el NO₂ en el gas de muestra se ha convertido en NO, se dirige a la célula de reacción donde se somete.

Mediante la conversión del NO₂ en el gas de muestra en NO, el analizador puede medir el contenido total de NO_x del gas de muestra (es decir, el NO

presente + el NO_2 convertido presente). Conmutar y encender la corriente de gas de muestra. Del convertidor "moly" cada 6 - 10 segundos, el analizador M200E es capaz de medir casi continuamente tanto el NO y el contenido total de NO_x . (Teledyne Technologies Company, 2010).

Finalmente, la concentración de NO_2 no se mide directamente sino que se calcula restando el contenido de NO conocido del gas de muestra del contenido conocido de NO_x .

1.11. Método de atenuación de radiación beta PM10

“Se emplea para cuantificar la concentración de partículas suspendidas de fracción respirable PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$. Es un método equivalente para el monitoreo continuo de partículas, certificado por la USEPA (Agencia de Protección al ambiente de los Estados Unidos)”. (Secretaría de Medio Ambiente México, s.r.)

“En la atenuación de rayos beta, se emplea un elemento radiactivo como carbono 14 (^{14}C) que emite electrones de alta energía, (conocidos como rayos beta). La radiación emitida se hace pasar a través de un punto de la cinta de fibra de vidrio limpia. Los rayos beta son detectados y cuantificados por un detector de centelleo sensible para asociarlos a una lectura cero o peso inicial. En la atenuación de rayos beta, se emplea un elemento radiactivo como carbono 14 (^{14}C) que emite electrones de alta energía, (conocidos como rayos beta). La radiación emitida se hace pasar a través de un punto de la cinta de fibra de vidrio limpia. Los rayos beta son detectados y cuantificados por un detector de centelleo sensible para asociarlos a una lectura cero o peso inicial.” (Red automática de monitoreo atmosférico de la ZMVT, 2017)

“Posteriormente la cinta avanza a la boca de la muestra, donde una bomba de vacío succiona una cantidad medida y controlada de aire-polvo, a través de ésta, impregnándola con el aire-polvo recolectado. Al final de una hora de muestreo este punto sucio se coloca nuevamente entre la fuente de radiación beta y el detector de tal modo que se obtiene una nueva medición de radiación, la cual es menor, debido a la presencia de la muestra. La atenuación de la señal de la radiación se utiliza para determinar la masa de las partículas depositadas en la cinta. La concentración volumétrica de partículas se determina considerando la cantidad del flujo, la presión y temperatura.” (Red automática de monitoreo atmosférico de la ZMVT, 2017)

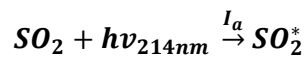
“El número de partículas beta que pasan por el material absorbente, como el polvo depositado en una cinta de papel, decrece de una manera exponencial con la masa, a través de la cual debe pasar.” (Colop Méndez, 2014)

Igual que con los métodos antes descritos, se utiliza la ley de Beer, para la determinación de la concentración, el símbolo (I) en la ecuación es la intensidad de rayos beta medidos (cuentas por unidad de tiempo), de la radiación atenuada a pasar, a través de las partículas depositadas en el papel de filtro, I_0 es la intensidad de radiación beta que pasa por la cinta de papel limpia, L es la área del material absorbente, y C es la densidad del material absorbente. La ecuación 1 se acerca mucho a la ley de Beer Lambert, esta ley es una simplificación del comportamiento real.

1.12. Método de fluorescencia por radiación UV SO₂

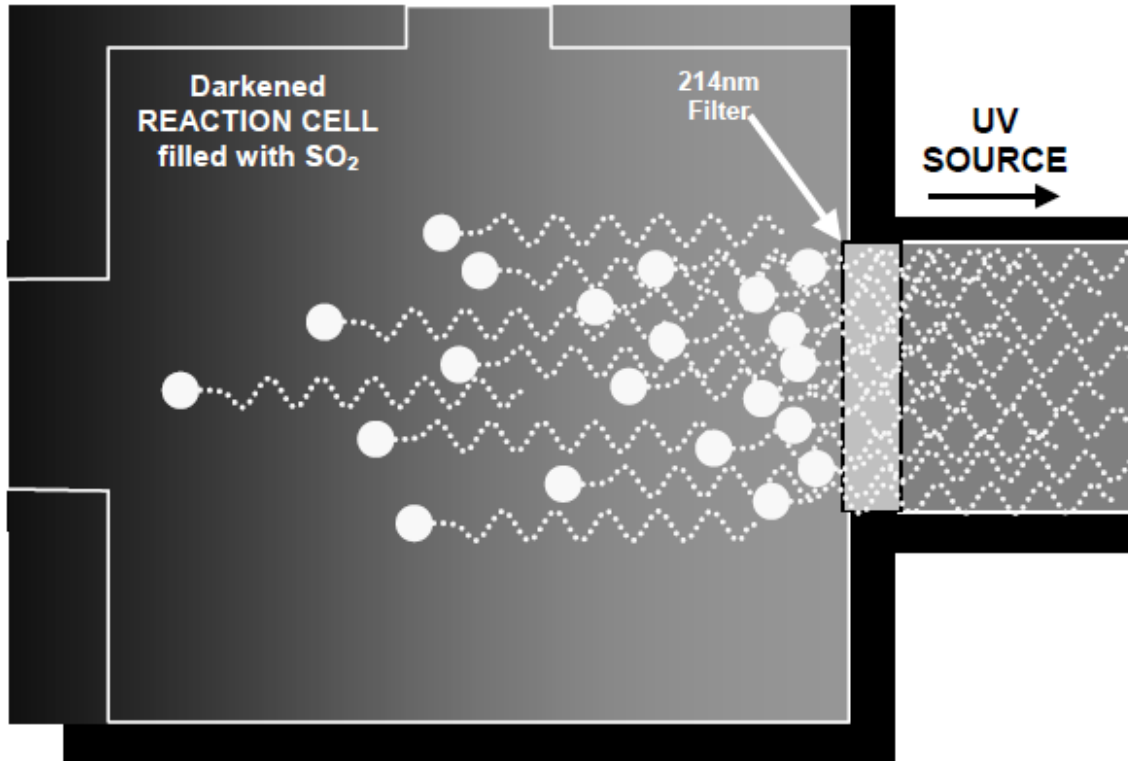
El principio físico en el que se basa el método de medición es la fluorescencia que se produce cuando el dióxido de azufre (SO₂) es excitado por luz ultravioleta con longitudes de onda en el intervalo de 190nm - 230nm. Esta reacción es un proceso de dos pasos. La primera etapa ocurre cuando las

moléculas de SO₂ son golpeadas por fotones del ultravioleta apropiado longitud de onda. En el caso del M100E, un filtro de paso de banda entre la fuente de la luz UV y el gas afectado limita la longitud de onda de la luz a aproximadamente 214 nm. Las moléculas de SO₂ absorben parte de la energía. La luz UV hace que uno de los electrones de cada una de las moléculas afectadas se mueva a un estado orbital de mayor energía (Teledyne Technologies Company, 2011).



La cantidad SO₂ convertida en SO₂^{*} excitado en la cámara de muestras depende de la intensidad media de la Luz UV (I_a) y no su intensidad máxima, porque la intensidad de la luz UV no es constante en todas las cámara de muestra (del equipo de medición). Algunos de los fotones son absorbidos por el SO₂ cuando la luz viaja, a través del gas de muestra.

Figura 4. Absorción de UV



Fuente: Manual Model 100E UV Fluorescence SO₂ Analyzer. Pág. 220.

La ecuación para definir la intensidad media de la luz UV (I_a) es:

$$I_a = I_0 [1 - e^{-ax(SO_2)}]$$

Donde:

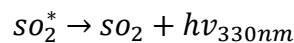
I_0 = Intensidad de la luz UV de excitación.

a = Coeficiente de absorción del SO₂ (es una constante).

SO₂ = Concentración de SO₂ en la cámara de muestras.

x = La distancia entre la fuente UV y la molécula (s) de SO₂ afectada (longitud de la trayectoria).

La segunda etapa de esta reacción se produce después que el SO₂ alcanza su estado excitado (SO₂*). Porque el sistema busca el estado de energía estable disponible más bajo, la molécula de SO₂* regresa rápidamente a su estado fundamental, mediante el desprendimiento del exceso de energía en forma de un fotón (hν). La longitud de onda de esta luz fluorescente también está. La banda ultravioleta a una longitud de onda más larga (menor energía) centrada en 330nm.



La cantidad de UV detectable desprendida por la desintegración del SO₂* está afectada a la velocidad a la que se produce esta reacción (k).

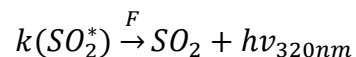
$$F = k(SO_2^*)$$

Donde:

F = la cantidad de luz fluorescente emitida.

K = La velocidad a la que el SO₂* se desintegra en SO₂.

SO₂* = Cantidad de SO₂ excitado en la cámara de muestras.



Finalmente, la función (k) es afectada por la temperatura del gas. Cuanto más caliente es el gas, más rápido las moléculas individuales decaen de nuevo en su estado fundamental y más fotones de luz UV se liberan por unidad de tiempo.

En resumen, dado que la tasa de absorción de SO₂ (a) es constante, la cantidad de fluorescencia (F) es el resultado de:

La cantidad de SO_2^* que salió creada que es afectada por los factores variables de la ecuación anterior:

Concentración de SO_2 ; intensidad de luz UV (I_0); longitud de la trayectoria de la luz UV (x) y; la cantidad de luz fluorescente creada que es afectada por los factores variables de (Ecuación): la cantidad de SO_2 presente y la tasa de decaimiento (k) que cambia con base a la temperatura del gas.

Cuando se conoce la intensidad de la luz (I_0); la longitud de la trayectoria de la luz excitada es corta (x); La temperatura del gas es conocidos y compensados para que la velocidad de decaimiento de SO_2^* sea constante (k). y; no hay condiciones de interferencia presentes (como gases interferentes o luz dispersa); la cantidad de luz fluorescente emitida (F) está directamente relacionada con la concentración de SO_2 en la cámara de muestras. (Teledyne Technologies Company, 2011)

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

La compilación de la información, se realizó por medio de una de base de datos desarrollado por la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Esta recopilación fue acompañada por el jefe del laboratorio de monitoreo del aire y del asesor de esta investigación.

Los resultados se dividieron en seis categorías generales: partículas micrométricas de 10, partículas micrométricas de 2.5, dióxidos de nitrógeno, dióxidos de azufre, índice de calidad del aire y simulación de la calidad del aire.

Esto permitió elaborar y establecer una la línea de base científica, con lo anterior se definieron prioridades para determinar los puntos críticos que sean negativos al ambiente, en el año 2017, según la escala de medición de la Organización Mundial de la Salud.

Inicialmente los eventos se categorizaron en función del impacto, mediante los rangos de concentración del ICA de la OMS.

Buena, la calidad del aire es considerada satisfactoria.

Moderada, la calidad del aire es aceptable; sin embargo, algunos contaminantes pueden generar un efecto moderado en la salud de un pequeño número de personas usualmente sensibles a la contaminación del aire.

Naranja, miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos sobre la salud. El público general no es usualmente afectado.

Rojo, cualquier persona comienza a experimentar efectos sobre la salud. Miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos más serios sobre la salud.

Púrpura, alerta de salud, cualquier persona puede experimentar efectos serios sobre la salud.

Granate, advertencia de condición de emergencia, la salud de la población entera está en riesgo de ser afectada.

El período analizado de los datos, se realizó desde el mes de enero 2012 al mes de diciembre de 2017, de esta forma se estableció la línea de base científica y la calidad del aire para la ciudad de Guatemala, asimismo se indicó el grupo de personas afectadas o potencialmente vulnerable.

Por último, se estableció una simulación del comportamiento de la calidad del aire y de cada tipo de contaminante evaluado en esta investigación, para un año posterior a la toma de datos (2018), indicando la calidad del aire proyectada.

3. RESULTADOS

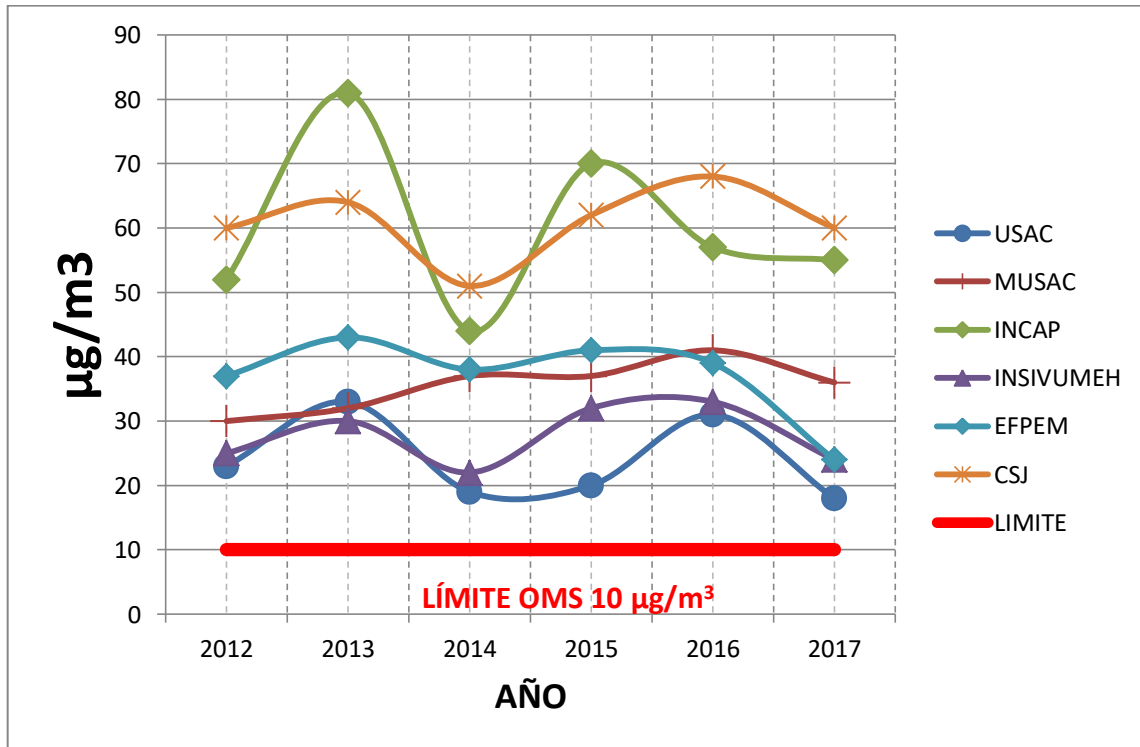
Se realizó el análisis estadístico para los parámetros de medición de la calidad del aire ambiente, se describirá uno por uno a detalle a continuación.

3.1. Partículas menores a 2.5 micrómetros

Son partículas finas de menos de 2,5 μm de diámetro y son de especial interés, ya que suponen mayor peligro a la salud puesto que al inhalar se adhieren a los pulmones, se considera que son causantes de cáncer pulmonar.

Estas partículas se generan en la quema de combustibles fósiles como diésel y gasolina, a nivel artesanal al quemar leña para cocinar, también se producen a partir de la condensación de los gases de combustión de los vehículos de combustión interna.

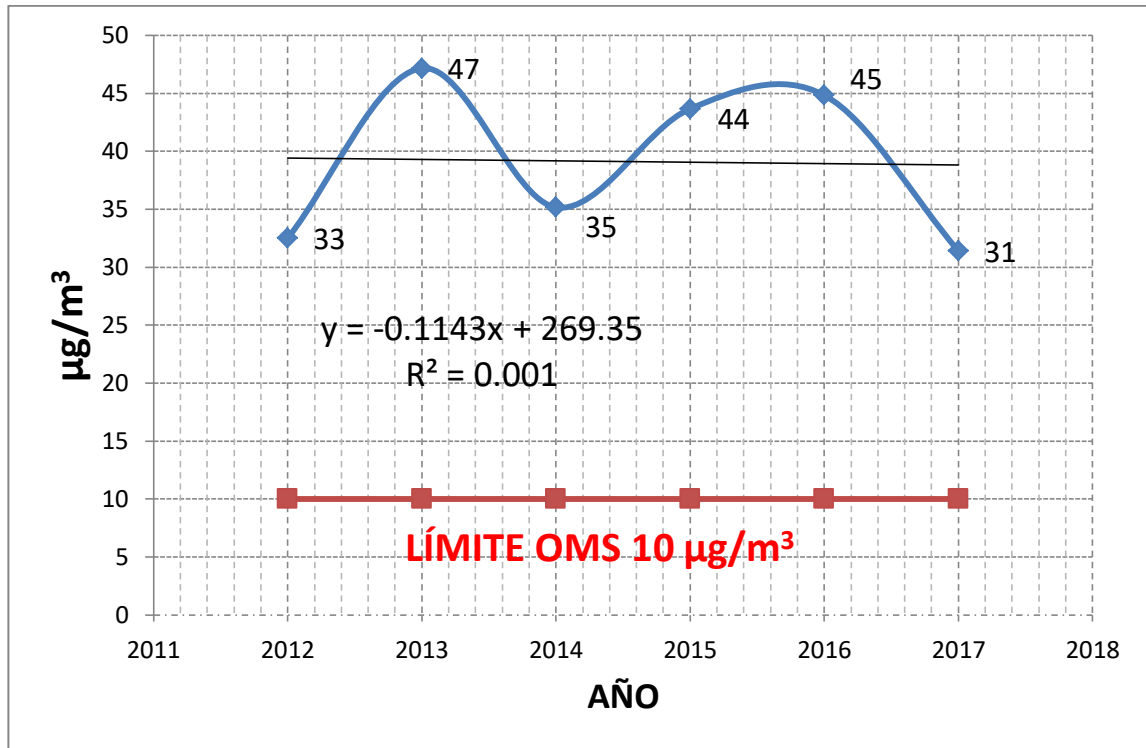
Figura 5. **Partículas totales en suspensión 2.5 micras**



Fuente: elaboración propia.

Al realizar el estudio, se determinó que en todas las mediciones se sobrepasa los valores guía estipulados por la OMS, que desde el año 2005 recomienda un valor de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para mediciones de 24 horas y un valor de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio anual.

Figura 6. Promedio de partículas en suspensión 2.5 micras del 2012 al 2017



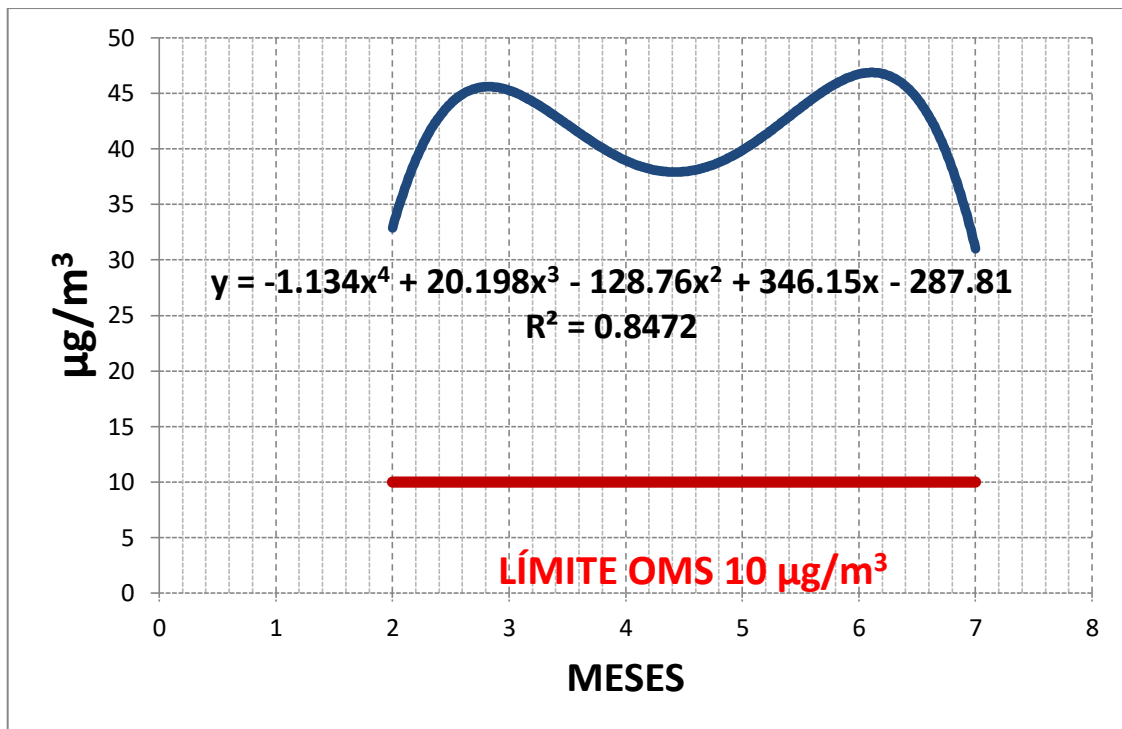
Fuente: elaboración propia.

Para obtener el valor promedio se tomaron los datos de las 6 estaciones ubicadas en diferentes puntos de la ciudad de Guatemala. Al realizar la figura 6 del promedio anual de partículas en suspensión, se observa que en los años del 2012 al 2017 se ha excedido en el límite máximo anual fijado por la Organización Mundial de la Salud de 10 microgramos por metro cúbico. Siendo el año 2013 con mayor cantidad de partículas suspendidas con 47 microgramos por metro cúbico.

3.1.1. Proyección de partículas suspendidas 2.5 micrómetros

Se utilizó el método estadístico de mínimos cuadrados para proyectar un escenario posterior al año 2017. El resultado fue el siguiente, para el año 2018 se espera tener un valor promedio anual de 38 microgramos por metro cúbico. Dicho resultado supera el límite establecido por la OMS, esto es derivado a que la totalidad de los valores se encuentran sobre el límite permisible.

Figura 7. **Proyección partículas en suspensión 2.5 micras para el año 2018**



Fuente: elaboración propia.

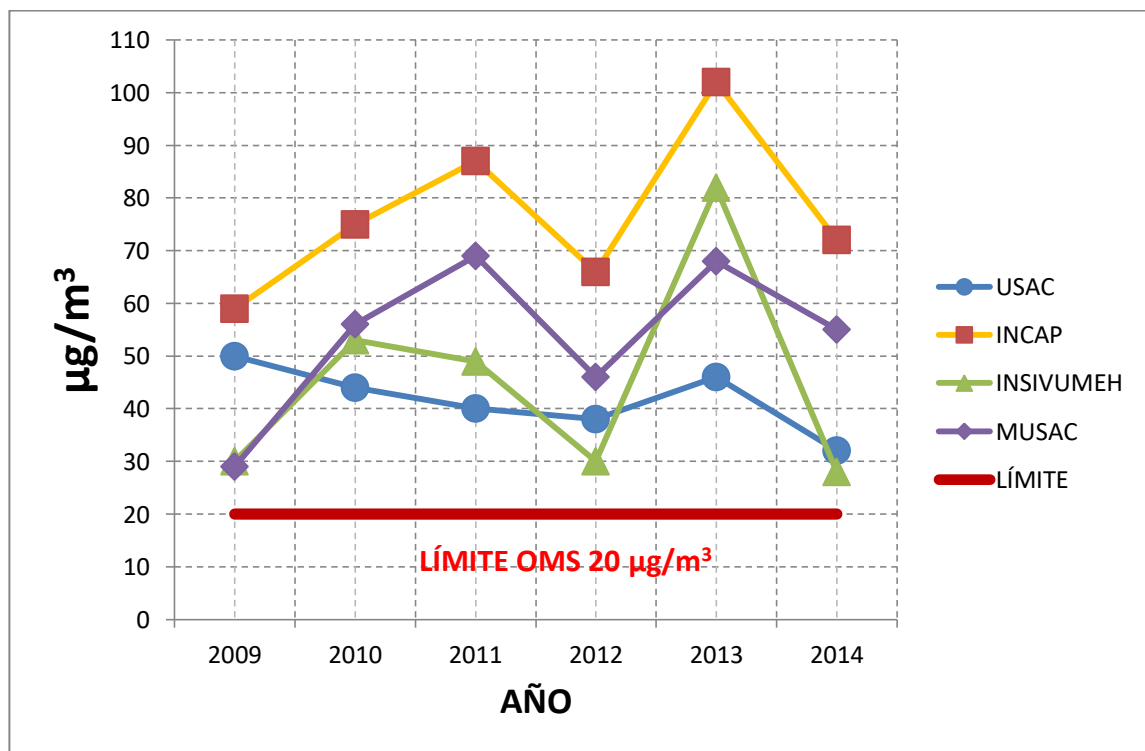
En la proyección de la simulación Montecarlo para el año 2018, se observa que los datos serán muy superiores al límite establecido de la

Organización Mundial de la Salud, con un coeficiente de determinación del 85 % se predice mucha interrelación en las variables por ende buena proyección.

3.2. Partículas menores a 10 micras

Comúnmente se les denominan como partículas gruesas y tienen un miden entre 2.5 y 10 micrómetros (aproximadamente es el ancho de 1 séptimo de un cabello). Las PM_{10} , ingresan al sistema respiratorio provocando serios daños a la salud.

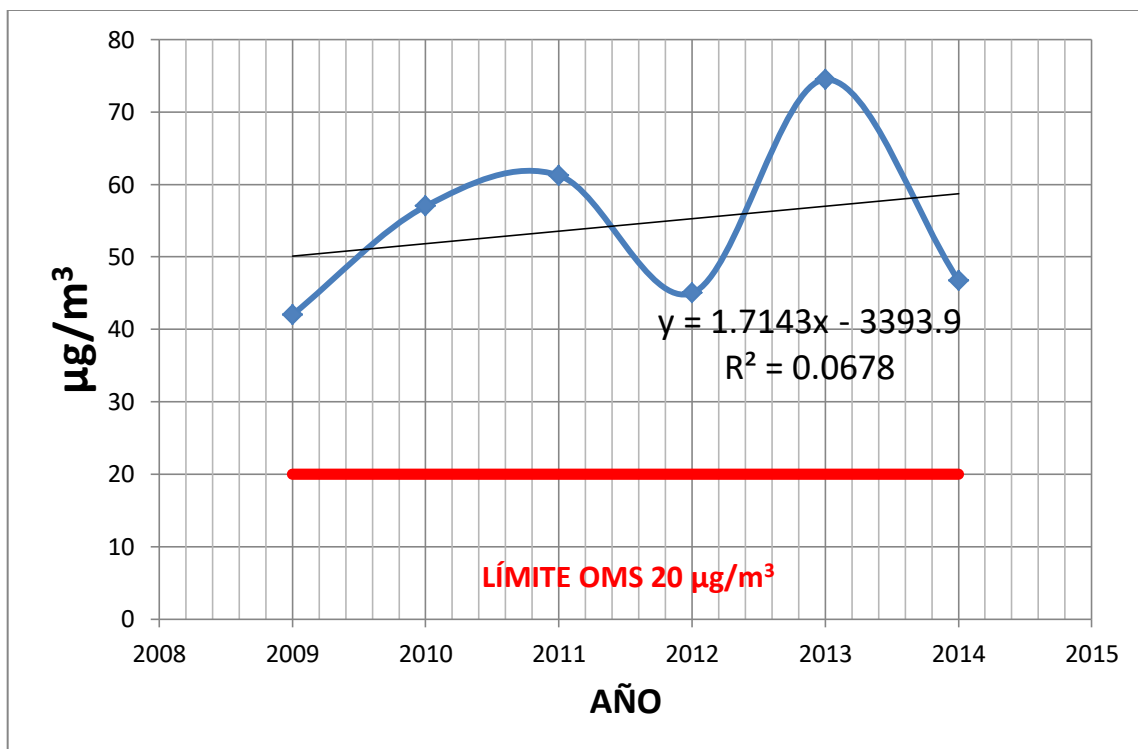
Figura 8. Partículas totales en suspensión 10 micras



Fuente: elaboración propia.

Al realizar el estudio se determinó que en todas las mediciones se sobrepasa los valores guía estipulados por la OMS ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), voy a enfatizar que del año 2015 a la fecha no se está realizando medición de dicho parámetro, únicamente de $\text{PM}_{2.5}$, es por ello que se decidió tomar desde el año 2009 al 2014 para que el modelo estadístico se llevara a cabo correctamente.

Figura 9. **Promedio de partículas en suspensión 10 micras del 2009 al 2014**



Fuente: elaboración propia, 2019.

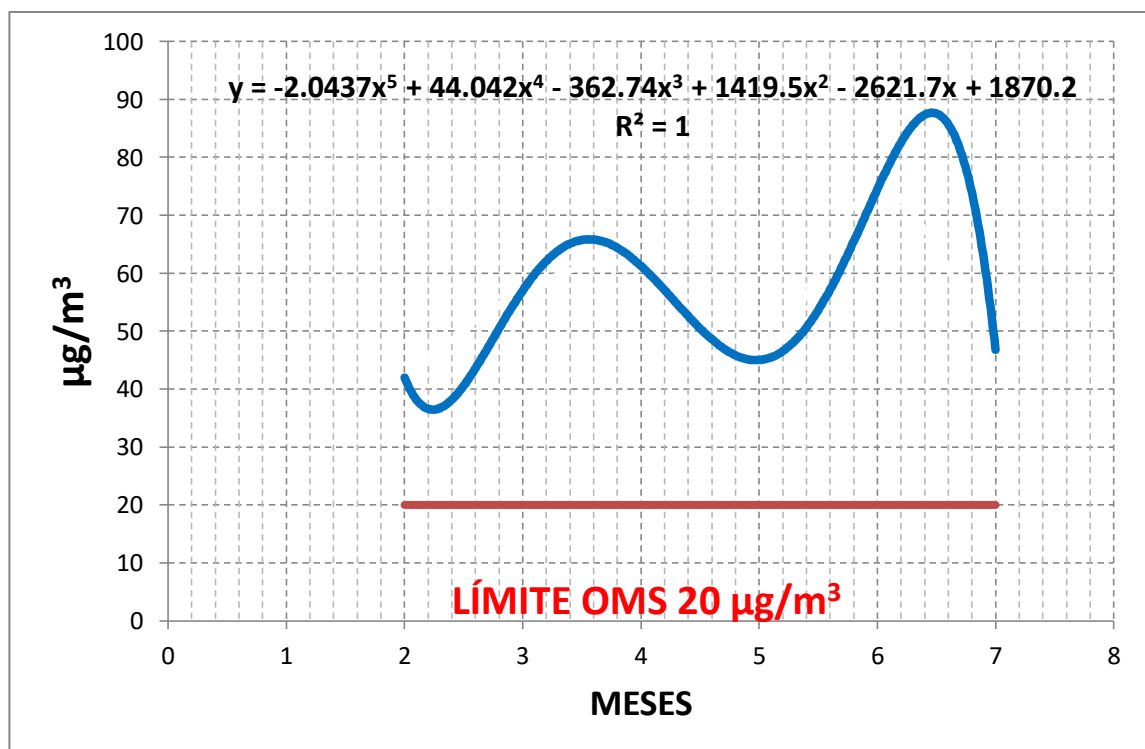
Para obtener el valor promedio se tomaron los datos de las 4 estaciones ubicadas en diferentes puntos de la ciudad de Guatemala. Al realizar la figura 9 del promedio anual de PM_{10} , se observa que en los años del 2009 al 2014 se excedió el límite máximo anual fijado por la Organización Mundial de la Salud

(20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Siendo el año 2013 con mayor cantidad de partículas suspendidas con 75 microgramos por metro cúbico.

3.2.1 Proyección de partículas suspendidas 10 micrómetros

Se utilizó el método estadístico de mínimos cuadrados para proyectar un escenario futurista. El resultado fue el siguiente, para el año 2018 se espera tener un valor promedio anual de 66 microgramos por metro cúbico. Dicho resultado supera el límite establecido por la OMS, esto es derivado a que la totalidad de los valores se encuentran sobre el límite permisible.

Figura 10. **Proyección de partículas en suspensión 10 micras al año 2018**



Fuente: elaboración propia.

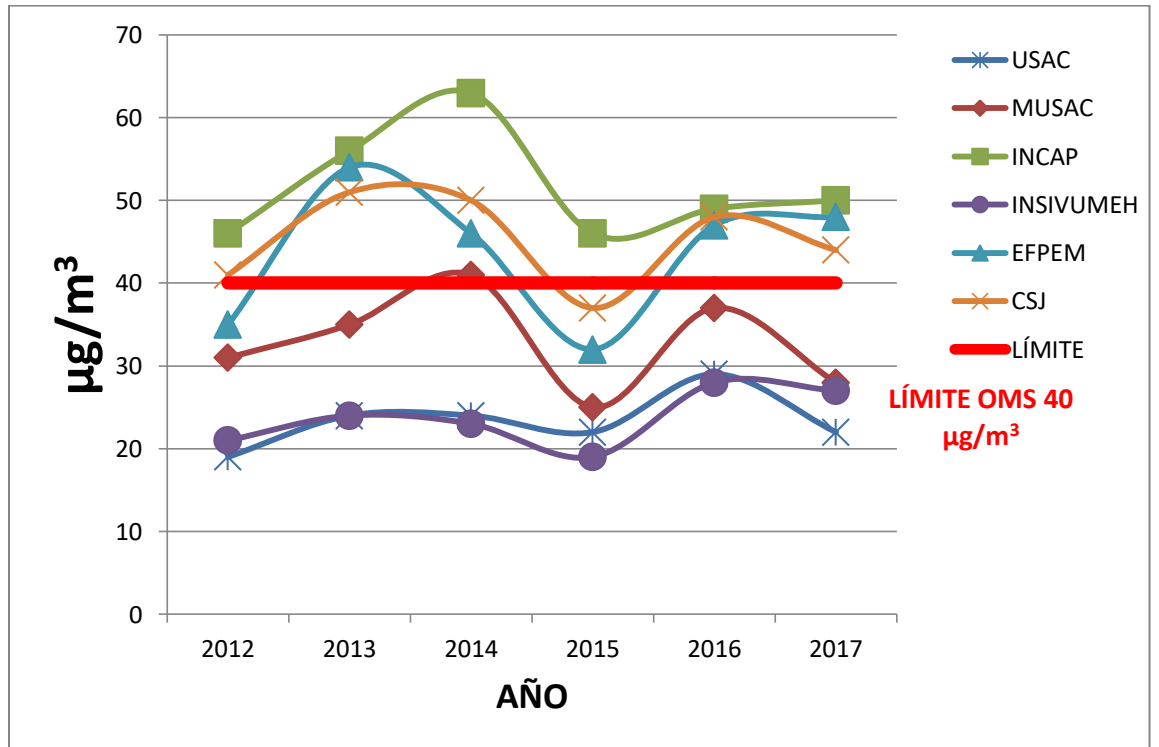
En la proyección de la simulación Montecarlo para el año 2018, se observa que los datos serán muy superiores al límite establecido de la Organización Mundial de la Salud, el más crítico será noviembre presentando casi $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lo cual es alarmante puesto que este es el parámetro más crítico para la salud de los humanos.

3.3. Dióxido de nitrógeno NO_2

El óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) son los únicos óxidos de nitrógeno presentes naturalmente en la atmósfera e introducidos por el hombre. La presencia del óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno en el aire se producen a través de dos procesos consecutivos, el primero es debido a las altas temperaturas alcanzadas en los rayos del sol, esto provoca la combinación directa del oxígeno y el nitrógeno del aire para formar óxido nítrico (NO), y éste se oxida rápidamente a dióxido de nitrógeno (NO_2) por acción del ozono.

Este elemento se encuentra en forma de gas en el aire ambiente, en altas concentraciones es un gas tóxico, irritante y precursor de la formación de partículas de nitrato. Estas llevan a la producción de ácido y elevados niveles de $\text{PM}_{2.5}$ en el ambiente. Afecta principalmente al sistema respiratorio.

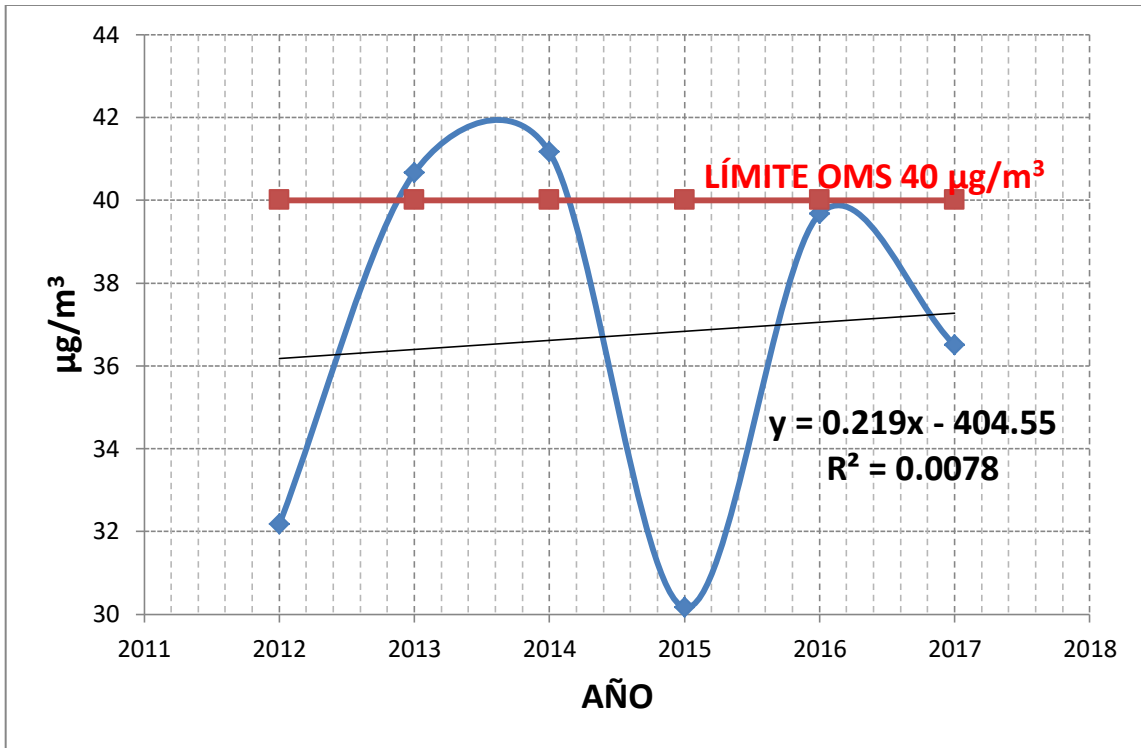
Figura 11. Dióxido de nitrógeno NO₂



Fuente: elaboración propia.

Al realizar el estudio se determina que el 40 % de las mediciones sobrepasa el límite establecido como máximo para la Organización Mundial de la Salud ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), los lugares en donde se encuentra un mayor riesgo de inhalación es en la estación del INCAP, ubicada en la zona 11, a inmediaciones del Calzada Roosevelt. También se establece que en la estación del EFPEM ubicada en el campus central de la USAC, presenta alta concentración dicho gas, lo que se traduce en que hay un riesgo potencial en los estudiantes de la USAC de sufrir una consecuencia derivado de la alta carga excesiva de dicho gas en el aire ambiente.

Figura 12. Dióxido de nitrógeno NO₂ anual



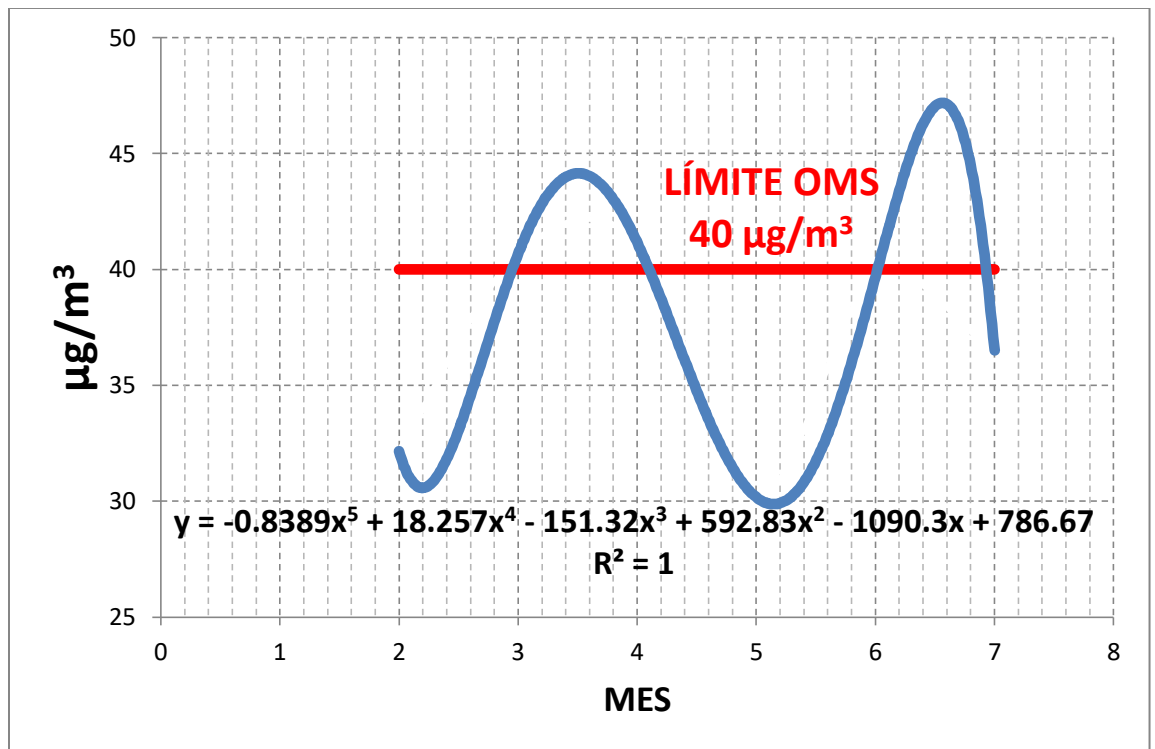
Fuente: elaboración propia.

Para obtener el valor promedio se tomaron los datos de las 6 estaciones ubicadas en diferentes puntos de la ciudad de Guatemala. Al realizar la figura 12 del promedio anual de dióxido de nitrógeno, se observa que en los años 2013 y 2014 se ha excedido en el límite máximo anual fijado por la Organización Mundial de la Salud de 40 microgramos por metro cúbico. Sin embargo, se observa que los valores se encuentran muy cerca del límite establecido por la OMS.

3.3.1 Proyección de dióxido de nitrógeno

Se utilizó el método estadístico de mínimos cuadrados para proyectar un escenario. El resultado fue el siguiente, para el año 2018 se espera tener un valor promedio anual de 38 microgramos por metro cúbico. Dicho resultado se encuentra casi en el límite establecido por la OMS.

Figura 13. **Proyección del dióxido de nitrógeno, para el año 2018**



Fuente: elaboración propia.

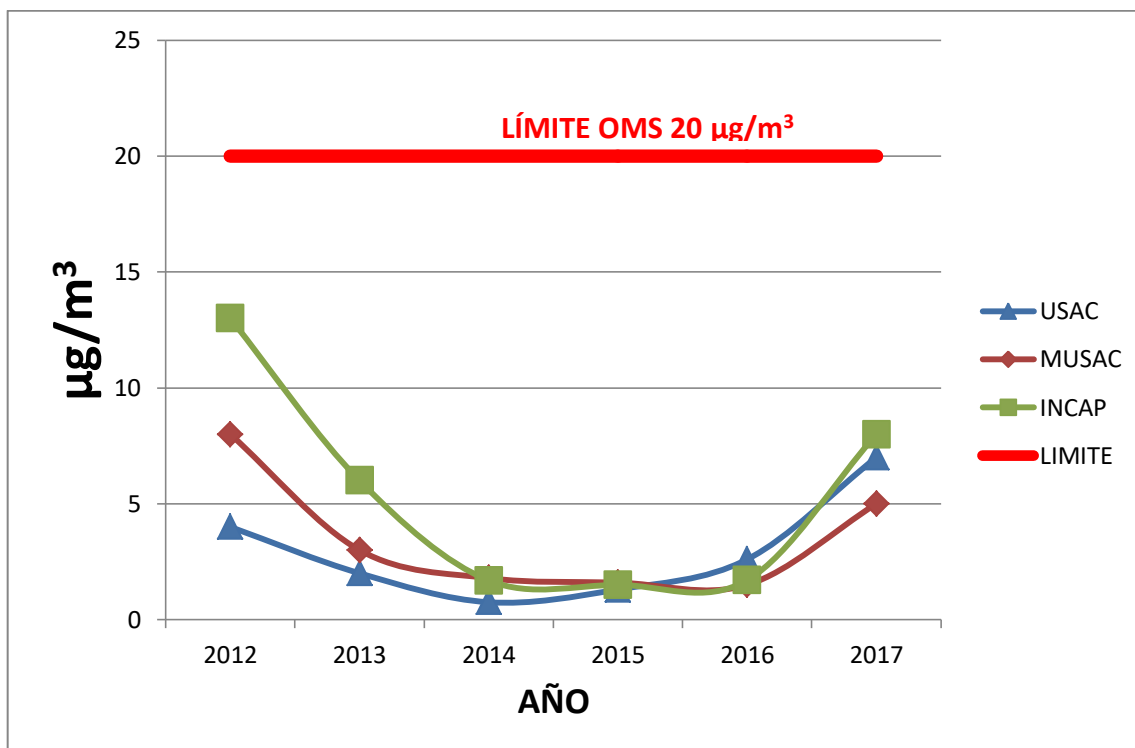
En la figura 13, se logró observar que durante los meses de marzo-abril y noviembre-diciembre, la concentración del contaminante dióxido de nitrógeno será superior al límite establecido por la OMS, lo que conlleva un riesgo de salud alto para los habitantes de la ciudad de Guatemala.

3.4. Dióxido de azufre SO₂

Es un gas incoloro que se genera de la combustión de combustibles fósiles con altos niveles de azufre. La combinación de este compuesto en el ambiente genera lluvia ácida puesto que en la atmósfera reacciona para formar ácido sulfúrico.

Durante la combustión, se generan compuestos azufrados. En procesos naturales emana de los volcanes y en las erupciones pueden liberar grandes cantidades del compuesto.

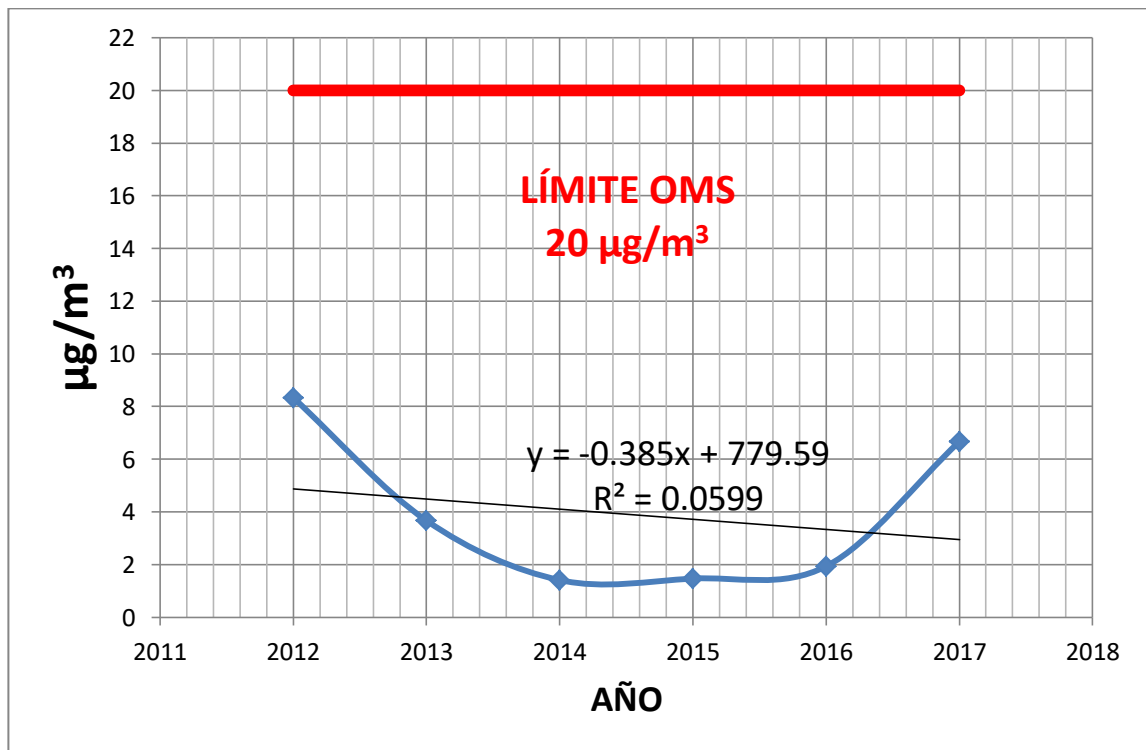
Figura 14. Dióxido de azufre



Fuente: elaboración propia.

Al realizar el estudio se determina que para el dióxido de azufre, no presenta un riesgo, puesto que los valores obtenidos están por debajo del límite de la OMS.

Figura 15. Dióxido de azufre anual



Fuente: elaboración propia.

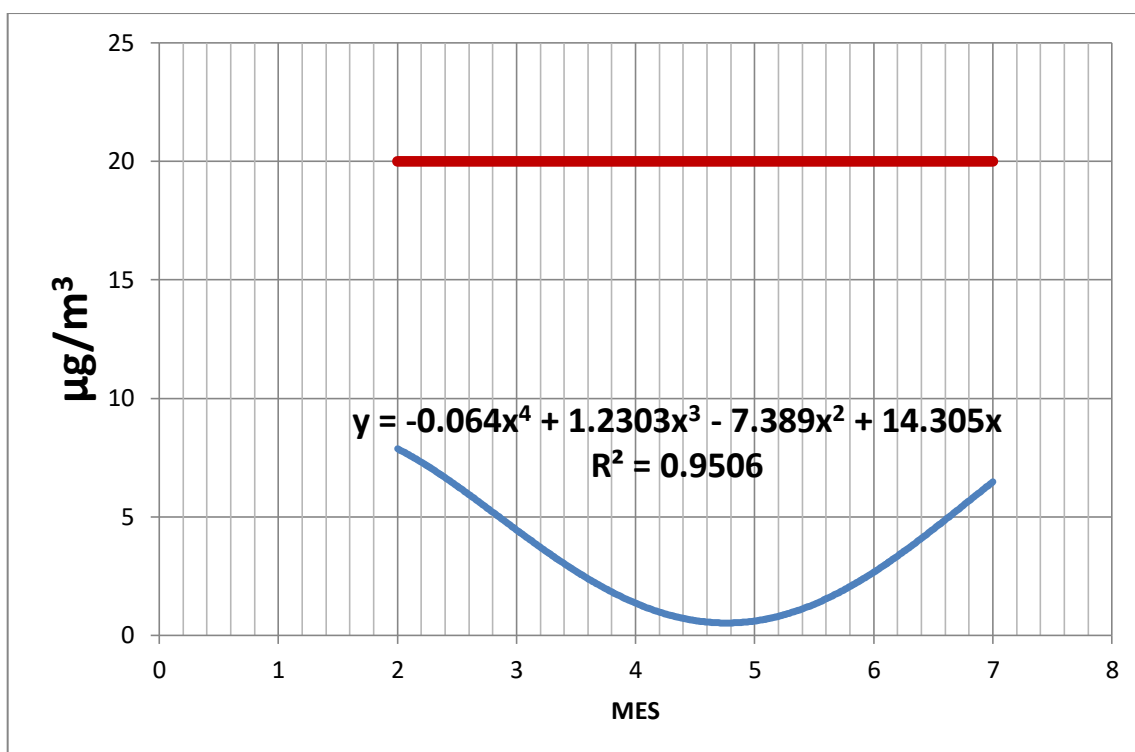
Para obtener el valor promedio se tomaron los datos de las 3 estaciones ubicadas en diferentes puntos de la ciudad de Guatemala. Al analizar la figura 15 del promedio anual de dióxido de azufre, no presenta riesgo al estar muy por debajo del límite establecido por la OMS.

3.4.1 Proyección de dióxido de azufre

Se utilizó el método estadístico de mínimos cuadrados para proyectar un escenario. El resultado fue el siguiente: para el año 2018, se espera tener un valor promedio anual de 2,66 microgramos por metro cúbico. Dicho resultado se encuentra estable y sin riesgo para la población.

A continuación se mostrará el resultado de la simulación Montecarlo.

Figura 16. Proyección de dióxido de azufre



Fuente: elaboración propia.

En la figura 22, (los meses están en pares) se observa el comportamiento del contaminante dióxido de azufre, se logra determinar que de los meses de mayo a octubre el contaminante tiende a disminuir la concentración, debido al

período de invierno que vive la ciudad de Guatemala, al tener lluvia el contaminante disminuye, luego en octubre el valor tiende a elevarse nuevamente, el coeficiente de determinación es de 95 %, el modelo se acopla a la predicción para el año 2018, que se pretendió.

Tabla V. **Resumen de modelos obtenidos por contaminante**

Contaminante	Ecuación obtenida	Coeficiente de determinación
PM ₁₀	$y = -2.0437x^5 + 44.042 x^4 - 362.74 x^3 + 1419.5x^2 - 2621.7x + 1870.20$	1.00
PM _{2.5}	$y = -1.134 x^4 + 20.198 x^3 - 128.76 x^2 + 346.15x - 287.81$	0.85
Dióxido de nitrógeno	$y = -0.8389x^5 + 18.257 x^4 - 151.32 x^3 + 592.83x^2 - 1090.3x + 786.67$	1.00
Dióxido de azufre	$y = -0.064 x^4 + 1.2303 x^3 - 7.389 x^2 + 14.305x$	0.96

Fuente: elaboración propia.

3.5. Calidad del aire

Se calculó el índice de la calidad de aire para cada compuesto contaminante, los resultados se muestran a continuación:

Tabla VI. Índice de calidad del aire

Contaminante/año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Valor ICA	ICA
PM _{2.5}	60	147	55	141	140	61	101	No saludable para los grupos sensibles
PM ₁₀	53	61	67	56	74	59	62	Moderada
Dióxido de azufre	1	1	1	1	1	1	1	Buena
Dióxido de nitrógeno	43	52	58	43	45	46	48	Buena

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la calidad de aire, en base a los datos obtenidos en las estaciones de muestreo, se determina que el contaminante más crítico es el de partículas de 2,5 micrómetros, puesto que se encuentra en el valor anaranjado (ver tabla III), el significado de dicho color es: los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos sobre su salud. El público general no es usualmente afectado. El contaminante material particulado de 10 micrómetros se encuentra en color amarillo calidad del aire moderada en el cual no se encuentran saludables para los grupos sensibles (niños y adultos mayores).

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentarán los análisis para cada tipo de contaminante estudiado en esta investigación.

Las partículas de 2.5 micrómetros son partículas finas que emanan naturalmente de erupciones de volcanes o incendios forestales, a nivel industrial proviene de la quema de hidrocarburos (gasolina, diésel, búnker, etc), carbón y biomasa; también se generan en la condensación de los gases de combustión de los automotores, su tamaño hace que no sean percibidas a simple vista, por lo que es un riesgo a la calidad del aire.

Las $PM_{2.5}$ es el contaminante atmosférico que tiene el mayor impacto negativo en la salud humana, por sus efectos adversos sobre la salud y porque se producen a niveles altos derivado de la actividad humana diaria. La exposición prolongada al material particulado aumenta de manera significativa el riesgo de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así también como padecer cáncer de pulmón a mediano plazo.

Las estaciones que obtuvieron mayor concentración de dicho contaminante fueron las localizadas en INCAP (zona 11,), MUSAC (zona 1) y Calzada San Juan (zona 7). Estos valores de contaminante excesivo fue derivado a la alta carga vehicular de los sectores que originan las partículas de 2.5 micrómetros.

Este resultado demuestra datos críticos en cuanto a este contaminante ($PM_{2.5}$), ya que constituye el mayor impacto negativo en la salud, debido a que

las partículas ingresan a los alvéolos pulmonares adheridos a otros tipos de contaminantes (por la mala calidad del aire) que constituyen un riesgo mayor para la salud, lo que deriva en daños respiratorios e inclusive cerebrales.

La calidad de aire para las partículas de 2.5 micrómetros fue: no saludable para los grupos sensibles. Dicho resultado hace referencia que los adultos mayores y los niños, son vulnerables al inhalar dicho compuesto, porque desarrollan enfermedades derivado de éstos.

Las partículas de 10 micrómetros (PM_{10}), se forman en actividades cotidianas como: construcciones, la re suspensión del polvo de suelo, y el tráfico, dicho contaminante perjudica el sistema respiratorio, dañan los pulmones, son potenciales causantes de cáncer.

En los resultados obtenidos, se determina que en cuanto a PM_{10} , la calidad del aire se encuentra en un estado moderado, en algunos momentos de la medición de los valores están por encima del límite establecido, y la tendencia es ascendente, dado a que no se toman medidas para mitigar dicho problema. Los problemas en la salud para los humanos y animales, van a derivar en múltiples enfermedades para los ciudadanos guatemaltecos, residentes en los alrededores de: INCAP (zona 11), MUSAC (zona 1), INSIVUMEH (zona 13), USAC (zona 12).

El dióxido de nitrógeno se encuentra en el aire, de dos formas: el primero es de manera natural, debido a las altas temperaturas (derivado del cambio climático), en los rayos del sol, lo que provoca una reacción directa entre oxígeno y el nitrógeno del aire para dar óxido nítrico (NO), y éste se oxida rápidamente a dióxido de nitrógeno (NO_2) por acción del ozono (O_3). Al analizar los datos del dióxido de nitrógeno se observa que los valores se encuentran en

un 60 %, dentro de los límites establecidos de la Organización Mundial de la Salud; sin embargo, en los años 2016 y 2017, el valor se encuentra cerca del límite establecido, lo cual es un problema, porque incide directamente en la calidad del aire de la ciudad de Guatemala.

Una exposición mínima de tiempo al dióxido de nitrógeno (NO_2) provoca irritación del sistema respiratorio y ocular. A largo plazo, los principales efectos pueden ser, un desarrollo pulmonar más lento en los niños y la aparición de enfermedades respiratorias crónicas y cerebrovasculares. En la investigación, los lugares que en el último año presentaron alta concentración de dicho compuesto químico fueron la estación INCAP (zona 11) con $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$; seguido de la Escuela de Formación de Profesores de Enseñanza Media EFPEM (zona 12) con $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y la calzada San Juan con $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, las tres ubicaciones están por encima del límite establecido ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en las otras tres estaciones los valores disminuyen en la mitad, lo que presenta un riesgo para todas las personas que se encuentran en los alrededores de las estaciones ya mencionadas.

En cuanto al compuesto de dióxido de azufre (SO_2), todos los valores para los años de estudio están por debajo del límite máximo, dicho contaminante de momento no presenta un riesgo para los habitantes de la ciudad de Guatemala.

La simulación de datos, mediante la prueba estadística Montecarlo demuestra que la tendencia de los compuestos contaminantes analizados es ascendente en todos los estudiados, esto es alarmante puesto que de los cuatros compuestos las $\text{PM}_{2.5}$ son las únicas que superan el parámetro establecido por la Organización Mundial de la Salud. Esto es un reflejo de la no legislación ambiental del país, en cuanto a leyes que establezcan condiciones mínimas para el control, monitoreo y mitigación del aire ambiente, siendo lo

mayores perjudicados los niños, adultos mayores, flora y fauna de la ciudad de Guatemala.

En la calidad del aire en la ciudad de Guatemala, los resultados demuestran que hay que poner mucha atención y cuidado en las partículas de 2.5 micrómetros, al encontrarse en peligro para los grupos sensibles; los demás contaminantes estudiados en esta investigación están entre el rango de bueno y moderado, también es importante hacer planes de mitigación en aire ambiente y adoptar medidas que ayuden a controlar dichos compuestos.

Es importante también definir que en la estación de invierno en la ciudad de Guatemala (mayo a octubre), la mayoría de contaminantes disminuye por diluirse con el agua; sin embargo, afecta en un fenómeno que se llama lluvia ácida, la cual es también perjudicial para los humanos y seres vivos, tiene consecuencias en la vegetación, es causante de enfermedades respiratorias en humanos, corroe vehículos, deteriora viviendas y sobre todo realiza una contaminación química a ríos y mares, que derivan en la biótica marítima; para posteriormente ingerirse como alimentos y termina por afectar sobre todo la vida de los seres humanos.

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones de esta investigación:

1. Se evaluó la calidad de aire de la ciudad de Guatemala, utilizando las normas internacionales de la Organización Mundial de la Salud, siendo el contaminante partículas de 2.5 micrómetros, el cual presenta una calidad del aire no saludable para los grupos sensibles, y las partículas de 10 micrómetros una calidad del aire moderada, para dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno están en una calidad del aire buena, asimismo se estableció el comportamiento de cada contaminante estudiado mediante un modelo estadístico inferencial.
2. Se estableció una línea de base científica basado en los datos recopilados de PM_{10} , $PM_{2.5}$, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre; también se incluyó la calidad del aire en la ciudad de Guatemala, a partir de los años 2012 al 2017.
3. De los contaminantes estudiados, se determinó que la calidad del aire para la ciudad de Guatemala se encuentra en un 75 % en buen estado, dado que únicamente un contaminante presenta diferencia significativa.
4. Se realizó una proyección mediante la simulación Montecarlo para determinar el comportamiento de los contaminantes en el año 2018, en el

cual se visualizó que las $PM_{2.5}$ tendrán un aumento y presentará una calidad del aire no saludable para los grupos sensibles, todos los demás contaminantes están en calidad de aire buena.

RECOMENDACIONES

1. Aumentar las mediciones de contaminantes, a través de estudios utilizando datos de instituciones gubernamentales y privadas, para la conformación de una línea de base científica más ampliada que la que deja esta investigación; así tener un resultado con menos variabilidad al aumentar la población de datos.
2. Instar a la Universidad de San Carlos de Guatemala, para impulsar una ley de aire ambiente, regulaciones y planes de mitigación integrales que incluyan la utilización de energías renovables, para la disminución de los contaminantes del aire ambiente en la ciudad de Guatemala.
3. Desarrollar estudios de emisiones de contaminantes de aire ambiente y sus fuentes en los departamentos de la república de Guatemala, así como la aplicación de la teledetección para la calidad del aire.
4. Informar y comunicar los resultados de la presente investigación a los diversos actores y sectores de la ciudad de Guatemala, para tomar las medidas sobre los contaminantes críticos en el aire ambiente.

5. Realizar una investigación a nivel doctoral, sobre la incidencia del cambio climático de los contaminantes del aire ambiente y sus consecuencias para los seres humanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. (20 de 09 de 2017). Obtenido de Agencia Europea de Químico:
<https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.030.234>
2. (10 de 09 de 2017). Obtenido de Sistema de monitoreo atmsférico Ciudad de México:
<http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=%27>
3. (01 de 09 de 2017). Obtenido de Red automática de monitoreo atmosférico de la ZMVT:
<http://rama.edomex.gob.mx/contaminacion-atmosferica/tecnicas-medicion>
4. (20 de 06 de 2017). Obtenido de Espectofotometría:
https://www.espectrometria.com/espectrometra_infrarroja
5. Brimblecombe, P. (1996). *Air Composition and Chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press.
6. CIEMAT. (2002). *Química analítica de los contaminantes mediambientales*. Madrid, España: Ciemat.

7. Colop Méndez, S. O. (2014). *Determinación y modelamiento del índice de calidad del aire de las estaciones de monitoreo Guatemala, Escuintla, Quetzaltenango y Puerto Barrios*. Guatemala: USAC.
8. Department of Health and Human Services, P. H. (2009). *Agency for toxic substances and disease registry (ATSDR)*. Atlanta.
9. (2006). Determinacion of O3, CO and PM10 transport in the metropolitan area of São Paulo, Brazil through synoptic-scale analysis of back trajectories. En O. R. Sánchez-Ccoyllo, P. L. Silvadias, M. F. Andrade, & S. R. Freitas, *Meteorology and Atmospheric Physics* (pág. 13). São Paulo.
10. Fanlayson, B. J., & Pitts, J. n. (1986). *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*. New York: Wiley-Interscience Publication.
11. Gangolli. (1999). *The dictionary of substances and their effects*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
12. (Greenburg, M. B. Jacobs, B. M. Drolette, & M. M. Braverman. (1953). *Report of an air pollution incident in New York City* (págs. 7-16). New York.
13. Gobierno de España. (15 de 08 de 2017). *Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente*. Obtenido de Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes: <http://www.prtr-es.es/NOx-oxidos-de-nitrogeno,15595,11,2007.html>

14. Gobierno del Estado de México. (20 de 08 de 2017). *Red automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT*. Obtenido de Secretaría de Medio Ambiente: <http://rama.edomex.gob.mx/contaminacion-atmosferica/tecnicas-medicion>
15. Komarnisky, R. J. Christopherson, & T. K. Basu. (2003) *Sulfur: its clinical and toxicological aspect* (págs. 54-61). Nutrition, 19.
16. Lide, D. R. (2003). *Handbook of Chemistry*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
17. Ministry of Health, United Kingdom. (1954). Morbidity and mortality during the London fog of December 1952. . En *Report No. 95. London: Ministry of Health Reports on Public Health and Medical Subjects* (págs. 173, 306). London.
18. National Aeronautics and Space Administration. (2001). Ozono. *The Earth Sciencs Entreprise Series*, 1-4.
19. *Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS)* . (22 de 08 de 2017). Obtenido de Environmental Protection Agency EPA: <https://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.particle>
20. Oliva Soto, P. E. (2008). *Calidad del aire en Guatemala compilación de la información existente*. Guatemala: USAC.
21. Oppenheimer , C., Francis, P., Burton, M., Maciejewski, A. J., & Boardman, L. (1998). Remote measurement of volcanic gases by

- Fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Physics B*, 67, 505-515.
22. Organización Mundial de la Salud. (20 de 08 de 2017). Obtenido de World Health Organization : <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
 23. Organización Mundial de la Salud. (15 de 08 de 2017). Obtenido de World Health Organization: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/es/>
 24. Rapin, P. J., Jacquard, J., & Jacquard, P. (1997). *Instalaciones frigoríficas*. Barcelona: Marcombo.
 25. Seinfeld , J., & Pandis, S. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics - From Air Pollution to Climate Change*. New York: John Wiley & Sons.
 26. Teledyne Technologies Company. (2008). Model 300E Family Carbon Monoxide Analyzers. San Diego, California: Teledyne Advanced Pollution Instrumentation.
 27. Teledyne Technologies Company. (2010). Technical manual model 200E Nitrogen Oxide Analyzer. San Diego, California: Teledyne Advanced Pollution Instrumentation.
 28. Teledyne Technologies Company. (2011). En *Model 100E UV Fluorescence SO2 Analyzer* (págs. 219-255). San Diego, California: Teledyne Advanced Pollution Instrumentation.

29. Teledyne Technologies Compañy. (2011). Model 400E Photometric Ozone Analyzer. San Diego, California: Teledyne Advanced Pollution Instrumentation.
30. Uda, H., Akiba, S., & Shinkuro, R. (1999). Asthma-like disease in the children living in the neighbourhood of Mt. Sakarajima. *Journal of Epidemiology*, 27-31.
31. Ware, J. H., Ferris, B. J., & Dockery, D. W. (1986). Effects of ambient sulfur oxides and suspended particles on respiratory health of preadolescent children. *American Review of Respiratory Disease*.
32. Wellburn, A. (1994). Air Pollurion and Climate Change: the biological impac. En A. Wellburn, *Air Pollurion and Climate Change: the biological impac.* (pág. 268). Harlow: Addison Wesley Longman Limited.

ANEXOS

A continuación se dejan los datos de las estaciones de muestreo de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

Tabla VII. **Valores anuales de PM₁₀ de 1996 a 2014**

AÑO	ESTACIÓN T-10 USAC	ESTACIÓN INCAP	ESTACIÓN INSIVUMEH	ESTACIÓN MUSAC
1996	50	143	N.M.	57
1997	50	143	50	40
1998	52	N.M.	N.M.	68
1999	49	N.M.	N.M.	55
2000	33	7	39	47
2001	42	59	37	33
2002	34	67	35	30
2003	54	71	49	61
2004	38	82	31	54
2005	48	83	33	30
2006	62	90	45	55
2007	42	80	49	53
2008	19	77	32	38
2009	50	59	30	29
2010	44	75	53	56
2011	40	87	49	69
2012	38	66	30	46
2013	46	80	47	51
2014	32	72	28	55

Fuente: laboratorio de monitoreo del aire, 2017.

Tabla VIII. Valores de promedio anual de NO₂ de 1995 a 2017

AÑO	T-10 USAC μg/m ³	INCAP μg/m ³	INSIVUMEH μg/m ³	MUSAC μg/m ³	EFPEM μg/m ³	CALZADA SAN JUAN μg/m ³
1995	20	56	NM	46	55	52
1996	25	63	NM	54	60	52
1997	33	88	36	45	87	76
1998	23	48	26	42	49	43
1999	23	82	29	56	52	49
2000	16	60	19	38	39	35
2001	20	43	20	39	36	38
2002	21	38	17	25	38	39
2003	27	35	23	34	47	44
2004	22	41	23	30	45	40
2005	31	41	24	31	46	47
2006	17	41	21	28	45	43
2007	20	38	19	25	36	37
2008	19	38	21	37	32	41
2009	12	20	11	17	25	26
2010	13	27	16	21	26	34
2011	20	46	24	37	35	43
2012	19	46	21	31	35	41
2013	24	56	24	35	54	51
2014	24	63	26	41	46	50
2015	22	46	19	25	32	37
2016	29	49	28	37	47	48
2017	22	50	27	28	NM	44

Fuente: laboratorio de monitoreo del aire, 2017.

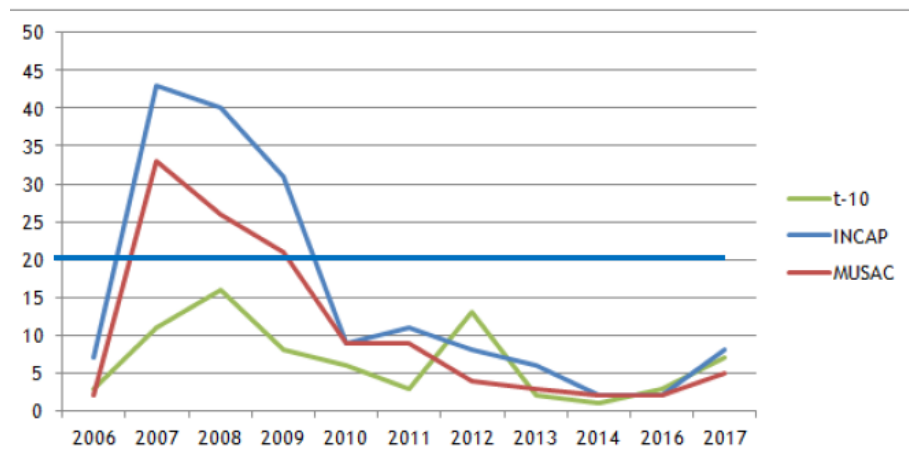
Tabla IX. **Valor de promedio anual de PM_{2.5} de 2013 a 2017**

Tabla No. 7 Valores de promedio anual de PM_{2.5} de 2013 a 2017

AÑO	T-10 USAC µg/m ³	INCAP µg/m ³	INSIVUMEH µg/m ³	MUSAC µg/m ³	EFPEM µg/m ³	C. SAN JUAN µg/m ³
2013	33	81	30	32	39	64
2014	19	44	22	37	38	51
2015	20	70	32	37	41	62
2016	31	57	33	41	39	68
2017	18	55	24	36	NM	65

Fuente: laboratorio de monitoreo del aire, 2017.

Figura 17. **Valores anuales de SO₂ de 2006 a 2017**



Fuente: laboratorio de monitoreo del aire, 2017.

Algoritmo de simulación Montecarlo

A continuación se describe el método de transformación de variables, utilizado como algoritmo en la presente investigación.

Dados r_1, r_2, \dots, r_n , distribuidos uniformemente en $[0,1]$ se trata de encontrar un conjunto x_1, x_2, \dots, x_m , distribuidos conforme a $f(x)$ mediante una transformación $x(r)$.

Siendo:

$g(r)dr$ la probabilidad de obtener un valor r en $[r, r+dr]$.

$f(x)dx$ la probabilidad de obtener un valor x en el intervalo correspondiente a $[r, r+dr]$, es decir $[x(r), x(r)+dx(r)]$.

$P(r \leq r') = P(x \leq x(r'))$ es decir:

$$\int_{-\infty}^{r'} g(r)dr = G(r') = r' = \int_{-\infty}^{x(r')} f(x')dx' = F(x(r'))$$