



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos (ERIS)

**CONTAMINACIÓN DE AGUA DE LLUVIA Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD DEL AIRE
POR CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN LA CIUDAD DE
GUATEMALA**

Ing. Christian Edgardo Saravia Solares
Asesorado por el Ing. Joram Matías Gil Larroj

Guatemala, septiembre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONTAMINACIÓN DE AGUA DE LLUVIA Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD DEL AIRE
POR CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN LA CIUDAD DE
GUATEMALA**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)
POR

ING. CHRISTIAN EDGARDO SARAVIA SOLARES
ASESORADO POR EL ING. JORAM MATÍAS GIL LAROJ

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADEMICO DE
**MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN RECURSOS HIDRÁULICOS,
GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de La Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR	MSc. Ing. Joram Matías Gil Laroj
EXAMINADOR	MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes
EXAMINADOR	MSc. Ing. Adán Pocasangre Collazos

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:

CONTAMINACIÓN DE AGUA DE LLUVIA Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD DEL AIRE POR CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha 20 de agosto 2018.

Ing. Christian Edgardo Saravia Solares

Correo electrónico: saraviachristian@gmail.com

Carné No. 201390199



Guatemala, 05 de julio de 2020

MSc, Ing. Elfego Orozco
Coordinador de la Maestría en Recursos Hidráulicos
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería, USAC

Habiendo revisado el documento denominado "**Contaminación de agua de lluvia y su relación con la calidad del aire por concentraciones de material particulado en la Ciudad de Guatemala**", que fuera elaborado por el Ing. **Christian Edgardo Saravia Solares**, como parte de su Estudio Especial, y como requisito para optar al grado académico de Maestro en Recursos Hidráulicos, mediante la presente me permito informarle mi satisfacción con su contenido y por lo tanto, le comunico que dicho documento cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

MSc. Ing. Jofam Matías Gil Laroj
Asesor del Estudio

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hidráulicos
COORDINACIÓN
RECURSOS HIDRÁULICOS

Edificio ERIIS,
Área de prefabricados, C11
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

www.ingenieria-usac.edu.gt

Guatemala, 07 de julio 2020

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería, USAC

Respetuosamente les comunico que he revisado la versión corregida, en mi calidad de Coordinador de la Maestría de Recursos Hidráulicos, del trabajo de Estudio Especial titulado:

**CONTAMINACIÓN DE AGUA DE LLUVIA Y SU RELACIÓN
CON LA CALIDAD DEL AIRE POR CONCENTRACIONES DE
MATERIAL PARTICULADO EN LA CIUDAD DE
GUATEMALA**

presentado por la estudiante,

Ingeniero Christian Edgardo Saravia Solares

Les manifiesto que el estudiante cumplió con los requisitos exigidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio en forma satisfactoria.

Agradeciéndoles la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Elfego Orozco
Coordinador Maestría de Recursos Hidráulicos



El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, M.Sc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque y M.Sc. Ing. Joram Matías Gil Laroj, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; M.Sc. Ing. Elfego Orozco Fuentes y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Jéssica Melgarejo Monterroso, Colegiada No. 27003, al trabajo del estudiante Ing. Christian Edgardo Saravia Solares, titulado: **CONTAMINACIÓN DE AGUA DE LLUVIA Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD DEL AIRE POR CONCENTRACIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los veintiocho días del mes de septiembre de 2020.

IMPRIMASE

“ID Y ENSEÑAD A TODOS

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por darme la vida, sabiduría, esperanza y fe.

Mis padres

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis y MSc. Licda. Elda Elena Solares Salazar, por darme la oportunidad de realizar mis sueños y apoyo incondicional.

Mis hermanos

Pedro y Pablo Saravia, por ser ejemplos de que todo puede ser posible.

Mi familia

Por el apoyo sincero y amor durante toda mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi asesor

Ing. Joram Matías Gil Laroj,
catedrático, asesor y amigo
(q. e. p. d).

**Escuela de Formación de
Profesores de Enseñanza Media,
de la Universidad de San Carlos
(EFPEM)**

Por permitirme desplegar equipos de
calidad del aire en sus instalaciones.

**Estación no. 2 del Benemérito
Cuerpo de Bomberos Municipales**

Por permitirme desplegar equipos de
calidad del aire en sus instalaciones.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
JUSTIFICACION.....	XVII
OBJETIVOS	XIX
HIPÓTESIS	XXI
ANTECEDENTES.....	XXIII
ALCANCES Y LIMITACIONES	XXIX
INTRODUCCIÓN.....	XXXI
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Salud y su relación con la contaminación del aire	1
1.2. Características climatológicas de la ciudad de Guatemala	4
1.2.1. Clima en Guatemala	4
1.2.2. Tendencias de viento en Guatemala.....	7
1.3. La deposición húmeda y la contaminación del agua de lluvia producto de la contaminación del aire	8
1.4. Proceso de deposición húmeda.....	8
1.5. El estado de contaminación atmosférica	11
1.6. Contaminación atmosférica en Guatemala.....	14
2. METODOLOGÍA	19
2.1. Parámetros a evaluar durante la deposición húmeda.....	20
2.1.1. Lluvia en Guatemala	20
2.1.2. El pH en el agua.....	21

2.1.3.	Los sólidos disueltos totales	22
2.1.4.	Qué es el material particulado	22
2.1.5.	Tendencias de dirección del viento en Guatemala ..	24
3.	MATERIALES UTILIZADOS	27
3.1.	Colector de agua de lluvia	27
3.2.	Sensores de calidad del aire	27
3.3.	Estación meteorológica	29
4.	PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	31
4.1.	Procedimiento de registro de lluvia	31
4.2.	Procedimiento de muestreo de agua de lluvia	31
4.3.	Procedimiento de muestreo de material particulado	34
4.3.1.	Las especificaciones de cada estación	34
4.3.2.	Ventajas de uso de los sensores	36
4.3.3.	Desventajas de uso de los sensores	36
5.	RESULTADOS	37
5.1.	Registros de lluvia	37
5.2.	Análisis de muestras de agua de lluvia	42
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
6.1.	Análisis de resultados de pH y sólidos disueltos totales en	45
6.2.	Análisis de resultados de ph y material particulado	47
6.3.	Análisis de resultado de sólidos disueltos totales y l particulado	50
6.4.	Análisis de resultados de material particulado y los lluvia	54
6.4.1.	Día 27/09/2018	54

6.4.2.	Día 03/10/2018.....	55
6.4.3.	Día 04/10/2018.....	56
6.4.4.	Día 05/10/2018.....	58
6.4.5.	Día 08/10/2018.....	59
6.4.6.	Día 09/10/2018.....	60
6.4.7.	Día 10/10/2018.....	61
6.4.8.	Día 11/10/2018.....	63
6.4.9.	Día 18/10/2018.....	64
6.4.10.	Día 19/10/2018.....	65
6.4.11.	Día 20/10/2018.....	66
6.4.12.	Día 21/10/2018.....	67
6.4.13.	Día 03/11/2018.....	68
6.4.14.	Día 04/11/2018.....	70
6.5.	Aportación adicional al estudio	72
CONCLUSIONES		73
RECOMENDACIONES.....		79
BIBLIOGRAFÍA		83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Tendencias observadas en la precipitación en Guatemala	7
2.	Proceso de deposición húmeda.....	10
3.	Mapa de ciudad de Guatemala con las estaciones de.....	17
4.	Descripción de la relación de pH	21
5.	Mapa de ciudad de Guatemala y vientos predominantes de septiembre a noviembre 2018.....	25
6.	Rosa de los vientos de septiembre a noviembre 2018	26
7.	Colector de lluvia	27
8.	Sensor de calidad del aire.....	29
9.	Estación meteorológica	30
10.	Mapa de ciudad de Guatemala con ubicación de sensor	32
11.	Ubicación de los sensores de calidad del aire	35
12.	Milímetros de lluvia de los meses septiembre a diciembre.....	38
13.	Días registrados de lluvia, donde se obtuvieron muestras de agua....	40
14.	Gráfica del mes de septiembre a noviembre, registros de los valores calidad del aire y los días donde se recolectaron muestras de lluvia.....	41
15.	Niveles de SDT en el agua de lluvia	43
16.	Niveles de pH en el agua de lluvia.....	44
17.	Relación entre SDT y pH.....	45
18.	Correlación entre SDT y pH	46
19.	Relación entre pH y PM _{2.5}	47
20.	Relación entre pH y PM ₁₀	48

21.	Correlación entre pH y PM _{2.5}	49
22.	Correlación entre pH y PM ₁₀	50
23.	Relación entre SDT y PM _{2.5}	51
24.	Relación entre SDT y PM ₁₀	51
25.	Correlación entre SDT y PM _{2.5}	53
26.	Gráfica de correlación entre SDT y PM ₁₀	53
27.	Día 27 de agosto. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia.	55
28.	Día 3 de octubre, registros de los valores de calidad del aire y lluvia...	56
29.	Día 4 de octubre, registros de los valores de calidad del aire y lluvia...	57
30.	Día 5 de octubre, registros de los valores de calidad del aire y lluvia...	58
31.	Día 8 de octubre, registros de los valores de calidad del aire y lluvia...	60
32.	Día 9 de octubre, registros de los valores de calidad del aire y lluvia...	61
33.	Día 10 de octubre, registros de los valores de calidad del aire y lluvia.	62
34.	Día 11 de octubre, registros de los valores de calidad del aire y lluvia.	63
35.	Día 18 de octubre, registros de los valores de calidad del aire y lluvia.	64
36.	Día 19 de octubre, registros de los valores de calidad del aire y lluvia.	65
37.	Día 20 de octubre, registros de los valores de calidad del aire y lluvia.	67
38.	Día 21 de octubre, registros de los valores de calidad del aire y lluvia.	68
39.	Día 3 de noviembre, registros de los valores de calidad del aire lluvia.	69
40.	Día 4 de noviembre, registros de los valores de calidad del aire lluvia...	70
41.	Promedios días de PM y lluvia.....	71

TABLAS

I.	Indicadores morbilidad y mortalidad en Guatemala	3
II.	Guías de material particulado	18
III.	Registros de lluvia durante los diferentes meses, los registros están milímetros.....	37
IV.	Registros de lluvia durante los días de toma de muestra	39
V.	Datos de los sólidos disueltos totales, pH y lluvia	42
VI.	Coeficiente de correlación entre pH y SDT	46
VII.	Coeficiente de correlación entre partículas y pH.....	49
VIII.	Coeficiente de correlación	52
IX.	Día 27 de agosto. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia...	54
X.	Día 3 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia ...	56
XI.	Día 4 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia ...	57
XII.	Día 5 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia ...	58
XIII.	Día 8 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia ...	59
XIV.	Día 9 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia ...	61
XV.	Día 10 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia .	62
XVI.	Día 11 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia .	63
XVII.	Día 18 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia .	64
XVIII.	Día 19 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia .	65
XIX.	Día 20 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia .	66
XX.	Día 21 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia .	68
XXI.	Día 3 de noviembre. Registros de los valores de calidad del aire lluvia.....	69
XXII.	Día 4 de noviembre. Registros de los valores de calidad del aire y	70

XXIII.	Coeficiente de correlación.....	74
XXIV.	Coguanor 29001 SDT para consumo humano.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
R²	Coefficiente de correlación de Pearson
COV	Compuestos orgánicos volátiles
SO₂	Dióxido de azufre
CO₂	Dióxido de carbono
NO₂	Dióxido de nitrógeno
HR%	Humedad relativa
PM_{2.5}	Material particulado menor de 2.5 micras
PM₁₀	Material particulado menor de 10 micras
µg/m³	Microgramo metro cúbico
ml	Milímetro
CO	Monóxido de carbono
nm	Nanómetro
O₃	Ozono
PPB	Partes por billón
PPM	Partes por millón
pH	Potencial de hidrógeno
SDT	Sólidos disueltos totales
T	Temperatura

GLOSARIO

Aerosol	Partícula diminuta sólida o líquida suspendida en el aire.
Ambente	Proyecto científico-social de calidad del aire.
Calidad del aire	Mezcla compleja de gases y partículas en la atmósfera determinada por su composición y concentración que son los principales factores determinantes de la calidad del aire.
Contaminantes criterio	Partículas y gases que se liberan en grandes cantidades de gran variedad por diferentes fuentes que implican riesgo a la salud y bienestar humano. Se identifican como PM, CO, SO ₂ , NO ₂ y O ₃ .
Dióxido de azufre	Gas invisible de olor desagradable y agudo que reacciona fácilmente con otras sustancias para formar compuestos perjudiciales, como ácido sulfúrico, ácido sulfuroso y partículas de sulfato.
Dióxido de nitrógeno	La principal fuente de dióxido de nitrógeno es la quema de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas.

EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América (<i>Environmental Protection Agency</i>).
ICA	Índice de Calidad de Aire.
Insivumeh	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
Material particulado	Sustancias microscópicas sólidas o líquidas suspendidas en el aire. Las fuentes pueden ser naturales o antropogénicas.
Monóxido de carbono	Gas incoloro, inodoro e insípido que es un poco menos denso que el aire. Es tóxico para los humanos cuando se encuentra en concentraciones superiores a 35 ppm. Tiene un papel en la formación del ozono troposférico.
Ozono troposférico	Se produce principalmente en áreas urbanas donde es el resultado de reacciones fotoquímicas de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos.
PM	Material particulado MP (<i>Particulate Matter</i>).
WHO	Organización Mundial de la Salud OMS (<i>World Health Organization</i>).

RESUMEN

El desarrollo de la investigación fue determinar la calidad de agua de lluvia y su relación con la contaminación del aire por concentraciones de material particulado. Se comprobó el efecto de barrido estimando el impacto generado en el área urbana. Por medio de la toma de muestra, registros y análisis se puede comprobar la relación existente de la contaminación de agua de lluvia debido a los niveles de calidad del aire ambiental, por concentraciones de material particulado; producto por los altos índices de diferentes fuentes de emisiones contaminantes en la atmósfera en el área urbana, durante el efecto de barrido transportando más del 50 % de la contaminación del aire al suelo, en ciudad de Guatemala.

En Guatemala se han desarrollado pocos estudios sobre la deposición húmeda. La falta de interés institucional para crear una regulación de calidad del aire ambiental hace que los niveles de contaminantes atmosféricos excedan los límites diarios permisibles de la Organización Mundial de la Salud. El agua de lluvia es alterada por contaminación del aire por concentraciones de material particulado que es un indicador de polución. Para conocer el grado de contaminación de lluvia comprobando el efecto de barrido que se produce cuando la precipitación ayuda a mejorar las condiciones de calidad atmosférica.

El análisis se realiza en un sitio de muestreo localizado en la ciudad de Guatemala, donde se instaló un sensor de calidad del aire del proyecto ambiente. También se utiliza una estación meteorológica, muestreador de lluvia y equipos para realizar las características químicas como pH y sólidos disueltos totales. Se comparó los datos con los coeficientes de correlación y determinación de los

datos de lluvia y calidad del aire, conociendo las estimaciones de los parámetros que mejor se ajustan a la variable que se están estudiando.

Se determinó que los valores de pH y material particulado tienen una correlación negativa indirectamente proporcional, indicando cuando los valores de material particulado en la atmósfera aumentan el valor de pH disminuye comprobando la acidez de la lluvia. Los valores de sólidos disueltos totales con relación al material particulado obtuvieron una correlación positiva, es decir, las concentraciones de material particulado en la atmósfera son altas. La cantidad de sólidos disueltos totales que son llevados a la superficie por la deposición húmeda durante el efecto de barrido serán mayores. Durante las fechas que se realizó la medición de calidad del aire, se encontraron días que excedieron los límites de las guías de calidad del aire aceptables de la Organización Mundial de la Salud, especialmente durante los primeros días de noviembre. Estos datos son importantes porque indican los momentos en que esta propensa a generar o agudizar los problemas respiratorios y de salud por las concentraciones de material particulado en el ambiente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación atmosférica es un índice negativo de calidad del aire y presenta un riesgo para la salud y el medio ambiente. Es responsable de un gran número de muertes y casos de enfermedades respiratorias al rededor del mundo. “Existe una estrecha relación cuantitativa entre la exposición a altas concentraciones de pequeñas partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}) y el aumento de la mortalidad o morbilidad diaria y a largo plazo”¹. La exposición a contaminantes como partículas está asociada con el aumento en los ingresos hospitalarios por enfermedades cardiovasculares, respiratorias y mortalidad en muchas ciudades de Europa y otros continentes.

El material particulado o PM siglas en inglés (*Particulate Matter*) es uno de los contaminantes más dañinos y representa una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas. Estas partículas suspendidas varían en tamaño, composición y origen. Las fuentes de PM incluyen la combustión en procesos mecánicos e industriales, emisiones de vehículos y humo de tabaco. Las fuentes naturales incluyen volcanes, incendios, tormentas de arena y sal marina.

Los registros obtenidos por los sensores de calidad del aire urbano para medir las concentraciones PM_{2.5} y PM₁₀ en tiempo real. Para estudiar la variación espacial y temporal de la contaminación del aire, instalados en diferentes lugares en la ciudad capital. Han ayudado a registrar datos proporcionando evidencia del deterioro de las masas de aire en el área urbana, producto de diferentes fuentes,

¹ Actualización Mundial, *Organizacion Panamericana de la Salud*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). Consulta: octubre 2018.

en especial las fuentes móviles. Los síntomas por este tipo de contaminación son visibles en estructuras debido a los procesos de reacción por agentes foto-oxidantes, vegetación y en árboles durante los eventos de lluvia. Se presume que durante los eventos de precipitación la calidad atmosférica debe mejorar, limpiar el aire.

El mayor problema de la contaminación atmosférica urbana que representa una amenaza cada vez mayor a la salud, ya que se expone a muchos contaminantes tóxicos que entran fácilmente a los pulmones. Desarrolla enfermedades respiratorias agudas y las enfermedades cardiovasculares a la población en la ciudad de Guatemala. Con respecto a las tendencias del gasto en salud, en la información en sector salud para la toma de decisiones con la situación actual que es compleja y la baja cobertura de atención sobre los problemas genera un alto impacto de salud a los perfiles de enfermedad morbilidad. En el año 2015, las enfermedades del aparato cardiovascular y respiratorio represento un 35 % que ocupó el primer lugar entre los grandes grupos de morbilidad de la población guatemalteca.

Por lo anterior, este estudio pretende responder la siguiente interrogante: ¿Es posible determinar la contaminación del aire por medio del muestreo del agua de lluvia durante la temporada húmeda en el área urbana?

JUSTIFICACION

La deposición de los contaminantes del aire es una importante pérdida muy significativa de partículas que se encuentran suspendidas en la atmósfera. Existe dos tipos de deposiciones: seca y húmeda. Para efecto de esta investigación, se enfocará en la deposición húmeda, llamada en inglés *washout* la que se produce por debajo de las nubes. “La evidencia disponible señala que la contaminación ambiental por concentraciones material particulado afecta al desarrollo neurológico y la capacidad cognitiva de los niños y puede causarles asma y cáncer”². La contaminación del agua se produce cuando las partículas son transportadas por los eventos de precipitación que es parte del ciclo hidrológico, alterando la zona urbana. Un punto importante lo constituye la poca investigación o inexistencia de información sobre el comportamiento en las zonas urbanas provocadas por episodios de estrés debidos a la deposición húmeda contaminada, producto de la polución atmosférica por contaminantes primarios.

² OMS. *Más del 90% de los niños del mundo respiran aire tóxico a diario*. p. 1

OBJETIVOS

General

Determinar la calidad de agua de lluvia y su relación con la contaminación del aire por concentraciones de material particulado, comprobando el efecto de barrido estimando el impacto generado en el área urbana.

Específicos

1. Muestrear la contaminación, del aire ambiental por concentración de material particulado y la contaminación de la lluvia producto de la deposición húmeda.
2. Registrar y analizar los parámetros de pH y sólidos disueltos totales en el agua, en comparación de los niveles de calidad del aire urbano por concentraciones de material particulado en la atmósfera y los registros obtenidos de la estación meteorológica de los datos de lluvia.
3. Demostrar si existe una relación espacial y temporal de datos, comparando los registros analizados de los parámetros de agua de lluvia y la contaminación del aire por concentraciones de material particulado en el ambiente en la ciudad de Guatemala.

HIPÓTESIS

Por medio de la toma de muestra, registros y análisis se puede comprobar la relación existente de la contaminación de agua de lluvia debido a los niveles de contaminación del aire ambiental, por concentraciones de material particulado, producto por los altos índices de diferentes fuentes de emisiones contaminantes en la atmósfera en el área urbana, durante el efecto de barrido transportando más del 50 % de la contaminación del aire al suelo, en ciudad de Guatemala.

La contaminación del aire en el ambiente puede alterar los parámetros de pH y sólidos disueltos totales del agua de lluvia, demostrando efectivamente que existe una deposición de contaminantes hacia el suelo, afectando la calidad del agua de lluvia en el área urbana.

Por lo tanto, durante la precipitación el agua de lluvia durante el proceso de barrido se contaminan los parámetros antes mencionados que llegan hacer insalubre para la salud de la población y expone un riesgo para la generación de diferentes enfermedades, el efecto de barrido mejora en más del 50 % la calidad del aire urbana.

ANTECEDENTES

La lluvia que cae, generalmente, lleva incorporado partículas de polvo y componentes químicos. “Los estudios han demostrado que el contenido de elementos químicos de la lluvia ha suscitado gran interés por dos motivos principales: primero, la lluvia ácida provoca graves efectos sobre los ecosistemas, terrestres o acuáticos”³; “segundo, la lluvia constituye una vía de entrada de nutrientes relevante en los ciclos biogeoquímica se dé los ecosistemas terrestres y acuáticos”⁴.

El contenido soluble y particulado de la lluvia depende de la existencia de fuentes de emisión en el recorrido de las masas de aire. La capacidad de *scavenging* (barrido) de las gotas, la cantidad de lluvia, entre otros. “La atmósfera contiene gases y partículas de origen natural o antropogénicas o que, tras un tiempo más o menos largo de residencia, son finalmente depositadas en la superficie terrestre por medio de la precipitación húmeda o por vía seca”⁵.

El enfoque determinante es la vigilancia de las concentraciones de diferentes contaminantes en la atmósfera que se generan por distintas fuentes desde las antropogénicas hasta las fuentes de aspecto natural, ya que estos pueden ser perjudiciales o limitantes para la salud humana y medio ambiente.

³ HUTCHINSON, TC y HAVAS, M. (Ed.). *Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems*. p. 341.

⁴ HEDIN, L.O.; ARMESTO, J.J.; HOHNSON, A.H. *Patterns of nutrient loss from UN polluted, old growth temperate forest: evaluation of biogeochemical theory*. p. 493.

⁵ ÁVILA, A. PEÑUELAS, J. *Increasing frequency of Saharan rains over northeastern Spain and its ecological consequences*. p. 153.

La Red Panamericana de muestreo de la contaminación del aire REDPANAIRE, de 1967 a 1974, realizó un programa de control de la contaminación del aire para alcanzar las metas de la tercera reunión especial de ministros de salud de las Américas, donde categorizan a Guatemala con 500 000 habitantes dentro de la ciudad de Guatemala. Los métodos de medición y análisis incluyeron polvo sedimentable con promedios mensuales, polvo en suspensión con promedios diarios y anhídrido sulfuroso con promedios diarios; contando únicamente con una estación de monitoreo y análisis, la cual concluyó que el número de muestras que exceden los niveles de referencia fue de 55 con un porcentaje del 5,4 % durante 18 meses de muestreo.

La investigación de la contaminación del aire en el área central de la ciudad de Guatemala, del ingeniero Pedro Saravia, donde realizó investigación de contaminación atmosférica en diferentes puntos midiendo varios parámetros en 1983, donde menciona que existe 1,2 millones de habitantes en el área urbana. Tampoco existe una regulación de ley para controlar la contaminación atmosférica, en especial para fuentes móviles principal precursor de contaminación atmosférica, se presentaron resultados alarmantes para la salud en parámetros de plomo, dióxido de azufre y polvo sedimentable, lo cual es debido al contenido de plomo en los aditivos de la gasolina, en especial, por combustible diésel.

Un factor determinante en la contaminación atmosférica son las fuentes móviles en rutas y los gases de efecto invernadero. El transporte en las zonas urbanas de América Latina, basado cada vez más en vehículos privados. El aumento del consumo de gasolina configura una compleja red de externalidades negativas, como los costos asociados a los accidentes de tránsito, la congestión vehicular, la construcción de una infraestructura específica proclive a las emisiones de CO₂. Para el abordaje de la cuantificación y categorización de las

unidades de transporte y, particularmente, orientado a las emisiones que estas generan, se utilizan varias designaciones, tales como transporte terrestre, transporte público y privado, fuentes móviles en ruta, parque vehicular, entre otros⁶.

En cuanto a la información o estadística, respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte motorizado en Guatemala, se identificaron algunos documentos elaborados por organismos internacionales relacionados con el tema y particularmente información o estudios de carácter nacional. “En el ámbito internacional, la Agencia Internacional de Energía, en su documento *CO₂ Emissions from fuel combustion highlights*, señala que las emisiones de CO₂, en el 2010, en el sector transporte en Guatemala fue de 5.8 millones de toneladas”⁷. “En el ámbito nacional, el Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero, año base: 2005, en la subcategoría transporte terrestre reporta 5 755,896 giga gramos de dióxido de carbono (CO₂); 0,9407 giga gramos de metano (CH₄); y 0,0484 giga gramos de óxido nitroso (N₂O)”⁸.

El proyecto de deposición húmeda y seca, y su impacto en la acidez del agua en la región del volcán de Pacaya en diez sitios de muestreo que se realizó en el año 2006, por la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, demostró que el agua de lluvia en la región del volcán de Pacaya presentó un grado de acidez mayor que en la ciudad de Guatemala. Tienen un impacto negativo ya que el lugar es considerado como un área de cosecha, también permitió establecer el deterioro de la calidad del agua subterránea y superficial debido al grado de

⁶ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Fuentes móviles en ruta de Guatemala y los gases de efecto invernadero año base*. p. 4.

⁷ International Energy Agency. *CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2019 Highlights*. p. 80.

⁸ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Fuentes móviles en ruta de Guatemala y los gases de efecto invernadero año base*. p 6.

acidez influenciado por la deposición húmeda y seca. Se demostró que los contaminantes en el aire tanto partículas como gases arrastrados por los vientos, son barridos por gotas de lluvia y depositados en el suelo en varios kilómetros del área del Pacaya.

Es importante conocer el efecto de barrido que se produce durante la deposición húmeda, cuando este se genera debajo de las nubes durante los eventos de precipitación. Las gotas de lluvia absorben los contaminantes, seguida de la remoción de estas gotas por precipitación. Es importante mencionar que se identifican dos procesos: el *washout* produce la eliminación de contaminantes de la atmósfera, por debajo de las nubes durante a caída de lluvia, nieve o granizo; *rainout* es la eliminación de contaminantes dentro de las nubes.

Muchos otros países han realizado programas importantes para la evaluación de daños y estudios de ciclos de contaminantes. En Europa utilizan modelos de dispersión complementaria para entender conceptos y tener una validación de datos creíbles, especialmente en áreas de vegetación, urbanas y rurales.

Al observarse la aparición de daños cada vez más alarmantes se condujo un extenso estudio de seguimiento en los árboles que de una forma u otra estaban afectados Alemania occidental en 1983. "Sucesivamente Holanda, Italia, Francia y Austria comenzaron a aparecer daños visibles en extensiones forestales producto de la deposición húmeda contaminada por parámetros atmosféricos"⁹.

⁹ MUÑOZ. *Ideas generales sobre la teoría de la dispersión de contaminantes en la atmósfera.* p. 9.

La precipitación que presentan precursores de ácidos proviene, mayormente, de emisiones antropogénicas como la combustión de fuentes fósiles y procesos industriales. “Las sustancias alcalinas neutralizantes pueden tener un origen antrópico, debido a actividades como las fábricas de cemento, la siderometalúrgica o las centrales térmicas”¹⁰. El reciente uso de cambio de suelos, la deforestación, los incendios forestales, los basureros clandestinos y el incremento del parque vehicular han provocado un aumento de estas sustancias que alteran el equilibrio de la atmósfera, incrementando la contaminación durante la deposición húmeda al suelo.

En Guatemala se han desarrollado pocos estudios sobre la deposición húmeda. La falta de interés institucional para crear una regulación de calidad del aire ambiental hace que los niveles de contaminantes atmosféricos exceden los límites diarios permisibles de la Organización Mundial de la Salud. La falta de información completa y monitoreo sobre deposición húmeda en Guatemala constituyen un problema para el planteamiento de medidas para proteger la salud de la población y para la planificación de medidas de emergencia relacionadas con las tendencias de la deposición húmeda respecto con el medio ambiente, tanto por su impacto socioeconómico sanitario y por razones de calidad del aire.

La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud. Según la Organización Mundial de la Salud para la calidad del aire y salud indica que mediante la disminución de los niveles de contaminación del aire los países pueden reducir la carga de morbilidad derivada de accidentes cerebrovasculares, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas y agudas, entre ellas y el asma.

¹⁰ SEMB, HANSEN, FRANCOIS, MAENHAUT y PACYNA. *Long range transport and deposition of mineral matter as a source for base cations, Water, Air, Soil Poll.* p. 85.

ALCANCES Y LIMITACIONES

El desarrollo de la investigación se realizó dentro de la ciudad de Guatemala, teniendo los datos registrados de los sensores de calidad del aire en 3 diferentes áreas: avenida Bolívar, Trébol y avenida Petapa entrada USAC. Se concentra la mayor contaminación ambiental por concentraciones de material particulado de tamaño de 10 y 2,5 micrómetros de diámetro. Se utilizará una estación meteorológica para registrar los milímetros de precipitación durante la temporada lluviosa.

Las muestras se tomarán al momento de los eventos de lluvia. Se recolectarán en frasco de vidrio que conserva las propiedades de higiene y no interfiere con los compuestos químicos garantizando, así la calidad original de su contenido, utilizando agua destilada con un volumen de 50 milímetros. Exponiendo la muestra destapada y tapando los frascos después de 1 hora de lluvia o durante el evento corto de lluvia. Al mismo tiempo se utilizó una muestra en blanco como testigo con agua destilada, para la comparación de los análisis. La ubicación de la recolección de la muestra fue la avenida Bolívar, zona 3, cerca de una vía altamente transitada.

Las limitantes principales es el punto de muestreo, dicho procedimiento de recolección de muestra se realizó en una sola ubicación en el techo de una oficina ubicada en la avenida Bolívar zona 3. El muestreo fue posible únicamente durante la temporada de lluvia en los meses comprendidos de agosto a diciembre.

En las muestras captadas de lluvia se realizaron pruebas *insitu*. Se analizó únicamente para el alcance del estudio el pH y sólidos disueltos totales SDT. Debe existir una persona responsable con la posibilidad de recoger la muestra en el momento en que empiece y termine la precipitación. Esto hace que se dificulte la toma de muestras durante los eventos de precipitación en varios puntos en el área urbana, también la disponibilidad de equipos de medición de laboratorio.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es un estado general de perturbación que altera la calidad del aire. Los efectos causados por la contaminación atmosférica producida por diferentes fuentes de contaminación es uno de los principales problemas ambientales y de salud alrededor del mundo, que especialmente afecta a Guatemala. Según las estadísticas del Sistema de Información Gerencial de Salud del Ministerio de Salud y Asistencia Social, desde el año 2012 al 2018 las enfermedades del apartado respiratorio y del corazón ocupan uno de los primeros lugares entre los grandes grupos de morbilidad y mortalidad de la población.

Es por eso el interés de investigar sobre la relación existente de la contaminación del aire y la lluvia. La deposición húmeda se produce por dos procesos, por un lado, las partículas contenidas en las nubes, que actúan como núcleos de condensación, pueden ser lavadas debido a la precipitación de las nubes que las contienen. “Este proceso es el denominado *in-cloud scavenging*”¹¹. “La deposición húmeda solo se puede realizar en presencia de precipitación”¹². “El material particulado presente en la atmósfera puede alcanzar el nivel de superficie mediante dos procesos de lavado atmosférico como la deposición húmeda. La eficacia de estos mecanismos depende del diámetro, composición química y propiedades termodinámicas de las partículas”¹³, en otras palabras, es

¹¹ SEINFELD y PANDIS. *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*. p. 3.

¹² ZANNETTI. *Dry and Wet Deposition, In: Air Pollution Modeling*. p. 4.

¹³ JAENICKE. *Dynamics of atmospheric Aitken particles*. p. 14.

“la masa de material depositada desde la atmósfera a la superficie subyacente en la precipitación (sobre la unidad de área durante la unidad de tiempo)”¹⁴.

Para determinar las características químicas de las muestras de agua de lluvia se procedió a realizar análisis de pH y sólidos disueltos totales con el fin de conocer la alteración del agua de lluvia producto de la contaminación atmosférica por concentraciones de material articulado. Para los registros de la contaminación del aire por concentraciones de material particulado PM, de tamaño aerodinámico de 10 y 2,5 micrómetros de diámetro se utilizó sensores de bajo costo y estación meteorológica del proyecto Ambiente.

Para el procedimiento de toma de muestra y recolección de muestra se basó en el manual del programa de la precipitación química, lineamientos, objetivos y estándares de procedimientos operativos de la organización mundial de meteorología del departamento de vigilancia global de la atmósfera. Se utilizó un colector de superficie donde la toma de muestra de agua de lluvia se hizo mediante un frasco de vidrio, con una solución de agua destilada y un embudo de plástico con una superficie de 10 centímetros de diámetro que garantizo la cantidad de muestra necesaria para analizar, con una inclinación superior al 15 % con el fin de facilitar la recolección.

Los registros de material particulado en el ambiente sirven para conocer el comportamiento espacial y temporal de la contaminación atmosférica en tiempo real en ciudad de Guatemala. Esto datos sirven para la toma de decisiones e identificar las fuentes emisoras de mayor contaminación existentes en diferentes puntos. De igual manera para obtener una mejor descripción de los análisis de pH, sólidos disueltos totales, material particulado y lluvia. Se analizarán los datos

¹⁴ WMO. *Programme, manual for the gaw precipitation chemistry*. p. 1.

gráficamente independientes haciendo que se facilite la comprensión de los objetivos trazados en esta investigación.

1. MARCO TEÓRICO

El problema de contaminación del aire en Guatemala es un factor de importancia, tanto de salud por los problemas sanitarios y de medio ambiente, el reflejo de este problema se ve en los indicadores de ingreso a los hospitales nacionales por problemas respiratorios que se encuentra en los diferentes aspectos de salud y de medio ambiente. A nivel rural, el 86 % de hogares utiliza el sistema dentro energético (carbón y leña) para cocinar sus alimentos, situación que incrementa considerablemente la calidad del aire y las enfermedades de las vías respiratorias.

1.1. Salud y su relación con la contaminación del aire

El problema se genera cuando la calidad del aire se altera por la presencia de diferentes sustancias tóxicas. Esta contaminación se encuentra en el ambiente o en lugares cerrados donde la concentración excesiva en la atmósfera por gases y partículas pueden provocar daños por respirar la suciedad del aire que se respira.

Según datos de la Organización Mundial de la Salud, anualmente 3,8 millones de personas mueren prematuramente por enfermedades atribuidas a la contaminación del aire en interiores producto de las emisiones durante la cocción de alimentos, entre ellas el 27 % se deben a neumonía, 18 % a accidentes cerebrovasculares, 27 % a cardiopatía isquémica, 20 % neumonía obstructiva crónica y 8 % a cáncer de pulmón, datos de OMS del 2018.

Los principales efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica sobre diferentes indicadores de salud pueden variar. “Se mencionan entre ellos el

aumento de la mortalidad total y por causas específicas, incremento de la utilización de los servicios sanitarios, ingresos hospitalarios, visitas a urgencias, visitas a consultas médicas, alteraciones de diferentes índices funcionales pulmonares, incremento de los síntomas de enfermedad y del uso de fármacos”¹⁵.

En Guatemala, desde el año 2012 al 2018 las enfermedades del aparato respiratorio y del corazón ocupan uno de los primeros lugares entre los grandes grupos de morbilidad y mortalidad de la población. Los datos de mortalidad el indicador número uno es la rinofaringitis y la amigdalitis agudas; mientras que los datos de mortalidad la neumonía e infartos agudos son los principales decesos a nivel nacional, datos del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social 2019 del Sistema de Información Gerencial de Salud SIGSA.

¹⁵ Committee of the Environmental and Occupational Health. *Health effects of outdoor air pollution, part 2*. p. 153.

Tabla I. Indicadores morbilidad y mortalidad en Guatemala

CIE-10	Diagnóstico	Mortalidad	Total de casos
J:18	Neumonía, organismo no especificado		43.192
I:21	Infarto agudo del miocardio		25.682
E:14	Diabetes mellitus, no especificada		13.275
I:46	Paro cardíaco		11.578
I:50	Insuficiencia cardíaca		8.548
A:09	Diarrea y gastroenteritis de presunto origen infeccioso		8.152
I:10	Hipertensión esencial (primaria)		7.752
K:70	Enfermedad alcohólica del hígado		7.327
I:64	Accidente vascular encefálico agudo, no especificado como hemorrágico o isquémico		6.799
W:34	Disparo de otras armas de fuego, y las no especificadas		6.281
A:41	Otras septicemias		5.788
C:16	Tumor maligno del estómago		4.423
N:19	Insuficiencia renal no especificada		4.321
C:22	Tumor maligno del hígado y de las vías biliares intrahepáticas		4.003
K:74	Fibrosis y cirrosis del hígado		3.770
Y:91	Evidencia de alcoholismo determinada por el nivel de intoxicación		3.738
I:67	Otras enfermedades cerebrovasculares		3.551
N:18	Insuficiencia renal crónica		3.395

Fuente: SIGSA

CIE-10	Diagnóstico	Morbilidad	Total de casos
J:00	Rinofaringitis aguda [resfriado común]		10.044.975
J:03	Amigdalitis aguda		5.051.299
N:39	Otros trastornos del sistema urinario		3.719.744
K:29	Gastritis y duodenitis		3.374.678
A:09	Diarrea y gastroenteritis de presunto origen infeccioso		3.066.496
B:82	Parasitosis intestinales, sin otra especificación		2.923.255
A:06	Amebiasis		2.103.025
R:51	Cefalea		1.652.349
J:06	Infecciones agudas de las vías respiratorias superiores, de sitios múltiples o no especificados		1.520.952
T:78	Efectos adversos, no clasificados en otra parte		1.378.320
M:79	Otros trastornos de los tejidos blandos, no clasificados en otra parte		1.357.852
T:14	Traumatismo de regiones no especificadas del cuerpo		1.315.955
J:18	Neumonía, organismo no especificado		1.224.788
H:10	Conjuntivitis		1.176.597
A:04	Otras infecciones intestinales bacterianas		1.002.029
I:10	Hipertensión esencial (primaria)		809.163
H:66	Otitis media supurativa y la no especificada		798.805
D:64	Otras anemias		648.446

Fuente: SIGSA

Fuente: SIGSA. Principales causas de mortalidad y morbilidad. p. 1.

1.2. Características climatológicas de la ciudad de Guatemala

Guatemala se caracteriza por tener un conjunto de variaciones climatológicas durante el año, presentando una variedad de zonas climáticas dependiendo los factores geográficos, la ciudad de Guatemala presenta micro climas que varían según la temporada, para el enfoque del estudio las variables principales meteorológicas son la lluvia, dirección del viento y velocidad del viento.

1.2.1. Clima en Guatemala

La ciudad de Guatemala goza de un clima subtropical de tierras altas, debido a su elevación sobre el nivel del mar (1500-1700 msnm), por lo que tiende a tener un clima muy suave. Guatemala se encuentra ubicada en la franja de los climas cálidos con predominio de temperaturas elevadas y clima tropical estacional con dos temporadas claramente marcadas, una seca y calurosa según datos del documento de variabilidad climática en Guatemala del proyecto fase II de cambio climático del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales del año 2013. “Específicamente la ubicación geográfica y las condiciones topográficas en que se localiza de la ciudad de Guatemala, permite la circulación del viento proveniente del noreste predominantemente durante el año”¹⁶. La precipitación en el territorio nacional se presenta en una temporada bimodal con dos momentos de máxima precipitación, uno en junio y el otro en septiembre; descendiendo hacia finales del año expresando únicamente temporada de lluvia y temporada seca, con el mes de marzo como el de mayor déficit hídrico. Según datos registrados de temperatura y precipitación los promedios de los años 2001

¹⁶ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Primer informe indicativo de medición de la calidad del aire ambiente en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala*. p. 9.

al 2014 han aumentado con respecto al periodo entre los años 1971 al 2000. La temperatura presentó un aumento entre 2,2 % a 10,3 % mientras que en la precipitación el aumento fue de 6 % a 48 %. Para obtener estos datos se utilizaron como base las estaciones meteorológicas de Flores (Petén), Puerto Barrios (Izabal), Cobán, INSIVUMEH, Labor Ovalle (Quetzaltenango), Huehuetenango, Camantulul (Escuintla), Sabana Grande (Escuintla parte alta), La Fragua (Zacapa) y Asunción Mita (Jutiapa), según datos del documento de variabilidad climática en Guatemala del proyecto fase II de cambio climático del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales del año 2013.

La precipitación en el territorio nacional se presenta en una temporada bimodal con dos momentos de máxima precipitación, uno en junio y el otro en septiembre, descendiendo hacia finales del año expresando únicamente temporada de lluvia y temporada seca. El mes de marzo como el de mayor déficit hídrico. Según datos registrados de precipitación los promedios de los años 2001 al 2014 han aumentado con respecto al periodo entre los años 1971 al 2000, de un 6 % a 48 %, según datos de estaciones meteorológicas del INSIVUMEH. Los meses de mayo (68 mm) y octubre (60 mm) son los que mayor aumento de lluvia se ha tenido, esto debido a los efectos de los ciclones naturales, según datos del documento de variabilidad climática en Guatemala del proyecto fase II de cambio climático del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales del año 2013.

Los campos de mayor precipitación media se encuentran estrechamente relacionada con el forzamiento de los sistemas de laderas:

Las laderas orientadas hacia pacífico presentan promedios de lluvia de hasta 4800 mm anuales; al sur de los departamentos de San Marcos y Quetzaltenango, las laderas orientadas hacia el norte presentan un máximo promedio de lluvia nacional de 5600 mm anuales, en lo que respecta en la meseta central y altiplanos¹⁷.

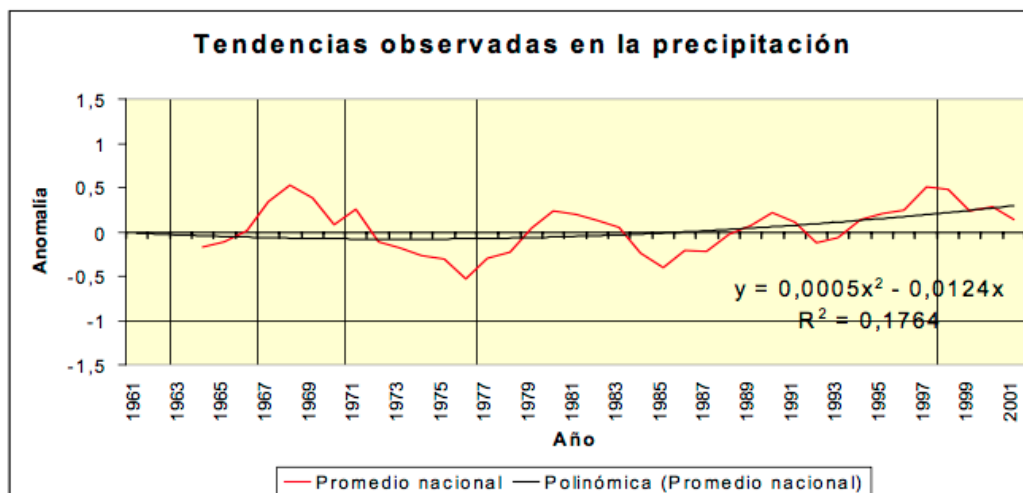
¹⁷ Universidad Rafael Landívar. *Informe Ambiental de Guatemala y Base para Evaluación Sistemática del Estado del Ambiente*. p. 20.

Según los datos registrados de precipitación pluvial promedio anual fue de 999,5 milímetros con un promedio de 108 días de lluvia en ciudad de Guatemala, teniendo el mes de septiembre el mayor registro de precipitación con 352,7 milímetros, datos obtenidos por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología INSIVUMEH.

“En el análisis de la Variabilidad Climática en Guatemala, realizado por la Unidad de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales”¹⁸ Se identificó la existencia de oscilaciones cuasi decadales en el comportamiento de las anomalías de lluvia reguladas por fuentes de variabilidad climática de corto y largo período de los Océanos Pacífico y Atlántico. Igualmente fue posible discernir la posible existencia de períodos prolongados en que las anomalías fueron mayores (antes de 1977 y a partir de 1987) respecto a un período transitorio (de 1977 a 1987) de menor anomalía de precipitaciones. En la figura 1 se muestra las tendencias históricas de las anomalías registradas de la precipitación en Guatemala.

¹⁸ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático*. p. 10.

Figura 1. **Tendencias observadas en la precipitación en Guatemala**



Fuente: Instituto de Incidencia Ambiental –URL IARNA, p. 46.

1.2.2. **Tendencias de viento en Guatemala**

La posición geográfica de la ciudad de Guatemala y su entorno (de 14°30' a 14°45' de latitud Norte y de 90°15' a 90°45' de longitud Oeste), permite el predominio de vientos del noreste en la capa de aire en contacto con la superficie terrestre. Conforme se asciende en altitud la dirección del viento se va haciendo del Este hasta una altitud aproximada de 3000 msnm como nivel de transición a vientos del Oeste en la parte superior de la troposfera. Esto se presenta durante la temporada época lluviosa (mayo a octubre) y seca (noviembre a abril) según la información de regiones climáticas del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. En el mes de julio y parte de agosto se produce un período seco denominado canícula, el cual se da por la inversión de los alisios que al debilitarse y desaparecer se intensifica el anticiclón semipermanente del Atlántico. “A partir de finales del mes de agosto, se reinicia

la época lluviosa produciendo precipitaciones intensas que completan la temporada lluviosa, principalmente en los meses de septiembre y octubre”¹⁹.

1.3. La deposición húmeda y la contaminación del agua de lluvia producto de la contaminación del aire

La deposición húmeda se produce por dos procesos, las partículas contenidas en las nubes que actúan como núcleos de condensación pueden ser lavadas debido a la precipitación de las nubes que las contienen. “Este proceso es el denominado *in-cloud scavenging*”²⁰.

Por otro lado, están las partículas que, estando en suspensión en la atmósfera, son simplemente arrastradas por precipitación, proceso denominado *below-cloud scavenging*. En este segundo mecanismo se distinguen dos procesos diferentes según el tamaño de las partículas: las partículas con diámetros menores a 0,5-1 μm caen por difusión debido a su movimiento browniano. “En el caso de las partículas mayores a estas, es la propia gravedad la que hace que se depositen en gotas de lluvia o cristales de hielo”²¹.

1.4. Proceso de deposición húmeda

La eliminación de gases y partículas de la atmósfera puede ocurrir en forma seca o húmeda. La importancia de cada forma de deposición varía con las especies y ubicaciones. “La deposición seca es un proceso continuo, mientras

¹⁹ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático Guatemala*. p. 4.

²⁰ SEINFELD, y PANDIS. *Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change*. p. 2.

²¹ *Ibíd.*

que la deposición húmeda solo se puede realizar en presencia de precipitación”²². “El material particulado en la atmósfera puede alcanzar el nivel de superficie mediante dos procesos de lavado atmosférico como la deposición húmeda, la eficacia de estos mecanismos depende del diámetro, composición química y propiedades termodinámicas de las partículas”²³.

En la deposición húmeda hay dos significados del término. Primero, es un proceso de recolección de cualquier gas y partículas de la atmósfera sólido o líquido. El proceso involucra eliminación de cualquier especie por gotas de lluvia o cristales de hielo en el interior de las nubes y por precipitación o copos de nieve. “Segundo, la deposición húmeda es la masa de material depositada desde la atmósfera a la superficie subyacente en la precipitación (sobre la unidad de área durante la unidad de tiempo)”²⁴.

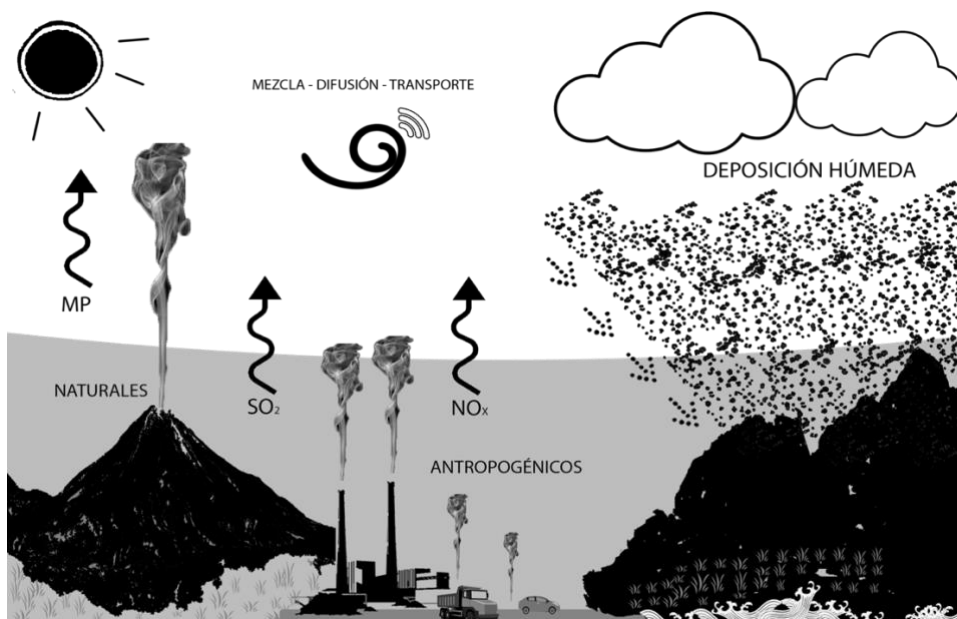
En la figura 2 se muestra el proceso de deposición húmeda y la contaminación de agua de lluvia producto de las diferentes fuentes contaminantes atmosféricas. En la atmósfera se produce una interacción importante donde se mezcla la contaminación produciendo reacciones oxidantes dando otros contaminantes. La dispersión de los contaminantes en la atmósfera es producida por la difusión y el transporte de los contaminantes por los movimientos atmosféricos.

²² ZANNETTI. *Dry and Wet Deposition. In: Air Pollution Modeling.* p.3.

²³ JAENICKE. *Dynamics of atmospheric Aitken particles.* p.11.

²⁴ WMO. *Programme, manual for the gaw precipitation chemistry.* p. XIV.

Figura 2. **Proceso de deposición húmeda**



Fuente: elaboración propia.

Al momento que existe la deposición húmeda creando el efecto de lavado se produce alteraciones en el agua de lluvia. La escala de pH mide el grado de acidez de un objeto. El agua pura tiene un valor de pH de 7. Ese valor se considera neutro ni ácido ni básico, la lluvia limpia normal tiene un valor de pH de entre 5,0 y 5,5, nivel levemente ácido. Sin embargo, cuando la lluvia se combina con dióxido de azufre y óxido de nitrógeno producidos por las centrales eléctricas y los automóviles. “La lluvia se vuelve mucho más ácida, la lluvia ácida típica tiene un valor de pH de 4,0. Una disminución en los valores de pH de 5,0 a 4,0 significa que la acidez es diez veces mayor”²⁵.

²⁵ United States Environmental Protection Agency. *What is Acid Rain?*. p.1.

Las enfermedades de las vías respiratorias y del corazón ocupan las primeras causas de morbilidad en Guatemala. Su incidencia es mayor en los niños menores de seis años.

“A nivel nacional, la tasa de incidencia de las enfermedades respiratorias en los niños y niñas de 0-5 años es de 47,9 % y la de diarrea, 31,3 %. Esta incidencia es más alta en la región Norte, Alta y Baja Verapaz y en el área rural”²⁶.

El órgano interno que está más expuesto constantemente al entorno ambiental son los pulmones. En zonas urbanas es donde se genera la mayor parte de contaminantes tóxicos en el aire; son las personas que transitan y circulan las que exponen, siendo vulnerables generando cuadros degenerativos de problemas respiratorios.

Las interrogantes que surgen observando los registros obtenidos por sensores de contaminación atmosférica que miden las concentraciones de calidad del aire por material particulado PM₁₀ en la ciudad de Guatemala. Es el mejoramiento de la calidad del aire durante los eventos de lluvia, que porcentaje de contaminantes se depositan por la precipitación, durante la acción de barrido que se produce debajo de las nubes. La deposición húmeda por material particulado su importancia relativa depende fundamentalmente de la precipitación durante la temporada lluviosa.

1.5. El estado de contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es un problema muy grave. Este tipo de contaminación es un estado general de perturbación que altera la calidad del aire.

²⁶ Instituto Nacional de Estadística. *Encuesta nacional de condiciones de vida encovi 2000*. p. 24.

“Según el informe sobre la calidad del aire”²⁷, es a partir del año 1970 cuando, en respuesta al marco de proyecto RED PANAIRE, se presenta un registro de información relativa a la calidad del aire en la ciudad de Guatemala. Sin embargo, es hasta el año de 1995 cuando, a través del laboratorio de monitoreo del aire de la Universidad de San Carlos de Guatemala, dicha información es recopilada sistemáticamente.

Los efectos causados por la contaminación atmosférica producida por diferentes fuentes de contaminación. Es uno de los principales problemas ambientales y de salud alrededor del mundo y que especialmente afecta a Guatemala. El rápido crecimiento demográfico e industrial, combinado con los diferentes estratos de vida hace que la cantidad de emisiones de la contaminación del aire en forma de partículas y gases se incrementen. El uso de combustibles fósiles, como el petróleo, carbón mineral y gas natural, son compuestos de carbono que se encuentran en el subsuelo; al ser quemados liberan carbón y otros componentes resultado de la combustión.

Muchas investigaciones han demostrado evidentemente que la contaminación atmosférica causada por diferentes fuentes como, por ejemplo las fijas, móviles, industriales, agrícolas y de origen natural, tienen efectos adversos en la población en especial relación con la salud. La contaminación atmosférica causada por vehículos automotores puede tener efectos muy adversos sobre la salud de la población.

²⁷ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Primer informe indicativo de medición de la calidad del aire ambiente en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala*. p. 3.

Durante el 2018 el parque vehicular sumó 3 500 000 vehículos, al menos 400 mil más que el año 2017, según datos de la Superintendencia de Administración Tributaria (SAT). De estos el 51 % de esa cantidad circula en el departamento de Guatemala; es decir, 1 800 000 vehículos transitan día a día, la mayoría concentrados en la capital, creando grandes congestionamientos e incrementando los niveles de contaminación al aire.

La mayor parte de la contaminación del aire es obra del ser humano y se produce por la combustión ineficiente de combustibles fósiles o de biomasa. La contaminación atmosférica urbana puede influir de manera considerable en la calidad del aire en interiores, sobre todo, en las casas muy ventiladas o en las situadas cerca de fuentes de contaminación. A la inversa, las fuentes de contaminación del aire en interiores pueden ser causa importante de contaminación atmosférica urbana, especialmente en las ciudades donde muchos hogares queman combustibles de biomasa o carbón para calentarse y cocinar. “La contaminación del aire urbano al aire libre es un término más específico que se refiere a la contaminación del aire ambiental exterior en áreas urbanas, por lo general en las ciudades o en sus alrededores”²⁸.

Existen diferentes contaminantes atmosféricos, los principales contaminantes del aire, como monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV), ozono (O₃), metales pesados y partículas respirables (PM_{2.5} y PM₁₀). “Difieren en su composición química, propiedades de reacción, emisión, tiempo de desintegración y capacidad de difusión en distancias largas o cortas”²⁹.

²⁸ Oficina Regional para las Américas de la Organización Mundial de la Salud. *Contaminación del aire ambiental exterior y en la vivienda*. p. 1.

²⁹ KAMPA, M., CASTANAS, E. *Human health effects of air pollution*. p. 2.

1.6. Contaminación atmosférica en Guatemala

Guatemala está catalogada por la Organización Panamericana de la Salud, “como un país con la mínima capacidad de monitoreo de calidad del aire a nivel latinoamericano, a comparación de México, Brasil o Chile que demuestran buena capacidad de monitoreo”³⁰

Existen grandes diferencias entre los países de la región de las Américas con respecto a la adopción de las Directrices de Calidad del Aire (AQG) de la OMS. Los principales contaminantes atmosféricos regulados en la región son material particulado 10 micras (PM₁₀), material particulado 2,5 micras (PM_{2.5}), dióxido nitroso (NO₂), ozono (O₃) y dióxido de azufre (SO₂). El PM₁₀ está regulado en 21 países; NO₂, en 20 países; y PM_{2.5}, en 15 países. “Solo Canadá, los Estados Unidos, Guatemala, Perú y Bolivia han adoptado la OMS-AQG o niveles más bajos para PM₁₀ en su legislación nacional y solo Canadá, Estados Unidos y Guatemala para PM_{2.5}”³¹

Las actividades antropogénicas generadas en la ciudad de Guatemala provienen mayormente de origen vehicular. Constituye una de las causas más relevante en el deterioro de la calidad del aire afectando la carga y concentraciones químicas en el deterioro de la calidad del aire a nivel local. A raíz que el parque vehicular de la ciudad de Guatemala está conformada aproximadamente por 1 800 000 vehículos que transitan diariamente, según datos de la SAT. Los mayores emisores de contaminación área urbana por fuentes de combustibles fósiles son los vehículos con motores diésel. Las fuentes

³⁰ Monitoreo de la Calidad del Aire en Américalatina. *Programa de Control de Contaminación del Aire*. p. 1

³¹ Oficina Regional para las Américas de la Organización Mundial de la Salud. *Contaminación del aire ambiental exterior y en la vivienda: Preguntas frecuentes*. p. 1

móviles en ruta, según los registros de la SAT, el 99,999 % combustionan gasolina y diésel, como resultado de la quema de combustible se generan emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros contaminantes. Las fuentes móviles en ruta que más predominan lo constituyen las unidades que utilizaron gasolina como combustible. Sin embargo, predominantemente las emisiones de dióxido de carbono, provino de las unidades que utilizaron diésel como combustible.

Actualmente, la evaluación de la calidad del aire se realiza a través de 6 estaciones de monitoreo. Se encuentran ubicadas en diversos puntos de la capital guatemalteca. Dichas estaciones recaban datos de partículas totales en suspensión, partículas menores de 5 y 10 micras de diámetro, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y presencia de lluvia ácida. Las estaciones que se encargan del monitoreo de la calidad el aire en la ciudad de Guatemala.

La situación actual de la contaminación ambiental del aire que enfrenta el país es el resultado de una falta de interés, actitud y formulación de políticas para regular los estándares nacionales de las instituciones y ministerios. Se debe a que no se tiene una estructura sólida de investigación técnica y científica con respecto a los efectos de la contaminación del aire en los seres humanos y el impacto en el medio ambiente.

En Guatemala hay dos instituciones nacionales en el área de las contaminaciones del aire que recolectan, monitorean el sistema de datos y reportan información pública. La institución nacional es el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología INSIVUMEH y el Laboratorio de Monitoreo del Aire LMA, de la Facultad de Ciencias Químicas de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC). La red de monitoreo de la calidad del aire por

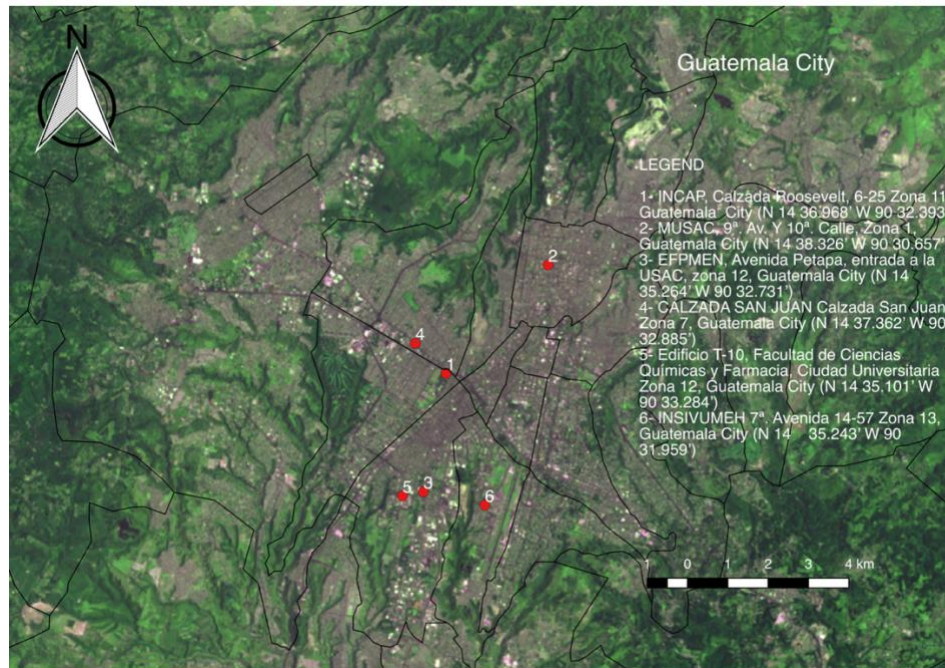
INSIVUMEH en Guatemala consiste en una estación central que recopila datos, “ubicada en el Centro Nacional de Pronósticos (NOC) dentro de las instalaciones de INSIVUMEH, y 4 estaciones remotas, conectadas al CNP a través de TCP / IP, ubicadas en 4 ciudades diferentes”³² y datos de estaciones de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la USAC, como se describe a continuación:

- Estación Radiosonda, 7ª. avenida 14-57 zona 13, ciudad de Guatemala (N 14 35.243 'W 90 31.959')
- Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá INCAP, calzada Roosevelt, 6-25 zona 11, Guatemala City (N 14 36.968' W 90 32.393')
- Museo de la Universidad de San Carlos MUSAC, 9ª. Av. y 10ª. calle, zona 1, Guatemala city (N 14 38.326' W 90 30.657')
- Escuela de Formación de Profesores de Enseñanza Media (EFPEM), avenida Petapa, entrada a la USAC, zona 12, Guatemala City (N 14 35.264' W 90 32.731')
- Motores Hino de Guatemala, S.A., calzada San Juan zona 7, Guatemala city (N 14 37.362' W 90 32.885')
- Universidad de San Carlos de Guatemala, edificio T-10, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Ciudad Universitaria zona 12, Guatemala city (N 14 35.101' W 90 33.284')

En la figura 3 se muestran las diferentes estaciones fijas de muestreo de calidad del aire en el área urbana.

³² INSIVUMEH. *Calidad del aire*. <https://insivumeh.gob.gt/hidrologia/calidad-del-aire/>. Consulta: diciembre 2018.

Figura 3. **Mapa de ciudad de Guatemala con las estaciones de monitoreo de calidad del aire**



Fuente: SARAIVIA, C. *Integrated air quality management in Guatemala: Fine Particulate Matter*. p. 6.

Guatemala no tiene ninguna política o legislación ambiental en el campo de la calidad del aire, que no esté definida en los límites nacionales de concentraciones que podrían causar efectos adversos para la salud de las personas y el medio ambiente en general. El sistema de calidad del aire utilizado como referencia limita la calidad del aire establecida en la legislación de los EE. UU. A través de la agencia de protección ambiental de Estados Unidos de Norte América *EPA*.

En la tabla II se muestran las diferentes tipos de contaminación de material particulado y su relación con la comparación con los distintos estándares de

calidad del aire, “comparación de los diferentes estándares internacionales de calidad del aire valores representados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ”.

Tabla II. **Guías de material particulado**

Contaminante	Tiempo	Guías OMS 2005 ^a	EU 2008/50/EC ^b	U.S.A. EPA ^c	Guatemala
PM₁₀	24 horas	50	50	150	--
	Anual	20	40	--	--
PM_{2.5}	24 horas	25	25	35	--
	Anual	10	--	12	--

Fuente: elaboración propia.

- a- Organización Mundial de la Salud, guías de calidad del aire para material particulado, 2005.
- b- Unión Europea ha establecido los estándares de emisión europeos, que incluyen límites para partículas en el aire, 2008.
- c- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha establecido estándares para las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5}, 2013 (Ver Normas Nacionales de Calidad del Aire Ambiental NAAQS).

2. METODOLOGÍA

El estudio se enfoca en ciudad de Guatemala específicamente, para conocer el grado de alteración de los parámetros de agua de lluvia y la relación entre la contaminación del aire, por los parámetros de material particulado en el ambiente y la relación sobre el impacto al medio ambiente y salud, comprobando el efecto de lavado o *washout* (en inglés), que se produce cuando la precipitación ayuda a mejorar las condiciones de calidad atmosférica.

El análisis se realiza en un sitio de muestreo localizado en la figura 4. En ciudad de Guatemala, donde está instalado el sensor de calidad del aire del proyecto Ambente, la estación meteorológica y el muestreador de lluvia, el procedimiento de obtención las muestras de lluvia se realizaron cada vez que se presentaban los eventos de precipitación. Se estuvo registrando un tiempo promedio de 1 hora o la duración de la lluvia cuando era menor a una hora. Se procedía a retirar el muestreador de agua de lluvia para su análisis posterior. Todos los registros estuvieron en tiempo real esto ayuda a obtener datos representativos de los parámetros que se evaluaron.

Para el análisis de agua de lluvia se midieron los parámetros de pH y sólidos disueltos totales utilizando equipo de laboratorio calibrados, también se está registrando la contaminación atmosférica por concentraciones de material particulado en tiempo real, esto se hizo gracias a los registros que compartió el proyecto Ambente sobre el monitoreo de calidad del aire en tiempo real en ciudad de Guatemala. Donde se registró PM_{2.5} y PM₁₀, también se tienen registros de temperatura y humedad relativa del ambiente.

Para el análisis de calidad del aire por partículas en el ambiente. Se analizaron un total de 14,141 datos entre PM_{2.5} y PM₁₀. Estos registros representan los datos de los días donde se realizaron las muestras de agua.

2.1. Parámetros a evaluar durante la deposición húmeda

Durante el proceso de deposición húmeda, se consideran parámetros importantes a evaluar, para comprender el proceso de la mejora en la calidad del aire, durante los eventos de lluvia. La influencia de contaminación atmosférica así como la meteorología pueden provocar cambios que alteren las propiedades del agua.

2.1.1. Lluvia en Guatemala

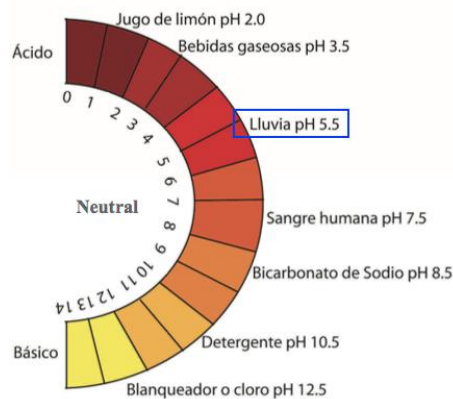
Para determinar las características químicas de las muestras de agua de lluvia se procedió a realizar análisis de pH y sólidos disueltos totales. Se conoce la alteración del agua de lluvia producto de la contaminación atmosférica por concentraciones de material articulado. Para esto se utilizó un aparato medidor de pH para medir la acidez o la alcalinidad de una solución marca *Hanna Instruments Deutschland GmbH* HI 9124. Para la medición de sólidos disueltos totales se utilizó un aparato marca *HACH Sension +DO6*.

La muestra de agua de lluvia se preparó con agua destilada cuya composición se basa en la unión de moléculas de H₂O y ha sido purificada o limpiada mediante destilación. Su pH oscila entre 5 y 6,5.

2.1.2. El pH en el agua

Es uno de los componentes más importantes para conocer la calidad del agua. “Es la forma como se expresa la concentración de los iones de hidrógeno, exactamente la actividad del ión hidrógeno”³³. Las mediciones de pH se ejecutan en una escala de 0 a 14, con 7.0 considerado neutro. Las soluciones con un pH inferior a 7,0 se consideran ácidos, las soluciones con un pH por encima de 7,0 hasta 14,0 se consideran bases o alcalinos. Todos los organismos están sujetos a la cantidad de acidez del agua y funcionan mejor dentro de un rango determinado.

Figura 4. Descripción de la relación de pH



Fuente: SIGLER y BAUDER. *Alkalinity, pH, and Total Dissolved Solids*. p. 1.

El pH del agua pura es de una escala de 7 a 25 °C, pero cuando se expone al dióxido de carbono en la atmósfera este equilibrio resulta en un pH de aproximadamente 5,2. Debido a la asociación de pH con los gases atmosféricos

³³ ROMERO. *Calidad del Agua*. p. 485.

y la temperatura. “El pH en presencia con el CO₂ del ambiente puede disminuir convirtiéndose en un pH ácido”³⁴.

2.1.3. Los sólidos disueltos totales

“Es el término utilizado para describir las sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica presentes en la solución en agua”³⁵.

El sólido disuelto total es clasificado como un contaminante secundario por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América y se sugiere un máximo de 500 mg/L en agua potable. Este estándar secundario se establece porque SDT elevado proporciona al agua una apariencia turbia y disminuye el sabor en esta. Personas no acostumbradas al agua con alto contenido de SDT pueden experimentar irritación gastrointestinal al beber esta.

2.1.4. ¿Qué es el material particulado?

La materia particulada (PM), o más apropiadamente, el aerosol atmosférico es actualmente objeto de una extensa investigación. “Fue solo a principios de los años 80 que el tema comenzó a recibir una mayor atención de la comunidad científica de la atmósfera”³⁶. “Los aerosoles atmosféricos afectan la calidad del aire y, a su vez, el bienestar humano y del ecosistema”³⁷.

³⁴ SIGLER, A. BAUDER, J. *Alkalinity, pH, and Total Dissolved Solids*. p. 1

³⁵ Organización Mundial de la Salud. *Guías para la calidad del agua potable*. p. 4.

³⁶ FUZZI, BALTENSBERGER U., CARSLAW K., DECESARI S., et al. *Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs*. p.15

³⁷ FOWLER, PILEGAARD, SUTTON, AMBUS, et al. *Atmospheric composition change: Ecosystems-Atmosphere interactions*. p. 6.

“El PM tiene una composición química diversa y su tamaño varía de 0,005 a 100 μm de diámetro aerodinámico”³⁸. “Sin embargo, la mayoría de las partículas presentes en la atmósfera tienen un tamaño menor a 40 μm ”³⁹. El PM se produce por la quema incompleta del combustible para motores diésel y los combustibles sólidos, como la madera y el carbón. El diámetro aerodinámico está en función de los procesos de formación de las partículas, la comunidad de aerosoles utiliza tres enfoques para la clasificación de partículas por tamaño: “modos, basados en las distribuciones de tamaño observadas y los mecanismos de formación; dosimetría, basada en la entrada a varios compartimentos del sistema respiratorio; y punto de corte”⁴⁰.

El contaminante considerado como uno de los más peligrosos por la Organización mundial de la Salud, es el material particulado llamado PM por sus siglas en inglés (*Particulate Matter*). “Las PM son un indicador representativo común de la contaminación del aire. Este contaminante atmosférico se encuentra una extensa clase de contaminantes constituidas por diferentes tipos de polvos y humos”⁴¹. Si bien las partículas con un diámetro de 10 micrones o menos ($\leq \text{PM}_{10}$) pueden penetrar y alojarse profundamente dentro de los pulmones. Existen otras partículas aún más dañinas para la salud que son aquellas con un diámetro de 2,5 micrones o menos ($\leq \text{PM}_{2.5}$).

Las partículas con tamaño aerodinámico no mayor a 10 micras se denominan PM_{10} , “las cuales por su pequeño tamaño pueden ser inhaladas fácilmente y penetrar en el cuerpo humano, afectando la salud de la población

³⁸ United States Environmental Protection Agency. *Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air*. p. 3.

³⁹ Environment Canada and Health Canada. *Priority Substances List Assessment Report, Respirable Particulate Matter Less Than or Equal to 10 Microns*. p. 5.

⁴⁰ EPA 1996. *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. p. 3.

⁴¹ OMS, 2018. *Calidad del aire y salud*. p. 1.

expuesta a concentraciones elevadas⁴². Las partículas más pequeñas contienen los aerosoles formados de forma secundaria (conversión de gas a partícula), partículas de combustión, vapores orgánicos y metálicos recondensados. “Las partículas más grandes generalmente contienen materiales de corteza terrestre y polvo fugitivo de carreteras e industria”⁴³. Las partículas con tamaño aerodinámico no mayor a 2,5 micras se denominan PM_{2.5}, pueden atravesar la barrera pulmonar y entrar en el sistema sanguíneo.

“Estudios epidemiológicos muestran una fuerte correlación entre las concentraciones de material particulado y los problemas respiratorio”⁴⁴, “indicando que el incremento de las concentraciones promedio de PM₁₀ puede causar el incremento de ingresos hospitalarios y mortalidad diaria”⁴⁵.

Estos contaminantes tienen efectos nocivos para la salud y para los diferentes ecosistemas ambientales, causando irritación de los ojos y garganta, incrementan las enfermedades cardiovasculares y hasta provocan enfermedades respiratorias crónicas como cáncer de pulmón.

2.1.5. Tendencias la dirección del viento en Guatemala

Un parámetro interesante que se tomó en cuenta durante el tiempo que duro la investigación, fue la dirección del viento durante los meses de agosto a diciembre. Las corrientes de aire ayudan a dispersar la contaminación, ya que

⁴² MOK, y HOI, K. *Effects of meteorological conditions on PM10 concentrations - a study in Macau.* p. 1.

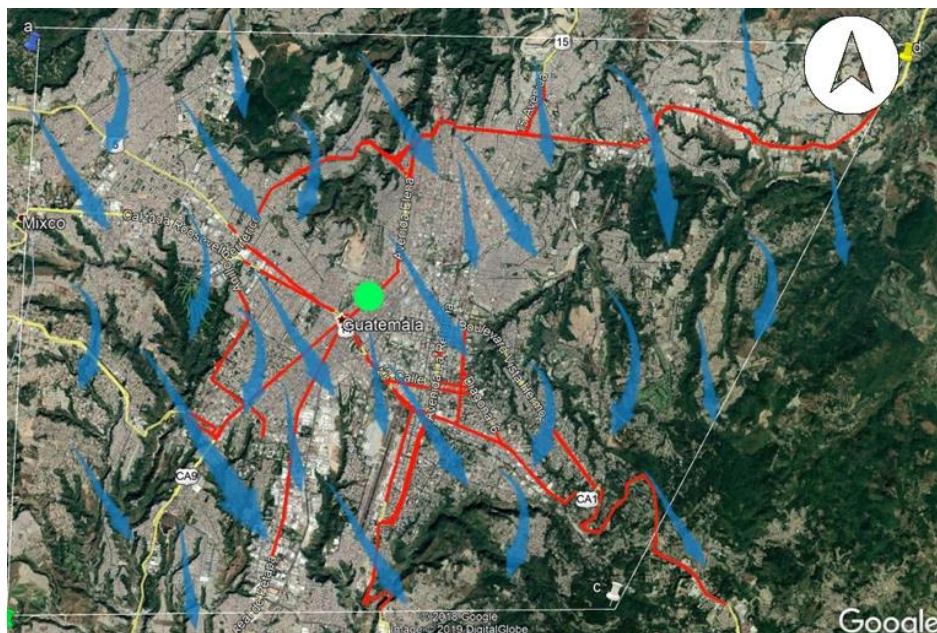
⁴³ WHO. *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide.* p. 7.

⁴⁴ SCHWARTZ, J. *The effects of particulate air pollution on daily deaths: a multi-city case crossover analysis.* p. 2.

⁴⁵ REGALADO, A., PACCHA, E. ÁLVAREZ, O. y MONTAÑO, T. *Comportamiento de las concentraciones de PM10 en la ciudad de Loja - Ecuador y su relación con variables meteorológicas.* p. 138.

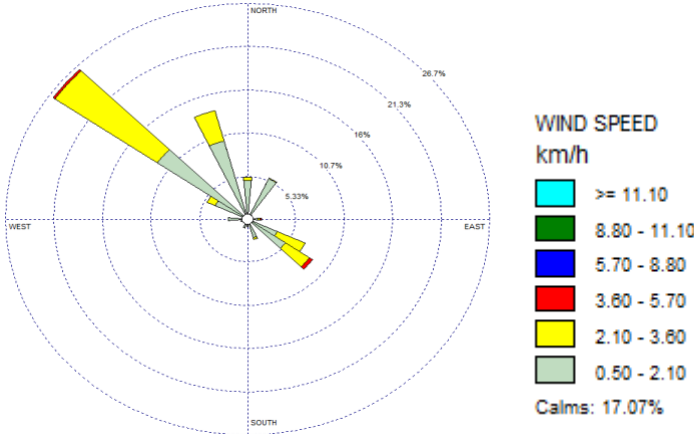
ayuda a limpiar la atmósfera, los movimientos de masa contaminados se desplazan con ayuda de la dirección del viento. En la Imagen 4 se muestra la ciudad de Guatemala y la tendencia dominante de la dirección del viento durante los meses registrados de agosto a diciembre. Durante estos meses se reportó una tendencia de viento Norte y Norte-Oeste, datos registrados por estación meteorológica del proyecto Ambiente 2018.

Figura 5. **Mapa de ciudad de Guatemala y vientos predominantes de septiembre a noviembre 2018**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Earth.

Figura 6. **Rosa de los vientos de septiembre a noviembre 2018**



Fuente: elaboración propia, empleando WeatherLink.

3. MATERIALES UTILIZADOS

3.1. Colector de agua de lluvia

Los materiales utilizados para el muestreo de agua de lluvia fueron un colector de agua de lluvia convencional, el cual recolecta la precipitación generada durante los eventos. Este consiste en un recipiente de vidrio con un volumen de 1 000 milímetros, el cual está anclado a un trípode en el suelo a una altura de 150 centímetros.

Figura 7. Colector de lluvia



Fuente: elaboración propia.

3.2. Sensores de calidad del aire

Para los registros de la contaminación del aire por concentraciones de material particulado PM, de tamaño aerodinámico de 10 y 2,5 micrómetros de diámetro.

Especificación del sensor:

- Valores medidos: PM_{2.5}, PM₁₀
- Rango: 0 – 999,9 µg / m³
- Voltaje de alimentación: 5 V (4,7 V – 5,3 V)
- Consumo de energía (trabajo): 70 mA ± 10 mA
- Consumo de energía (modo de suspensión láser y ventilador): <4mA
- Temperatura de almacenamiento: -20 a + 60 C
- Temperatura de trabajo: -10 a + 50 C
- Humedad (almacenamiento): máx. 90 %
- Humedad (trabajo): máx. 70 % (condensación de vapor de agua lecturas falsas)
- Exactitud:
- 70 % para 0,3µm
- 98 % para 0,5µm

Figura 8. **Sensor de calidad del aire**



Fuente: elaboración propia, foto tomada en el Obelisco ciudad de Guatemala 2018.

3.3. **Estación meteorológica**

Estación meteorológica marca *Dauids Instruments*, serie *vantage Pro2*, con exactitud para tasas de lluvia de hasta 4 "/hr (100 mm / hr): $\pm 4 \%$ del total o \pm del cubo (0,01 "/0,2mm).

Figura 9. Estación meteorológica



Fuente: elaboración propia, laboratorio de calidad del aire Ambiente, ciudad de Guatemala.

4. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO

4.1. Procedimiento de registro de lluvia

Para el procedimiento de lluvia se utilizó una estación meteorológica localizada en el lugar de sitio de muestreo utilizando una estación meteorológica marca vantage Pro2 marca Davids. Los registros se obtuvieron cada 60 minutos de promedio durante los eventos de lluvia. En los meses comprendidos de agosto a noviembre. Para tener acceso a los datos de los registros se utilizó el software *weatherLink*, el cual tiene los datos de los parámetros climatológicos que utilizamos para el desarrollo de este estudio.

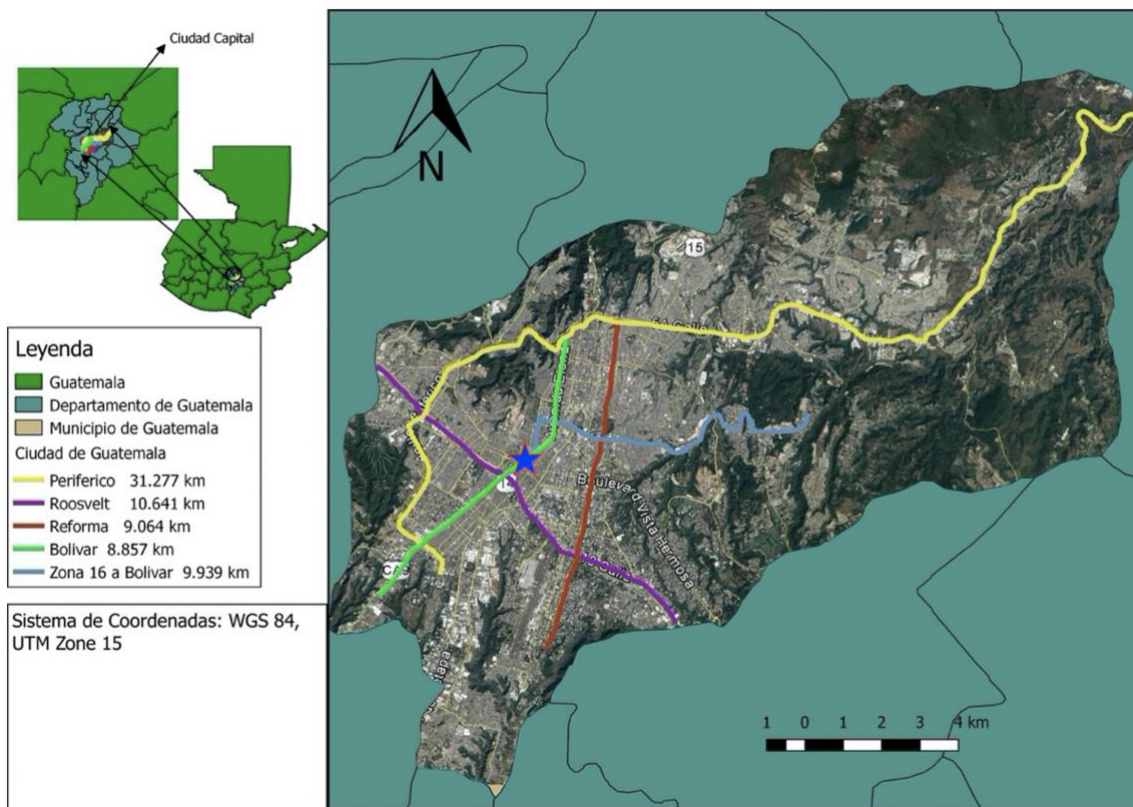
4.2. Procedimiento de muestreo de agua de lluvia

El procedimiento de muestreo consistió en recolectar durante aproximadamente una hora la deposición húmeda o el tiempo que duro el evento de lluvia, la ubicación de recolección de muestras se hizo en el punto fijo según figura 10, localizado en la avenida Bolívar (14,619053, -90,528623). Se escogió esta ubicación ya que se encuentra localizada en un área céntrica de la región de la ciudad de Guatemala, es un lugar representativo de toma de muestra ya que alrededor hay varias vías principales de transporte vehicular que generan emisiones a la atmósfera.

A continuación, se muestra el área de ciudad de Guatemala con las principales vías de transporte terrestre que producen congestionamiento por la alta carga vehicular, estas son las principales vías de accesos hacia la ciudad

capital, también se visualiza las distancias en kilómetros de cada una de las principales vías.

Figura 10. **Mapa de ciudad de Guatemala con ubicación de sensor**



Fuente: elaboración propia, empleando QGIS.

La toma de muestra se realizó en un recipiente con el fin de remitir la muestra para sus análisis *insitu* correspondientes. El muestreador y material utilizado para la toma de muestras de agua de lluvia.

Para el procedimiento de toma de muestra y recolección de muestra se basó en el manual del programa de la precipitación química, lineamientos, objetivos y

estándares de procedimientos operativos, de la Organización Mundial de Meteorología del Departamento de Vigilancia global de la Atmósfera. Se utilizó un colector de superficie donde la toma de muestra de agua de lluvia se hizo mediante un frasco de vidrio con una solución de agua destilada y un embudo de plástico con una superficie de 10 centímetros de diámetro que garantizo la cantidad de muestra necesaria para analizar, con una inclinación superior al 15 % con el fin de facilitar la recolección.

La altura del colector estuvo a 150 centímetros del suelo. Considerando que cuando menor sea esa altura, mayor será la probabilidad de que se depositen partículas de mayor peso por arrastres del viento (resuspensión) o salpicaduras procedentes del suelo.

Consideraciones previas que se tomaron antes de iniciar el muestreo, se precisó verificar que los recipientes de vidrio y el embudo estuvieran en perfectas condiciones, limpias y selladas. Se evitó que entren en contacto con cualquier tipo de contaminante.

El muestreo se realizó durante eventos puntuales, correspondientes a una deposición húmeda concreta de una hora o el tiempo que duro la precipitación. Con la posibilidad de recoger la muestra en el momento en que empezó y termino la precipitación después del tiempo indicado. Cada vez que se realizó un muestreo, durante deposiciones húmedas, se levantaron los frascos de vidrio y embudo completo con agua destilada con el fin de evitar las acumulaciones de suciedad, polvo, entre otros. Se realizó mediciones de campo de los parámetros de pH y sólidos disueltos totales.

4.3. Procedimiento de muestreo de material particulado

Durante el año 2018, el proyecto llamado Ambiente desplegó una red de 4 unidades de monitoreo de calidad del aire en tiempo real en la ciudad de Guatemala, también se muestran las ubicaciones de las diferentes estaciones donde se localizan los sensores. La red de monitoreo y registro proporcionó mediciones de partículas (PM_{2.5} y PM₁₀), así como la temperatura y humedad relativa en alta resolución temporal (2 minutos).

4.3.1. Las especificaciones de cada estación

Sensores: un contador luz de partículas ópticas (NOVA) para parámetros de mediciones MP_{2.5} y MP₁₀, sensores de temperatura y humedad relativa.

Comunicación: vinculada a una base de datos remota a través de WIFI y IoT *Long Range*. También utiliza una capacidad de soporte de datos de tarjeta SD para guardar datos.

Figura 11. **Ubicación de los sensores de calidad del aire**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Earth.

Nombre de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en tiempo real:

- Avenida Bolívar
- Trébol
- USAC/Petapa
- Aguilar Batres

Para el fin de este estudio se utilizó únicamente una estación de monitoreo en tiempo real no. 1 ubicada en avenida Bolívar.

4.3.2. Ventajas de uso de los sensores

Los sistemas de sensores proporcionados por Ambiente tienen un enorme potencial. El rendimiento y los procedimientos de control de calidad en curso se pueden cuantificar de manera confiable; hay un gran número de posibles aplicaciones en epidemiología, salud, exposición de la población, gestión de emisiones y modelización. Por lo tanto, es importante idear adecuadamente un aseguramiento de la calidad robusta y regímenes de control de calidad para obtener el máximo valor de esta tecnología.

Aún no existe un procedimiento internacionalmente acordado para cuantificar el rendimiento de los sensores por el Comité Europeo de Normalización y de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América. Es una forma sostenible y de bajo costo proveyendo una red de monitoreo de la calidad del aire, que proporciona importantes datos sobre las concentraciones en tiempo real de MP en ciudad de Guatemala.

4.3.3. Desventajas de uso de los sensores

A pesar de que es una tecnología emergente tiene varias desventajas, por ejemplo, la vida útil de estos sensores varía de unos cuantos meses a pocos años, la precisión y la exactitud están aun en debate por institutos reconocidos a nivel internacional. Las pruebas han resultado aceptables para las mediciones y sus correlaciones con equipos de referencia internacional; la calibración es un factor importante pues con el tiempo de uso presenta desgloses de variación de niveles en los registros adquiridos durante la medición, pueden presentar interferencias en la medición producto de las condiciones meteorológicas como, por ejemplo, la temperatura y la humedad.

5. RESULTADOS

5.1. Registros de lluvia

Los registros de lluvia se obtuvieron por medio de la estación meteorológica ubicada en el mapa de la figura 10. En la tabla III se muestra los registros de lluvia en milímetros de los meses del año 2018.

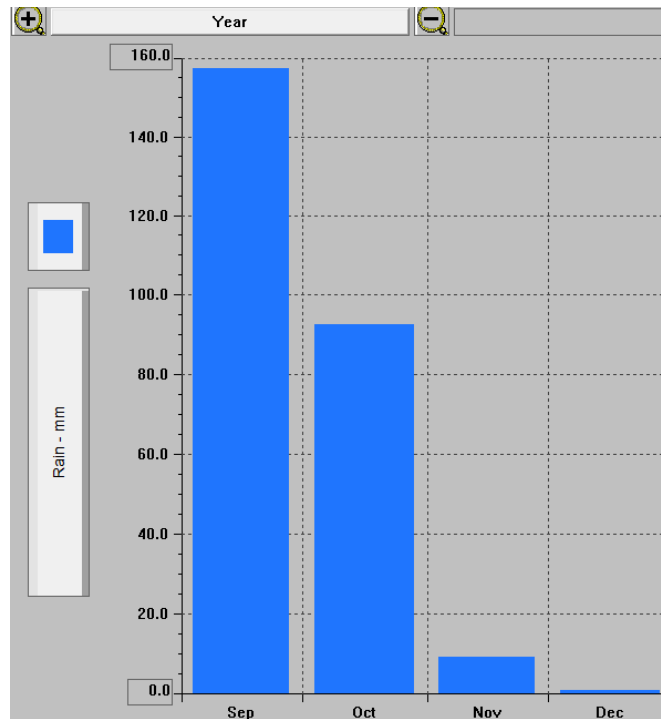
Tabla III. **Registros de lluvia durante los diferentes meses (los registros están en milímetros)**

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	TOT
2018	---	---	---	---	---	180.1	33.0	64.5	157.2	92.7	9.1	0.8	537.5
2019	3.6	0.3	0.3	105.2	46.5	---	---	---	---	---	---	---	155.7

Fuente: elaboración propia, utilizando WeatherLink.

Los meses que se tomaron en cuenta para el estudio fueron comprendidos entre septiembre a noviembre del 2018. Claramente se observan, en los datos registrados por la estación marca Davis Instrument, que los meses de junio y septiembre las mayores precipitaciones, estos valores están representados en milímetros de lluvia acumulada, así como se muestra en la figura 12, con ayuda del software WeatherLink para hacer un análisis detallado de los datos que se registraron durante esos episodios de lluvia.

Figura 12. **Milímetros de lluvia de los meses septiembre a diciembre**



Fuente: elaboración propia, empleando WeatherLink Davids.

Según datos del Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), septiembre es uno de los meses que mayor lluvia presenta. Se asocian condiciones locales como la abundante humedad y altas temperaturas, además del paso o acercamiento de ondas del este, la activación y acercamiento de la zona de convergencia intertropical, la afectación directa o indirecta de sistemas tropicales en el Mar Caribe y Pacífico de Centroamérica.

En la tabla IV se presentan los registros de lluvia en milímetros obtenidos de los días durante la toma de muestras. En total fueron 14 tomas de muestras

de agua de lluvia. Se estuvo midiendo durante esos días la cantidad de precipitación y las horas donde empezó y terminó la lluvia.

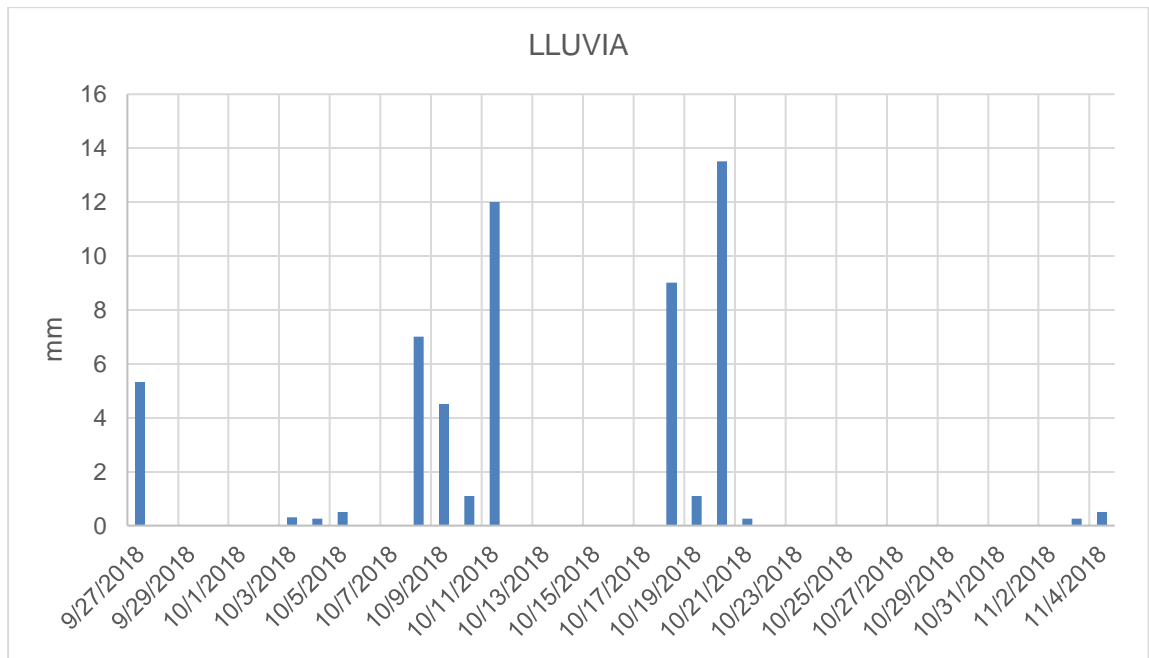
Tabla IV. **Registros de lluvia durante los días de toma de muestra**

Fecha	Lluvia mm por día
27/09/2018	5,33
3/10/2018	0,3
4/10/2018	0,25
5/10/2018	0,25
8/10/2018	2,54
9/10/2018	4,5
10/10/2018	0,25
11/10/2018	12
18/10/2018	9
19/10/2018	0,25
20/10/2018	19,81
21/10/2018	0,25
3/11/2018	0,25
4/11/2018	0,5

Fuente: elaboración propia.

En la figura 13 se muestran los diferentes días donde se realizaron las muestras de agua de lluvia y los milímetros registrados de lluvia. Se visualiza que el día 20 de octubre fue el día donde se registró mayor precipitación, con un total de 19,81 mm/día de lluvia. En la gráfica 2 representan únicamente los días donde se tomaron muestras para el análisis de agua de lluvia.

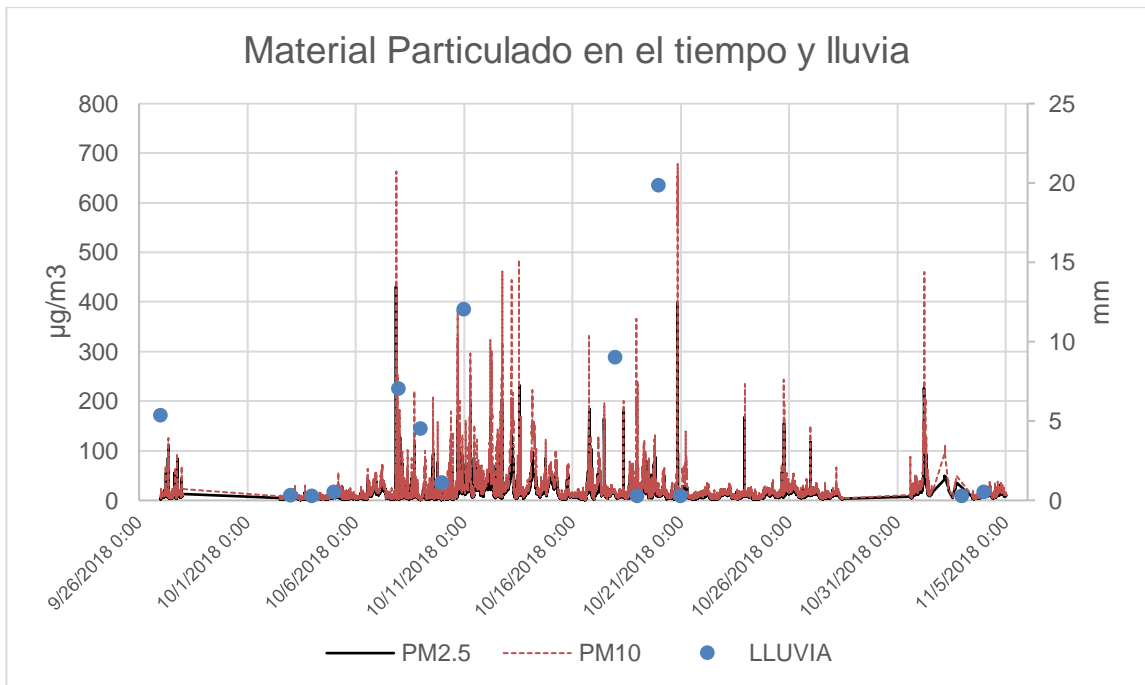
Figura 13. **Días registrados de lluvia donde se obtuvieron muestras de análisis agua**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 14 se muestra la integración del comportamiento de los registros de niveles de calidad del aire por material particulado durante el 27 de agosto al 6 de noviembre 2018. También los días donde se realizaron las tomas de muestra de agua de lluvia para análisis.

Figura 14. **Gráfica del mes de septiembre a noviembre. Registros de los valores de calidad del aire y los días donde se recolectaron muestras de agua lluvia**



Fuente: elaboración propia.

La gráfica de material particulado en el tiempo y lluvia presenta los datos crudos de los registros que se obtuvieron cada 3 minutos en el tiempo. Se conoce el comportamiento espacial y temporal de la contaminación atmosférica en tiempo real en ciudad de Guatemala, esto datos sirven para la toma de decisiones e identificar las fuentes emisoras de mayor contaminación existentes en diferentes puntos.

5.2. Análisis de muestras de agua de lluvia

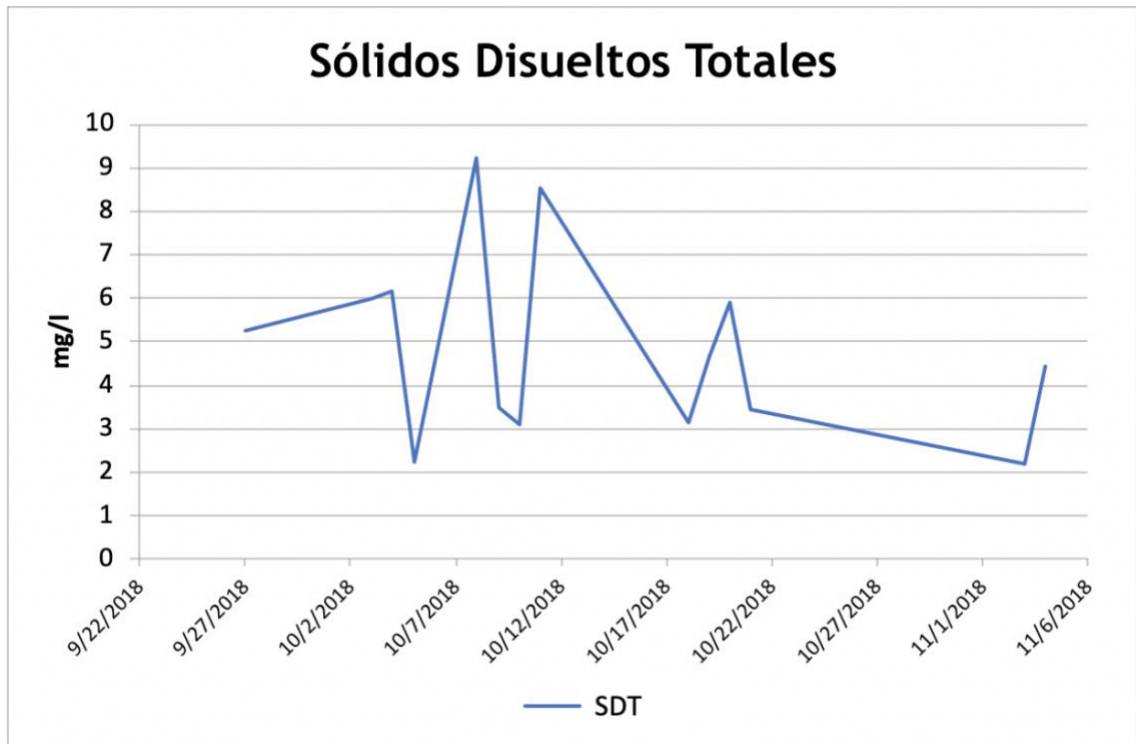
En la tabla V se muestran los datos de inicio y fin de lluvia, milímetros totales de lluvia y los análisis de toma de muestra de agua de los parámetros pH y sólidos disueltos totales.

Tabla V. Datos de los sólidos disueltos totales, pH y lluvia

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT mg/l	Lluvia mm
1	27/09/2018	12:00	17:54	7,45	5,26	5,33
2	3/10/2018	15:00	15:29	7,3	6,01	0,3
3	4/10/2018	21:00	21:59	7,37	6,18	0,25
4	5/10/2018	19:00	20:00	7,2	2,23	0,25
5	8/10/2018	12:03	17:00	7,12	9,22	2,54
6	9/10/2018	12:02	21:56	7,14	3,5	4,5
7	10/10/2018	14:29	15:01	7,23	3,11	0,25
8	11/10/2018	18:07	23:00	7,08	8,52	12
9	18/10/2018	13:04	18:07	6,98	3,14	9
10	19/10/2018	18:20	19:11	7,01	4,66	0,25
11	20/10/2018	17:04	22:00	6,97	5,9	19,81
12	21/10/2018	16:03	16:33	7,02	3,45	0,25
13	3/11/2018	16:55	17:38	6,96	2,18	0,25
14	4/11/2018	16:01	16:57	6,98	4,42	0,5
Promedio				7,13	4,84	3,98
Máximo				7,45	9,22	13,5
Mínimo				6,96	2,18	0,25
Desviación Estándar				0,16	2,32	4,69

Fuente: elaboración propia.

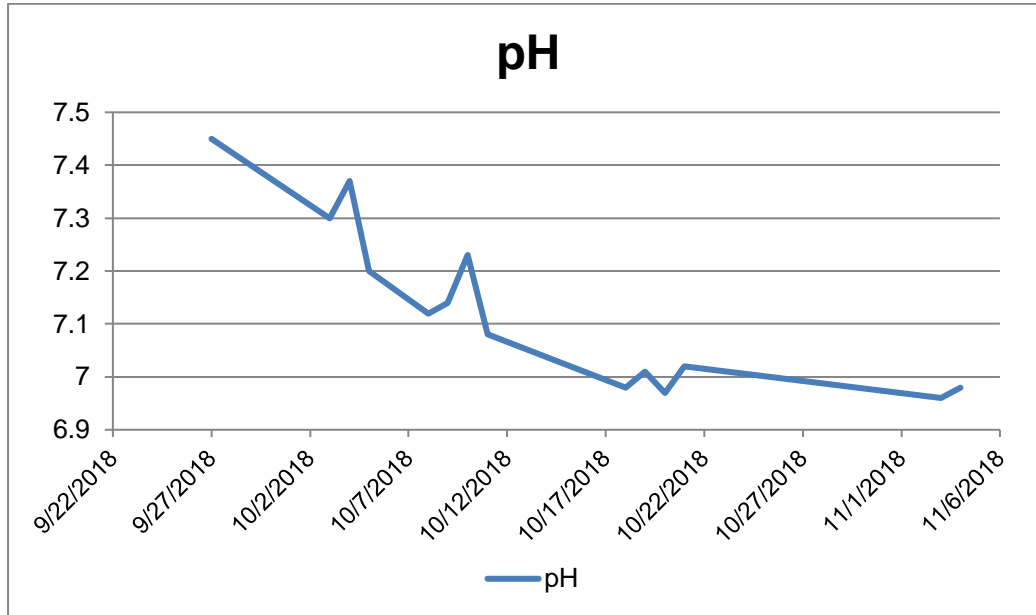
Figura 15. Niveles de SDT en el agua de lluvia



Fuente: elaboración propia.

Los datos de los pH en la figura 16 se muestran picos de aumento en algunos días donde se realizaron los análisis de agua.

Figura 16. Niveles de pH en el agua de lluvia



Fuente: elaboración propia.

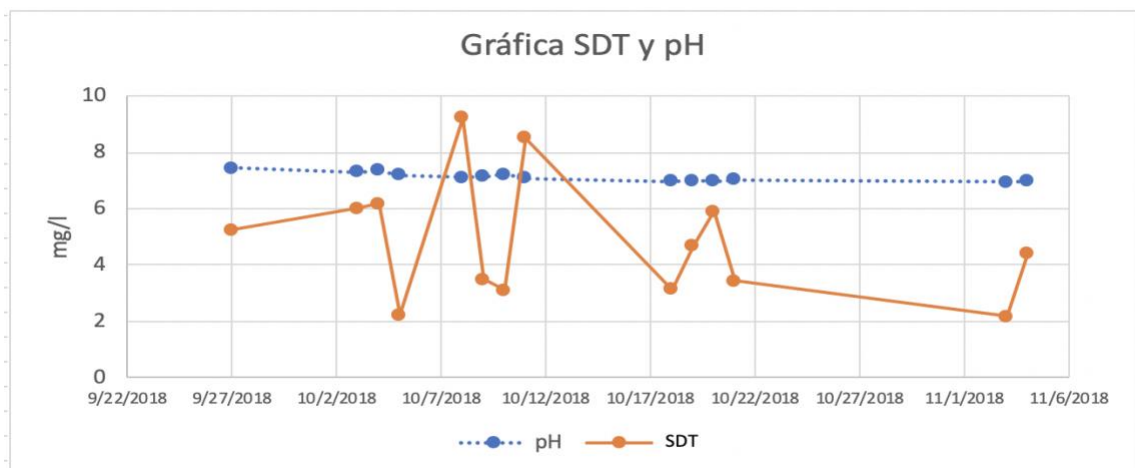
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para obtener una mejor descripción de los datos de pH, sólidos disueltos totales, material particulado y lluvia se analizarán los datos gráficamente independientes, haciendo que se facilite la comprensión de los objetivos trazados en esta investigación.

6.1. Análisis de resultados de pH y sólidos disueltos totales en lluvia

Se analizó los datos de medición de pH y los sólidos disueltos totales (SDT) en el agua de lluvia. En la figura 17 estos resultados son la representación de los días donde se recolectaron las muestras. La tendencia de los valores de pH se mantuvo constantes en el tiempo, mientras que los valores de SDT variaron, puede ser por la cantidad de material particulado que se encontró en la atmósfera durante los eventos de lluvia y fueron arrastrados por el efecto de barrido a la superficie.

Figura 17. Relación entre SDT y pH



Fuente: elaboración propia.

Se obtuvo el coeficiente de correlación en relación con el pH y los sólidos disueltos totales. La correlación se muestra en la tabla VI indicando una correlación positiva entre los dos parámetros evaluados, se muestra cuando el valor de pH es directamente proporcional al valor de sólidos disueltos totales.

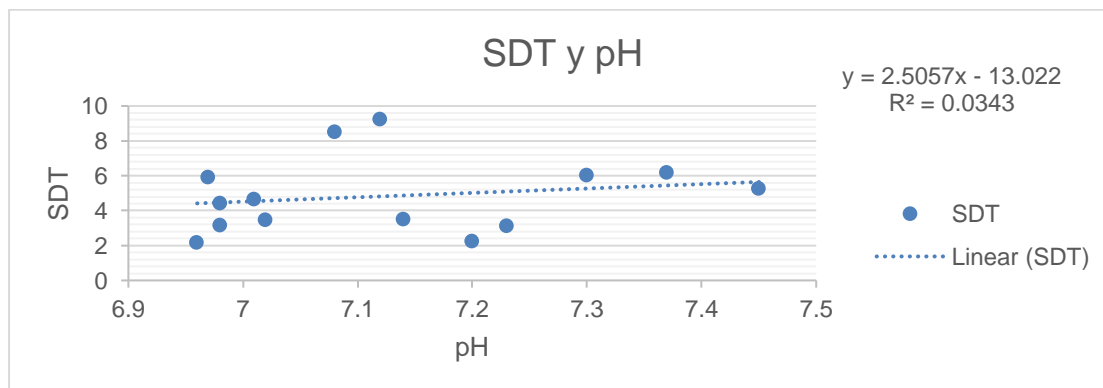
Tabla VI. **Coefficiente de correlación entre pH y SDT**

	pH	SDT
pH	1	
SDT	0,18	1

Fuente: elaboración propia.

En la figura 18 se observa que la correlación es positiva, con línea de regresión ligeramente inclinada hacia arriba, indica que los valores de pH y SDT son directamente proporcional a las concentraciones de material particulado arrastrado a la superficie por eventos de lluvia. Las gotas de lluvia realizan el efecto de barrido, es decir, que la calidad del aire mejora durante la precipitación.

Figura 18. **Correlación entre SDT y pH**

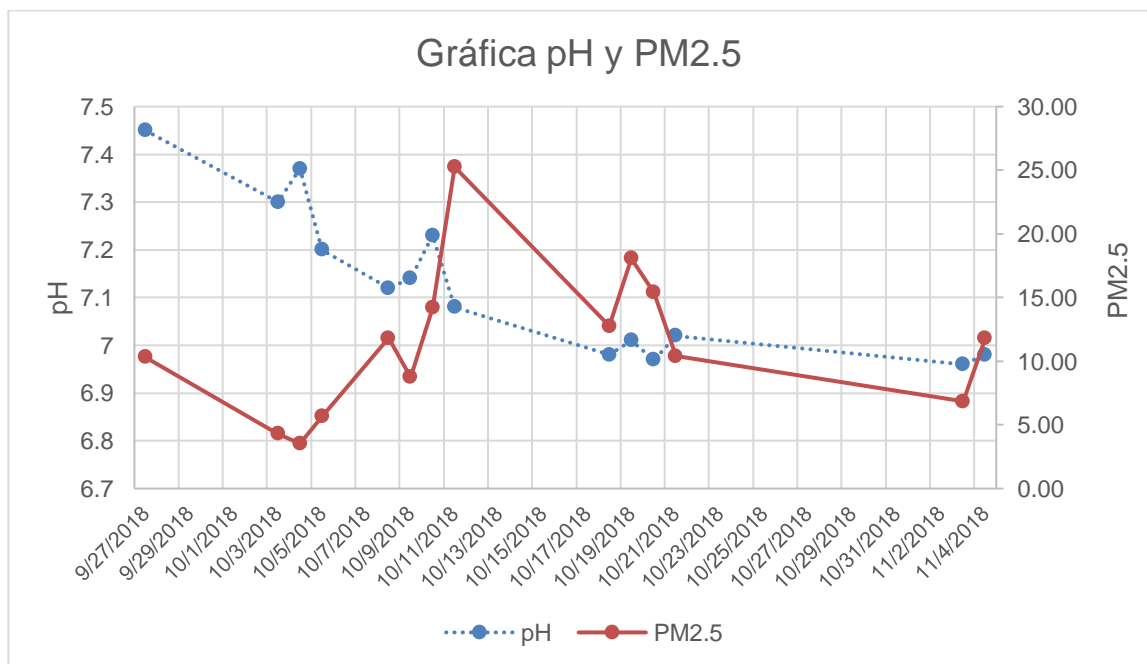


Fuente: elaboración propia.

6.2. Análisis de resultados de pH y material particulado

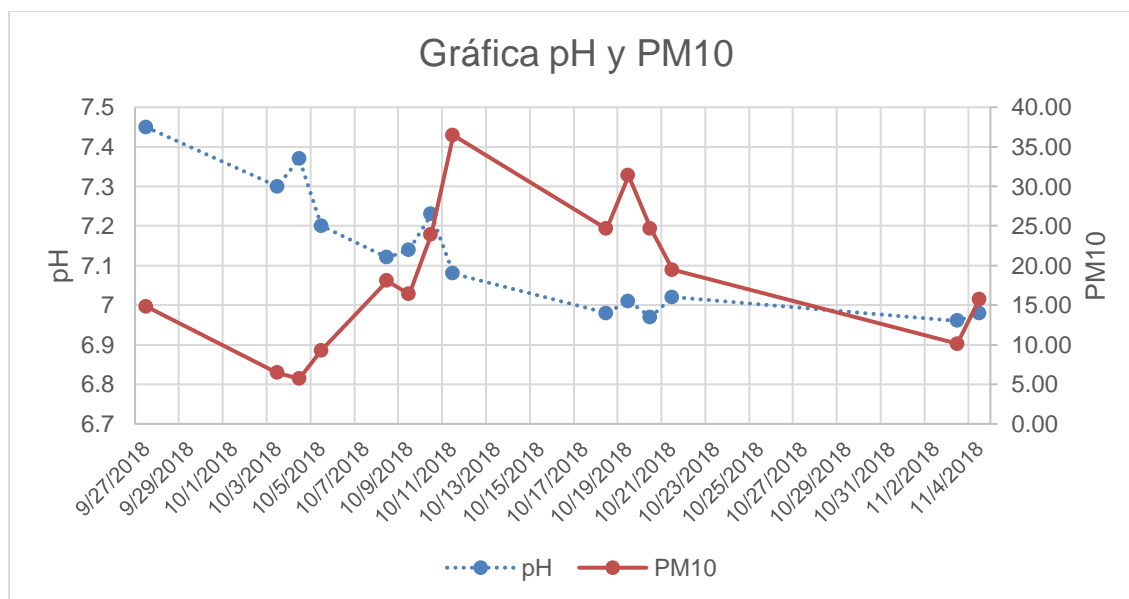
En las figuras 19 y 20 se muestran los valores de pH, PM_{2.5} y PM₁₀ en el tiempo indicando el comportamiento de los parámetros durante los eventos de lluvia. Se observa que hay una similitud entre los valores de PM_{2.5} y PM₁₀ en relación con el pH.

Figura 19. Relación entre pH y PM_{2.5}



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Relación entre pH y PM₁₀



Fuente: elaboración propia.

En la tabla VII el coeficiente de correlación los valores de pH y material particulado son negativos, es decir, los parámetros evaluados son inversamente proporcionales al resultado. Indicando que el valor pH aumenta los valores de material particulado disminuyen. En algunos casos, como muestra la figura 19 y 20, los días 10, 19 de octubre y 4 de noviembre los dos parámetros aumentaron.

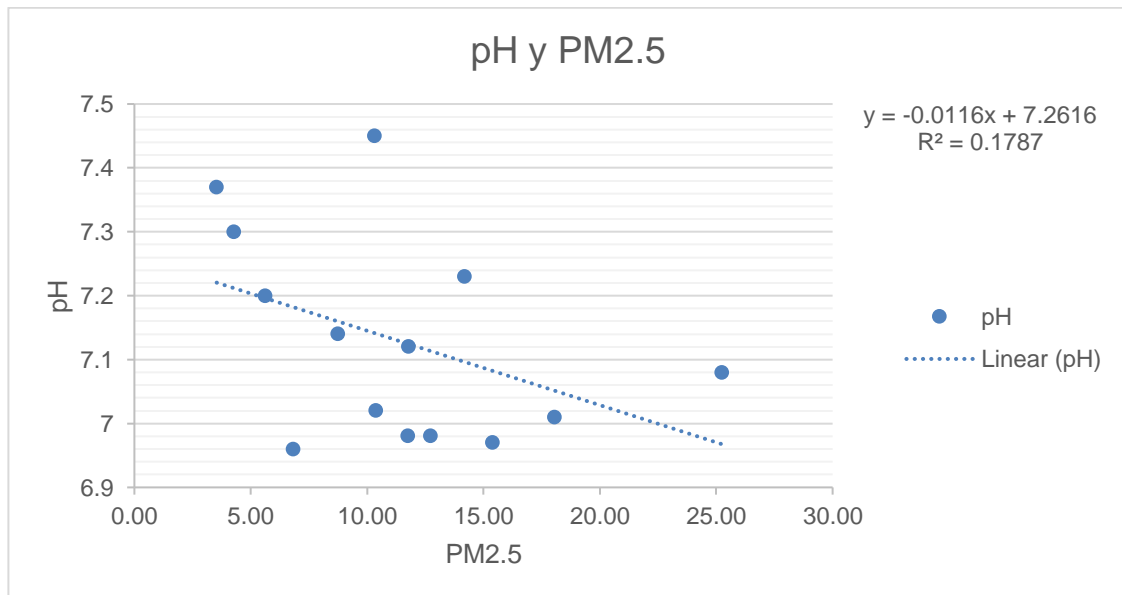
Tabla VII. **Coefficiente de Correlación entre partículas y pH**

	PM _{2.5}	PM ₁₀	pH
PM _{2.5}	1		
PM ₁₀	0,97	1	
pH	-0,42	-0,46	1

Fuente: elaboración propia.

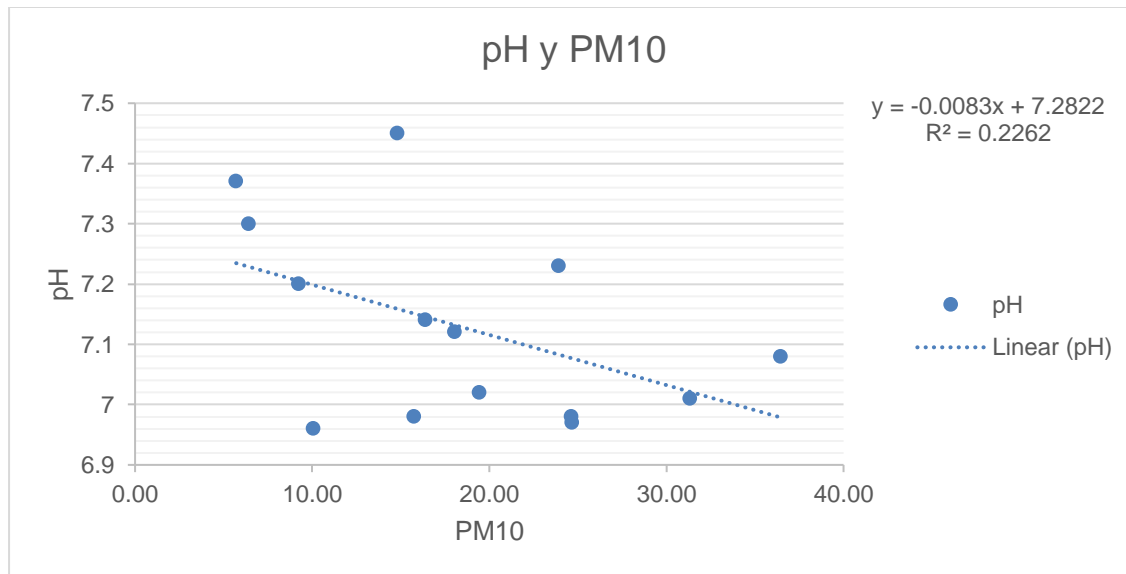
En las figuras 21 y 22 se observa que el coeficiente de determinación R², con línea de regresión inclinada hacia abajo, que los valores de pH y PM son indirectamente proporcionales a las concentraciones de material particulado arrastrado hacia la superficie por eventos de lluvia. Las gotas de lluvia realizan el efecto de barrido, es decir, que la calidad del aire mejora durante la precipitación.

Figura 21. **Correlación entre pH y PM_{2.5}**



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Correlación entre pH y PM₁₀**

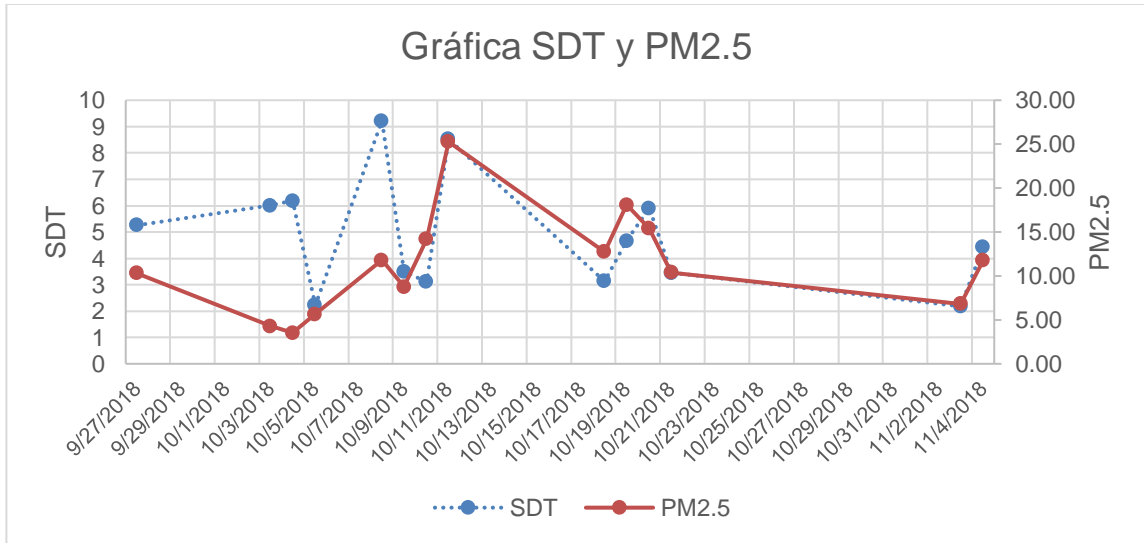


Fuente: elaboración propia.

6.3. **Análisis de resultado de sólidos disueltos totales y material particulado**

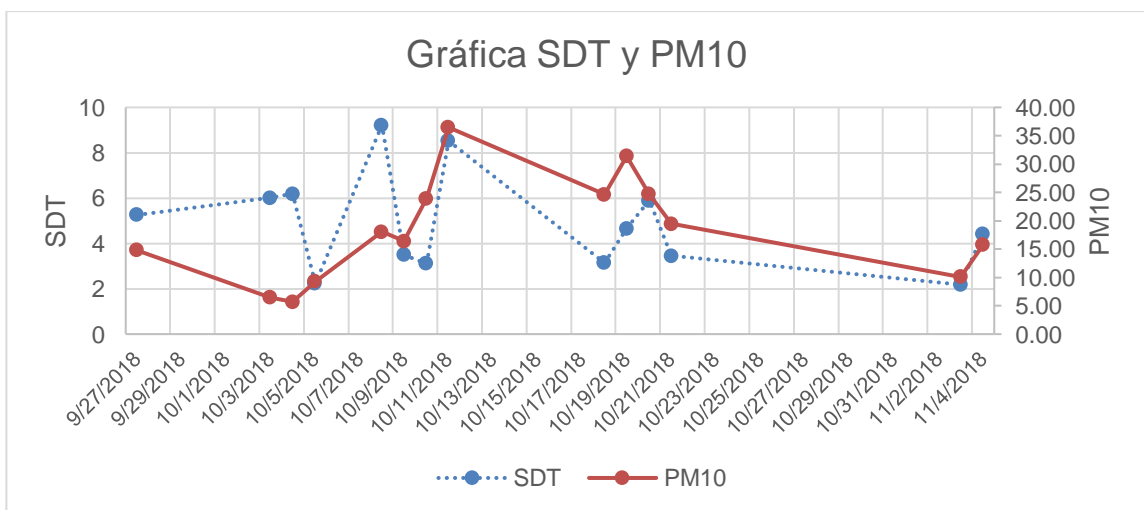
En las figuras 23 y 24 los valores de sólidos disueltos totales, PM_{2.5} y PM₁₀ son bastante similares en el tiempo.

Figura 23. Relación entre SDT y PM_{2,5}



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Relación entre SDT y PM₁₀



Fuente: elaboración propia.

En la tabla VIII el coeficiente de correlación muestra unos valores positivos, el parámetro que se correlaciona mejor con el sólido disuelto total es el $PM_{2.5}$.

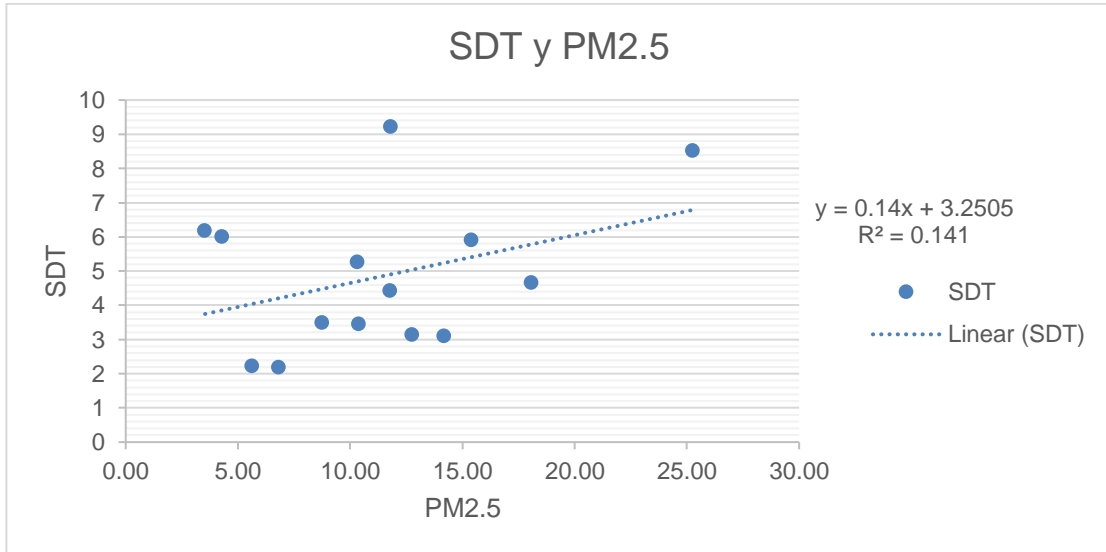
Tabla VIII. **Coeficiente de correlación**

	PM_{2.5}	PM₁₀	SDT
PM_{2.5}	1		
PM₁₀	0,96	1	
SDT	0,37	0,25	1

Fuente: elaboración propia

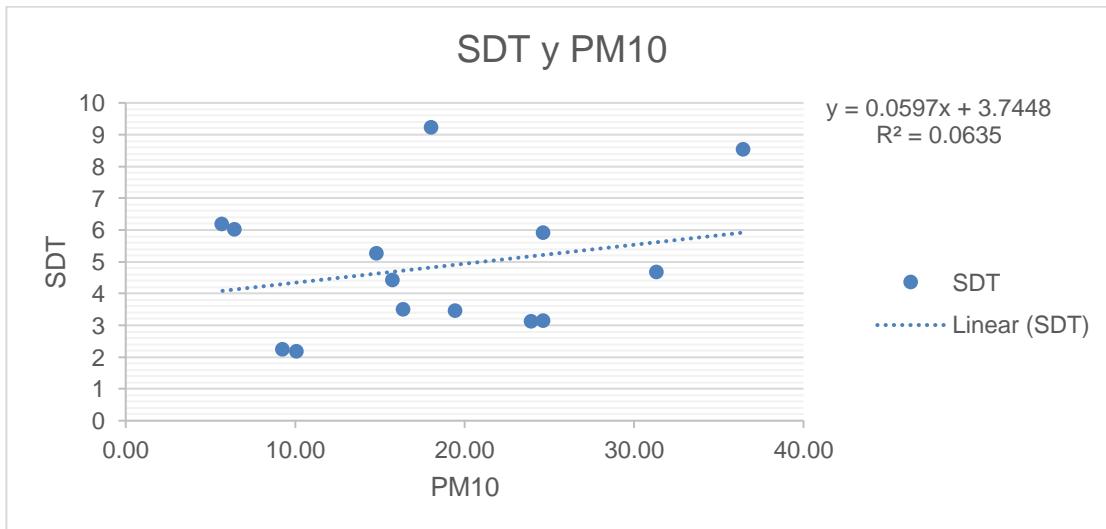
En las figuras 25 y 26 se observa que el coeficiente de determinación R^2 , con línea de regresión inclinada hacia arriba, indicando que los valores de sólidos disueltos totales y PM son directamente proporcionales a las concentraciones de material particulado arrastrado hacia la superficie por eventos de lluvia. Es decir, cuando las concentraciones de material particulado en la atmósfera son mayores, la cantidad de sólidos disueltos totales que son llevados a la superficie por la deposición húmeda durante el efecto de barrido serán mayores. Durante estos sucesos las gotas de lluvia realizan el efecto de barrido, esto quiere decir que la calidad del aire mejora durante la precipitación.

Figura 25. **Correlación entre SDT y PM_{2.5}**



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Gráfica de correlación entre SDT y PM₁₀**



Fuente: elaboración propia.

6.4. Análisis de resultados de material particulado y los registros de lluvia

A continuación, se presentan los análisis de los días individuales en las siguientes tablas. Se presentan las gráficas donde se analizan las lluvias con el efecto de barrido sobre la contaminación atmosférica.

6.4.1. Día 27/09/2018

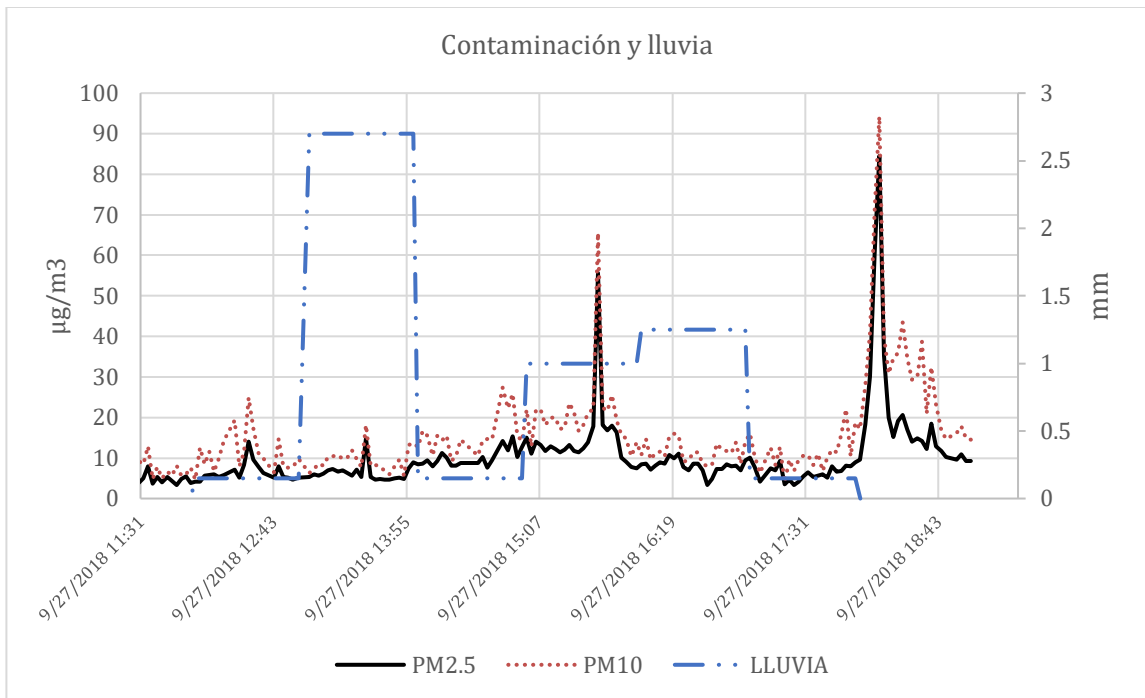
Durante el día 27 de agosto se presentaron dos eventos de lluvia después del mediodía, empezando con una lluvia leve hasta incrementándose a su punto máximo alrededor de las 13:00 horas. En la gráfica de la figura 27, se observa cuando se alcanzó la lluvia máxima se redujo levemente los niveles de material particulado durante las mediciones con el sensor en tiempo real. A las 18:11 horas se presentó un pico de aumento en los niveles de calidad del aire, producto de la falsa lectura por la presencia de la humedad en el ambiente.

Tabla IX. **Día 27 de agosto. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
1	27/09/2018	12:00	17:54	7,45	5,26	5,33

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Día 27 de agosto. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**



Fuente: elaboración propia.

6.4.2. **Día 03/10/2018**

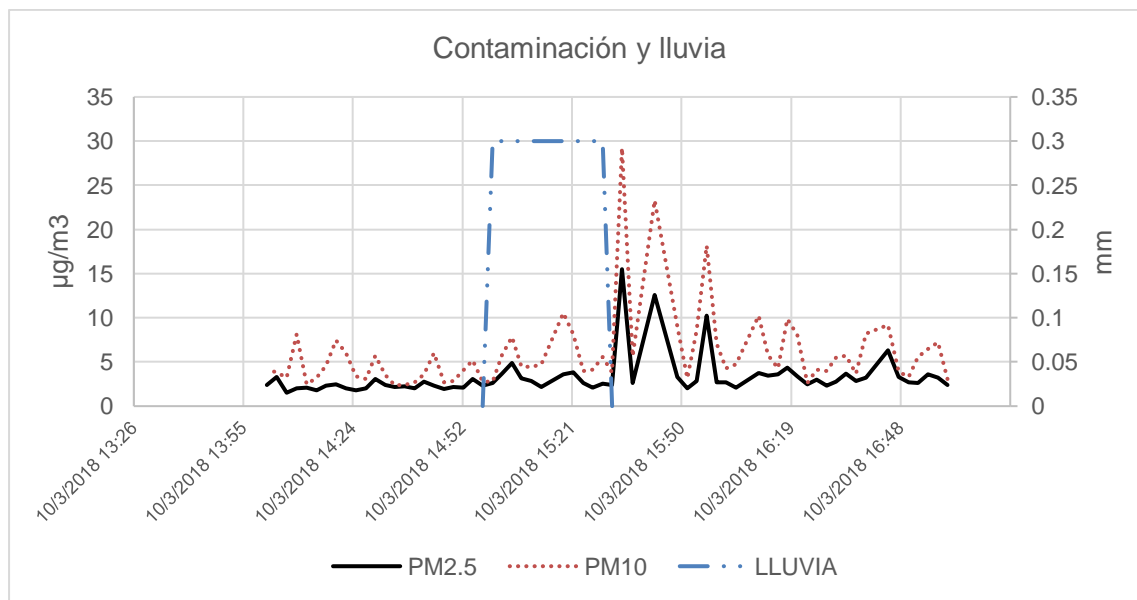
Durante el día 03 de octubre se presentó el evento de lluvia alrededor de las 15:00 horas, con una lluvia leve llegando a un máximo registrado de 0,3 mm. En la gráfica en la figura 28, se observa que la lluvia no interfirió demasiado con los valores de contaminación del aire por material particulado en el ambiente. Se presentó un pico de aumento de los niveles por causas de la falsa lectura producto de la humedad.

Tabla X. **Día 3 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
2	3/10/2018	15:00	15:29	7,3	6,01	0,3

Fuente: elaboración propia

Figura 28. **Día 3 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**



Fuente: elaboración propia.

6.4.3. Día 04/10/2018

Durante el día 04 de octubre se presentó el evento de lluvia alrededor de las 21:00 horas, con una lluvia leve llegando a un máximo registrado de 0,25 mm, en la gráfica de la figura 29, se observa que la lluvia no interfirió demasiado con

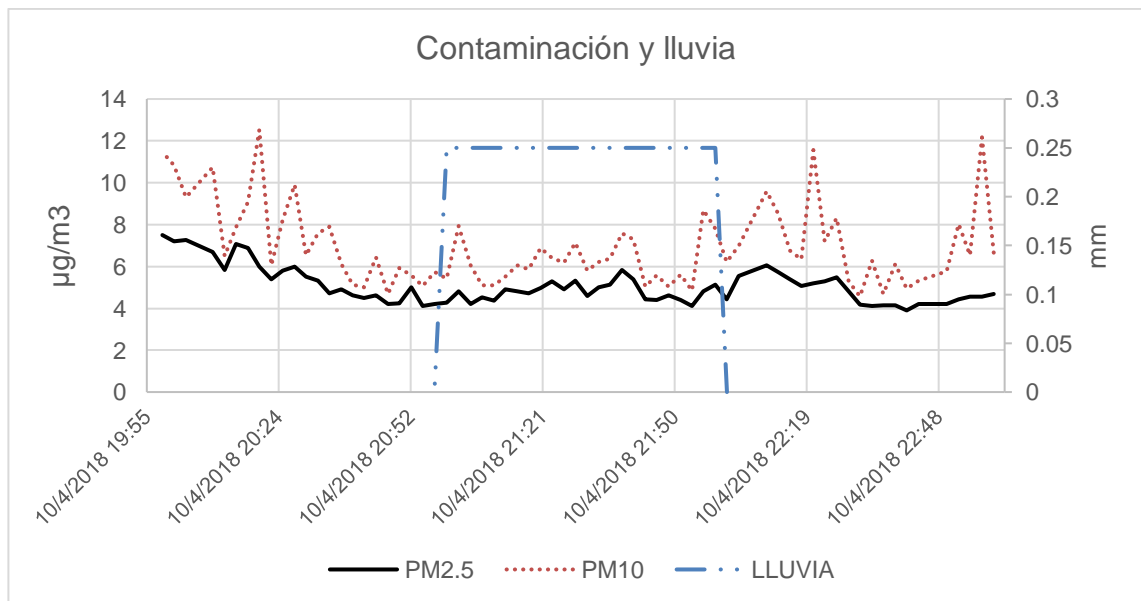
los valores de contaminación del aire por material particulado en el ambiente, se presentó un pico de aumento de los niveles por causas de la falsa lectura producto de la humedad.

Tabla XI. **Día 4 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
3	4/10/2018	21:00	21:59	7,37	6,18	0,25

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Día 4 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**



Fuente: elaboración propia.

6.4.4. Día 05/10/2018

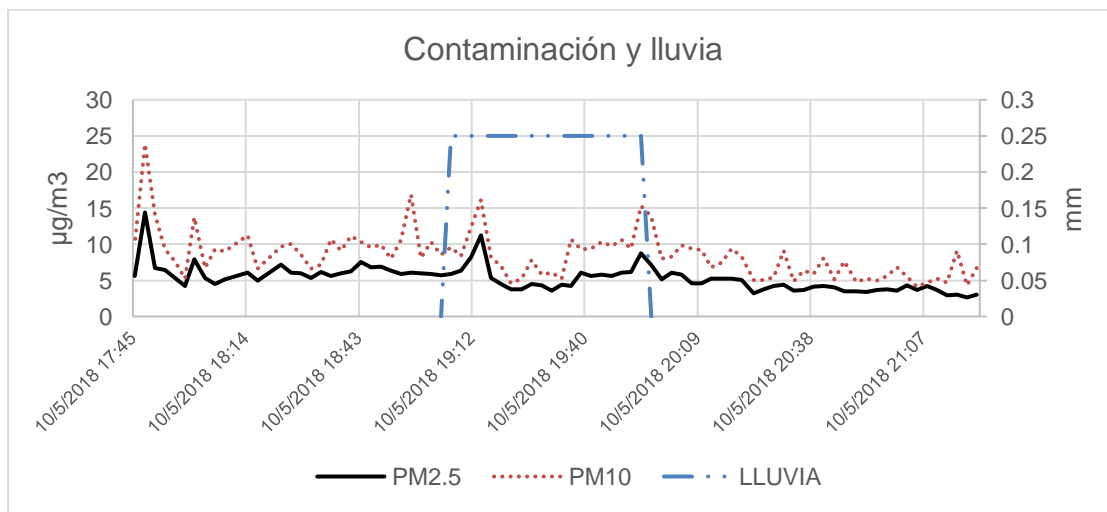
Durante el día 05 de octubre se presentó el evento de lluvia alrededor de las 19:00 horas, con una lluvia leve llegando a un máximo registrado de 0,25 mm. En la gráfica de la figura 30, se observa que la lluvia mejoro la calidad del aire levemente, después no interfirió demasiado con los valores de contaminación del aire por material particulado en el ambiente.

Tabla XII. **Día 5 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
4	5/10/2018	19:00	20:00	7,2	2,23	0,25

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Día 5 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**



Fuente: elaboración propia.

6.4.5. Día 08/10/2018

Durante el día 08 de octubre se presentó el evento de total de lluvia de 4,06 mm, llegando a un máximo registrado de 2,5 mm a la 13:00 horas disminuyendo poco a poco la intensidad, en la gráfica de la figura 31, se observa que solo al inicio de la lluvia mejoro la calidad del aire, después no interfirió demasiado con los valores de contaminación del aire por material particulado en el ambiente. Después de la lluvia se presentó un pico de aumento en los valores de calidad del aire, esto debido a la falsa lectura producto de la humedad.

Tabla XIII. **Día 8 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia Total mm
5	8/10/2018	12:03	17:00	7,12	9,22	4,06

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Día 8 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**



Fuente: elaboración propia.

6.4.6. Día 09/10/2018

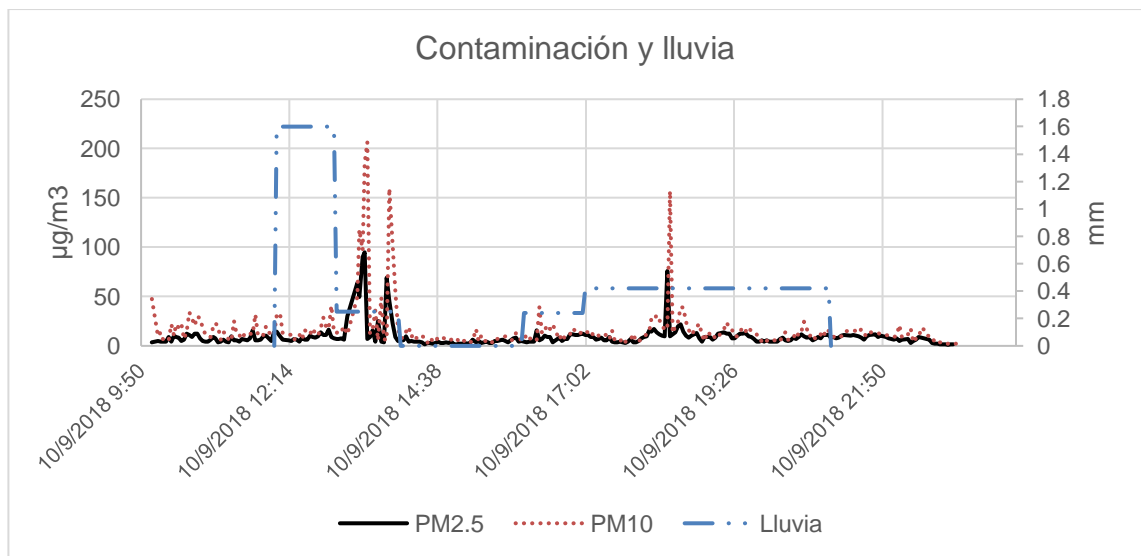
Durante el día 09 de octubre se presentó el evento total de lluvia de 4,5 mm, llegando a un máximo registrado de 1,6 mm alrededor de las 12:00 horas disminuyendo poco a poco, incrementando el nivel después de las 17:00 horas. En la gráfica de la figura 32, se observa que la lluvia mejoro la calidad del aire, después no interfirió demasiado con los valores de contaminación del aire por material particulado en el ambiente. Se presentó un pico de aumento en los valores de calidad del aire, esto debido a la falsa lectura producto de la humedad.

Tabla XIV. **Día 9 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
6	9/10/2018	12:02	21:56	7,14	3,5	4,5

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Día 9 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**



Fuente: elaboración propia.

6.4.7. Día 10/10/2018

Durante el día 10 de octubre se presentó el evento total de lluvia de 0,25 mm. En la gráfica de la figura 33, se observa que la lluvia mantuvo los niveles

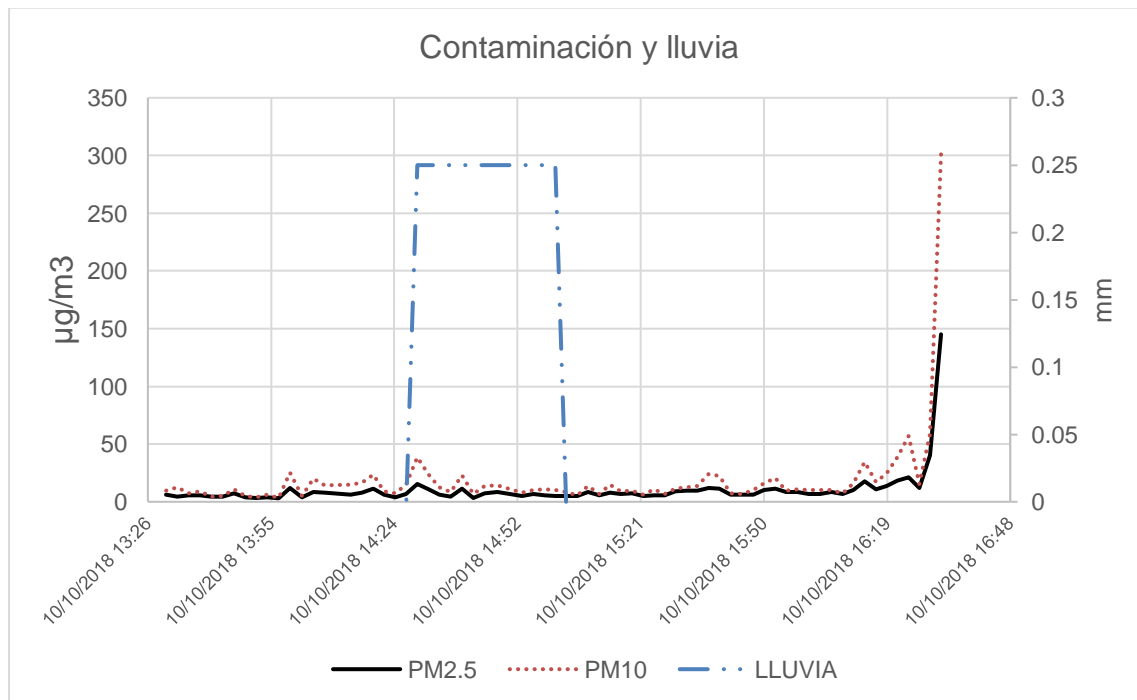
de calidad del aire, después no interfirió demasiado con los valores de contaminación del aire por material particulado en el ambiente.

Tabla XV. **Día 10 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
7	10/10/2018	14:29	15:01	7,23	3,11	0,25

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Día 10 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**



Fuente: elaboración propia.

6.4.8. Día 11/10/2018

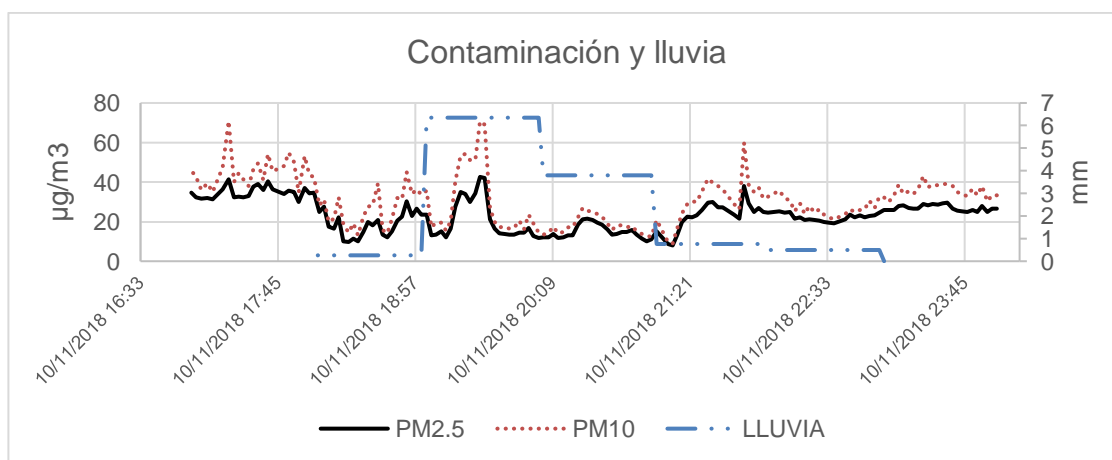
Durante el día 11 de octubre se presentó el evento total de lluvia de 12 mm, llegando a un máximo registrado de 6,15 mm alrededor de las 19:00 horas disminuyendo poco a poco la intensidad. En la gráfica de la figura 34, se observa que la lluvia mejoro la calidad del aire a las 18:00 horas, después no interfirió demasiado con los valores de contaminación del aire por material particulado en el ambiente conforme iban disminuyendo la intensidad de lluvia.

Tabla XVI. **Día 11 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
8	11/10/2018	18:07	23:00	7,08	8,52	12

Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Día 11 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**



Fuente: elaboración propia.

6.4.9. Día 18/10/2018

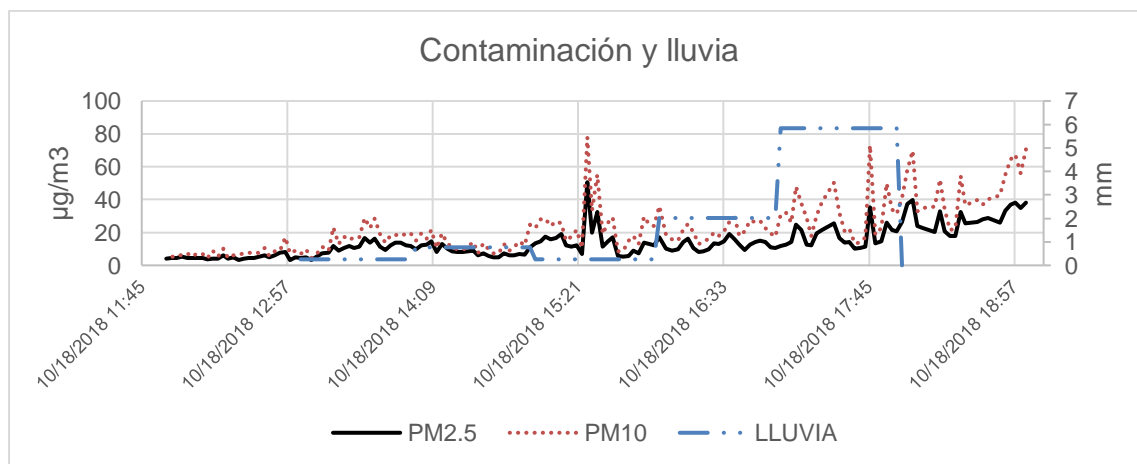
Durante el día 18 de octubre se presentó el evento total de lluvia de 9 mm, llegando a un máximo registrado de 5,84 mm alrededor de las 17:00 horas. En la gráfica de la figura 35, se observa que la lluvia mejoro la calidad del aire a las 18:00 horas, después no interfirió demasiado con los valores de contaminación del aire por material particulado en el ambiente conforme iban disminuyendo la intensidad de lluvia.

Tabla XVII. **Día 18 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
9	18/10/2018	13:04	18:00	6,98	3,14	9

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Día 18 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**



Fuente: elaboración propia.

6.4.10. Día 19/10/2018

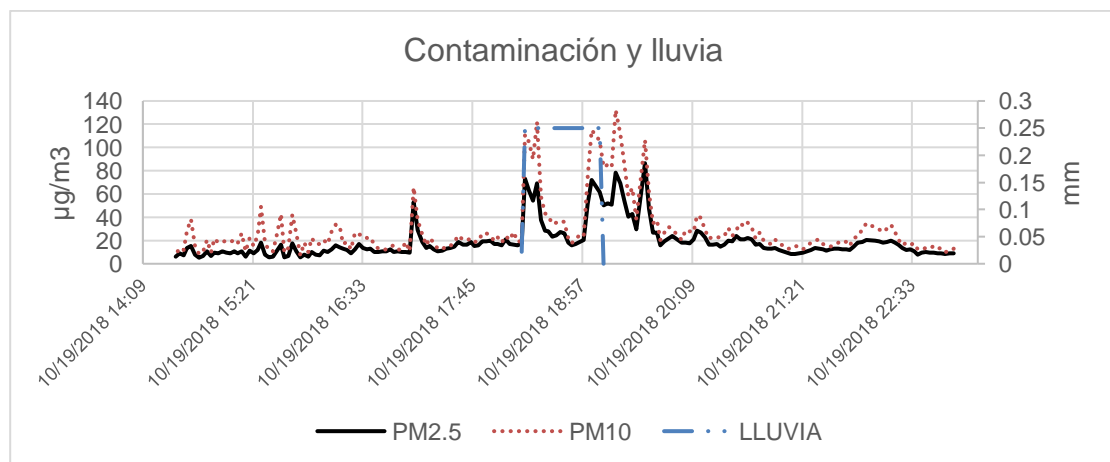
Durante el día 19 de octubre se presentó el evento total de lluvia de 0,25 mm, una precipitación de aproximadamente de 40 min en la gráfica de la figura 36, se observa que la lluvia mejoro la calidad del aire a las 18:30 horas, después no interfirió demasiado con los valores de contaminación del aire por material particulado, se encontraron picos de aumento de PM, esto es debido a la acumulación de humedad en el ambiente.

Tabla XVIII. Día 19 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
10	19/10/2018	18:20	19:11	7,01	4,66	0,25

Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Día 19 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia



Fuente: elaboración propia.

6.4.11. Día 20/10/2018

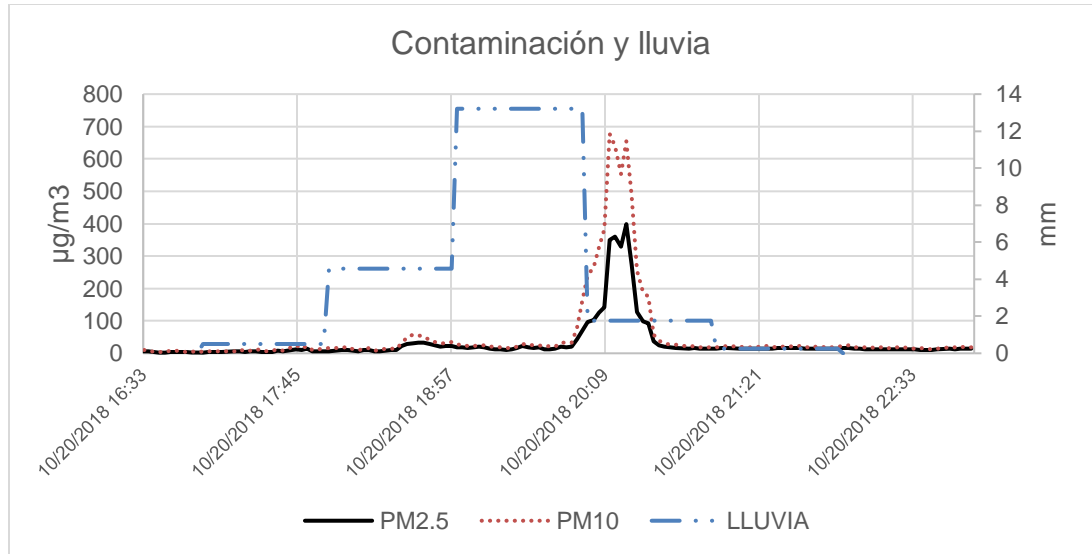
Durante el día 20 de octubre se presentó el evento total de lluvia de 19.81 mm, llegando a un máximo registrado de 13,21 mm alrededor de las 19:00 horas. En la gráfica de la figura 37, se observa que la lluvia mejoro la calidad del aire, se encontraron picos de aumento de PM, debido a la acumulación de humedad en el ambiente. Este día fue el que mayor lluvia se registró entre los 14 datos que se evaluaron.

Tabla XIX. **Día 20 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
11	20/10/2018	17:04	22:00	6,97	5,9	19,81

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Día 20 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**



Fuente: elaboración propia.

6.4.12. Día 21/10/2018

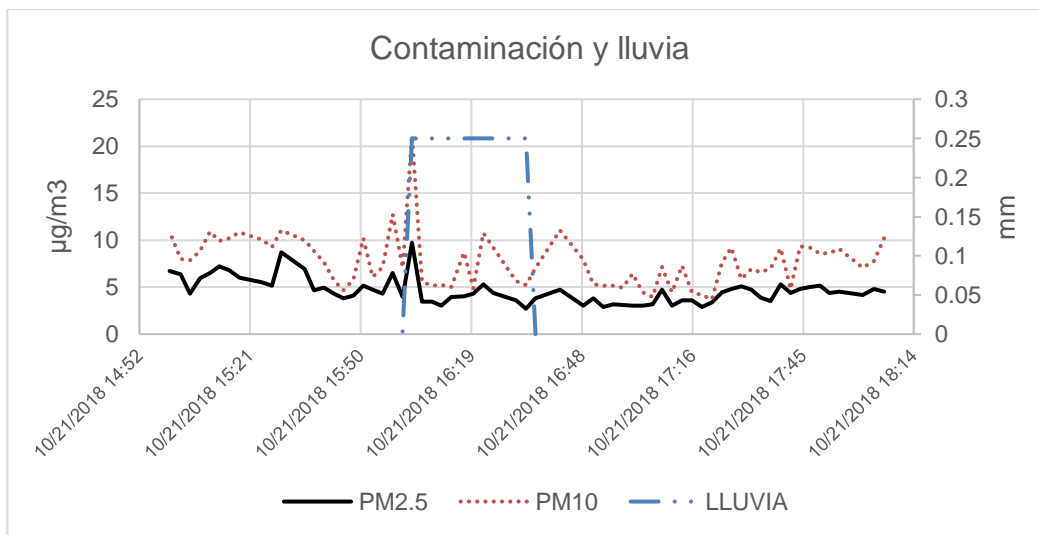
Durante el día 21 de octubre se presentó el evento total de lluvia de 0,25 mm, una precipitación de aproximadamente de 30 min. En la gráfica de la figura 38, se observa que la lluvia mejoro la calidad del aire después de las 16:00 horas, después no interfirió demasiado con los valores de contaminación del aire por material particulado, se encontraron picos de aumento de PM, debido a la acumulación de humedad en el ambiente. Los valores de PM estuvieron relativamente bajos, esto porque los valores registrados fue día domingo.

Tabla XX. **Día 21 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
12	21/10/2018	16:03	16:33	7,02	3,45	0,25

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Día 21 de octubre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**



Fuente: elaboración propia.

6.4.13. **Día 03/11/2018**

Durante el día 3 de noviembre se presentó el evento total de lluvia de 0,25 mm, una precipitación de aproximadamente de 30 min. En la gráfica de la figura 39, se observa que la lluvia mejoro la calidad del aire después de las 17:00 horas,

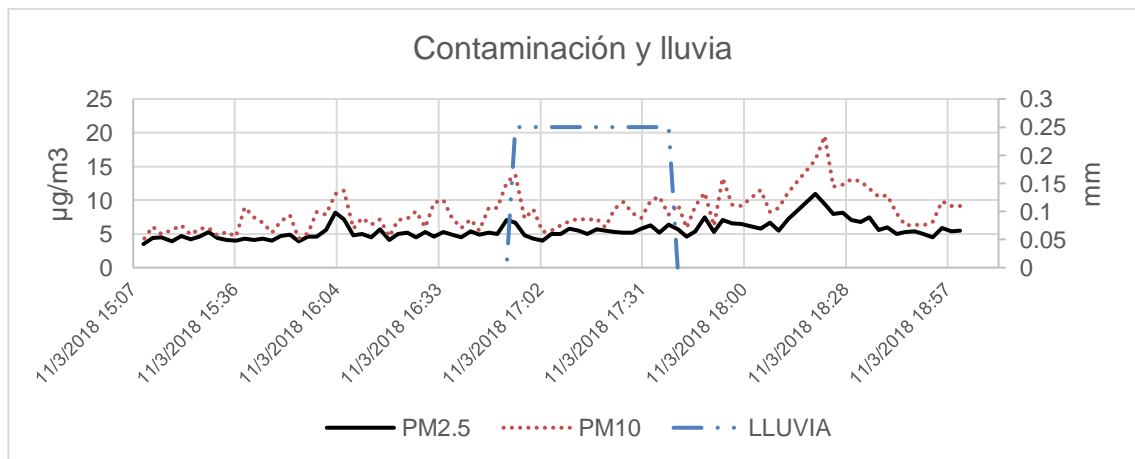
se encontraron picos de aumento de PM, esto es debido a la acumulación de humedad en el ambiente. En general, los valores de calidad del aire estuvieron relativamente bajos durante ese día.

Tabla XXI. **Día 3 de noviembre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
13	3/11/2018	16:55	17:38	6,96	2,18	0,25

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Día 3 de noviembre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia**



Fuente: elaboración propia.

6.4.14. Día 04/11/2018

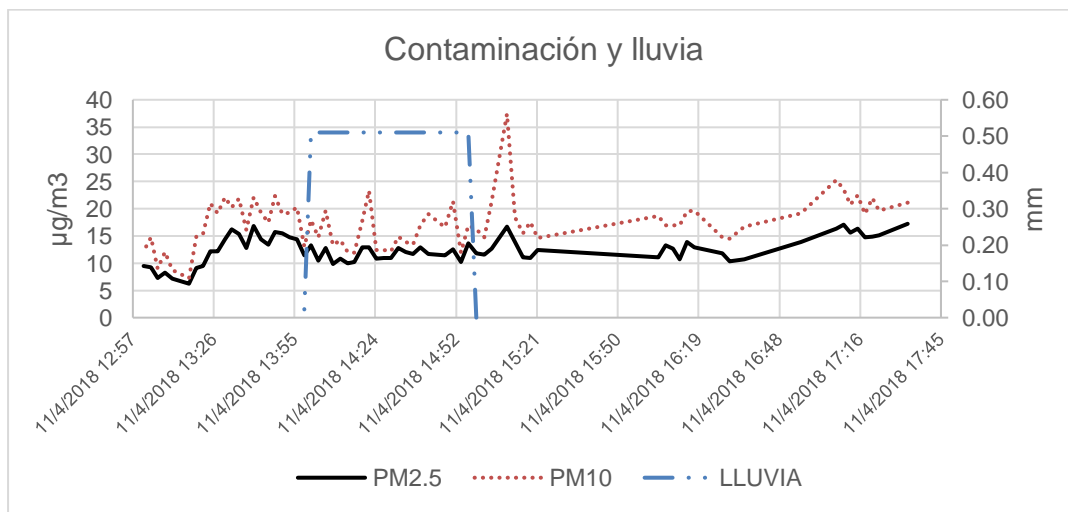
Durante el día 4 de noviembre se presentó el evento total de lluvia de 0,5 mm, una precipitación de aproximadamente de 60 min. En la gráfica de la figura 40, se observa que la lluvia mejoro la calidad del aire durante el evento, se encontraron picos de aumento de PM, debido a la acumulación de humedad en el ambiente. Lo valores de calidad del aire estuvieron relativamente bajos, esto por ser día domingo.

Tabla XXII. Día 4 de noviembre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia

No.	Fecha	Hora inicio	Hora final	pH	SDT	Lluvia mm
14	4/11/2018	16:01	16:57	6,98	4,42	0,5

Fuente: elaboración propia.

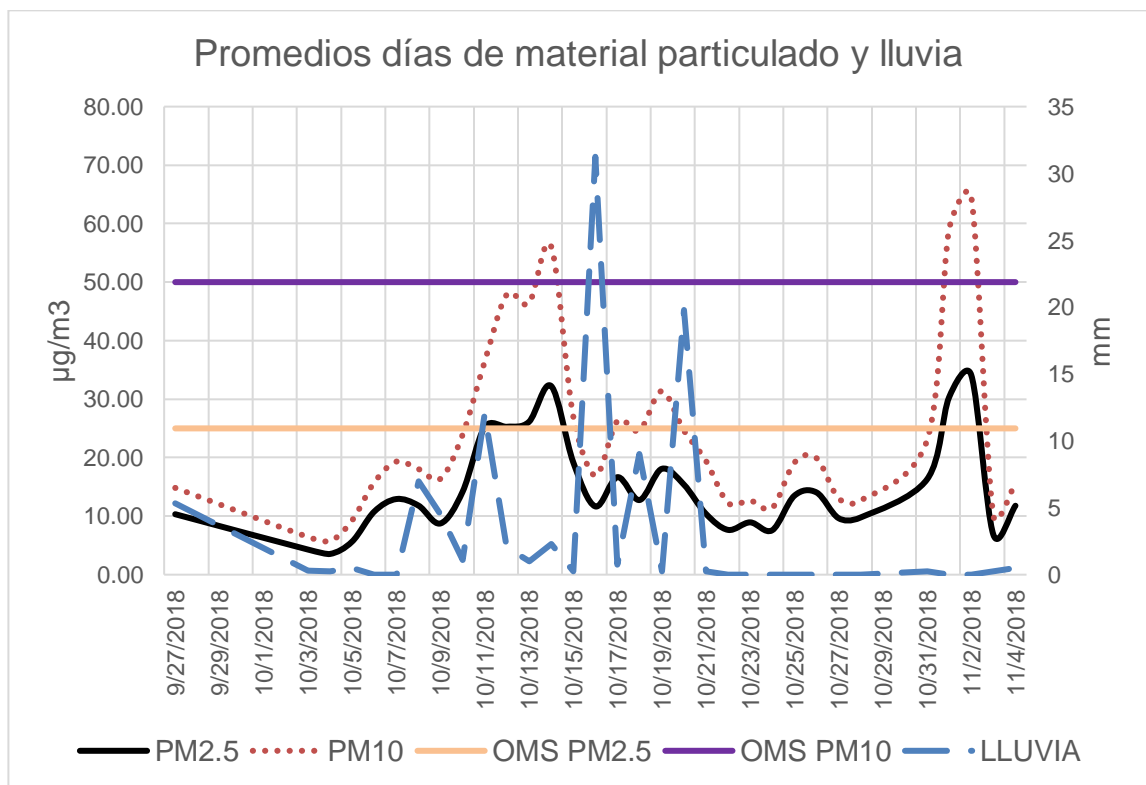
Figura 40. Día 4 de noviembre. Registros de los valores de calidad del aire y lluvia



Fuente: elaboración propia

En la figura 41 se muestra la integración de los datos que se midieron desde el inicio de la investigación hasta su conclusión. Los datos observados de material particulado son los promedios días, donde se muestran las guías de la Organización Mundial de la Salud OMS referente a los límites aceptables de valores de PM₁₀ de 50 µg/m³ y PM_{2.5} de 25 µg/m³. Si estos valores exceden las guías de los límites aceptables representan efectos adversos a la salud en la sociedad urbana.

Figura 41. Promedios días de PM y lluvia



Fuente: elaboración propia.

6.5. Aportación adicional al estudio

El alto costo de la obtención de las muestras de agua de lluvia, material particulado en la atmósfera y material de análisis, hicieron que únicamente se obtuvieran 14 muestras alrededor de un mes, con una sola ubicación de recolección. La aportación adicional del estudio que se considera importante para continuar con esta investigación se describe en dos puntos siguientes.

Para obtener datos más precisos sobre la deposición húmeda, se deben de registrar los datos de lluvia con intervalos cortos de 1 minuto para conocer la intensidad y el comportamiento de la lluvia obteniendo una correlación precisa de la contaminación del aire, los pluviógrafos son instrumentos ideales que registran la cantidad de lluvia, intensidad y el tiempo en que ésta ha caído. Lo importante de una precipitación no es solo la cantidad de agua recogida, hay que tomar en cuenta los factores que se mencionan arriba para tener un perfil detallado.

Una opción que puede ayudar a obtener muestras de agua de lluvia es la construcción de un *WetDry deposimetro digital*. Es un muestreador para deposición húmeda y seca con un sistema automático para toma de muestra de los dos tipos de deposición. Lo ideal es contar con varios tipos de estos sistemas para un estudio profundo sobre la contaminación atmosférica arrastrada por la lluvia a la superficie, efecto de barrido en Guatemala.

CONCLUSIONES

1. Se cumple con los objetivos planteados de la investigación sobre la determinación, muestreo y análisis, demostrando la existencia de la alteración de agua de lluvia por la concentración de material particulado en el ambiente, que es un parámetro criterio de contaminación del aire.
2. En el análisis estadístico se comparó los registros con los coeficientes de correlación y determinación de los datos de lluvia y calidad del aire, conociendo las estimaciones de los parámetros que mejor se ajustan a la variable que se están estudiando. Se evidencia que cuando existen concentraciones altas de material particulado ambiental en la atmósfera en el área de ciudad de Guatemala, durante deposiciones húmedas son arrastradas hacia la superficie parte de la contaminación del aire hacia el suelo, alterando la calidad de agua en las gotas de lluvia producto del efecto de barrido.
3. En los resultados del coeficiente de correlación de los parámetros de material particulado, pH y sólidos disueltos totales de la tabla XXIII, se muestra la relación existente de los valores de $PM_{2.5}$ y PM_{10} se correlacionan positivamente teniendo un valor aproximado de 1. Mientras que los valores de pH y material particulado tienen una correlación negativa indicando que cuando los valores de material particulado en la atmósfera aumentan el valor de pH disminuye, demostrando que entre mayor sea la contaminación del aire mayor será la acidez (lluvia ácida) figura 16. Los valores de sólidos disueltos totales con relación al material particulado obtuvieron una correlación positiva. Es decir, cuando las concentraciones de material particulado en la atmósfera son altos, la cantidad de sólidos

disueltos totales que son llevados a la superficie por la deposición húmeda durante el efecto de barrido serán mayores.

Tabla XXIII. **Coefficiente de correlación**

	PM_{2.5}	PM₁₀	pH	SDT
PM_{2.5}	1			
PM₁₀	0,97	1		
pH	-0,42	-0,47	1	
SDT	0,37	0,25	0,18	1

Fuente: elaboración propia.

4. Los datos de los sólidos disueltos totales, según la figura 15 son variables con respecto a la cantidad de lluvia y acumulación de contaminantes del aire en la atmósfera. El máximo valor obtenido durante los registros y análisis de agua de lluvia de SDT fue para el lunes 8/10/18.

5. Los datos de los valores de pH se mantuvieron estables en un rango de entre 6,9 y 7,4, siendo el de mayor valor el día 27/09/18 con un valor de 7,45. El de menor valor fue el día 4/11/18 con un valor de 6,98. A simple vista, se muestra que los valores en las gráficas de contaminación por material particulado, desciende al presentarse precipitaciones y se incrementan ligeramente los niveles de PM cuando la lluvia cesa, como en la figura 41 de promedios días de material particulado y lluvia. Durante los días de mayor precipitación hubo un descenso de material particulado y al contrario cuando no hubo presencia de lluvia los niveles de contaminación ambiental se incrementaron.

6. También se observó la presencia de picos atípicos de incremento de contaminación del aire en corto tiempo una vez la lluvia ha terminado. Puede ser por la existencia de una alta humedad en el ambiente por micro gotas de lluvia que arrojan falsos valores en el sensor, haciendo que los niveles de PM se incrementen, generando que los sensores durante humedad extrema no sean precisos. Los sensores son efectivos cuando la humedad relativa no supera el 70 % en el ambiente.
7. Durante los eventos de lluvia que duraron poco tiempo no hubo mayor cambio en la tendencia de contaminación del aire por PM en el ambiente. Estas permanecieron casi constantes en el tiempo, pero si existió una disminución inmediata al inicio de la precipitación. En comparación con los eventos de lluvia donde la lluvia estuvo presente por horas prevalecieron los niveles de calidad del aire aceptables y muy por debajo de los límites máximos.
8. Los días con mayor índice de lluvia fueron los días 16/10 y del 18/10 al 21/10, los promedios de calidad del aire son directamente proporcionales a los días que caen durante el fin de semana en especial jueves, viernes y sábado. Indicar que tienen un factor importante de aportación para la contribución de la contaminación atmosférica promedio por concentraciones de material particulado en el ambiente urbano, como se puede observar en la figura 41. Los días que presentan excedente de contaminación según las guías de la Organización Mundial de la Salud, son los días 14/10/18 con promedio día de PM₁₀ de 56,12 µg/m³ y PM_{2.5} de 32,25 µg/m³, y el día 2/11/18 con un valor de PM₁₀ de 64,61 µg/m³ y PM_{2.5} de 34,12 µg/m³ este último valor fue el día con mayor contaminación. Según la OMS, los valores que exceden las guías representan efectos adversos a la salud de la población urbana.

9. Con relación a temas de salud en el agua, según la norma Técnica Guatemalteca COGUANOR 29001 agua para consumo humano, las características físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano debe tener las características que se muestra en la tabla XXIV. El máximo registrado de Sólidos disueltos totales en la muestra de lluvia fue el día 8/10/18 con 9,22 mg/l. Es decir que los valores están muy por debajo de los límites aceptables de la norma guatemalteca.

Tabla XXIV. **COGUANOR 29001 SDT para consumo humano**

Características	LMA	LMP
Sólidos totales disueltos	500,0 mg/L	1000,0 mg/L

Fuente: COGUANOR. *Norma NTG 29001 agua para consumo humano*. p. 6.

10. La aparición de picos repentinos de aumento de día promedio de contaminación empezando los jueves a sábado y con declive los días domingo. Considerándose que estos representan la mayoría de los días que aportan gran parte de la contaminación atmosférica durante la semana.
11. La aportación de contaminación atmosférica urbana, según los datos que se observaron es consecuencia del rápido crecimiento urbano y el transporte vehicular se concentra en actividades que desprende cantidades de emisiones al ambiente afectando la calidad del aire en el área urbana en ciudad de Guatemala. La contaminación debe tratarse como una prioridad de salud. Es necesario que las instituciones responsables de regular y desarrollar leyes trabajen con los objetivos de garantizar salud urbana a la sociedad, la exposición a la contaminación atmosférica produce grave daños, sin mencionar el alto costo económico que representa una enfermedad crónica producto de las concentraciones por material

particulado. El alto incremento del transporte vehicular en ciudad de Guatemala y de las distintas fuentes de emisiones hacen que cada año sea de crecimiento lineal acelerado, haciendo que los niveles a la exposición de contaminación del aire estén en riesgo para la salud de la sociedad, especialmente aquellas que viven cerca de las vías de mayor congestión vehicular que podrían perjudicar la salud respiratoria como el asma, bronquitis crónica y enfisemas.

12. Los sensores han demostrado ser una excelente herramienta para conocer el comportamiento de la contaminación atmosférica. Para entender cómo se disipa en el ambiente por condiciones climatológicas la dispersión de la contaminación en un área local, también para conocer de donde proviene las mayores emisiones de contaminación del aire por diferentes fuentes. Esto aporta información relevante para la toma de decisiones y controles de contaminantes atmosféricos en un área local.

RECOMENDACIONES

1. El agua de lluvia es apta para consumo humano, de acuerdo con las características de los parámetros de pH y sólidos disueltos totales en esta investigación con relación a la norma guatemalteca COGUANOR 29001.
2. La contaminación del aire es el factor más importante de riesgo ambiental para la salud. La contaminación por material particulado es una mezcla compleja por contribución de fuentes primarias como el carbón negro, polvo, brisa de mar y por fuentes secundarias como el resultado de transformaciones químicas por las emisiones primarias como los sulfatos del dióxido de azufre, nitratos y oxidaciones por componentes orgánicos volátiles.
3. Una estrategia es limitar el tráfico vehicular en ciertas zonas, especialmente en aquellas donde la exposición a las personas es alta por emisiones tóxicas. Una alternativa es un transporte con energía alternativa como la eléctrica, influenciar el desarrollo de espacios verdes y el cuidado de los árboles generando iniciativas para plantar árboles en zonas de mayor contaminación. Podría ayudar a disminuir el impacto al ambiente y salud.
4. Donde se encuentra el mayor beneficio es la regulación vehicular con normativa de emisiones para gases de efecto invernadero y partículas. La normativa Euro que es una norma europea sobre emisiones contaminantes es un conjunto de requisitos que regulan los límites aceptables para las emisiones de gases de combustión interna de los vehículos nuevos vendidos en los Estados Miembros de la Unión Europea. Las normas de emisión se definen en una serie de directivas de la Unión Europea con implantación progresiva que son cada vez más restrictivas según los datos

de la Directiva 1999/94/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de diciembre de 1999, relativa a la información sobre el consumo de combustible y sobre las emisiones de CO₂ facilitada al consumidor al comercializar turismos nuevos.

5. Contar con un financiamiento para la elaboración de este tipo de investigación, para realizar una red de toma de muestras de agua de lluvia en diferentes partes de la región urbana. Para obtener datos que generen valores representativos sobre el impacto en diferentes áreas según la carga de contaminación atmosférica.
6. Ampliar la red de recolección de muestras de agua de lluvia para conocer las concentraciones de contaminantes atmosféricos que se transfieren al suelo por medio de los eventos de lluvia en diferentes áreas que son foco de contaminación por las emisiones de transporte vehicular.
7. La utilización de sensores es una excelente opción para conocer la variabilidad del comportamiento de la calidad del aire. Si se desea conocer los datos con precisión de valores y estimaciones de comportamiento en el tiempo. Se deberá comparar datos con sensores más precisos que no muestren análisis falsos de las mediciones cuando la humedad sea mayor al 70 %. El inconveniente es el alto precio de estos sensores.
8. En el impacto salud, con los registros de calidad del aire que se obtuvieron durante los meses registrados, se visualizó que las horas de mayor incremento de contaminación que se generan durante las horas pico que son durante la mañana y tarde-noche. Se recomienda reducir toda actividad física al aire libre, y evitar las áreas congestionadas por el tráfico vehicular.

El riesgo de generar o empeorar enfermedades respiratorias, en especial, para grupos sensibles que pueden experimentar efectos agravados.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁVILA, A., PEÑUELAS, J. *Increasing frequency of Saharan rains over northeastern Spain and its ecological consequences*. Barcelona, España: Elsevier Scencie, 1999. 4 p.
2. ARCINIÉGAS, C. *Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM₁₀*. Caldas, Colombia: Luna Azul, 2012. 112 p.
3. Banco Mundial. *Contaminación atmosférica por vehículos automotores. Experiencias recogidas en siete centros urbanos de América Latina*. Washington, DC: Banco Mundial, 1997. 14 p.
4. Comisión Guatemalteca de Normalización. *Agua para consumo humano (agua potable)*. Guatemala: COGUANOR, 2010. 10 p.
5. DAVIS, R., KALKSTEIN, L. *Development of an automated spatial synoptic climatology classification*. New York, USA: International Journal Climatology, 1990. 25 p.
6. Directrices del IPCC. *Para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Kanagawa, Japón: IPCC, 2006. 12 p.
7. DOCKERY, D., POPE C. *Acute respiratory effects of particulate air pollution*. Boston, USA: Annu Rev Public Health, 1994. 107 p.

8. DRAXLER, R. *Hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectories (HYSPLIT) version 3.0 – Users´ s guide and model description*. New York, USA: NOAA Tech. Memo, 1992. 26 p.
9. Environment Canada and Health Canada. *Priority Substances List Assessment Report, Respirable Particulate Matter Less Than or Equal to 10 Mi-crons*. Toronto, Canada: Canadian Environmental Protection Act 1999, 2000. 21 p.
10. EPA. *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. New York, USA: EPA. Vol. 1. 1996. 174 p.
11. FOWLER, D., PILEGAARD, K., SUTTON, M., AMBUS, P., RAIVONEN, M., *et. al. Atmospheric composition change: Ecosystems-Atmosphere interactions*, New York, USA: Atmos. Environ, Elsevier, 2009. 43 p.
12. FUZZI, S., BALTENSBERGER, U., CARSLAW, K., DECESARI, S., VAN DER GON, H., *et. al. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs*. Bologna, Italy: Atmospheric Chemistry and Physics. 2015. 15 p.
13. Committee of the Environmental and Occupational Health. *Health effects of outdoor air pollution. Part 2*, Vol. Maryland, USA: American journal of respiratory and critical care medicine, 1996. 56 p.
14. HEDIN, L.O., ARMESTO, J.J., HOHNSON, A.H. *Patterns of nutrient loss from UN polluted, old growth temperate forest: evaluation of biogeochemical theory*. Michigan, USA: Ecology Society of America, 1995. 76 p.

15. HUTCHINSON, T.C., HAVAS, M. *Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems*. New York, USA: Plenum Press, 1980. 32 p.
16. GARCÍA, M., RAMÍREZ, H., MEULENERT, Á., GARCÍA, F., ALCALÁ, J., ESPINOSA, M., *Influencia de los contaminantes SO₂ y NO₂ en la formación de lluvia ácida en la zona metropolitana de Guadalajara*, Jalisco, México: e-Gnosis, Universidad de Guadalajara, 2006. p. 6.
17. International Energy Agency. *CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2019 Highlights*. Paris, France: IEA, 2019. 80 p.
18. INSIVUMEH. *Calidad del aire*. [en línea] [Citado el: 2 de Diciembre de 2018.] <<https://insivumeh.gob.gt/hidrologia/calidad-del-aire/>> [Consulta: Enero, 2019].
19. Instituto de Incidencia Ambiental – URL – IARNA, 2003. *Estado actual del clima y la calidad del aire en Guatemala*. Guatemala : Universidad Rafael Landivar, 2003. 46 p.
20. Instituto Nacional de Estadística. *Encuesta nacional de condiciones de vida Encovi 2000, perfil de la pobreza en Guatemala*. Guatemala, Guatemala: INE, 2002. 24 p.
21. JAENICKE, R. *Dynamics of atmospheric Aitken particles*. Berichte der bunser gesellschaft. Londres, Inglaterra: Physical Chemistry and Chemical Physics, 1978. 82 p.

22. KAMPA, M., CASTANAS, E. *Human health effects of air pollution*. Essex, Inglaterra: Environmental Pollution, 1987. p. 7.
23. LUIZ, F., TEIXEIRA, G., KLAUS, D., OSWALDO, M., WOLFGANG, V., DIETER, K. *Scavenging processes of atmospheric particulate matter: a numerical modeling of case studies*. Sao Paulo, Brazil: ResearchGate, 2010. p. 5.
24. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Primer informe indicativo de medición de la calidad del aire ambiente en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala*. Guatemala, Guatemala: MARN, 2013. 51 p.
25. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático Guatemala*. Guatemala, Guatemala: MARN, 2015. 206 p.
26. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Fuentes móviles en ruta de Guatemala y los gases de efecto invernadero, año base 2013 (una perspectiva y una aproximación)*. Dirección de cambio climático. [en línea] <<https://www.marn.gob.gt/Multimedios/15580.pdf>> [Consulta: enero 2019].
27. Ministerio de Salud y Asistencia Social. *Principales causas de mortalidad y morbilidad en Guatemala*. Sistema de información Gerencial de Salud. [en línea]. <https://sigsa.mspas.gob.gt/>. [Consulta: 12 enero 2019].

28. Monitoreo de la Calidad del Aire en América Latina. *Programa de Control de Contaminación del Aire*. [en línea] <<http://www.monitoreoambiental.com/download/14.%20Monitoreo-Aire-latam.pdf>> [Consulta: 1 diciembre 2019].
29. MOK, K., HOI, K. *Effects of meteorological conditions on PM10 concentrations - a study in Macau*. Macau, China: Springer, 2005. 102 p.
30. MUÑOZ, M. *Ideas generales sobre la teoría de la dispersión de contaminantes en la atmósfera*. Catalunya, España: Universidad Politécnica de Catalunya, Tarrasa. 1996. 30 p.
31. Oficina Regional para las Américas de la Organización Mundial de la Salud. *Contaminación del aire ambiental exterior y en la vivienda: Preguntas frecuentes*. [en línea] <https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=14454:ambient-and-household-air-pollution-and-health-frequently-asked-questions,Itemid=72243,lang=es> [Consulta: 11 diciembre 2019].
32. OLIVA, P. *Monitoreo del Aire en Ciudad de Guatemala, Informe Anual*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Guatemala, Guatemala: Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC, 2000. 78 p.
33. _____. *Informe anual 2013 de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Guatemala, Guatemala: Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC. 2013. 79 p.

34. OMS. *Más del 90% de los niños del mundo respiran aire tóxico a diario*. [en línea] <<https://www.who.int/es/news-room/detail/29-10-2018-more-than-90-of-the-world's-children-breathe-toxic-air-every-day>> [Consulta: enero 2019].
35. Organización Panamericana de la Salud, 2005. *Actualización mundial, 2005*. [en línea]. <[https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)> [Consulta: 2 de octubre 2018].
36. REGALADO, A., PACCHA, E., ÁLVAREZ, O., MONTAÑO, T. *Comportamiento de las concentraciones de PM10 en la ciudad de Loja - Ecuador y su relación con variables meteorológicas*. Babahoyo, Ecuador: Journal of Science Research, 2020. p. 5.
37. ROMERO, J. *Calidad del Agua*. 3a. ed. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009. 485 p.
38. SARAVIDA, C. *Integrated air quality management in Guatemala: Fine Particulate Matter*, Dissertation. 39 International Postgraduate Course on Environmental Management for Developing Countries, Dresde, Germany: CIPSEM, 2016. 78 p.
39. SARAVIDA, P. *Investigación de la Contaminación del Aire en el Área Central de la Ciudad de Guatemala*. Estudio Especial de la Maestría en Ingeniería Sanitaria. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 1983. 83 p.

40. SCHWARTZ, J. *The effects of particulate air pollution on daily deaths: a multi-city case crossover analysis*. Boston, USA: Occupational and Environmental Medicine. 2004. 61 p.
41. SCHWARTZ, J., DOCKERY, D., W. NEAS, L., M. *Is daily mortality associated specifically with fine particles?*. Boston, USA: Journal of the Air and Waste Management Association, 1996. 10 p.
42. SEINFELD J.H., PANDIS S.N. *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*. New York, USA: John Wiley, Sons Inc, 1998. 17 p.
43. SEMB, A., HANSEN, J.E., FRANCOIS, F., MAENHAUT, W., PACYNA, J.M. *Long range transport and deposition of mineral matter as a source for base cations*. Toronto, Canadá: ScienceDirect. 1995, 85 p.
44. SIGLER, A., BAUDER, J. *Alkalinity, pH, and Total Dissolved Solids*. [en línea]
<http://www.wyoextension.org/werawater/region8/PDFs/Well%20Educated/Revised%20Fact%20Sheets%20%20Nov%202012/Alkalinity_pH_TDS%202012-11-27.pdf> [Consulta: enero 2019].
45. Superintendencia de Administración Tributaria, 2019. *Análisis Estadístico del Parque Vehicular*. [en línea]
<<https://portal.sat.gob.gt/portal/parque-vehicular/>> [Consulta: enero 2019].

46. UNAL, Y., TOROS, H., DENIZ, A., and INCECIK, S. *Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM10 concentrations in Istanbul metropolitan area*. Estambul, Turquía: Atmospheric Environment, 2011. 45 p.
47. Universidad Rafael Landívar. *Informe Ambiental de Guatemala y Base para Evaluación Sistemática del Estado del Ambiente*. Guatemala: Universidad Rafael Landívar, 2004. 89 p.
48. United States Environmental Protection Agency. *What is Acid Rain?* [en línea] <<https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>> [Consulta: enero 2019].
49. United States Environmental Protection Agency. *Integrated Science Assessment for Particulate Matter*. New York, USA: EPA, 2009. 70 p.
50. USAC, *La deposición húmeda y seca, y su impacto en la acidez del agua en la región del volcán de Pacaya, Universidad de San Carlos de Guatemala*. Guatemala, Guatemala: Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, 2006. 45 p.
51. WHO. *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide*. Bonn, Alemania: WHO Regional Office, 2003. 94 p.
52. WMO. *Programme, manual for the gaw precipitation chemistry. Manual ForThe GAW Precipitation Chemistry Programme Guilines, Data Quality Objectives and Standard Operating Procedures*. 2004. 85 p.

53. XING, J., SONG, J., YUAN, H., WANG, Q., LI, X., *et. al.* *Atmospheric wet deposition of dissolved trace elements to Jiaozhou Bay, North China: Fluxes, sources and potential effects on aquatic environments.* Beijing, China: Chemosphere, 2017. 430 p.
54. ZANNETTI, P. *Dry and Wet Deposition.* In: *Air Pollution Modeling.* Boston, USA: Springer, 1990. 5 p.