



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN Y MODELAMIENTO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL
AIRE DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE GUATEMALA,
ESCUINTLA, QUETZALTENANGO Y PUERTO BARRIOS**

Samuel Oswaldo Colop Méndez
Asesorado por el Ing. Zenón Much Santos

Guatemala, noviembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN Y MODELAMIENTO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL
AIRE DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE GUATEMALA,
ESCUINTLA, QUETZALTENANGO Y PUERTO BARRIOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

SAMUEL OSWALDO COLOP MÉNDEZ
ASESORADO POR EL ING. ZENÓN MUCH SANTOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayora
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

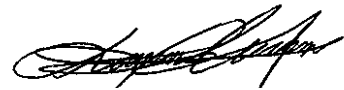
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxóm
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Astúrias
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DETERMINACIÓN Y MODELAMIENTO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE GUATEMALA, ESCUINTLA, QUETZALTENANGO Y PUERTO BARRIOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha septiembre de 2014.



Samuel Oswaldo Colop Méndez



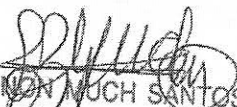
Guatemala, 14 de julio de 2014

FACULTAD DE INGENIERIA

Ingeniero
Víctor Monzón
Director Escuela de Ingeniería Química
Su Despacho

Por medio de la presente le informo que he revisado y aprobado el trabajo de tesis "**Determinación y Modelamiento del Índice de Calidad del Aire de las Estaciones de Monitoreo de Guatemala, Escuintla, Quetzaltenango y Puerto Barrios**", realizado por el estudiante **Samuel Oswaldo Colop Méndez** con carné 2007-14999 el cual llena los requisitos exigidos de investigación tanto por la Facultad de Ingeniería como por la Universidad de San Carlos, por lo que lo someto a su consideración para que continúe con los tramites requeridos por la Escuela de Ingeniería Química.

Agradeciendo la atención a la presente, le saluda respetuosamente,


ZENON MUCH SANTOS
Ing. Químico Col. No. 420
M. Sc. en Ingeniería Sanitaria



Guatemala, 02 de septiembre de 2014
Ref. EIQ.TG-IF.031.2014

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo 121-2013 le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Samuel Oswaldo Colop Méndez**.
Identificado con número de carné: **2007-14999**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

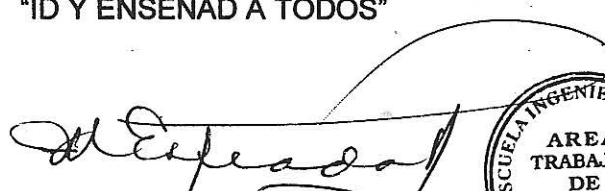
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DETERMINACIÓN Y MODELAMIENTO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE GUATEMALA, ESCUINTLA, QUETZALTENANGO Y PUERTO BARRIOS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Zenón Much Santos**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.244.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **SAMUEL OSWALDO COLOP MÉNDEZ** titulado: "**DETERMINACIÓN Y MODELAMIENTO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE GUATEMALA, ESCUINTLA, QUETZALTENANGO Y PUERTO BARRIOS**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre 2014


Cc: Archivo
VMMV/ale



DTG. 610.2014

El 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 Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN Y MODELAMIENTO DEL INDICE DE CALIDAD DEL AIRE DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE GUATEMALA, ESCUINTLA, QUETZALTENANGO Y PUERTO BARRIOS**, presentado por el estudiante universitario **Samuel Oswaldo Colop Méndez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Alfredo Enrique Beber Acosta
Decano en Funciones



Guatemala, 6 de noviembre de 2014

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS

Por darme la vida, sabiduría, fuerzas, salud y permitirme dar un paso más en mi formación, sin Él no podría hacer nada.

Mis padres

Oswaldo Colop y Liliana Méndez, por ser las personas más importantes en mi vida, ser esos ángeles que Dios me dio como padres y apoyarme en mis decisiones. Los amo.

Mi hermano

Sergio Colop, por ser ese amigo y hermano y darme su apoyo incondicional en todo momento.

Mis abuelos

Serapio Colop (q.e.p.d), Emilia de Colop (q.e.p.d), Teófilo Méndez y Aura de Méndez, por ser esas personas especiales en mi vida y mostrarme su cariño en todo momento.

Mis amigos

A todos quienes me han apoyado siempre haciendo que este momento por fin llegue.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Por ser la casa de estudios en donde me he formado profesionalmente.

Ing. Zenón Much

Por su asesoramiento y apoyarme en este proyecto.

INSIVUMEH

Por ser la institución que me ha dado la oportunidad de iniciar mi carrera profesional y darme las facilidades para crecer profesionalmente.

Pueblo de Guatemala

Porque gracias al pueblo, pude seguir con mis estudios superiores.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
Hipótesis	XVIII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Componentes naturales del aire	5
2.2. Calidad del aire	5
2.2.1. Partículas menores a 10 micras (PM10)	7
2.2.2. Ozono	9
2.2.3. Óxidos de nitrógeno	10
2.2.4. Dióxido de azufre	12
2.2.5. Monóxido de carbono.....	14
2.3. Monitoreo de la calidad del aire	16
2.4. Técnicas de muestreo ambiental	16
2.4.1. Método de absorción infrarroja para CO	17
2.4.2. Método de quimiluminiscencia para NO-NOx	19
2.4.3. Método de absorción de ultravioleta para O ₃	22
2.4.4. Método de atenuación de radiación beta PM10	24
2.4.5. Método de fluorescencia por radiación UV SO ₂	26

2.5.	Índice de calidad del aire (ICA).....	30
2.5.1.	Dato de concentración del contaminante.....	30
2.5.2.	Categorías de la calidad del aire	33
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	35
3.1.	VARIABLES.....	35
3.1.1.	VARIABLES DE MEDICIÓN.....	35
3.1.2.	VARIABLE DEPENDIENTE.....	36
3.2.	DELIMITACIÓN DEL CAMPO DE ESTUDIO	36
3.3.	RECURSO HUMANO DISPONIBLE	41
3.4.	RECURSOS MATERIALES DISPONIBLES	41
3.4.1.	EQUIPO DE MEDICIÓN	41
3.4.2.	EQUIPO AUXILIAR	41
3.5.	TÉCNICA CUALITATIVA	42
3.5.1.	DISEÑO PRELIMINAR.....	42
3.5.2.	ÍNDICES DE CALIDAD DEL AIRE: MÉTODO	43
3.6.	RECOLECCIÓN Y ORDENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	45
3.6.1.	ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	45
3.6.1.1.	DISEÑO DE TRATAMIENTOS	45
3.6.1.2.	MUESTREO.....	45
3.6.1.3.	DISEÑO DE CONTROL DE ERROR	46
3.7.	TABULACIÓN, ORDENAMIENTO Y PROCESAMIENTO	47
3.7.1.	TABULACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	47
3.7.2.	ORDENAMIENTO Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	49
3.8.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	50
3.8.1.	DATO PROMEDIO ESTADÍSTICO	50
3.8.2.	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	51
3.8.3.	INCERTIDUMBRE ABSOLUTA	52
3.8.4.	ERROR PORCENTUAL DE INCERTIDUMBRE	52

3.8.5.	Análisis de varianza	53
3.8.6.	Modelamiento estadístico de datos	53
3.8.7.	Interpolación de datos.....	54
3.8.8.	Extrapolación de datos.....	54
3.9.	Plan de análisis de los resultados	54
3.9.1.	Métodos y modelos	55
3.9.2.	Programas a utilizar para análisis de datos.....	55
4.	RESULTADOS.....	57
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	63
	CONCLUSIONES	67
	RECOMENDACIONES	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	APÉNDICES	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Tamaño del material particulado.....	8
2.	Formación de ozono	10
3.	Molécula del dióxido de nitrógeno.....	12
4.	Fuente de dióxido de azufre, volcán de Pacaya	14
5.	Fuente de monóxido de carbono	15
6.	Método de absorción infrarroja	18
7.	Espectro de sensibilidad del equipo monitor de NO-NOx	20
8.	Principio de conversión de NO ₂	21
9.	Trayectoria de la absorción de ozono	24
10.	Absorción de luz ultravioleta	28
11.	Ubicación estación Guatemala	37
12.	Ubicación estación Escuintla	38
13.	Ubicación estación Quetzaltenango.....	39
14.	Ubicación estación Puerto Barrios	40
15.	Diseño preliminar	43
16.	Índices de calidad del aire de la estación Guatemala.....	57
17.	Índices de calidad del aire de la estación Escuintla	58
18.	Índices de calidad del aire de la estación Quetzaltenango	58
19.	Índices de calidad del aire de la estación Puerto Barrios.....	59
20.	Proyección para 1 año estación Guatemala	60
21.	Proyección para 1 año estación Escuintla	60
22.	Proyección para 1 año estación Quetzaltenango.....	61
23.	Proyección para 1 año estación Puerto Barrios	61

TABLAS

I.	Composición del aire	5
II.	Rangos de concentración para el cálculo del ICA	32
III.	Categoría de la calidad del aire según ICA	33
IV.	Determinación de las variables de medición	35
V.	Determinación de las variables dependiente.....	36
VI.	Rangos de concentración para el cálculo del ICA.....	44
VII.	Tabulación de la información por estación	47
VIII.	Tabulación del ICA por estación	48
IX.	Ordenamiento de los datos tabulados.....	49
IX.	Ecuaciones de comportamiento de datos	59

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
EPA	Agencia de protección ambiental (Environmental Protection Agency).
SO₂	Dióxido de azufre
NO₂	Dióxido de nitrógeno
DIR	Dirección del viento
CE	Estacion Concepción, Escuintla
LO	Estación Labor Ovalle, Quetzaltenango
PB	Estación Puerto Barrios
RS	Estación Radio Sonda, Guatemala
E	Este
°C	Grados centígrados
h	Horas
ICA	Índice de calidad del aire
AQI	Índice de calidad del aire (Air Quality Index).
m³	Metros cúbicos
m/s	Metros por segundo

msnm	Metros sobre el nivel del mar
NOx	Mezcla de óxidos de nitrógeno
µg	Microgramos
mmHg	milímetros de mercurio
CO	Monóxido de carbono
NO	Monóxido de nitrógeno
N	Norte
O	Oeste
O₃	Ozono
PM10	Partículas menores a 10 micras
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
PTS	Partículas totales suspendidas
S	Sur
TEMP	Temperatura
VELOC	Velocidad

GLOSARIO

Atmósfera	Cobertura gaseosa que rodea la tierra, la atmósfera seca consiste mayormente en nitrógeno (78,1%), oxígeno (20,9%) junto con trazas de otros gases como argón, helio, dióxido de carbono, ozono y vapor de agua.
BCIE	Banco Centroamericano de Integración Económica, que tiene por objeto promover la integración y el desarrollo de los países fundadores: Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica.
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 cualquier necesidad o propósito humano.
Concentración promedio	Promedio del valor de la concentración que se determinó durante un período de tiempo determinado.
Contaminante	El compuesto molecular del que se está tratando y es considerado como contaminante del aire, este puede ser: CO, NO ₂ , O ₃ , PM10 y SO ₂

Dióxido de azufre

Es uno del grupo de gases altamente reactivos conocidos como "óxidos de azufre". Las grandes fuentes de emisiones de SO₂ son: combustión de combustibles fósiles en plantas eléctricas (73%) y otras del sector industrial (20%). Las fuentes de emisiones más pequeñas incluyen procesos industriales como: extracción de metal mineral, y quema de combustibles altos en azufre por parte de locomotoras, barcos grandes, y equipo estacionario. Está ligado a numerosos efectos adversos en el sistema respiratorio.

Emisión

La liberación de sustancia (generalmente un gas cuando se habla de cambio climático) hacia la atmósfera.

Estación de calidad del aire

Lugar físico en donde se encuentran los equipos analizadores de CO, NO_x, O₃, PM10 y SO₂ y son transmitidos los datos por internet.

Inmisión

Concentración de contaminantes a nivel del suelo. En la actualidad se emplea más el término calidad aire ambiente.

Índice de calidad del aire

El índice de calidad del aire (ICA) es un índice para reportar la calidad de aire diaria, indica que tan limpio o insalubre se encuentra el aire y que efectos a la salud están asociados al asunto. Se enfoca en los efectos a la salud que podrían tener las personas dentro de unas pocas horas o días después de respirar aire insalubre. El ICA es calculado por cuatro mayores contaminantes los cuales son: ozono superficial, contaminación de partículas, monóxido de carbono y dióxido de azufre.

INSIVUMEH

Instituto nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología. Organismo adscrito al Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda de la República de Guatemala.

Óxidos de nitrógeno

Gases que consisten en una molécula de nitrógeno y variables números de moléculas de oxígeno. Los óxidos de nitrógeno son producidos en las emisiones de los escapes de vehículos y de las centrales eléctricas. En la atmósfera, los óxidos de nitrógeno pueden contribuir a la formación de ozono fotoquímico puede dañar la visibilidad y tiene consecuencias en la salud, son considerados como contaminantes del aire.

Ozono

Forma triatómica del oxígeno, es un constituyente atmosférico gaseoso. En la tropósfera, es producido naturalmente y por reacciones fotoquímicas, envolviendo gases resultantes de actividades humanas. En altas concentraciones, el ozono troposférico puede ser dañino a altos niveles en organismos vivos.

Material particulado

Pequeñas piezas de material sólido o líquido, tal es el caso de partículas de hollín, polvo, gases, neblina y aerosoles. Las características físicas de las partículas, y como se combinan con otras partículas son parte del mecanismo de realimentación de la atmósfera.

Media móvil

Método utilizado para analizar un conjunto de datos en modo de puntos para crear series de promedios. Así las medias móviles son una lista de números en la cual cada uno es el promedio de un subconjunto de los datos originales.

Monóxido de carbono

Es un gas que existe en la parte superior de la atmósfera y al nivel del suelo, donde es un componente clave en el smog urbano. El CO al nivel del suelo provoca una variedad de problemas a la salud incluso a niveles bajos, puede causar daños permanentes a los pulmones después de un tiempo de exposición prolongado y daños a las plantas y ecosistemas.

Partes por billón

Número de partes de químico encontrado en un billón de partes de un gas, líquido o mezcla de sólidos en particular.

Partes por millón

Número de partes de un químico encontrado en un millón de partes de un gas, líquido o sólido en particular.

Promedio del intervalo

Promedio de los promedios de concentración que se obtuvieron durante el período de tiempo determinado, este puede ser de 1 hora, 8 horas o 24 horas dependiendo del contaminante del que se está tratando.

Quenching

Término que hace referencia a cualquier proceso que produzca una disminución en la intensidad de la fluorescencia emitida por una determinada sustancia.

Radiación solar

Radiación emitida por el sol, también se refiere a una onda corta de radiación. La radiación solar tiene un rango distinto de longitud de onda determinada por la temperatura del sol.

RESUMEN

El tema de calidad del aire en el país es de poca relevancia para la mayoría de sectores, actualmente existen dos instituciones que se dedican al monitoreo de la calidad del aire siendo: la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos y el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

A pesar de ello, ninguna de las dos instituciones ha realizado algún estudio sobre la tendencia que tiene o que tendrá en el futuro, únicamente se dedican al monitoreo y a publicar resultados que se obtuvieron, es por ello que en el presente trabajo de investigación se utilizaron los datos del índice de calidad del aire publicados en los boletines diarios en la página web del INSIVUMEH para determinar la tendencia de la calidad del aire y se creó un modelo estadístico que proyecta el comportamiento del índice de calidad del aire en las regiones de Guatemala, Escuintla, Quetzaltenango y Puerto Barrios.

Se determinó que el área con promedio de ICA más bajo es Puerto Barrios y con el promedio de ICA más elevado es Escuintla, estando Guatemala y Quetzaltenango con un ICA intermedio.

OBJETIVOS

General

Determinar y realizar un modelo de los índices de calidad del aire obtenidos por los equipos de monitoreo del INSIVUMEH, de los años 2010, 2011 y 2012, para realizar una proyección de 1 año en función del ICA y del tiempo.

Específicos

1. Determinar el índice de calidad del aire de los años 2010, 2011 y 2012 en el área de las estaciones de monitoreo (Guatemala, Escuintla, Quetzaltenango y Puerto Barrios).
2. Realizar un análisis estadístico a los índices de calidad del aire obtenidos a fin de obtener una ecuación que describa el comportamiento de los datos.
3. Evaluar el modelo estadístico del índice de calidad del aire proyectada a un año.

Hipótesis

- **Hipótesis de investigación**

El Índice de calidad del aire cumple en, al menos, el 75 por ciento de los datos del período de estudio, dentro del rango de bueno según las Normas de la EPA en las estaciones de monitoreo: Guatemala, Escuintla, Quetzaltenango y Puerto Barrios

- **Hipótesis nula**

El índice de calidad del aire no cumple, en al menos, el 75 por ciento de los datos del período de estudio, dentro del rango de bueno según las Normas de la EPA en las estaciones de monitoreo: Guatemala, Escuintla, Quetzaltenango y Puerto Barrios

INTRODUCCIÓN

Guatemala es un país que se destaca de otros, debido a la gran riqueza natural que en él existe, los suelos, mantos freáticos, diversidad en su fauna y flora, que incluye un sin número de especies de árboles que ayudan a generar una gran cantidad de oxígeno para el ambiente, son únicos en la región. Debido al rápido crecimiento poblacional e industrial que se ha dado en el país, estos recursos se han ido deteriorando hasta el punto de poner en peligro la salud de las personas, un ejemplo de ello es la contaminación que se encuentra en los ríos, los suelos y en el aire.

La contaminación, en general, es un tema que ha tomado importancia en los últimos años a nivel mundial, esto debido al cambio climático que ha sido evidente. Se han firmado acuerdos para que los países se comprometan a moderar su producción de contaminación, Guatemala, al no ser un país contaminante a gran escala, no se ha visto involucrado en acuerdos como estos, pero los ha ratificado.

En Guatemala, la Comisión Guatemalteca de Normas del Ministerio de Economía se encarga de realizar las normas para regular la contaminación que se produce al realizar determinados procesos y que afectan a los recursos naturales como el agua, esto ha sido posible gracias a los estudios previos que se han realizado para determinar los límites aceptables de contaminación, desafortunadamente estas regulaciones no existen para la contaminación que prevalece en el aire y que afecta la salud de las personas.

A nivel latinoamericano, México es en donde existe una red de monitoreo de la calidad del aire y cuenta con regulaciones y rangos de concentraciones ya establecidos sobre los contaminantes que afectan la salud humana, estos rangos determinan el estado de la calidad del aire y los efectos que tienen sobre la población, cabe destacar que los límites son más rigurosos que los establecidos por otras instituciones como la EPA.

En Guatemala existe una red de monitoreo de calidad del aire a cargo del Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) que trabaja las 24 horas del día, los 7 días de la semana desde el 2010 y que se sitúan en Guatemala, Escuintla, Quetzaltenango e Izabal, que se consideran los departamentos en donde hay actividad industrial o bien los más poblados o de principal actividad económica. La red cuenta con equipos de última tecnología que están automatizados y utilizan métodos fisicoquímicos para la obtención de datos que se generan cada hora, por otro lado, la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala ha realizado mediciones de los contaminantes de calidad del aire solo en el departamento de Guatemala, en diferentes puntos de la ciudad capital, utilizando métodos gravimétricos para determinar la concentración de los contaminantes en el aire, obteniendo datos mensuales. Un método diferente al que utiliza el INSIVUMEH.

A pesar de que sí existe un monitoreo en Guatemala sobre los contaminantes del aire, para ambos casos, no existe un estudio de ingeniería sobre un modelamiento para el índice de calidad del aire, de este modo determinar un comportamiento de los datos obtenidos y realizar una predicción de cómo estará la calidad del aire en un futuro. Para la realización del modelamiento del índice de calidad del aire se utilizarán los datos generados por los equipos de monitoreo de calidad del aire del INSIVUMEH y que se

publican diariamente en los boletines de calidad del aire (BCA) desde el 2010 en su página web, así como los documentos EPA QA/G-9R Y EPA QA/G9S de la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés).

1. ANTECEDENTES

En 1989, Zenón Much Santos realizó su trabajo de graduación titulado, *Determinación de los índices de contaminación del aire por la industria en la ciudad de Tecún Umán, San Marcos, Guatemala* para La Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

En 1994, la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de La Universidad de San Carlos comenzó con la implementación de un plan de monitoreo de calidad del aire para la ciudad de Guatemala, esto con el objetivo de establecer un diagnóstico del estado de las emisiones de vehículos, a la fecha, estas mediciones se siguen realizando utilizando un método gravimétrico para la determinación de las concentraciones de los contaminantes en el aire y cada año presentan un Informe anual de calidad del aire en la ciudad de Guatemala, en donde dan a conocer los resultados obtenidos durante el período de monitoreo que consiste en un promedio mensual de los contaminantes y se realizan comparaciones de los resultados de otros años con el fin de determinar si la calidad del aire mejora o empeora.

En noviembre de 1997, Ruth Eglantina Portillo Jiménez realizó su trabajo, de graduación titulado *Algunas especificaciones técnicas que deben observarse en el manejo de la calidad del aire*, para la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

En noviembre de 2005, Selvin Adán Apxuac Corado realizó su trabajo de graduación titulado, *Caracterización de material particulado menor a 10 μ m –*

PM₁₀- colectado en dos puntos de muestreo en la ciudad de Guatemala para la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos.

En octubre de 2008, Pablo Ernesto Oliva Soto realizó su trabajo de graduación titulado, *Calidad del aire en Guatemala. Compilación de la información existente*, para la obtención de grado de maestría en Docencia Universitaria con especialización en evaluación educativa de la Facultad de Humanidades de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

En el 2010 se comienza con un programa de monitoreo de calidad del aire para el país, a cargo por el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), en donde se crea una red de monitoreo de calidad del aire que consiste en una estación central de recolección de datos y cuatro estaciones remotas comunicadas con el Centro Nacional de Pronósticos CNP vía TCP/IP, ubicadas en 4 diferentes ciudades que se consideran las mas importantes en el país, ciudad de Guatemala, Quetzaltenango, Escuintla y Puerto Barrios. Cada una de las estaciones está equipada con instrumentos de medición de los contaminantes: dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y partículas menores a 10 micras (PM₁₀). Con el fin de recolectar información y monitorear la calidad del aire en el país.

El Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de México utiliza un método parecido al de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) para determinar el índice de calidad del aire, siendo este el índice metropolitano de la calidad del aire (IMECA) en donde se definen rangos específicos de concentración de contaminantes para el cálculo del IMECA, el cual puede ser buena, regular, mala, muy mala y extremadamente mala, dependiendo del rango en que se encuentre el valor del IMECA calculado. La diferencia principal

entre el IMECA y el ICA radica en el rango de concentraciones definidas para cada contaminante y el valor del índice que se le dan a esos rangos, el cálculo de ambos se hace utilizando la misma ecuación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Componentes naturales del aire

El aire atmosférico es una mezcla de gases que, al parecer, ha evolucionado durante varios miles de millones de años hasta llegar a la composición actual. Sus componentes naturales son nitrógeno, oxígeno y algunos gases inertes o nobles. Otros componentes como el dióxido de carbono y el vapor de agua son variables, según el lugar y el tiempo.

Tabla I. Composición del aire

Componente	Volumen, %	Peso, %
Nitrógeno (N ₂)	78,03	75,58
Oxígeno (O ₂)	20,99	23,08
Argón (Ar)	0,94	1,28
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,035	0,053
Neón (Ne)	0,0024	0,0017
Otros gases inertes	0,0024	0,0017
Hidrógeno (H ₂)	0,00005	0,000004

Fuente: elaboración propia.

El oxígeno es un componente activo de la atmósfera, e interviene en los siguientes procesos:

- Oxidación de hidratos de carbono
- Combustión
- Descomposición de materia orgánica

Las sustancias que se encuentran en la atmósfera, tal como fueron emitidas se conocen como contaminantes primarios. Como contaminantes secundarios del aire se conocen aquellos que resultan de la interacción de los contaminantes primarios entre si.

2.2. Calidad del aire

Los procesos de la naturaleza que producen contaminantes son clasificados como fuentes biogénicas, las actividades del hombre que producen contaminantes en el aire se denominan fuentes antropogénicas

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.¹

Los contaminantes que afectan la salud humana al estar en determinadas concentraciones son:

- Partículas menores a 10 micras (PM10)

¹ ALBERT, Lilia A. *Toxicología ambiental*, Instituto Nacional de Investigaciones sobre recursos bióticos, México 1985. p. 46.

- Ozono (O₃)
- Óxidos de nitrógeno (NO-NO_x)
- Dióxido de azufre (SO₂)
- Monóxido de carbono (CO)

2.2.1. Partículas menores a 10 micras (PM10)

Las partículas menores a 10 micras conocido también como material particulado, incluyen una mezcla de sólidos y gotas líquidas. Algunas partículas son emitidas directamente, otras son formadas en la atmósfera cuando otros contaminantes reaccionan en el aire. Las partículas vienen en una amplia gama de tamaños, aquellas menores a 10 micrómetros de diámetro son tan pequeñas que pueden ingresar dentro de los pulmones, causando serios daños a la salud, 10 micrómetros es más pequeño que el ancho de un cabello humano.

Las partículas más finas, menores a 2,5 micrómetros de diámetro son llamadas partículas finas, estas partículas son tan pequeñas que pueden ser detectadas solo con un microscopio electrónico. La fuente de las partículas finas incluye todo tipo de combustión, incluyendo motores de vehículos, plantas de poder, quemas de madera residencial, quemas forestales, quemas agrícolas y algunos procesos industriales.

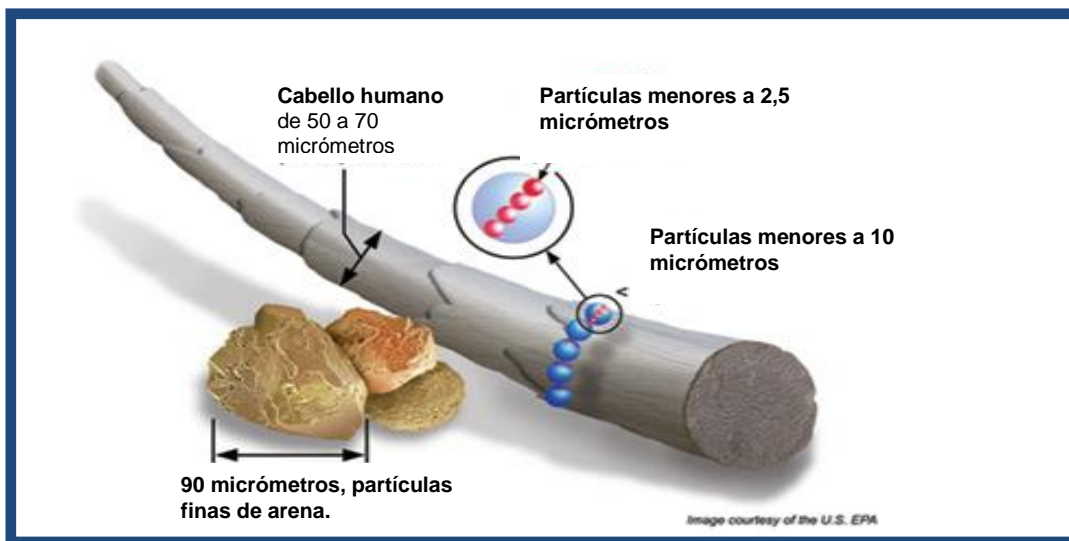
Las partículas entre 2,5 y 10 micrómetros de diámetro son referidas como gruesas. Las fuentes de las partículas gruesas incluyen operaciones de moler o triturar, polvo provocado por los vehículos que circulan en las carreteras.

El tamaño de las partículas está directamente relacionado con la salud, por su potencial de causar problemas. Las partículas menores a 10 micras de

diámetro poseen los más grandes problemas porque pueden alojarse en lo más profundo de los pulmones y algunos pueden incluso alojarse en la corriente sanguínea.

Estas partículas 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.²

Figura 1. **Tamaño del material particulado**



Fuente: <http://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.particle>. Consulta: 25 de julio de 2013.

² Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, *Partículas menores a 10 micras*, <http://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.particle>. Consulta: 25 de julio de 2013.

2.2.2. Ozono

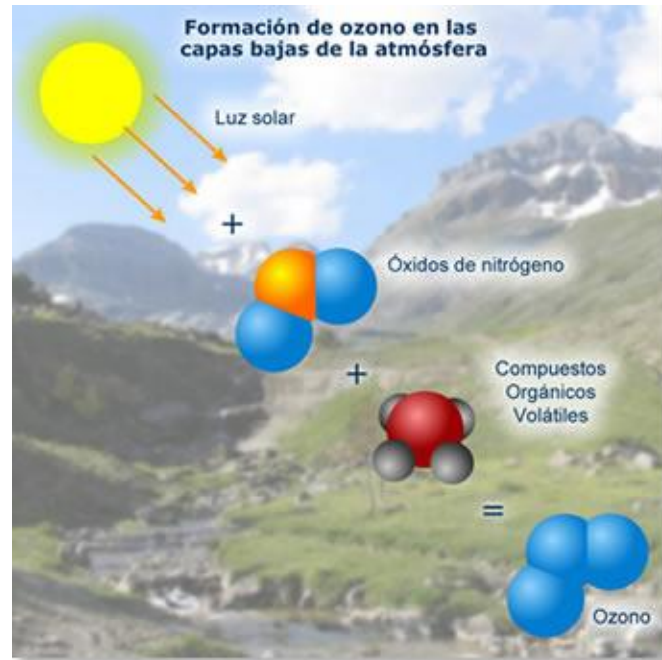
Es un gas que está compuesto por tres átomos de oxígeno. Puede estar tanto a nivel del suelo como en la atmósfera. Puede ser bueno o malo, dependiendo donde se encuentre.

El ozono existe naturalmente en la atmósfera de 6 a 30 millas sobre la superficie de la Tierra, en donde forma una capa protectora que protege de los dañinos rayos ultravioleta provenientes del Sol. Los químicos creados por el hombre son conocidos por destruir el ozono benéfico. Los lugares en donde la capa protectora de ozono ha sido significativamente reducida son llamados agujero de ozono. Junto con más de 180 países se reconoció la amenaza que significa el deterioro del ozono atmosférico y en 1987 se adoptó un tratado llamado el Protocolo de Montreal para eliminar la producción y uso de sustancias que agotan el ozono.

En la atmósfera inferior de la Tierra, cerca del nivel del suelo, el ozono se forma cuando los contaminantes emitidos por los vehículos automotores, plantas de energía, calderas industriales, refinerías, plantas químicas y otras fuentes reaccionan químicamente en presencia de la luz solar. El ozono a nivel del suelo es un contaminante perjudicial. Los niños, los ancianos, las personas con enfermedades pulmonares como el asma y las personas que trabajan o ejercen fuera corren el riesgo de efectos adversos de la capa de ozono. Estos incluyen la disminución de la función pulmonar y el aumento de los síntomas de daños respiratorios, así como visitas a urgencias respiratorias relacionadas, ingresos hospitalarios y muertes posiblemente prematuros.³

³ Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, *Ozono*, <http://airnow.gov/index.cfm?action=aqbasics.ozone>. Consulta: 25 de julio de 2013.

Figura 2. **Formación del ozono**



Fuente: <http://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.ozone>. Consulta: 25 de julio de 2013.

2.2.3. **Óxidos de nitrógeno**

La suma de óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno se llama comúnmente óxidos de nitrógeno o NOx. Otros óxidos de nitrógeno, incluyendo el ácido nitroso y el ácido nítrico son parte de la familia de óxidos de nitrógeno.

NOx reacciona con amoníaco, humedad, y otros compuestos para formar partículas pequeñas. Estas penetran profundamente en las partes sensibles de los pulmones y pueden causar o empeorar enfermedades respiratorias, como el enfisema y la bronquitis, y pueden agravar la enfermedad cardíaca existente, provocando un aumento de las hospitalizaciones y muertes prematuras.

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es uno de un grupo de gases altamente reactivos conocidos como: óxidos de nitrógeno (NO_x). Otros óxidos de nitrógeno incluyen el ácido nitroso y ácido nítrico. El dióxido de nitrógeno se forma rápidamente de las emisiones de los automóviles, camiones y autobuses, centrales eléctricas, y equipos fuera de carretera. Además de contribuir a la formación de ozono a nivel del suelo y la contaminación de partículas finas, El dióxido de nitrógeno está vinculado con una serie de efectos adversos en el sistema respiratorio.

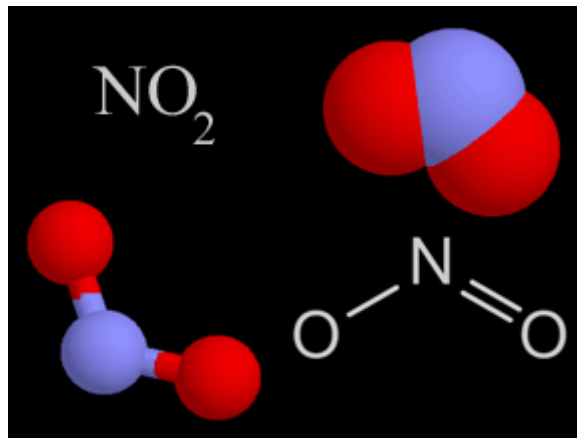
Las exposiciones a corto plazo a dióxido de nitrógeno, que van desde 30 minutos hasta 24 horas conllevan efectos respiratorios adversos que incluyen inflamación de las vías, en las personas sanas, y el aumento de síntomas respiratorios en las personas con asma, además, los estudios muestran una conexión entre la respiración elevada a corto plazo de concentraciones de NO_2 , y el aumento de las visitas a urgencias e ingresos hospitalarios por problemas respiratorios, especialmente el asma.

Las concentraciones de dióxido de nitrógeno de exposición cerca de las carreteras son de particular interés para los individuos susceptibles, incluidas las personas con asma, niños y ancianos.

Las emisiones que conducen a la formación de NO_2 , generalmente conducen también a la formación de NO_x otra. Generalmente se puede esperar que las medidas de control de emisiones que conducen a la reducción de NO_2 para reducir la exposición de la población a todos los NO_x gaseoso funcionen. Esto puede tener el importante cobeneficio de la reducción de la formación de

ozono y partículas finas ambos de los cuales plantean importantes amenazas para la salud pública.⁴

Figura 3. **Molécula del dióxido de nitrógeno**



Fuente: <http://www.epa.gov/air/nitrogenoxides/>. Consultado: 26 de julio de 2013.

2.2.4. Dióxido de azufre

Es uno de los gases 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. A escala global el dióxido de azufre es peligroso para los humanos en su forma gaseosa y también, porque se oxida formando sulfato aerosol.

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 partes por millón y es fácilmente notable

⁴ Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. *Óxidos de nitrógeno*. Artículo <http://www.epa.gov/air/nitrogenoxides/> consultado el día 26 de julio de 2013.

a 3 partes por millón, el dióxido de azufre no es inflamable, no es explosivo y es relativamente estable. Su densidad es más del doble que la del aire ambiental (2,62 gramos por litro a 25 grados centígrados y 1 atmósfera) y es altamente soluble en agua (85 gramos por litro). En contacto con membranas húmedas el dióxido de azufre forma ácido sulfúrico (H₂SO₄), que es responsable de fuertes irritaciones en los ojos, membranas mucosas y piel (Komarnisky et al, 2003).

Típicamente, la concentración de dióxido de azufre en fumarolas volcánicas diluidas es menor a 10 partes por millón, Suponiendo que el gas tuviese media vida de 6 a 24 horas, entonces solo el 5 por ciento del gas emitido está presente en la atmósfera baja después de 1 a 4 días.

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. Las personas asmáticas son especialmente sensibles al dióxido de azufre y pueden reaccionar ante concentraciones tan bajas como 0,2 a 0,5 partes por millón. Los vulcanólogos que sufren de asma pueden advertir efectos adversos a concentraciones sustancialmente más bajas de las que afectan a los demás colegas. Una exposición prolongada o repetida a concentraciones bajas (1-5 partes por millón) puede ser peligrosa para personas con enfermedades cardíacas o pulmonares previas.⁵

⁵ *Contaminación con dióxido de azufre.* Artículo http://ivhnh.org/index.php?option=com_content&view=article&id=144. Consulta: 26 de julio de 2013.

Figura 4. **Fuente de dióxido de azufre, volcán de Pacaya**



Fuente: http://ivhhn.org/index.php?option=com_content&view=article&id=144. Consulta: 26 de julio de 2013.

2.2.5. Monóxido de carbono

Es un gas inodoro e incoloro que puede causar la muerte. Se produce cada vez que se enciende algún combustible como gas natural, gas propano, gasolina, petróleo, queroseno, madera o carbón. Cuando la persona inhala el monóxido de carbono, el gas tóxico entra en el torrente sanguíneo e impide que el oxígeno entre al organismo, lo cual puede causar daños en los tejidos y producir la muerte.

Para la mayoría de las personas, las primeras señales de exposición a concentraciones bajas de monóxido de carbono incluyen ligeros dolores de cabeza y falta de aliento cuando se hacen ejercicios moderados. La exposición continua puede producir síntomas de gripe, incluidos dolor de cabeza más

fuertes, mareos, cansancio, náuseas, confusión, irritabilidad y pensamiento confuso, falta de memoria y coordinación. Al monóxido de carbono le llama: el asesino silencioso, porque si no se presta atención a estas primeras señales, la persona puede perder la conciencia y la capacidad de salir del peligro.

La persona puede no tener síntomas y lo mismo estar expuesta a niveles peligrosos de monóxido de carbono. Respirar concentraciones bajas de este gas puede no resultar en síntomas obvios de envenenamiento, pero esta baja exposición puede causar daños a la salud en el largo plazo, aún después de que se haya eliminado la fuente de dicho contaminante. Estos efectos incluyen daños neurológicos a largo plazo, por ejemplo dificultad para aprender y retener datos en la memoria, efectos emocionales y de personalidad, y trastornos sensoriales y motores.⁶

Figura 5. **Fuente de monóxido de carbono**



Fuente: http://www.epa.gov/iaq/espanol/monoxido_de_carbono.html. Consulta: 26 de julio de 2013.

⁶ Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. *Monóxido de carbono*, http://www.epa.gov/iaq/espanol/monoxido_de_carbono.html. Consulta: 26 de julio de 2013.

2.3. Monitoreo de la calidad del aire

Es la evaluación sistemática y a largo plazo de los niveles de contaminantes en determinada comunidad, el objetivo primario del programa de monitoreo es la protección de la salud de las personas que viven en las comunidades contra la exposición excesiva a los contaminantes atmosféricos.

Para llevar a cabo estos monitoreos se necesitan técnicas de muestreo ambiental para determinar el grado de contaminación en la región de interés.

2.4. Técnicas de muestreo ambiental

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:

- CO método de absorción infrarroja
- NO₂ método de quimiluminiscencia
- O₃ método de absorción de radiación ultravioleta
- PM₁₀ método de atenuación de radiación beta o beta-atenuación

- SO2 Método de fluorescencia por radiación ultravioleta

2.4.1. Método de absorción infrarroja para CO

Para analizar la concentración en el ambiente de monóxido de carbono se utiliza este método, el cual se basa en la capacidad de la molécula de CO de absorber energía infrarroja a 4,7 micrómetros, utilizando un filtro de correlación para corregir las interferencias. La absorción de luz de una molécula se rige por la ley de Beer, que relaciona la intensidad de luz absorbida a una longitud de onda específica.

Ley de Beer

$$I = I_o * e^{-\alpha Lc}$$

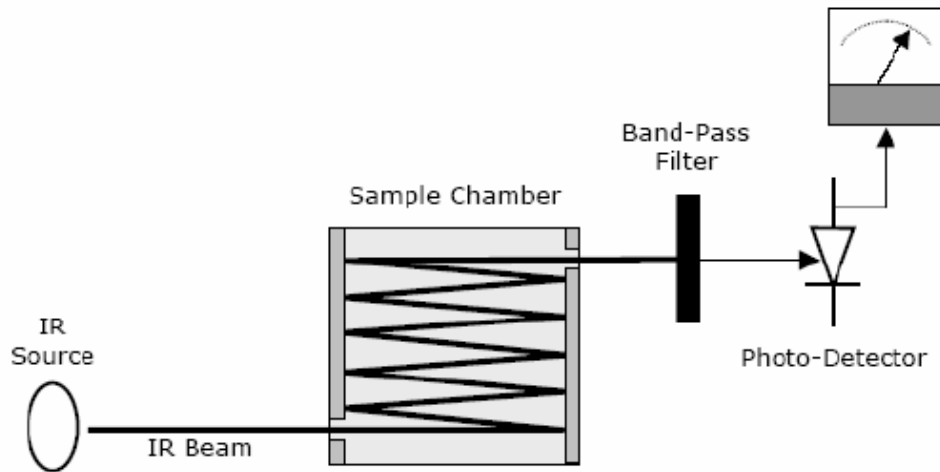
Donde:

I	=	intensidad de luz a determinada concentración de CO
I _o	=	intensidad de luz al no haber absorción
L	=	distancia que recorre la luz cuando está siendo absorbida
C	=	concentración de la molécula de CO
α	=	coeficiente de absorción a 4.7 micrómetros

En los términos más básicos, el equipo utilizado usa un elemento caliente, altamente energético para generar un rayo de banda ancha de luz infrarroja con una intensidad conocida (medida durante la calibración del equipo). Este rayo pasa directamente a través de una celda con gas de muestra. La celda de muestra tiene unos espejos al final para reflejar el rayo de infrarrojos que vuelve a atravesar la muestra de gas para generar un camino de

14 metros de absorción. Esta longitud ha sido elegida para darle al analizador la máxima sensibilidad ante las fluctuaciones en la densidad del CO.

Figura 6. **Método de absorción infrarroja**



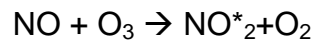
Fuente: Manual *Model 300E/EM carbon monoxide analyzer*, p. 194.

Tras la excitación de la célula de muestra, el rayo brilla a través de un filtro pasa-banda que permite el paso de una longitud de onda de 4,7 micrómetros. Finalmente, el rayo golpea un fotodetector en estado sólido que convierte la señal de luz en una señal de voltaje modulada representando la atenuación de la intensidad del rayo.⁷

⁷ Manual, *Model 300E/EM. Carbon Monoxide Analyzer*. Teledyne Advanced Pollution Instrumentation Revisión B3, Carroll Park Drive, San Diego CA 32121-5201, Estados Unidos 2006. p. 193-197.

2.4.2. Método de quimiluminiscencia para NO-NOx

El principio físico del equipo de medida es la detección de quimiluminiscencia, que tiene lugar cuando el óxido de nitrógeno (NO) reacciona con el ozono (O₃). Esta reacción es un proceso de dos pasos. En el primer paso, una molécula de NO y una molécula de O₃ chocan y reaccionan químicamente para producir una molécula de oxígeno (O₂) y una molécula de dióxido de nitrógeno (NO₂). Parte del NO₂ retiene cierta cantidad de exceso de energía de estas colisiones y, de aquí, que se mantenga en estado de excitación, lo que significa que uno de los electrones de la molécula de NO₂ está en una órbita superior a lo normal.

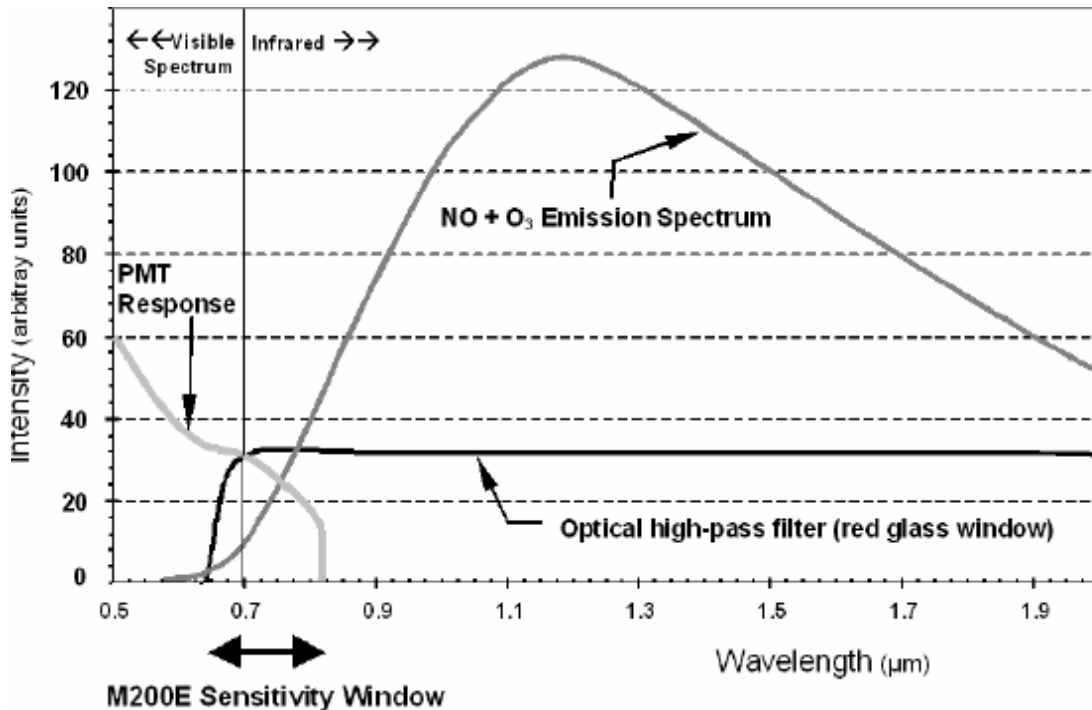


La termodinámica hace que el sistema busque el estado más bajo de energía más estable disponible; es por esto que la molécula de NO₂ vuelve inmediatamente a su estado original en el paso siguiente, despojándose del exceso de energía en forma de fotón (hv) con longitud de onda entre seiscientos y tres mil nanómetros, con un pico de mil doscientos nanómetros.



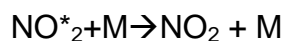
Con estas condiciones constantes, la relación entre la cantidad de NO presente en la celda de reacción y la cantidad de luz emitida en la reacción es lineal. A mayor cantidad de NO mayor producción de luz, que se puede medir con un sensor sensible a la luz (figura 7). Con el fin de maximizar la producción de la reacción, el M200E le suministra a la celda de reacción una gran cantidad constante de ozono (alrededor de 3 000-5 000 partes por millón) desde el generador interno de ozono.

Figura 7. Espectro de sensibilidad del equipo monitor de NO-NOx



Fuente: Manual Model 200E Nitrogen Oxides Analyzer. p. 160.

En cualquier caso, solo cerca del 20 por ciento del NO₂ que se forma durante la reacción, está en estado de excitación. Además, el NO₂ en estado de excitación puede chocar con otra molécula *M* en la celda de reacción (mayormente otras moléculas, pero también las paredes de la celda) y transferir este exceso de energía a su molécula sin emitir ningún tipo de luz, de hecho, la mayor parte del NO₂* vuelve a su estado de reposo de esta manera, dejando solo un pequeño porcentaje de quimiluminiscencia útil.



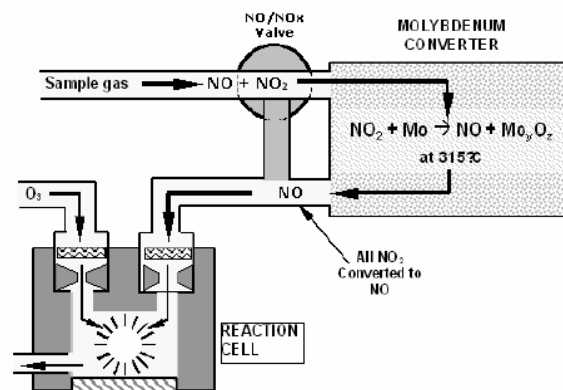
Con el fin de aumentar la luz producida en la reacción, la celda de reacción se mantiene a una presión reducida. La probabilidad de colisión entre la molécula de NO₂ y otra molécula M aumenta proporcionalmente con la presión de la celda de reacción. Esta colisión no radiante con las moléculas de NO₂* normalmente tiene que ver con el *quenching*,

Con el fin de medir las concentraciones de NO o NO_x (que aquí se define como la suma de NO y NO₂ de la muestra de gas), el M200E hace pasar el caudal de la muestra periódicamente a través de un cartucho del convertidor que está relleno de molibdeno calentado a una temperatura de 315 grados centígrados. El molibdeno calentado reacciona con el NO₂ del gas de muestra y produce una variedad de óxidos de molibdeno y de NO.



Una vez que el NO₂ de la muestra se ha convertido en NO, se envía a la celda de reacción donde es sometida a la reacción de quimiluminiscencia.

Figura 8. Principio de conversión de NO₂



Fuente: Manual *Model 200E Nitrogen Oxides Analyzer*. p. 161.

El analizador puede medir el total de NOx (NO+ NO2) de la muestra cuando convierte el NO2 de la muestra de gas en NO. Activando el convertidor de NO2 dentro y fuera de la corriente de muestra de gas cada 6 a 10 segundos, el analizador M200E es capaz de medir casi constantemente tanto el contenido de NO como el NOx.⁸

2.4.3. Método de absorción de radiación ultravioleta para O₃

El principio de base con el cual el analizador trabaja se llama ley de Beer (utilizado en el análisis de concentración de monóxido de carbono). Define cómo la luz de una longitud de onda específica es absorbida por una molécula particular de gas sobre cierta distancia en una temperatura y una presión dadas. La relación matemática entre estos tres parámetros para los gases en presión y temperatura estándar (STP) es:

Ley de Beer

$$I = I_o * e^{-\alpha Lc}$$

Donde:

- I = intensidad de luz a determinada concentración de CO
- I_o = intensidad de luz al no haber absorción
- L = distancia que recorre la luz cuando está siendo absorbida
- C = concentración de la molécula de CO
- α = coeficiente de absorción a 4.7 micrómetros

⁸ Manual *Model 200E Nitrogen Oxides Analyzer* Teledyne Advanced Pollution Instrumentation, Revisión B3, Carroll Park Drive, San Diego CA 32121-5201, Estados Unidos 2006. p. 161-165.

El equipo mide cada una de las variables: temperatura de la muestra; presión de la muestra; intensidad de la luz UV con y sin la presencia de O₃. Inserta valores conocidos para la longitud del camino de absorción y del coeficiente de absorción, y calcula la concentración del O₃ presente en el gas de la muestra.

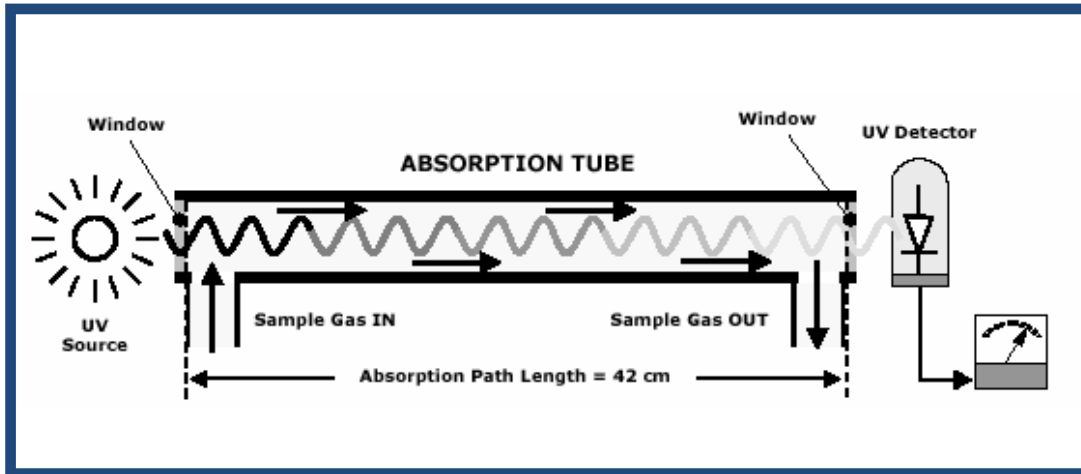
En los términos más básicos, el modelo 400E utiliza una lámpara de vapor de mercurio de alta energía para generar un haz de luz UV. Este haz pasa a través de una ventana del material elegida, específicamente para ser no reactiva al O₃ y transparente a la radiación ultravioleta en los 254 nanómetros y en un tubo de absorción lleno de gas de muestra.

Como el ozono es un atenuador muy eficiente de la radiación ultravioleta, el camino de absorción requerido para crear una disminución medible de la intensidad UV es bastante corta (aproximadamente 42 centímetros). Por lo tanto, no hay un sistema complejo de espejos para alargar la trayectoria eficaz enviando el haz de luz hacia adelante y hacia atrás. Finalmente, el haz ultravioleta pasa a través de una ventana similar en el otro extremo de la cámara de absorción y es detectada por un diodo especialmente diseñado en el cual detecta solamente la radiación de una longitud de onda de 254 nanómetros.

La especificidad del detector es suficiente para que no sea necesaria una filtración óptica adicional de la luz UV. El montaje del detector reacciona a la luz UV y hace salir un voltaje que varía en relación directa con la intensidad de luz. Este voltaje se convierte a digital y se envía a la CPU del instrumento que se utilizará en calcular la concentración de O₃ en el tubo de la absorción.⁹

⁹ Manual. *Model 400E Ozone Analyzer Instruction manual*. Teledyne Advanced Pollution Instrumentation. Revisión B3, Carroll Park Drive, San Diego CA 32121-5201, Estados Unidos 2006. p. 222-227.

Figura 9. Trayectoria de la absorción de ozono



Fuente: Manual *Model 400E Ozone Analyzer*. p. 222.

2.4.4. Método de atenuación de radiación beta PM10

Cuando los electrones de alta energía que emanan de la fuente de C14 interactúan con la materia próxima, pierden su energía y en algunos casos, son absorbidos por la materia. Estos electrones son conocidos como rayos beta y el proceso se llama atenuación de radiación beta. Cuando la materia se coloca entre la fuente radiactiva y un componente capaz de detectar la radiación beta, los rayos beta son absorbidos y su energía disminuye. Esto implica una disminución de la cantidad de partículas beta detectadas. La magnitud de la reducción es una función de la masa del material absorbente situado entre la fuente y el detector.

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.

Este principio también se basa en la ley de Beer, 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 ecuación¹ se acerca mucho a la ley de Beer Lambert, Esta ley es una simplificación del comportamiento real.

En operación, el aire ambiente es muestreado a un flujo constante durante un tiempo determinado, Este aire pasa a través del papel de filtro en una superficie L , Una vez que, C , la densidad másica de las partículas recogidas ha sido determinada, es posible calcular la concentración ambiental de las partículas (microgramos por metro cúbico).

El estudio de la misma revela varias cosas. La incertidumbre relativa de la medida decrece (se mejora) incrementando el área en el que se deposita la muestra (A), el flujo, (q), el tiempo de muestreo (t), la absorción (μ) I e I_0 .

En la práctica la incertidumbre asociada con el área, puede ser minimizada asegurando que la cinta esté en la misma posición cuando se mide I e I_0 .

La incertidumbre del caudal de aire, puede ser minimizada controlando de forma adecuada el flujo en el instrumento. En el BAM 1020 estándar este valor es de ± 3 por ciento en el equipo dotado del controlador de flujo másico se reduce a ± 1 por ciento.

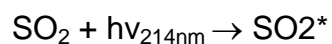
El error relativo debido a la incertidumbre de la absorción μ es debido a la ligera variación que se produce con la diferente composición química del material absorbente, esta incertidumbre es de ± 2 a 3 por ciento.

La incertidumbre asociada con la medida de I e I_0 tiene que ver con la naturaleza física del proceso de emisión de las partículas beta. Este proceso se puede modelizar con estadísticos de Poisson, que muestran la incertidumbre asociada a la medida de I e I_0 se pueden minimizar incrementando el tiempo de muestreo. Análisis matemáticos muestran que doblando el tiempo de muestreo, y con esto la intensidad de I e I_0 se reduce la incertidumbre por un factor de 1,41.

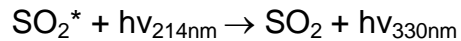
2.4.5. Método de fluorescencia por radiación UV SO₂

El principio físico por el que se rige el método de medida de SO₂ es la fluorescencia que tiene lugar cuando el dióxido de azufre SO₂ es excitado por una luz ultravioleta de longitud de onda de rango 190 nanómetros a 230 nanómetros. Esta reacción es un proceso de dos fases: la primera tiene lugar cuando las moléculas de SO₂ son golpeadas por los fotones ultravioletas de la longitud de onda apropiada (190 nanómetros a 230 nanómetros). El SO₂ retiene un exceso de energía que hace que uno de los electrones se mueva a una órbita con nivel de energía superior.

En el caso del M100E, una banda a modo de filtro de paso entre la fuente de luz UV y el gas, limita la longitud de onda de la luz ultravioleta a aproximadamente 214 nanómetros.



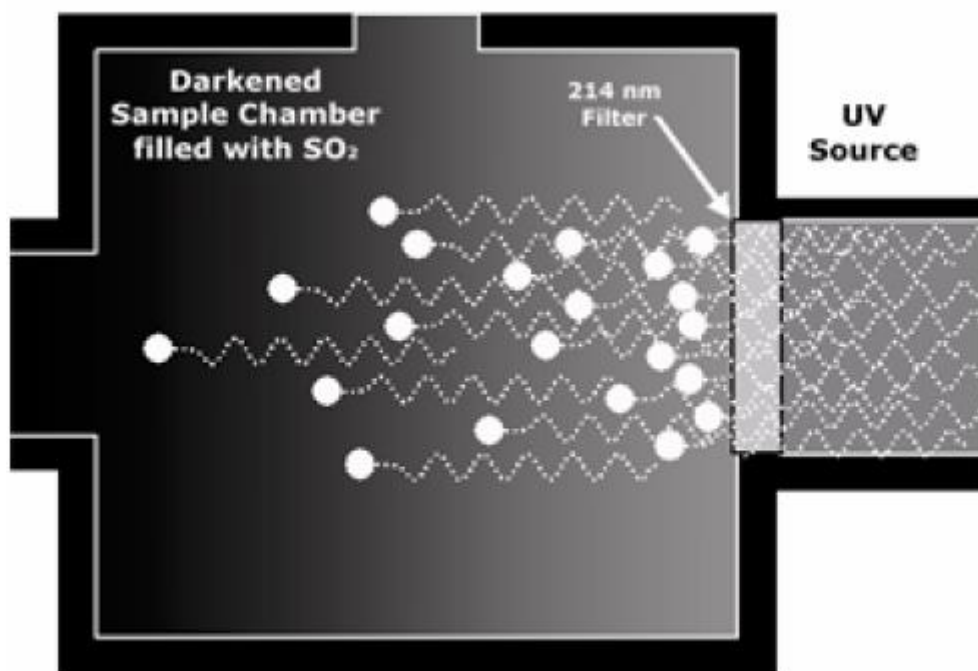
La segunda fase de esta reacción tiene lugar después de que el SO₂ alcanza el estado de excitación (SO₂*). Debido a que el sistema va a buscar el estado más bajo de energía más estable disponible, las moléculas de (SO₂*) volverán inmediatamente a su estado original despojándose del exceso de energía en forma de fotón (hν). La longitud de onda de esta luz fluorescente es también de la banda ultravioleta pero de una mayor (menor energía) longitud de onda fijada en 330 nm.



Evidentemente, a mayor cantidad de SO₂ en la muestra de gas, mayor fluorescencia será detectada en la cámara de muestra. Lamentablemente existen otros muchos factores que pueden afectar a la cantidad de luz fluorescente que puede detectar el analizador.

Por ejemplo, la cantidad de SO₂* depende de la media de la intensidad de luz de la lámpara UV y no de la intensidad máxima de luz porque algunos de los fotones son absorbidos por el SO₂ cuando la luz viaja a través de la muestra de gas.

Figura 10. **Absorción de la luz ultravioleta**



Fuente: Manual *Model 100E UV Fluorescence SO₂ Analyzer*. p. 172.

La ecuación que define la medida de la intensidad de la luz ultravioleta es la ley de Beer. Existe otro factor que afecta a la cantidad de luz detectable UV presente es el valor al que esta reacción tiene lugar (k), que varía en función de la temperatura de SO₂*. A mayor temperatura de gas, mayor velocidad a la que las moléculas individualmente vuelven a su estado original y mayor número de fotones son despedidos por unidad de tiempo.

En resumen, la cantidad de fluorescencia es afectada indirectamente por la temperatura del gas y por los factores de la ecuación (concentración de SO₂; intensidad de la luz UV; longitud del camino de la luz UV) y afectada

directamente por dos factores: el valor de la reacción y la cantidad de SO₂* presente.

Por lo tanto, cuando la longitud del camino de la luz sea pequeño, no habrá gases interfiriendo; no habrá luces interfiriendo; tanto la temperatura del gas como la intensidad de la luz son valores conocidos y compensados; la cantidad de luz fluorescente emitida (F) está directamente relacionada con la concentración de SO₂ en la cámara de muestra. El analizador M100E UV está diseñado específicamente para generar estas condiciones. El camino de la luz es muy corto

El diseño de la óptica reduce los efectos de la desviación de la luz geométrica y espectralmente. Un filtro especial de hidrocarburos elimina las interferencias más comunes de otros gases en la muestra.

El detector de referencia mide la intensidad de la excitación de luz UV y se utiliza para eliminar los efectos de la deriva de la lámpara.

Finalmente, la temperatura de la muestra de gas se mide y se controla a través de los calentadores que existen junto a la cámara de muestra.

El resultado es que cualquier variación en la fluorescencia UV puede ser directamente atribuida a los cambios de concentración de SO₂ en la muestra de gas.¹⁰

¹⁰ Manual. *Model 100E UV Fluorescence SO₂ Analyzer*. Teledyne Advanced Pollution Instrumentation. Revisión B3, Carroll Park Drive, San Diego CA 32121-5201, Estados Unidos 2006. p. 172-177.

2.5. Índice de calidad del aire (ICA)

Es un número adimensional que indica qué tan buena es la calidad del aire para determinado contaminante, en la región donde se encuentra la estación de monitoreo.

Este índice puede tener valores de entre 0 y 500, siendo 0 el valor correspondiente a un aire completamente libre del contaminante y 500 el valor más alto que se puede alcanzar. Un valor por debajo de 100 se considera aceptable para la salud, mientras que un valor por encima de 101 implica concentraciones que comienzan a ser perjudiciales para algunos o todos los grupos de la población.

El índice categoriza la calidad del aire en varias escalas que van desde buena hasta peligrosa.

Se puede calcular el índice de calidad del aire, ICA, utilizando el dato de concentración del contaminante, los puntos superiores e inferiores de los rangos de concentración correspondientes a los distintos ICA y la ecuación del cálculo del índice de calidad del aire.

2.5.1. Dato de concentración del contaminante

Al hablar de dato de concentración del contaminante en el cálculo del ICA se trata del valor más grande o valor máximo de los 24 datos de concentración de un día calendario (un valor por cada hora del día).

El dato que se reporta en cada una de las 24 horas del día es la concentración promedio a lo largo de esa hora —concentración horaria— o bien

el promedio o media móvil de 8 o 24 horas, dependiendo del contaminante. A esto se le llama promedio del intervalo.

En el caso del dióxido de nitrógeno se toma directamente la concentración horaria, al cual se le llama promedio del intervalo de 1 hora.

Para el monóxido de carbono y el ozono se utiliza un promedio o media móvil de 8 horas (la concentración horaria promediada con las 7 concentraciones horarias anteriores) llamado promedio del intervalo de 8 horas. Se utilizan medias móviles en el cálculo de las inmisiones de estos contaminante para las partículas menores a diez micras y el dióxido de azufre se utiliza un promedio o media móvil de 24 horas, llamado promedio de del intervalo 24 horas.

La concentración de un contaminante se divide en rangos a los cuales se les llama rangos de concentración. Cada uno de estos de concentración corresponde a un rango de valores del ICA, los cuales a su vez, definen distintas categorías. Los distintos rangos de concentración, los rangos de ICA y las categorías, se pueden ver en la tabla II.

Tabla II. Rangos de concentración para el cálculo del ICA

Rangos de concentración							ICA	Calidad del Aire
O ₃ (ppm) 8-horas	O ₃ (ppm) 1-horas	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	NO ₂ (ppb)		
0,000 – 0,059	-	0 – 54	0.0 – 15,4	0,0 – 4,4	0,000 – 0,034	0-53	0 - 50	Buena
0,060 – 0,075	-	55 – 154	15,5 – 40,4	4,5 – 9,4	0,036 – 0,075	54-100	51 - 100	Moderada
0,076 – 0,095	0,125 – 0,164	155-254	40,5 – 65,4	9,5 – 12,4	0,076 – 0,185	101-360	101 - 150	No saludable para grupos sensibles
0,096 – 0,115	0,165 – 0,204	255 – 354	65,5 – 150,4	12,5 – 15,4	0,186 – 0,304	361-649	151 - 200	Insalubre
0,116 – 0,374	0,205 – 0,404	355 – 424	150,5 – 250,4	15,5 – 30,4	0,305 – 0,604	650 – 1249	201 - 300	Muy insalubre
(³)	0,405 – 0,504	425 - 504	250,5 – 350,4	30,5 – 40,4	0,605 – 0,804	1 250 – 1 649	301 - 400	Peligrosa
(⁰)	0,505 – 0,604	505 - 604	350,5 – 500,4	40,5 – 50,4	0,805 – 1,004	1 650 – 2 049	401 - 500	Peligrosa

Fuente: Guía para el reporte Diario de la Calidad del Aire y del ICA de la EPA. p. 14.

La ecuación que se utiliza para el cálculo del ICA a partir de los datos de la tabla II y teniendo la concentración del contaminante es la siguiente:

Cálculo del índice de calidad del aire

$$I_c = \frac{100}{C_c} \left(\frac{C - R_{inf}}{R_{sup} - R_{inf}} \right)$$

Donde:

I_c = índice de calidad del aire para el contaminante

C_c = concentración del contaminante

R_{inf} = valor inferior del rango de concentración dentro del cual queda la concentración del contaminante.

R_{sup} = valor superior del rango de concentración dentro del cual queda la concentración de contaminante.

I_{inf} = índice de calidad del aire inferior.

I_{sup} = límite superior de dicho rango.

2.5.2. Categorías de la calidad del aire

Dependiendo del índice de calidad del aire calculado, se determina en qué rango se encuentra la calidad del aire en ese momento. A continuación las categorías a las que podrían entrar según el ICA:¹¹

Tabla III. **Categoría de la calidad del aire según ICA**

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	<u>Alerta de salud:</u> cualquier persona puede experimentar efectos serios sobre su salud.
301 - 500	Granate	Peligrosa	<u>Advertencia de Condición de Emergencia:</u> La salud de la población entera está en riesgo de ser afectada.

Fuente: INSIVUMEH, boletines diarios de calidad del aire.

¹¹ INSIVUMEH, *Boletines de Calidad del aire*. <http://www.insivumeh.gob.gt:8080/calidadaire>. Consulta: 30 de julio de 2013.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Para llevar a cabo el cumplimiento de los objetivos propuestos, se necesitarán de las siguientes variables para cada punto geográfico (Guatemala, Escuintla, Quetzaltenango y Puerto Barrios)

3.1.1. Variables de medición

Son los datos de concentración que se obtienen de la medición de los equipos analizadores de calidad del aire, los cuales son: analizador de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, ozono, partículas menores a 10 micras y dióxido de azufre.

Tabla IV. **Determinación de las variables de medición**

No.	Variable	Dimensional	Factor Potencial de Diseño	
			Constantes	Variables
Análisis del Proceso				
1	Concentración de CO	ppm		x
2	Concentración de NO ₂	ppb		x
3	Concentración de O ₃	ppb		x
4	Concentración de PM ₁₀	µg/m ³		x
5	Concentración de SO ₂	ppb		x
6	Tiempo de Análisis	h	x	

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Variable dependiente

Se le denomina dependiente porque su valor numérico no depende de una simple medición sino depende de otras variables, para el caso del índice de calidad del aire, depende del dato obtenido por los equipos de monitoreo de calidad del aire y posteriormente calcular el dato.

Tabla V. **Determinación de la variable dependiente**

No.	Variable	Dimensional	Factor Potencial de Diseño	
			Constantes	Variables
Análisis del Proceso				
1	Índice de Calidad del Aire (ICA)	adimensional		x

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

- Área de investigación: medio ambiente.
- Línea de investigación: calidad del aire.
- Proceso: determinación y modelamiento del índice de calidad del aire.
- Ubicación:
 - Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) 7 av. 14-57 zona 13, ciudad de Guatemala.

- Estación Radio Sonda, 24 calle 10-80 colonia Aurora 2, zona 13, ciudad de Guatemala

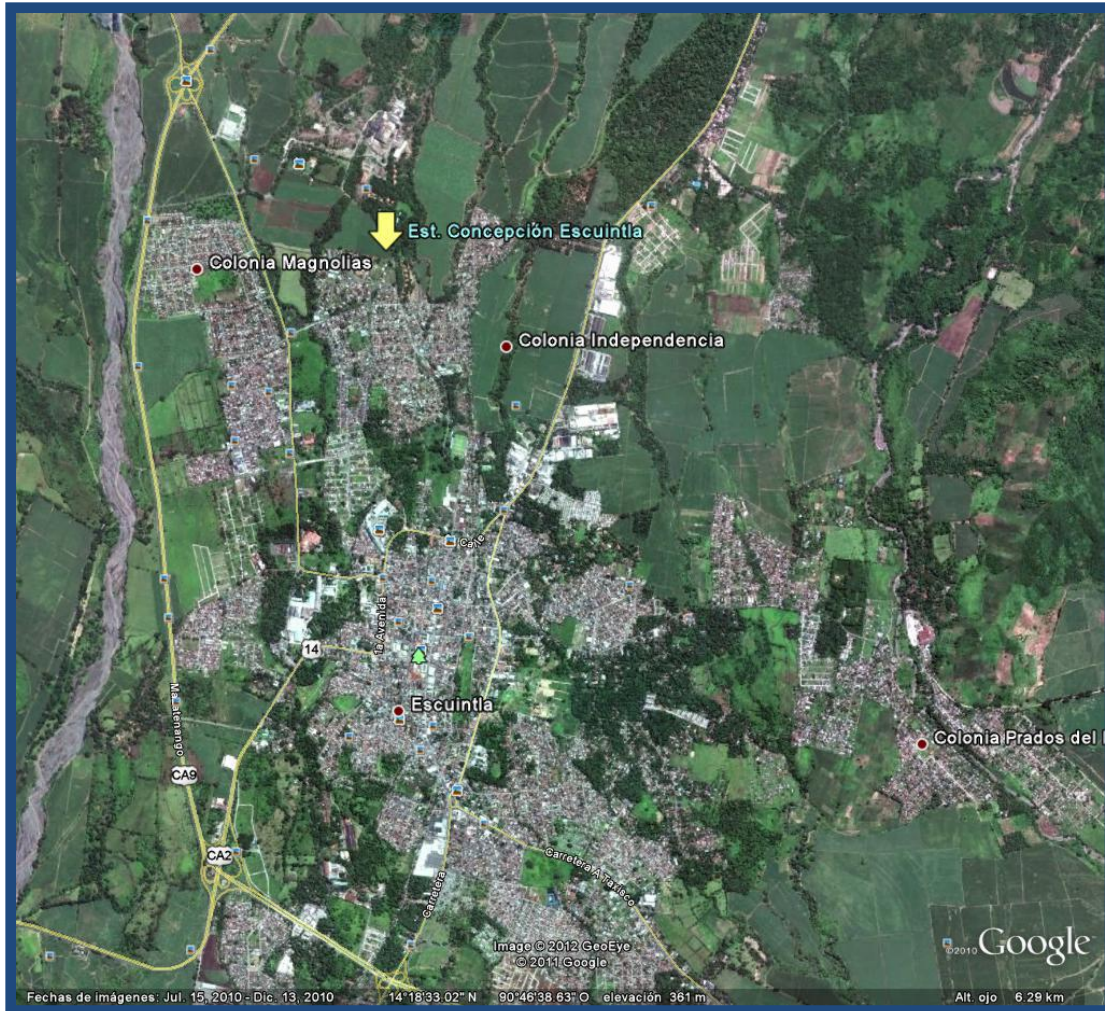
Figura 11. Ubicación estación Guatemala



Fuente: Google Earth. Consulta: 03 de agosto de 2013.

- Estación Concepción Escuintla, finca Concepción zona 2, Escuintla.

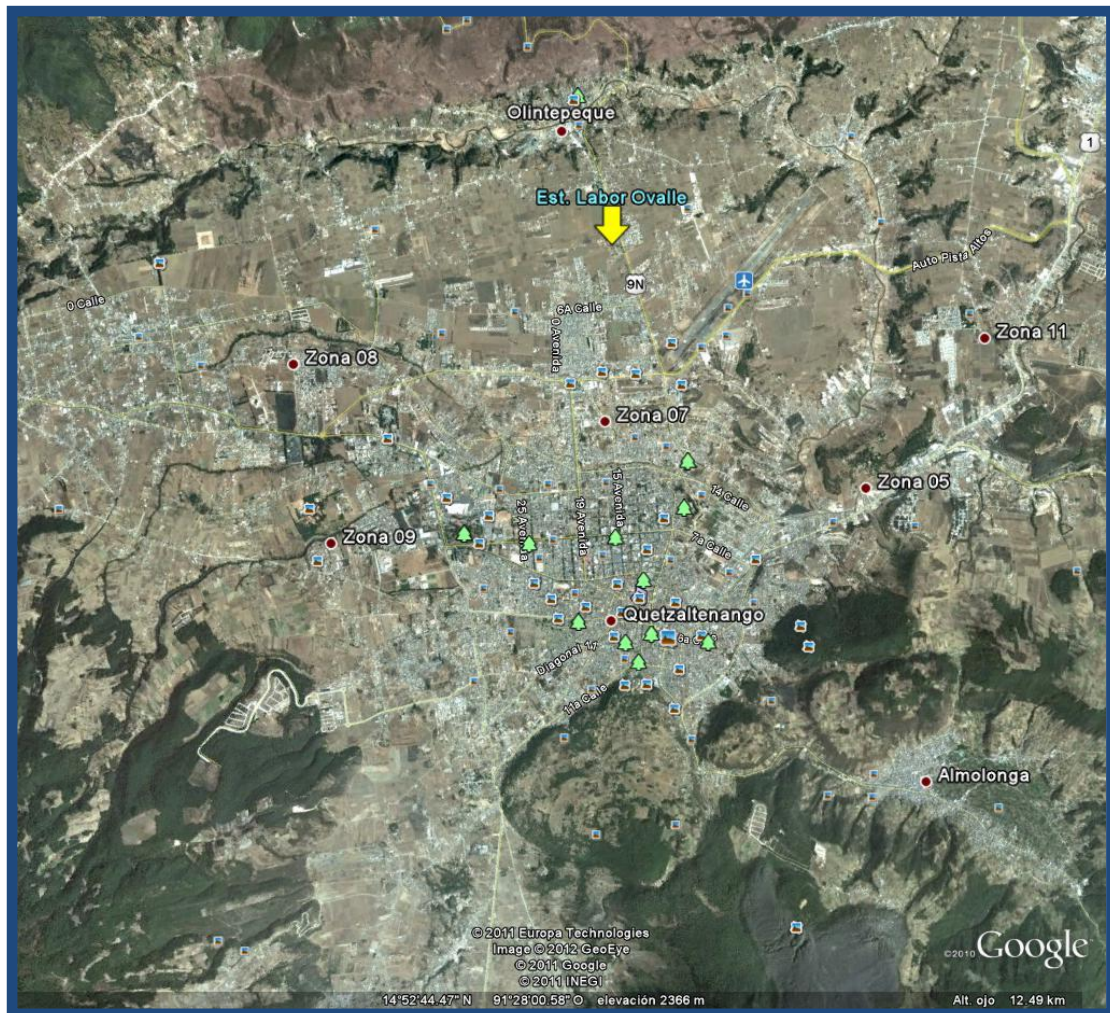
Figura 12. Ubicación estación Escuintla



Fuente: Google Earth. Consulta: 03 de agosto de 2013.

- Estación Labor Ovalle, Km 13,5 carretera a Olinstepeque, finca Labor Ovalle apartado No. 7, Olinstepeque, Quetzaltenango.

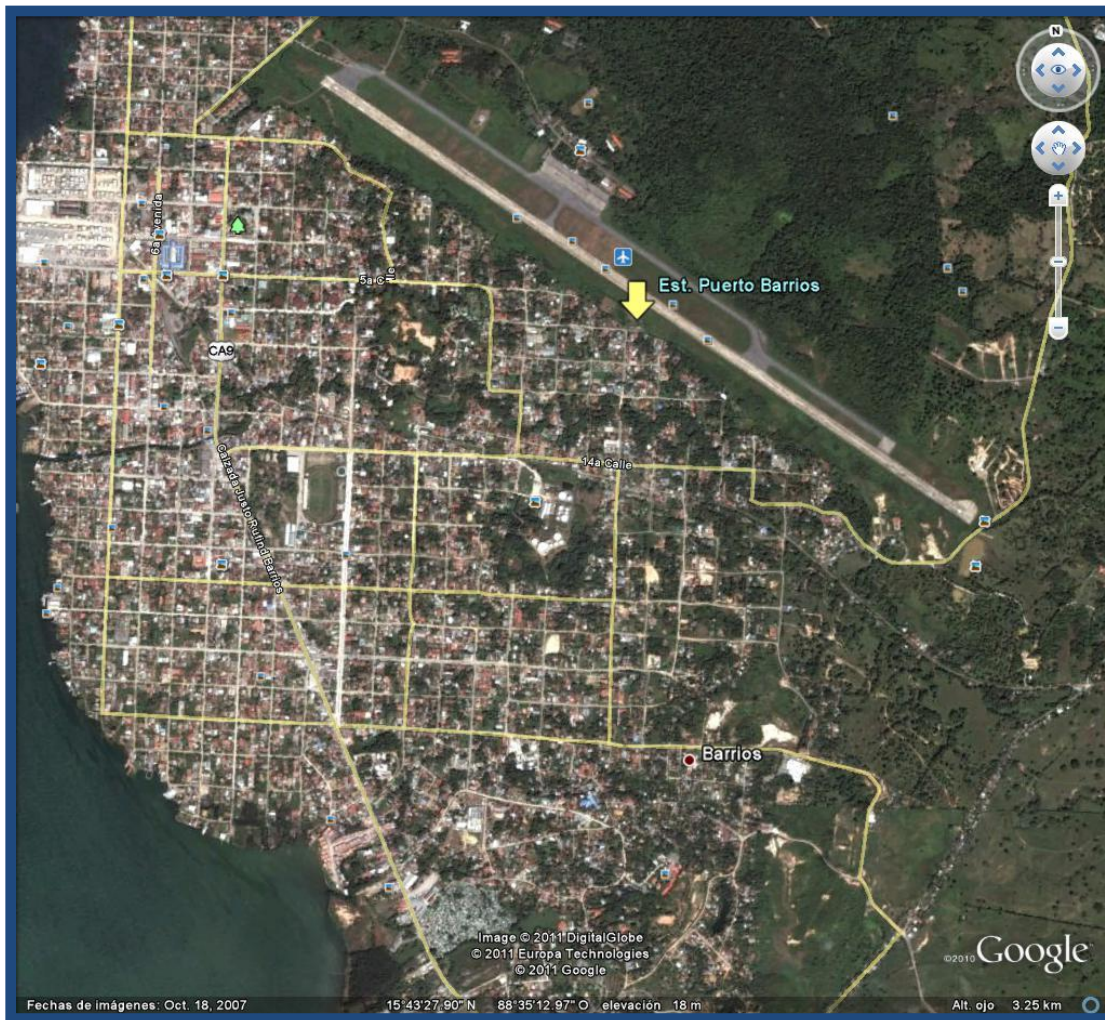
Figura 13. Ubicación estación Quetzaltenango



Fuente: Google Earth. Consulta: 03 de agosto de 2013.

- Estación Puerto Barrios, 10 calle y 20 avenida barrio La Esperanza, Puerto Barrios, Izabal.

Figura 14. **Ubicación estación Puerto Barrios**



Fuente: Google Earth. Consulta: 03 de agosto de 2013.

3.3. Recurso humano disponible

- Investigador: Samuel Colop
- Asesor: Ing. Zenón Much Santos

3.4. Recursos materiales disponibles

Para realizar el proyecto es necesario contar con los equipos adecuados para la obtención de los datos a analizar, a fin de que sean confiables y lo más apegado a la realidad.

3.4.1. Equipo de medición

- Equipo TAPI M 100E (Equipo monitor de dióxido de azufre).
- Equipo TAPI M200E (Equipo monitor de óxidos de nitrógeno).
- Equipo TAPI M300E (Equipo monitor de monóxido de carbono).
- Equipo TAPI M400E (Equipo monitor de ozono).
- Equipo MetOne BAM 1020 (Equipo monitor de partículas suspendidas).
- Filtros de entrada de muestra para equipos TAPI.
- Filtro tape para equipo monitor de partículas.

3.4.2. Equipo auxiliar

- Equipo TAPI M701 (generador de aire cero para calibrar)
- Equipo TAPI M700E (calibrador general)
- Cilindros con mezcla de gases SPAN (para calibración)

- Datta Logger (ordenadora de los datos y encargada de las funciones)
- Computadora
- Programas para modelamiento
- Calibrador de BAM1020 DeltaCal

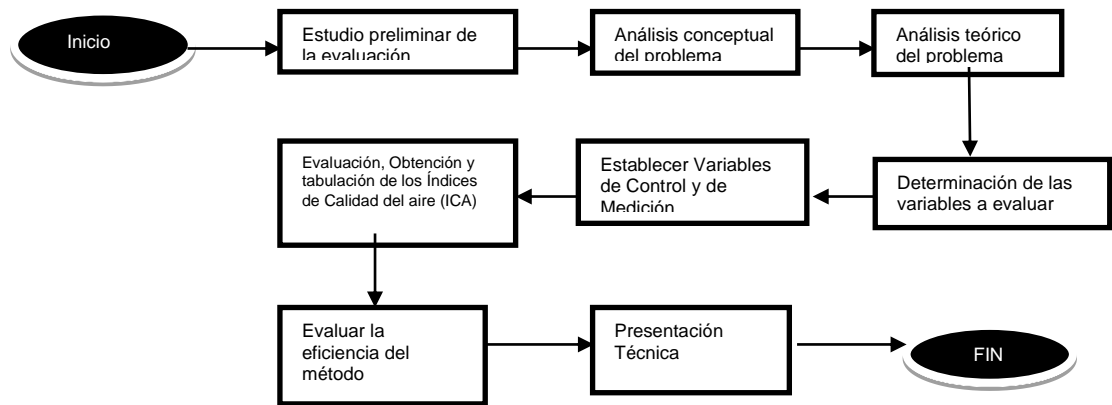
3.5. Técnica cualitativa

La investigación será desarrollada utilizando técnicas cualitativas debido a la naturaleza y tendencia de los datos del tema de interés, para ello se utilizarán las normas establecidas por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), cualquier parámetro cuantitativo adicional servirá como referencia a la elaboración de determinada interpretación.

3.5.1. Diseño preliminar

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, es necesario tener en claro los pasos a seguir, estructurarlos con el fin que se detallen de una manera fácil y clara.

Figura 15. Diseño preliminar



Fuente: elaboración propia.

3.5.2. Índices de calidad del aire: método

Para la obtención de los índices de calidad del aire diarios se utilizará la metodología de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) que se describe a continuación:

En la tabla II se muestran los rangos de las concentraciones las unidades en que se deben medir, por contaminante, y también los rangos en que estos se categorizan.

Tabla VI. Rangos de concentración para el cálculo del ICA

Rangos de concentración							ICA	Calidad del Aire
O ₃ (ppm) 8-horas	O ₃ (ppm) 1-horas	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	NO ₂ (ppb)		
0.000 - 0.059	-	0 - 54	0.0 - 15.4	0.0 - 4.4	0.000 - 0.034	0-53	0 - 50	Buena
0.060 - 0.075	-	55 - 154	15.5 - 40.4	4.5 - 9.4	0.036 - 0.075	54-100	51 - 100	Moderada
0.076 - 0.095	0.125 - 0.164	155-254	40.5 - 65.4	9.5 - 12.4	0.076 - 0.185	101-360	101 - 150	No saludable para grupos sensibles
0.096 - 0.115	0.165 - 0.204	255 - 354	65.5 - 150.4	12.5 - 15.4	0.186 - 0.304	361-649	151 - 200	Insalubre
0.116 - 0.374	0.205 - 0.404	355 - 424	150.5 - 250.4	15.5 - 30.4	0.305 - 0.604	650 - 1249	201 - 300	Muy insalubre
(³)	0.405 - 0.504	425 - 504	250.5 - 350.4	30.5 - 40.4	0.605 - 0.804	1250 - 1649	301 - 400	Peligrosa
()	0.505 - 0.604	505 - 604	350.5 - 500.4	40.5 - 50.4	0.805 - 1.004	1650 - 2049	401 - 500	Peligrosa

Fuente: Guía para el reporte diario de la calidad del aire y del ICA de la EPA. p. 14.

La siguiente ecuación muestra la forma en que se calcula el índice de calidad del aire utilizando los datos de la tabla II.

Cálculo del índice de calidad del aire

$$I_c = \frac{I_{\text{sup}} - I_{\text{inf}}}{R_{\text{sup}} - R_{\text{inf}}} (C_c - R_{\text{inf}}) + I_{\text{inf}}$$

Donde:

I_c = índice de calidad del aire para el contaminante.

C_c = concentración del contaminante.

R_{inf} = valor inferior del rango de concentración dentro del cual queda la concentración del contaminante.

R_{sup} = valor superior del rango de concentración dentro del cual queda la concentración de contaminante.

I_{inf} = índice de calidad del aire inferior.
 I_{sup} = límite superior de dicho rango.

Ejemplo: se obtuvo un valor de 103 microgramos por metro cúbico de partículas menores a 10 micras (PM10) según el equipo monitor BAM1020, de un promedio de 24 horas como lo establece la norma, utilizando la tabla II se sustituyen los datos en la ecuación anterior.

$$I_c = \frac{100 - 51}{154 - 55} (103 - 55) + 51$$
$$I_c = 75$$

Por lo tanto, a una concentración de 103 microgramos por metro cúbico le corresponde un ICA de 75, este ICA se encuentra en el rango moderado, se concluye que la calidad del aire se encuentra moderado, de este modo se determinan todos los índices de calidad del aire dependiendo del contaminante crítico.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

La información que se encuentra publicada en los boletines diarios de calidad del aire del INSIVUMEH en su página web, se encuentra muy dispersa para el análisis que se realizará, su recolección y ordenamiento se realizará de la siguiente manera:

3.6.1. Elección del diseño experimental

Para la investigación se debe elegir el diseño experimental adecuado para obtener los resultados esperados con un margen de error mínimo para que sea una investigación fiable.

3.6.1.1. Diseño de tratamientos

Los tratamientos que se utilizarán serán los sugeridos por las normas EPA y por el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, siendo las variables las concentraciones de los contaminantes presentes en el aire desde abril del 2010, para las estaciones de Guatemala, Quetzaltenango y Puerto Barrios y desde abril del 2011 para la estación Escuintla.

3.6.1.2. Muestreo

Para la obtención de los índices de calidad del aire de cada estación, se revisarán y se clasificarán los índices de calidad del aire críticos que se encuentran publicados en los boletines diarios de calidad del aire en la página web del INSIVUMEH, estos índices críticos son los que determinan el estado de la calidad del aire y depende directamente de la concentración del contaminante (vea tablas No. II y III).

3.6.1.3. Diseño de control de error

Los datos que se publican en los boletines de calidad del aire son validados previamente por un técnico de calidad del aire de la institución a fin de evitar dar falsas alarmas al público por fallas de funcionamiento, comunicación o actividades que se realizan en las cercanías de las estaciones y que pueden provocar un incremento de concentración debido a la presencia de una emisión de contaminación, siendo esta una lectura no valida puesto que la calidad del aire se basa en la medición de inmisiones y no de emisiones de contaminantes. Por lo tanto, los datos obtenidos para la realización del trabajo de investigación son válidos, sin embargo, se revisará y se dará seguimiento a cualquier dato que pueda considerarse como anómalo y que pueda afectar el

comportamiento del índice de calidad del aire, a fin de crear un modelo de ICA apegado a la realidad y sobre todo, confiable.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Después de realizar la recolección y el ordenamiento de la información es necesario condensarla e ingresarla al programa que se utilizará para su análisis y procesamiento.

3.7.1. Tabulación de la información

Después de haber revisado los boletines de calidad del aire en la página web de la institución, se extraerán los datos de los índices críticos de la siguiente manera:

Tabla VII. **Tabulación de la información por estación**

No.	Fecha	Estación	Contaminante Crítico (CC)	Concentración del CC	ICA del CC
1	DD/MM/AA	GT/ES/QZ/PB	CO/NO ₂ /O ₃ /PM ₁₀ /SO ₂	ppb, ppm, ug/m ³	#
2	DD/MM/AA	GT/ES/QZ/PB	CO/NO ₂ /O ₃ /PM ₁₀ /SO ₃	ppb, ppm, ug/m ³	#
3	DD/MM/AA	GT/ES/QZ/PB	CO/NO ₂ /O ₃ /PM ₁₀ /SO ₄	ppb, ppm, ug/m ³	#
4	DD/MM/AA	GT/ES/QZ/PB	CO/NO ₂ /O ₃ /PM ₁₀ /SO ₅	ppb, ppm, ug/m ³	#

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los índices de calidad del aire críticos por estación y por día, se tabularán por año de la siguiente manera:

Tabla VIII. **Tabulación anual del ICA por estación**

Estación: GT,ES,QZ,IZ													
AÑO:201X													
Enero							Julio						
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	22	23	24	25	26	27	28
29	30	31					29	30	31				
Febrero							Agosto						
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	22	23	24	25	26	27	28
							29	30	31				
Marzo							Septiembre						
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	22	23	24	25	26	27	28
29	30	31					29	30					
Abril							Octubre						
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	22	23	24	25	26	27	28
29	30						29	30	31				
Mayo							Noviembre						
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	22	23	24	25	26	27	28
29	30	31					29	30					
Junio							Diciembre						
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	22	23	24	25	26	27	28
29	30						29	30	31				

Fuente: elaboración propia.

En la tabla VII se colocará el ICA del contaminante crítico que corresponda al día y mes en turno. También es importante recalcar, que se utilizará una tabla de estas para cada año y para cada estación.

3.7.2. Ordenamiento y procesamiento de la información

Para el ordenamiento de toda la información tabulada, se colocarán por años en forma ascendente y por estación, dependiendo de la ubicación, de la más cercana a la ciudad a la más lejana, obteniendo un orden como el de la tabla VIII.

Tabla IX. **Ordenamiento de los datos tabulados**

Año	Estación
2010	Radio Sonda (Guatemala)
2011	Radio Sonda (Guatemala)
2012	Radio Sonda (Guatemala)
2013	Radio Sonda (Guatemala)
2010	Concepción (Escuintla)
2011	Concepción (Escuintla)
2012	Concepción (Escuintla)
2013	Concepción (Escuintla)
2010	Labor Ovalle (Quetzaltenango)
2011	Labor Ovalle (Quetzaltenango)
2012	Labor Ovalle (Quetzaltenango)
2013	Labor Ovalle (Quetzaltenango)
2010	Puerto Barrios (Izabal)
2011	Puerto Barrios (Izabal)
2012	Puerto Barrios (Izabal)
2013	Puerto Barrios (Izabal)

Fuente: elaboración propia.

De este modo se comenzará con el 2010 de la estación Radio Sonda ubicada en la ciudad de Guatemala y se finalizará con el 2013 hasta el mes de junio de la estación ubicada en Puerto Barrios, Izabal.

Al tener todos los datos tabulados y ordenados, se procederá a realizar el procesamiento de los mismos, se utilizará el programa Microsoft Excel 2007 para realizar una gráfica de los índices de calidad del aire en función del tiempo y de este modo determinar la tendencia de los índices de calidad del aire en cada región a lo largo de los tres años que lleva en funcionamiento las estaciones de Guatemala, Quetzaltenango e Izabal y los dos que lleva la estación de Escuintla, así mismo se pretende obtener una ecuación que sea válida para el año siguiente (2014) que se ajuste a los datos que ya se conocen y así poder extrapolar cualquier índice de calidad del aire para cualquier época del año.

Al obtener la tendencia de los índices de calidad del aire se puede comprobar la hipótesis planteada al inicio del trabajo de graduación.

3.8. Análisis estadístico

Debido que es un trabajo puramente estadístico, los temas de estadística descriptiva que se utilizará son muy importantes en la obtención de los resultados esperados.

3.8.1. Dato promedio estadístico

El promedio (\bar{a}), permitirá obtener un dato representativo para cada variable en cada medición, de esta forma se tomarán en cuenta las posibles variaciones aleatorias junto con la desviación estándar:

$$\bar{a} = \frac{\sum_i^n a_i}{n} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

Donde:

- \bar{a} = valor promedio
- a_i = valor i
- n = número de datos

3.8.2. Desviación estándar

La desviación estándar (S_a), permitirá cuantificar la dispersión de los valores para una misma medición respecto al valor promedio, lo cual representará el error aleatorio causado por diversos factores:

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_i^n |\bar{a} - a_i|}{n - 1}}$$

Donde:

- \bar{a} = valor promedio
- a_i = valor i
- n = número de datos
- S_a = desviación estándar de la variable a

3.8.3. Incertidumbre absoluta

El error por incertidumbre permitirá determinar la utilidad del resultado final, evaluar la confianza que se puede tener en una decisión basada en el resultado y comparar resultados de mediciones. Para cualquier variable:

$$a_x = f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$$

Donde a_n es la n -ésima variable independiente; su incertidumbre está dada por la siguiente ecuación:

$$\delta a_x = \delta f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\delta(f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n))}{\delta a_x} \right| \times \delta a_i$$

Donde

a_i = i -ésima

Δa_i = es la i -ésima incertidumbre de la n -ésima variable de la función a_x .

3.8.4. Error porcentual de incertidumbre

Una vez determinado el error por incertidumbre de cada resultado, es posible analizar proporcionalmente el aporte de cada variable de las cuales depende, con el fin de rastrear las posibles causas de dicho error. De este modo se establece el porcentaje de incertidumbre aportado por cada variable de la siguiente manera:

$$\% \delta a_k = \frac{\delta(f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)) \cdot \delta a_k}{\sum_{i=1}^n \left| \frac{\delta(f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n))}{\delta a_i} \right| \cdot \delta a_i} \cdot 100\%$$

Donde:

a_k = es una de las variables dependientes que afectan a la variable

3.8.5. Análisis de varianza

El análisis de varianza que se pretende realizar, permitirá determinar si el error sistemático en los datos de cada variable, pueden atribuirse a factores reales y comprobables, o pueden considerarse errores aleatorios, al relacionarlas entre sí. Se utilizará de dos maneras:

- En un solo sentido: cuando se analiza la variación de una variable de control y la dispersión de cada dato respecto a un promedio.
- En dos o más sentidos: cuando se analiza la variación de dos o más variables y su efecto al relacionarlas mediante un modelo.

3.8.6. Modelamiento estadístico de datos

Un modelo estadístico es una ecuación matemática que reproduce los fenómenos que se observaron de la forma más exacta posible. Para ello se tienen en cuenta los datos suministrados y la influencia que el azar tiene en estas observaciones.

El modelo lineal solo es válido cuando los puntos del gráfico están distribuidos alrededor de una recta. Cuando se distribuyen en forma de herradura, el coeficiente de correlación es casi cero, indicando que la recta no es la mejor opción. Si se utiliza un modelo lineal, se llegarán a la conclusión errónea de que el número de casos de gripe no varía con el número de habitantes. En estos casos es necesario recurrir a modelos estadísticos más complejos para estudiar la relación entre ambas variables.

3.8.7. Interpolación de datos

La Interpolación de datos consiste en obtener una puntuación o un dato dentro de un intervalo en donde se conocen los extremos. Este dato se encuentra estrictamente dentro de los extremos y el valor dependerá de la ecuación que define la tendencia de esos datos en particular.

3.8.8. Extrapolación de datos

A diferencia de la interpolación, La extrapolación consiste en obtener un dato en particular fuera de los extremos de un intervalo que se conozca, esta puede o no seguir la tendencia de los datos tabulados o conocidos, en la extrapolación se está suponiendo el comportamiento ya conocido a partir de datos conocidos.

3.9. Plan de análisis de los resultados

Al tener los datos ordenados, tabulados y procesados, se utilizarán métodos y modelos para obtener los resultados finales y así comprobar o descartar la hipótesis planteada.

3.9.1. Métodos y modelos

Los resultados serán analizados gráfica, matemática y estadísticamente, de esta manera es posible evaluar el comportamiento del índice de calidad del aire de cada región en función del tiempo, así mismo permite determinar una ecuación que se ajuste a la tendencia de los datos obtenidos y realizar una proyección para el siguiente año.

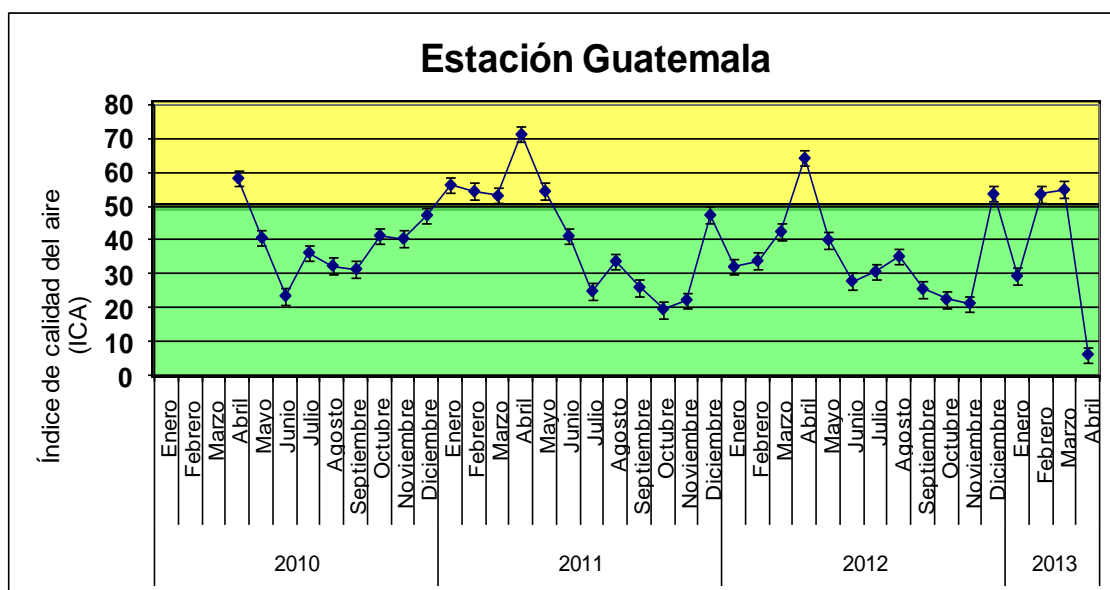
3.9.2. Programas a utilizar para análisis de datos

- Microsoft Excel 2010
- AirVision versión 1.0.5.3

4. RESULTADOS

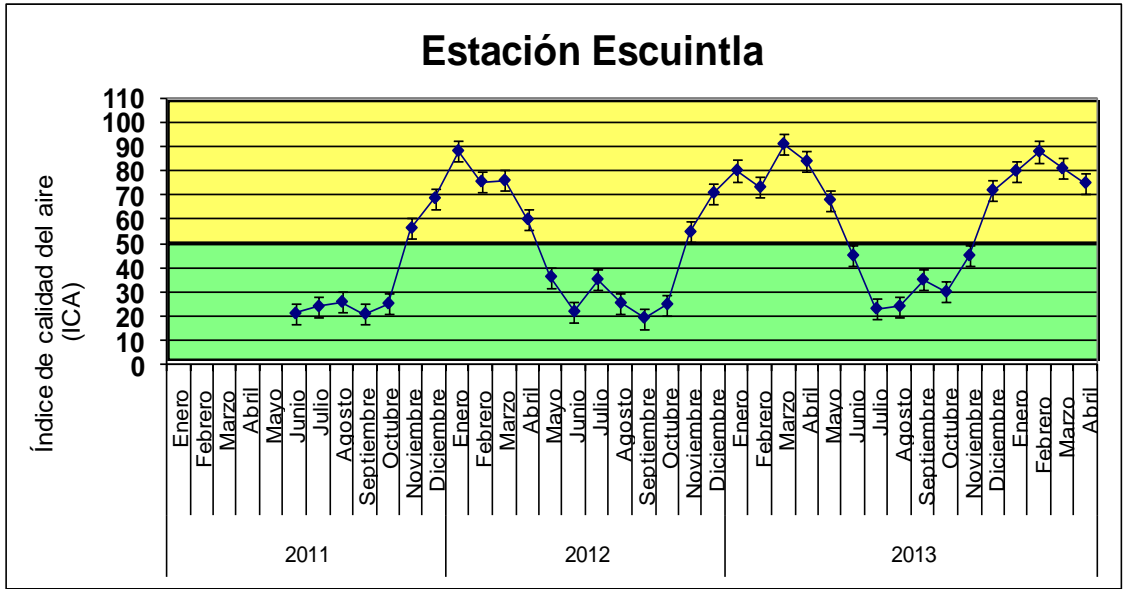
Al realizar el análisis estadístico con los datos obtenidos de los equipos de monitoreo de calidad del aire para las estaciones, se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 16. Índices de calidad del aire de la estación Guatemala



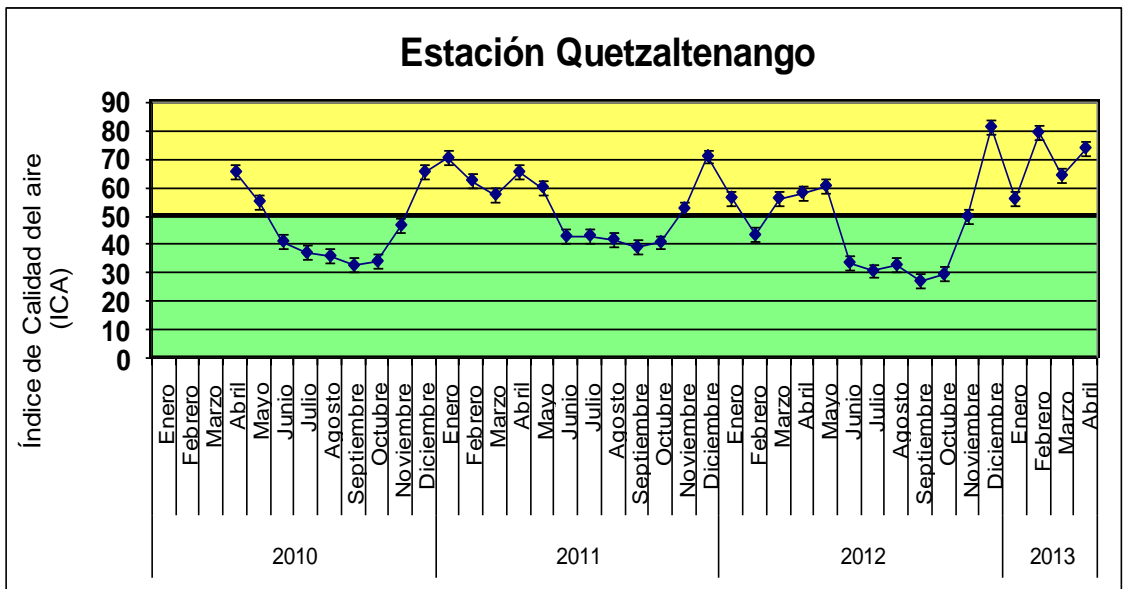
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Índices de calidad del aire de la estación Escuintla



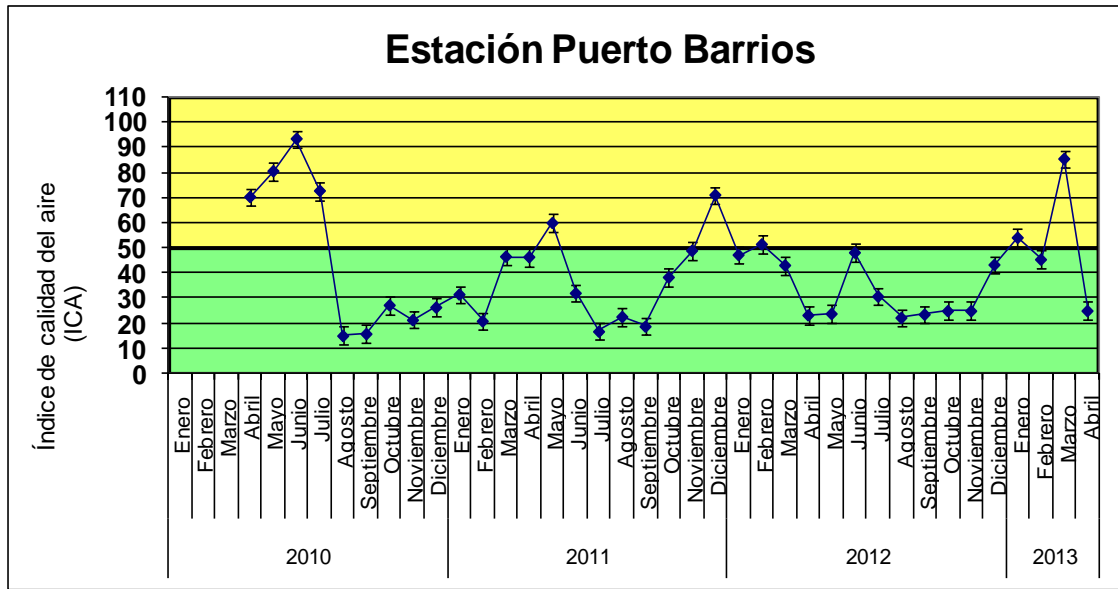
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Índices de calidad del aire de la estación Quetzaltenango



Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Índices de calidad del aire de la estación Puerto Barrios



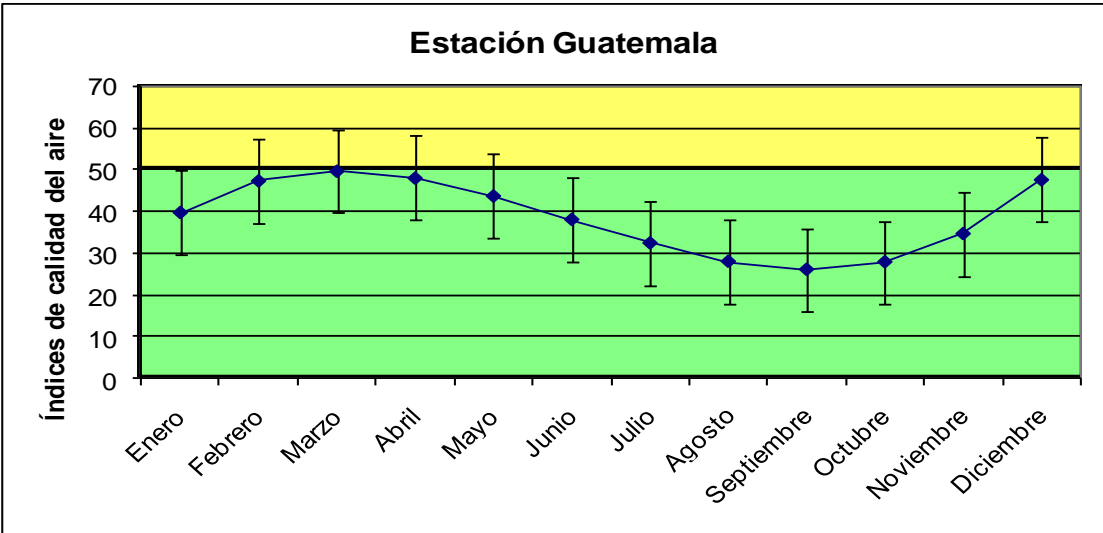
Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Ecuaciones de comportamiento de datos

Estación Guatemala	
$ICA = -0,0007X^4 + 0,2322X^3 - 4,0465X^2 + 18,19X + 25,317$	$R^2 = 0,8559$
Estación Escuintla	
$ICA = -0,0321x^4 + 1,0866x^3 - 10,378x^2 + 23,681x + 68,338$	$R^2 = 0,9234$
Estación Quetzaltenango	
$ICA = 0,0103x^4 + 0,0145x^3 - 2,4267x^2 + 11,057x + 50,918$	$R^2 = 0,9303$
Estación Puerto Barrios	
$ICA = -0,0034x^4 + 0,4508x^3 - 7,717x^2 + 36,48x + 14,04$	$R^2 = 0,9055$

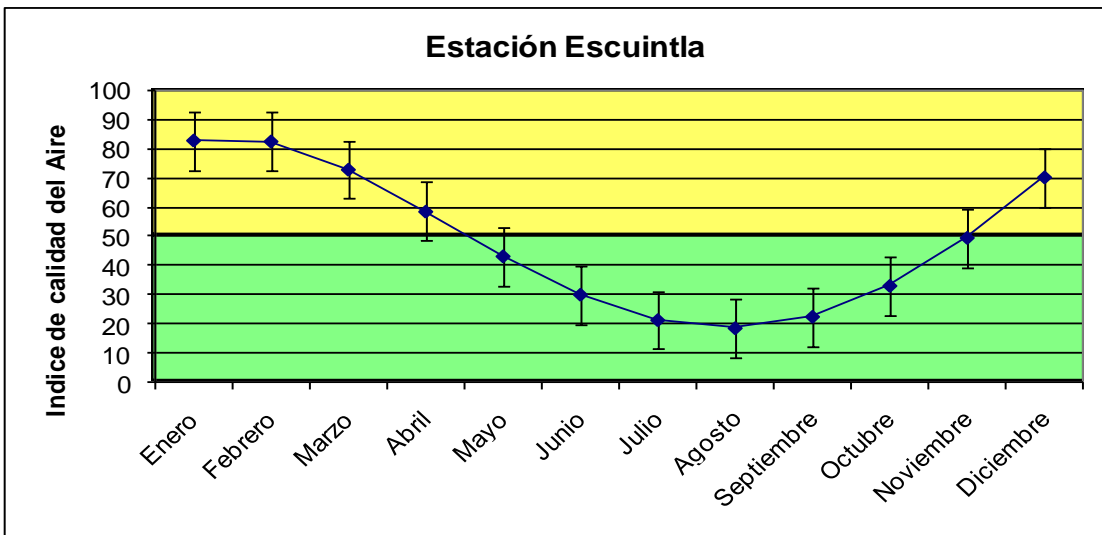
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Proyección para 1 año estación Guatemala**



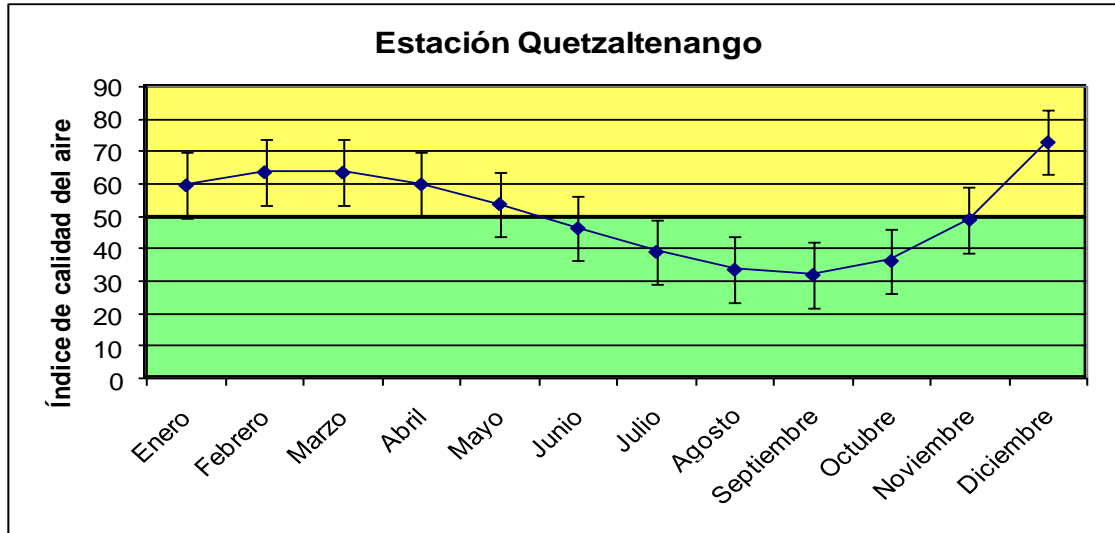
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Proyección para 1 año estación Escuintla**



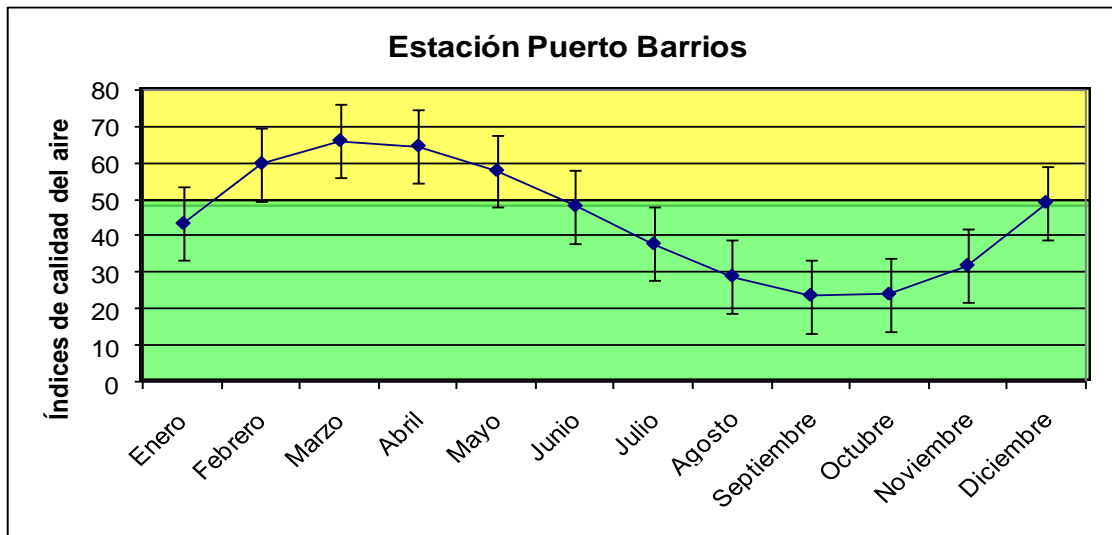
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Proyección para 1 año estación Quetzaltenango**



Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Proyección para 1 año estación Puerto Barrios**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los equipos de monitoreo de la calidad del aire que el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) posee en su red de monitoreo, son equipos automatizados que analizan muestras de aire en tiempo real para determinar la concentración del contaminante utilizando métodos fisicoquímicos.

En cada estación se encuentran 5 equipos que determinan la concentración de los contaminantes los cuales son: dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono y partículas menores a 10 micras, estos datos se almacenan en un *data logger* que, a su vez, los transmite al servidor de la institución, dejándolos almacenados en su base de datos.

Para determinar el índice de calidad del aire, se utiliza el dato de concentración obtenido por los equipos y se calcula según la tabla II y la ecuación correspondiente. El índice que determina la calidad del aire es el dato mas alto de los cinco índices calculados siendo el contaminante responsable el contaminante crítico, dependiendo del valor del dato, este se clasifica según la tabla II, pudiendo ser bueno, moderado, no saludable para grupos sensibles, insalubre, muy insalubre y peligrosa.

El ICA se obtiene diariamente y es diferente para cada estación de monitoreo, obteniendo así 31 o 30 datos por mes, para poder condensar esos datos y tener un dato cualitativo de la calidad del aire en ese mes, se promediaron los datos, obteniendo así un dato por mes, para cada estación.

En las figuras 16, 17, 18 y 19 se muestran la tendencia de los índices de calidad del aire desde su funcionamiento que fue abril del 2010 hasta abril de 2013.

En la figura 16 se presenta la tendencia de los datos de índices de calidad del aire en función del tiempo de la estación Guatemala, claramente se observa que en los meses de enero a junio los índices de calidad del aire se encuentran en el rango de moderado, y el dato más alto se registró en abril del 2011, siendo el índice 71,37 dentro del rango de moderado.

De los 37 datos obtenidos por el promedio de los índices de calidad del aire, calculados a partir de las concentraciones registradas en los equipos de la estación Guatemala, 28 se encuentran dentro del rango de bueno, siendo el 75,67 por ciento de los datos, es decir, el índice de calidad del aire cumple en al menos el 75 por ciento de los datos del período de estudio, dentro del rango de bueno según las Normas de la EPA.

En la figura 17 se presenta la tendencia de los datos de índices de calidad del aire en función del tiempo de la estación Escuintla, para este caso, el índice de calidad del aire aumenta en los meses de noviembre a abril, siendo los meses de zafra, en estos meses se alcanza el ICA más alto, siendo 91,10 en marzo de 2013 estando en los límites superiores del rango de moderado.

De los 37 datos obtenidos por el promedio de los índices de calidad del aire calculados a partir de las concentraciones registradas en los equipos de la estación Escuintla, 17 se encuentran dentro del rango de bueno, siendo el 45,95 por ciento de los datos, por lo tanto, El índice de calidad del aire no cumple en al menos el 75 por ciento de los datos del período de estudio, dentro del rango de bueno según las Normas de la EPA.

En la figura 18 se presenta la tendencia de los datos de índices de calidad del aire en función del tiempo de la estación Quetzaltenango, claramente se observa que en los meses de noviembre a mayo, los índices de calidad del aire se encuentran en el rango de moderado, y el dato más alto se registró en diciembre de 2012, siendo el índice 81,22 dentro del rango de moderado.

De los 37 datos obtenidos por el promedio de los índices de calidad del aire calculados a partir de las concentraciones registradas en los equipos de la estación Quetzaltenango, 18 se encuentran dentro del rango de bueno, siendo el 48,65 por ciento de los datos, es decir, el índice de calidad del aire no cumple en al menos el 75 por ciento de los datos del período de estudio, dentro del rango de bueno según las Normas de la EPA.

En la figura 19 se presenta la tendencia de los datos de índices de calidad del aire en función del tiempo de la estación Puerto Barrios, en este caso, no existe una tendencia tan marcada en donde el ICA se encuentre en rango de moderado durante determinado tiempo, como sucede en las otras estaciones de monitoreo, el dato más alto se registró en junio de 2010, siendo el índice 92,95 dentro del rango de moderado y el más alto de todas las estaciones.

De los 37 datos obtenidos por el promedio de los índices de calidad del aire calculados a partir de las concentraciones registradas en los equipos de la estación Puerto Barrios, 29 se encuentran dentro del rango de bueno, siendo el 78,37 por ciento de los datos, por lo tanto, el índice de calidad del aire cumple en al menos el 75 por ciento de los datos del período de estudio, dentro del rango de bueno según las Normas de la EPA en las estaciones de monitoreo de Guatemala.

Obteniendo la tendencia de los datos, se realizó un análisis con el fin de obtener una ecuación de ajuste a la tendencia de los datos y describa el comportamiento.

La tabla IX muestra las ecuaciones que describen dicha tendencia para cada estación, siendo todas funciones polinomiales de grado 4, siendo la ecuación de la estación Quetzaltenango la que mejor se adecúa con un R^2 de 0,9303.

Utilizando las ecuaciones de descripción de la tendencia de los datos, se determinó el comportamiento del ICA para las cuatro estaciones que se muestran en las figuras 20, 21, 22 y 23 para un año.

CONCLUSIONES

1. El ICA cumple, al menos el 75 por ciento de los datos del período de estudio, dentro del rango de bueno según las Normas de la EPA en las estaciones de monitoreo Guatemala, 75,67 por ciento del período de estudio y Puerto Barrios el 78,37 por ciento del período de estudio.
2. El ICA no cumple, en al menos el 75 por ciento de los datos del período de estudio, dentro del rango de bueno según las Normas de la EPA en las estaciones de monitoreo Escuintla, siendo el 45,95 por ciento del período de estudio y Quetzaltenango, el 48,65 por ciento del período de estudio.
3. Los valores del ICA se encuentran dentro del rango moderado en los meses de época seca y, en el rango de bueno en los meses de época lluviosa en todas las estaciones de monitoreo.
4. El índice de calidad del aire de las estaciones de monitoreo no sobrepasa, el rango de moderado durante el período de estudio por lo tanto la calidad del aire no representó ningún riesgo significativo y alarmante para la salud de la población en general, según las Normas de la EPA.
5. El área de la estación de monitoreo Puerto Barrios presenta una mejor calidad del aire en comparación a las otras áreas de estudio, durante todo el período de monitoreo según los promedios de ICA obtenidos.

6. El área de la estación de monitoreo Escuintla presenta una menor calidad del aire en comparación a las otras áreas de estudio, durante todo el período de monitoreo, según los promedios de ICA obtenidos.

RECOMENDACIONES

1. Mantener actualizado el presente estudio para determinar cambios significativos en el índice de calidad del aire.
2. Continuar y dar seguimiento al programa de monitoreo de la calidad del aire para prevenir y mantener alertada a la población.
3. Utilizar los datos que se obtienen para compararlos con las Normas de la Organización Mundial de la Salud y determinar el estado de la calidad del aire, según los límites establecidos por dichas normas.
4. Cambiar el estudio de monitoreo de partículas menores a 10 micras a monitoreo de partículas menores a 2,5 micras, ya que en países como Estados Unidos y México, en donde existen normas sobre los rangos permitidos de los contaminantes del aire, ha estado tomando relevancia el estudio de las partículas menores a 2,5 micras, porque la exposición prolongada a ellas tiene repercusiones más serias a la salud humana.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALBERT, Lilia A. *Toxicología ambiental*. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. México: 1985. 200 p.
2. CHANG, Raymond. *Fisicoquímica*. 3a ed. México: McGraw-Hill, 2008. 1018 p.
3. *Contaminación con dióxido de azufre*. [en línea] http://ivhhn.org/index.php?option=com_content&view=article&id=144. [Consulta: 25 de julio de 2013].
4. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Boletines de calidad del aire*. [en línea] <http://www.insivumeh.gob.gt:8080/calidadaire/>. [Consulta: del 02 de febrero al 30 de mayo de 2013].
5. Manual, *Model 100E UV Fluorescence SO2 Analyzer*. Teledyne Advanced Pollution Instrumentation Revisión B3, Carroll Park Drive, San Diego CA 32121-5201, Estados Unidos, 2006. 308 p.
6. Manual, *Model 200E Nitrogen Oxides Analyzer Instruction manual*. Teledyne Advanced Pollution Instrumentation, Revisión B3, Carroll Park Drive, San Diego CA 32121-5201, Estados Unidos, 2006. 286 p.

7. Manual, *Model 300E/EM Carbon Monoxide Analyzer*. Teledyne Advanced Pollution Instrumentation, Revisión B3, Carroll Park Drive, San Diego CA 32121-5201, Estados Unidos, 2006. 314 p.
8. Manual, *Model 400E Ozone Analyzer*. Teledyne Advanced Pollution Instrumentation, Revisión B3, Carroll Park Drive, San Diego CA 32121-5201, Estados Unidos, 2006. 322 p.
9. *Modelamiento estadístico*. [en línea] http://www.divestadistica.es/es/que_es_un_modelo_estadistico.html. [Consulta: 30 julio de 2013].
10. MUCH SANTOS, Zenón. *Determinación de los índices de contaminación del aire por la industria en la ciudad Tecún Umán, San Marcos, Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1989. 52 p.
11. *Normas de la agencia de protección ambiental*. [en línea] <http://www.epa.gov/español/aire.html>. [Consulta: 25 de agosto de 2013].
12. OLIVA SOTO, Pablo Ernesto. *Calidad del aire en Guatemala compilación de la información existente*. Trabajo de graduación de Maestría en Docencia Universitaria con especialización en Evaluación Educativa. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Humanidades, 2008. 41 p.

13. PORTILLO JIMÉNEZ, Ruth Eglantina. *Algunas especificaciones técnicas que deben observarse en el manejo de la calidad del aire*. Trabajo de graduación de Ing. Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1997. 82 p.
14. PERRY, R.H.; GREEN, D.W.; MALONEY, J.O. *Manual del ingeniero Químico*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 1997. 5 vol 105 p.
15. SPIEGEL, Murray R. *Estadística*. 2a ed. España: McGraw-Hill, 1991. 556 p.
16. US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Air Quality Index, A guide to Air Quality an your Health*. Washington DC 20460. 2009. 10 p.
17. _____. *Data Quality Assessment: A Reviewer's Guide*. Ed. 2006, Washington DC 20460, 2006. 61 p.
18. _____. *Data Quality Assessment: Statistical Methods for practitioners*. Washington:2006, 20460, 2006. 198 p.
19. _____. *Monóxido de carbono*. [en línea] http://www.epa.gov/iaq/espanol/monoxido_de_carbono.html. [Consulta: 26 de julio de 2013].
20. _____, *Óxidos de nitrógeno*. [en línea] <http://www.epa.gov/air/nitrogenoxides/>. [Consulta: 26 de julio de 2013].

21. _____, *Ozono*. [en línea]
<http://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.ozone>. [Consulta: día 25 de julio de 2013].
22. _____, *Partículas menores a 10 micras*, [en línea]
<http://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.particle>. [Consulta: 25 de julio de 2013].
23. _____. *QA Handbook for Air Pollution Measurement Systems*.
Washington:2006, 20460. 2008. 348 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Promedios de los índices de calidad del aire de la estación Guatemala

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2010				58,35	40,69	23,44	36,26	32,40	31,39	41,32	40,45	47,37
2011	56,35	54,47	53,17	71,38	54,50	41,22	24,87	33,70	25,99	19,50	22,24	47,44
2012	32,07	33,86	42,53	64,31	40,07	27,86	30,67	35,16	25,49	22,46	21,26	53,68
2013	29,36	53,61	54,95	6,05								

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Promedios de los índices de calidad del aire de la estación Escuintla

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2011						21,04	23,96	25,81	20,89	25,14	56,36	68,70
2012	88,25	75,57	76,04	59,95	36,19	21,80	35,15	25,36	19,24	24,81	54,77	70,92
2013	80,21	73,27	91,11	84,1	68,35	45,33	23,44	24,25	35,16	30,14	45,52	72,63
2014	80,33	88,43	81,83	75,33								

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Promedios de los índices de calidad del aire de la estación Quetzaltenango

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2010				65,48	55,12	41,15	37,13	35,98	32,69	34,15	46,76	65,50
2011	70,38	62,51	57,54	65,47	60,13	42,91	43,17	41,84	39,10	40,85	52,66	70,95
2012	56,42	43,38	56,26	58,18	60,58	33,68	30,76	32,87	27,21	29,60	49,92	81,22
2013	55,99	79,32	64,26	73,82								

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Promedios de los índices de calidad del aire de la estación Puerto Barrios

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2010				70,01	80,18	92,95	72,41	15,12	15,89	27,24	21,37	26,36
2011	31,48	20,93	46,45	46,25	59,72	31,99	16,83	22,65	18,82	38,26	48,77	70,76
2012	47,09	51,29	42,99	23,27	23,85	48,00	30,70	22,27	23,57	24,94	24,95	43,18
2013	53,90	45,27	118,04	1,98								

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Tendencia estación Guatemala

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	39,26	47,32	50,21	50,02	45,09	30,84	30,6	33,75	27,62	27,76	27,98	49,49
S	14,86	11,66	6,71	29,80	8,15	9,25	5,69	1,38	3,27	11,83	10,81	3,62

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Tendencia estación Escuintla

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	84,23	74,42	83,57	72,03	52,27	29,39	27,52	25,13	25,1	26,69	52,21	70,79
S	4,611	8,16	7,59	12,22	22,74	13,81	6,61	0,80	8,75	2,98	5,85	1,97

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Tendencia estación Quetzaltenango**

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	60,93	61,74	59,35	65,74	58,61	39,24	37,02	36,89	33	34,86	49,77	72,55
S	8,18	17,98	4,30	6,39	3,02	4,90	6,20	4,55	5,94	5,65	2,95	7,98

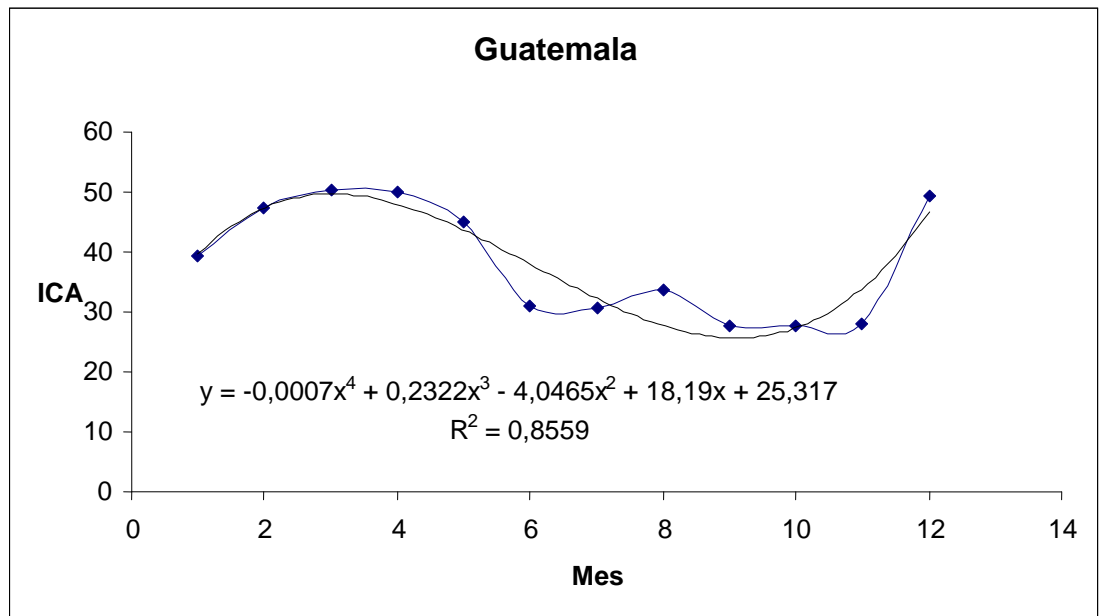
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Tendencia estación Puerto Barrios**

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	44,15	39,16	69,15	35,38	54,58	57,65	39,98	20,01	19,43	30,15	31,69	46,77
S	11,49	16,07	42,36	29,32	28,51	31,61	28,93	4,23	3,87	7,12	14,89	22,41

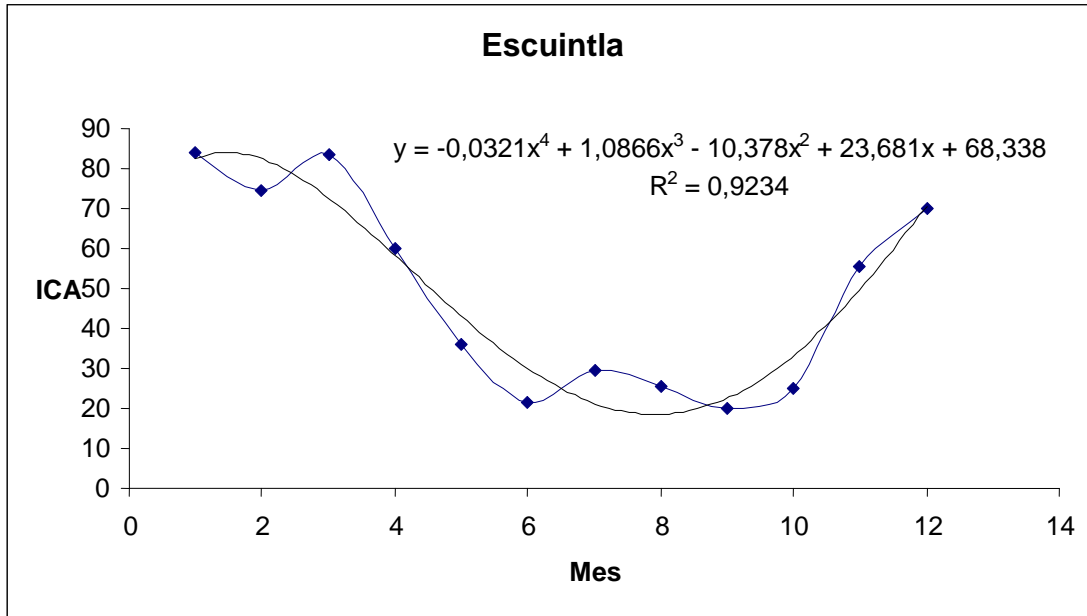
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Tendencia estación Guatemala**



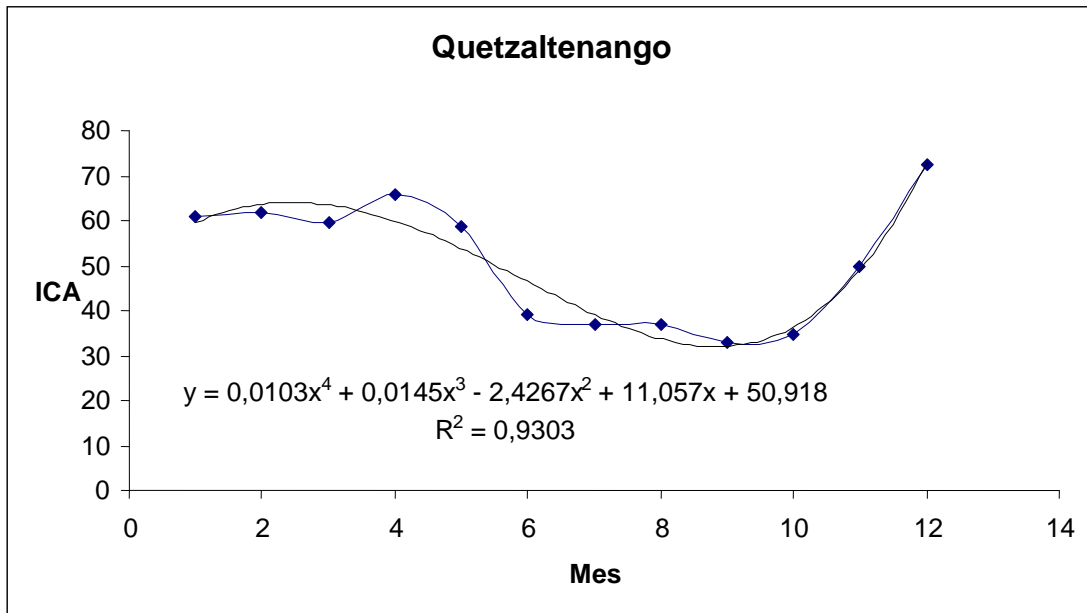
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Tendencia estación Escuintla**



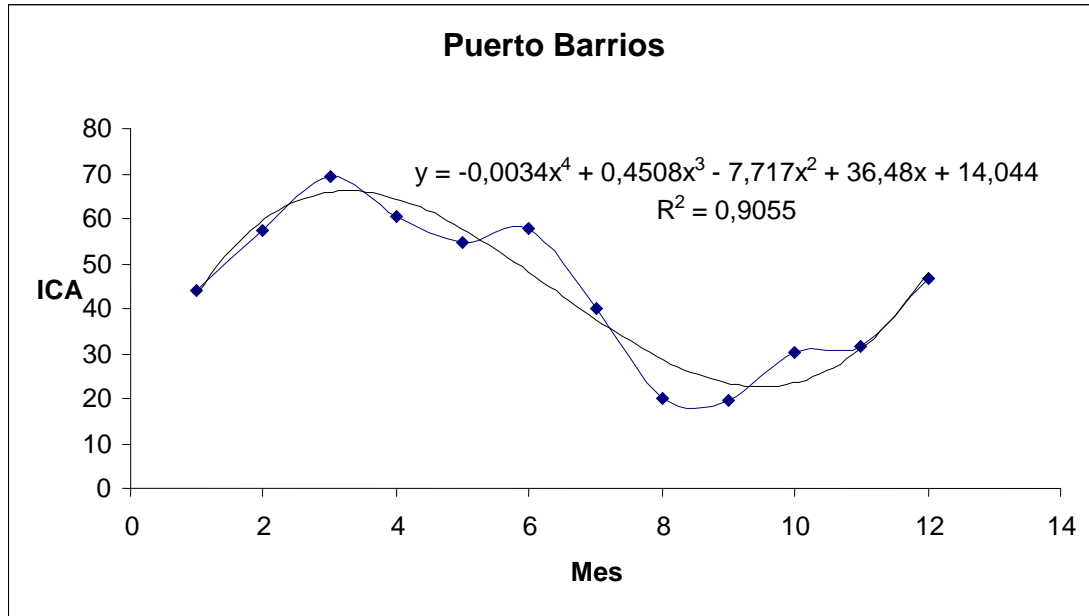
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Tendencia estación Quetzaltenango**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Tendencia estación Puerto Barrios**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Error típico modelamiento estación Guatemala**

Guatemala	
S	E%
9,53	8,75

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Error típico modelamiento estación Escuintla**

Escuintla	
S	E%
25,12	23,08

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Error típico modelamiento estación Quetzaltenango**

Quetzaltenango	
S	E%
13,95	13,73

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Error típico modelamiento estación Puerto Barrios**

Puerto Barrios	
S	E%
16,31	13,42

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Proyección 1 año estación Guatemala**

Guatemala	
1	39,69
2	47,35
3	49,68
4	48,01
5	43,69
6	38,03
7	32,33
8	27,88
9	25,94
10	27,76
11	34,59
12	47,62

Fuente: Elaboración Propia

Apéndice 18. **Proyección 1 año estación Guatemala error típico**

Error típico Guatemala%
7,98

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Proyección 1 año estación Escuintla**

Escuintla	
1	82,70
2	82,37
3	72,72
4	58,34
5	43,06
6	29,92
7	21,21
8	18,45
9	22,37
10	32,95
11	49,38
12	70,10

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Proyección 1 año estación Escuintla error típico**

Error típico Escuintla%
21,79

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. **Proyección 1 año estación Quetzaltenango**

Quetzaltenango	
1	59,57
2	63,61
3	63,47
4	59,88
5	53,79
6	46,38
7	39,11
8	33,68
9	32,02
10	36,32
11	49,02
12	72,79

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. **Proyección 1 año estación Quetzaltenango error típico**

Error típico Quetzaltenango%
13,17

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. **Proyección 1 año estación Puerto Barrios**

Puerto Barrios	
1	43,25
2	59,69
3	65,93
4	64,47
5	57,74
6	48,08
7	37,73
8	28,88
9	23,61
10	23,94
11	31,80
12	49,04

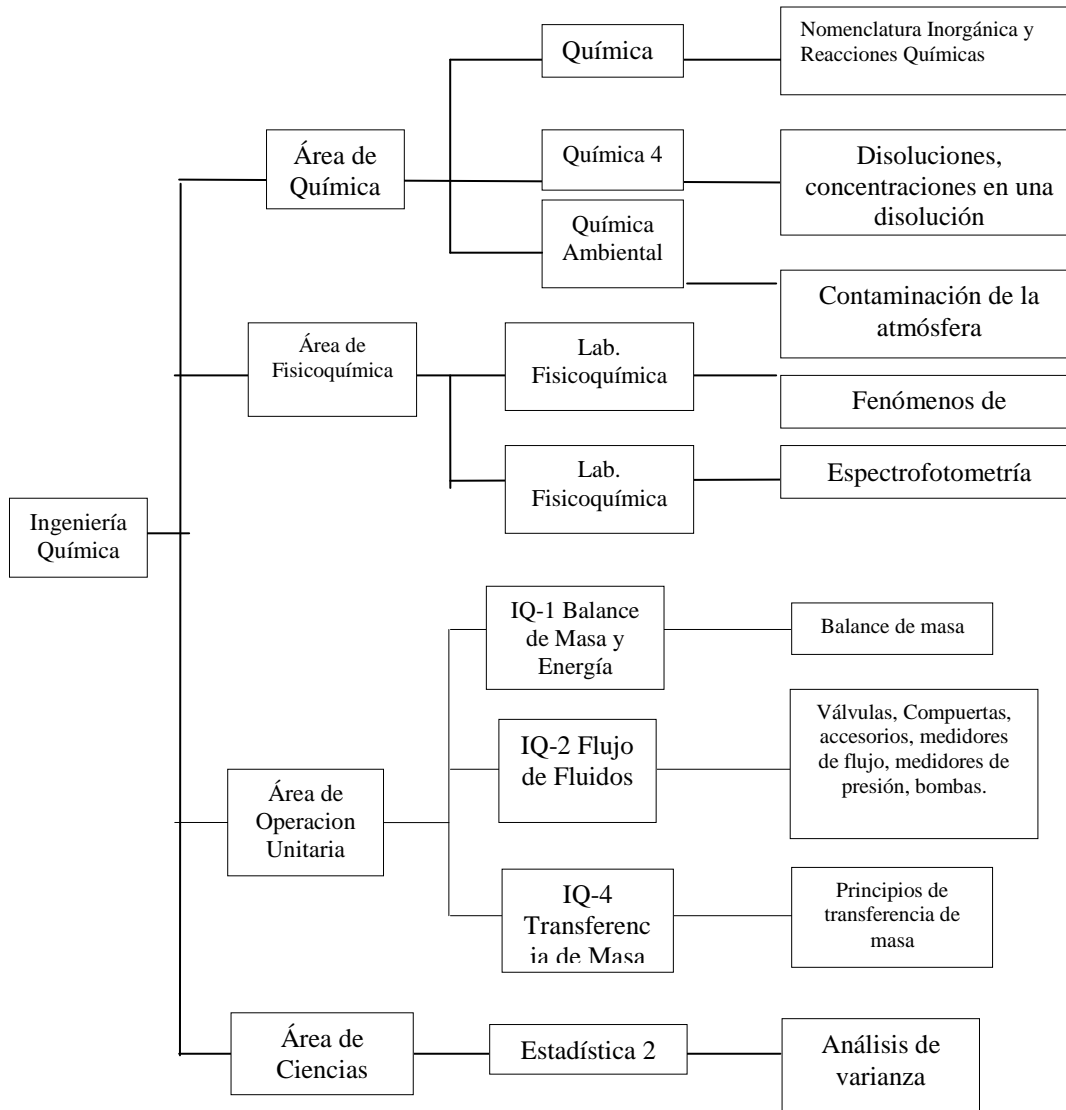
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. **Proyección 1 año estación Puerto Barrios error típico**

Error Puerto Barrios%
12,40

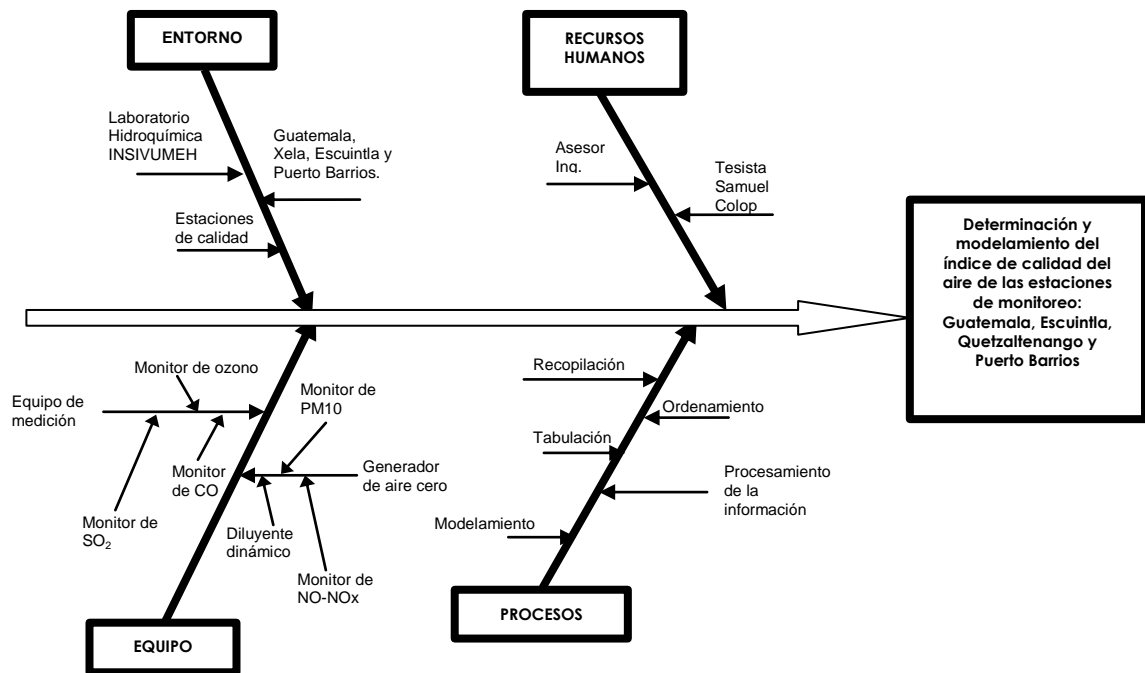
Fuente: elaboración propia

Apéndice 25. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 26. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

