



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE  
MEDICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE CALIDAD DE AIRE  
UTILIZANDO IOT Y BIG DATA**

**César Geovanni López García**

Asesorado por el M.A. Ing. Erick Rolando Reyes Rodas

Guatemala, septiembre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE  
MEDICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE CALIDAD DE AIRE  
UTILIZANDO IOT Y BIG DATA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CÉSAR GEOVANNI LÓPEZ GARCÍA**

ASESORADO POR EL M.A. ING. ERICK ROLANDO REYES RODAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO a.i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez
EXAMINADOR	Ing. José Aníbal Silva de los Angeles
SECRETARIA	Ing. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE MEDICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE CALIDAD DE AIRE UTILIZANDO IOT Y BIG DATA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrado, con fecha 12 de enero de 2022.

**César Giovanni López García**



EEPFI-PP-0160-2022

Guatemala, 12 de enero de 2022

**Director**

**Armando Alonso Rivera Carrillo**  
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica  
Presente.

**Estimado Ing. Rivera**

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE MEDICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE CALIDAD DE AIRE UTILIZANDO IOT Y BIG DATA.** , el cual se enmarca en la línea de investigación: **Internet de las cosas - Internet de las cosas**, presentado por el estudiante **César Geovanni López García** carné número **201404361**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Ingeniería Para La Industria Con Especialidad En Ciencias De La Computación.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

**Erick Rolando Reyes Rodas**  
INGENIERO EN CIENCIAS Y SISTEMAS  
NÚMERO DE Colegiado 9,240

Mtro. Erick Rolando Reyes Rodas  
Asesor(a)

Mtro. Mario Renato Escobedo Martinez  
Coordinador(a) de Maestría



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-0160-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE MEDICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE CALIDAD DE AIRE UTILIZANDO IOT Y BIG DATA.** , presentado por el estudiante universitario **César Giovanni López García**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink is written over a circular official stamp. The stamp contains the text: "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA", "DIRECCIÓN ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA", and "FACULTAD DE INGENIERIA".

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director  
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, enero de 2022



Decanato  
Facultad de Ingeniería  
24189101- 24189102  
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.670.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE MEDICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE CALIDAD DE AIRE UTILIZANDO IOT Y BIG DATA**, presentado por: **César Geovanni López García**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.

Guatemala, septiembre de 2023

JFGR/gaac

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme la sabiduría para alcanzar esta meta.
<b>Mis padres</b>	Por su apoyo incondicional, sus consejos y por ser un ejemplo de vida para mí.
<b>Mis hermanos</b>	Por darme ánimos y motivación para culminar esta etapa.
<b>Mi novia</b>	Por su cariño y apoyo incondicional.
<b>Mis amigos</b>	Que siempre confiaron en mi persona y siempre me alentaron cuando ya no quise seguir.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por brindarme la oportunidad de alcanzar esta meta profesional haciendo conciencia del entorno social.
<b>Departamentos de física y matemáticas</b>	Por brindarme la oportunidad de laborar y conocer a personas brillantes que de manera desinteresada compartieron su conocimiento.
<b>Mi asesor</b>	Erick Reyes, por su apoyo durante todo el proceso de elaboración y revisión de este trabajo de graduación.
<b>Mis amigos y compañeros de la universidad</b>	Por su amistad, apoyo y por todos los momentos especiales vividos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
INTRODUCCIÓN .....	XI
1. ANTECEDENTES .....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
2.1. Contexto general .....	15
2.2. Descripción del problema .....	16
2.3. Formulación del problema .....	17
2.3.1. Pregunta central .....	17
2.3.2. Preguntas auxiliares .....	17
2.4. Delimitación del problema .....	18
3. JUSTIFICACIÓN .....	19
4. OBJETIVOS .....	21
4.1. General.....	21
4.2. Específicos .....	21
5. NECESIDADES PARA CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN .....	23
6. MARCO TEÓRICO.....	25
6.1. Calidad del aire.....	25

6.1.1.	Contaminación atmosférica .....	25
6.1.2.	Principales contaminantes .....	26
6.1.3.	Índice de calidad del aire .....	29
6.2.	Arquitectura del sistema IoT .....	30
6.2.1.	Sensores.....	31
6.2.1.1.	Sensor MQ-7 .....	33
6.2.1.2.	Sensor MQ-131 .....	33
6.2.1.3.	Sensor MQ-135 .....	34
6.2.1.4.	Sensor de Dióxido de azufre.....	35
6.2.1.5.	Sensor de material particulado .....	36
6.2.2.	Computadora de placa reducida.....	37
6.2.2.1.	Raspberry Pi Pico ® .....	37
6.2.2.1.1.	Lenguaje de programación interpretado MicroPython.....	37
6.2.3.	Sistema de posicionamiento global GPS.....	38
6.2.3.1.	Receptor GPS.....	38
6.2.4.	Base de datos geoespaciales .....	38
6.2.4.1.	Servicios BDG en la nube.....	39
6.2.5.	Página web.....	40
6.2.5.1.	Tecnologías involucradas .....	40
6.2.5.1.1.	JavaScript.....	40
6.2.5.1.2.	HTML.....	41
6.2.5.1.3.	CSS .....	41
7.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	43
8.	METODOLOGÍA.....	47

8.1.	Características del estudio .....	47
8.2.	Unidades de análisis .....	47
8.3.	Variables.....	48
8.4.	Fases del estudio .....	48
8.4.1.	Revisión de literatura .....	48
8.4.2.	Diseño del sistema embebido adquirente de datos .....	49
8.4.2.1.	Selección de sensores de gases y material particulado .....	50
8.4.2.2.	Computadoras de placa reducida para IoT .....	50
8.4.2.3.	Módulo GPS .....	50
8.4.2.4.	Almacenamiento de las mediciones realizadas .....	50
8.4.3.	Diseño de herramienta de visualización web.....	51
8.4.3.1.	Creación de página web .....	51
8.4.3.2.	Diagrama de bloque para la representación de la visualización web	51
8.4.4.	Interpretación de información .....	52
8.4.5.	Redacción del informe final.....	52
9.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	53
9.1.	Indicadores de calidad del aire .....	53
9.2.	Índice de calidad del aire .....	54
10.	CRONOGRAMA.....	55
11.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	57
11.1.	Factibilidad económica .....	57

11.2.	Factibilidad operativa.....	58
11.3.	Factibilidad técnica.....	58
12.	REFERENCIAS.....	61

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Diagrama de la propuesta de solución .....	24
2.	Índice de calidad de aire.....	29
3.	Diagrama esquemático de un sensor MQ .....	32
4.	Curva de calibración del sensor MQ-7 .....	33
5.	Curva de calibración del sensor MQ-131 .....	34
6.	Curva de calibración del sensor MQ-135 .....	35
7.	Sensor de dióxido de sulfuro 2SH12 .....	36
8.	Indicadores de calidad del aire.....	53
9.	Índice de calidad del aire.....	54

## TABLAS

I.	Contaminantes críticos.....	26
II.	Niveles guías recomendados para cada contaminante.....	28
III.	Características de algunos sensores MQ.....	32
IV.	Variables .....	48
V.	Cronograma .....	55
VI.	Factibilidad económica.....	57





## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>GPS</b>	Sistema de posicionamiento global
<b>GB</b>	Gigabytes
<b>Hz</b>	Hertz
<b>IoT</b>	Internet de las cosas
<b>PM</b>	Material particulado
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>mA</b>	Miliamperio
<b>MB</b>	Megabytes
<b>μg</b>	Miligramo
<b>μm</b>	Micrómetro
<b>ms</b>	Milisegundo
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>V</b>	Voltios
<b>W</b>	Watts



## GLOSARIO

<b>Big data</b>	Conjunto de datos con proporciones tan grandes y complejas que analizarlos por los métodos convencionales resulta complicado.
<b>Ethernet</b>	Tecnología que permite la conexión y comunicación de dispositivos en una red local utilizando cable.
<b>IoT</b>	Internet de las cosas. Interconexión de dispositivos físicos por medio de redes inalámbricas.
<b>I2C</b>	Protocolo de comunicación sería que establece una trama de datos y las conexiones físicas para la transferencia de información entre dos dispositivos digitales.
<b>JavaScript</b>	Lenguaje de programación interpretado de alto nivel.
<b>Nube</b>	Red enorme de computadoras conectadas, distribuidas en el mundo, especializadas en almacenamiento de archivos y servicios de <i>software</i> .
<b>Python</b>	Lenguaje de programación interpretado de alto nivel.
<b>Raspberry Pico</b>	Computadora de placa reducida.

<b>SQL</b>	Lenguaje de consulta estructurada.
<b>SSH</b>	Protocolo de administración que permite a los usuarios controlar y modificar sus servidores remotos a través de Internet.
<b>UART</b>	Protocolo de comunicación de transmisión-recepción asíncrona universal de datos.
<b>Wifi</b>	Tecnología que permite conectar dispositivos por medio de una red inalámbrica de banda ancha.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el problema de la contaminación atmosférica ha tenido como consecuencia que se le atribuya la quinta parte de los fallecimientos anuales, alrededor de todo el mundo. El problema de la contaminación atmosférica radica en la producción tanto de gases como la proliferación de material particulado que tiene una consecuencia de riesgo puntual en la salud de los seres humanos y del medio ambiente en sí. Con el pasar de los años, el crecimiento desbordado de las industrias, así como el aumento del parque vehicular en los sectores urbanos de todos los países del mundo, se ha incrementado la mala calidad del aire provocando un riesgo latente en los seres humanos que las habitan. Más allá del aumento de la contaminación del recurso más indispensable, el aire, la falta de concientización de parte de las partes que la promueven como las partes afectadas han hecho aún más compleja la situación. Como consecuencia de lo mencionado, la ciudad de Guatemala cuenta con un índice de calidad de aire muy parecido al de ciudades de India con índice de calidad de aire catalogado como muy malo para la salud.

El propósito principal de este proyecto de investigación es brindar información veraz y sustentada en la medición directa de los elementos contaminantes del aire para que las personas puedan crear desde hábitos de cuidado personal, hasta propuestas de ley para que los entes emisores de esos contaminantes estén controlados para que los niveles de contaminación no sean críticos.

El enfoque metodológico de esta investigación trata de un estudio no experimental, descriptivo con la finalidad de únicamente informar a la población del casco urbano de la Ciudad de Guatemala, la condición del aire que

respiran día a día a través de informes obtenidos por un proceso de medición, análisis y procesamiento de datos medidos por medio de un grupo de sensores esperando que más allá de crear una opinión popular. Se puedan llegar a las entidades gubernamentales con un peso mayor en cuanto a la voz y voto en la sociedad, para que puedan presentar propuestas de ley que regulen y mejoren la calidad del aire en esta región.

## 1. ANTECEDENTES

El trabajo de grado de Campoli, E. (2016) con el título *Sistema de monitoreo de la calidad del aire integrado a IoT* es una investigación de tipo experimental en la cual se utilizó como instrumento de recolección de datos, un sistema de sensores utilizando el concepto de Internet de las Cosas.

De acuerdo con Campoli (2016), los objetivos seguidos en este trabajo son implementar un sistema que cuantifique la polución en aire de una ciudad, como objetivo general y como objetivos específicos están: recolectar datos de agentes contaminantes en el aire de la misma ciudad, procesar las mediciones obtenidas para establecer el nivel de contaminación con la que cuenta el aire. Finalmente, implementar un servidor conectado a internet que permita el acceso a los datos y realice el procesamiento de estos.

Se abordó la relación entre sistemas embebidos y la Internet para analizar las condiciones en la que se encuentra el aire. Además, se establecieron escalas para medir el grado de polución del aire en las regiones de estudio con el propósito de recolectar los datos necesarios para luego ser procesados, con el objetivo de facilitar el acceso a la información y la toma de decisiones. Finalmente se diseñó e implementó una página web, que permite a los usuarios finales acceder a una gran cantidad de información sobre el medio ambiente y las condiciones climáticas circundantes, en tiempo real.

El trabajo realizado por Campoli, se relaciona con la investigación a realizar, en cuanto a que se busca que los datos obtenidos por el prototipo a desarrollar brinden mediciones actualizadas en lapsos pequeños. Además,



servirá de base para implementar el acceso en tiempo real a los datos medidos por el sistema propuesto y así tener una lectura de los contaminantes que puedan existir dentro del ambiente en el que se esté.

En concordancia con la problemática que se vive en la ciudad de Guatemala, Castañeda A. en 2018 presenta el informe de grado *Determinación de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) por difusión activa, como indicador de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala*. La investigación es de tipo aplicada, ya que se utilizó como población el aire de la ciudad de Guatemala y como muestra la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en 9 puntos distintos de esta. La técnica de recolección de datos se realizó utilizando sensores de gases.

El objetivo principal de la investigación fue determinar la concentración de dióxido de nitrógeno utilizando el método de difusión activa, como indicador de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala y entre los objetivos específicos se encuentran: cuantificar y determinar la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire de 9 puntos de la ciudad, comparando con la *Guía de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud* y respaldar el establecimiento de políticas de gestión de la calidad del aire con la información obtenida.

El informe de la investigación realizada se enfoca en mostrar las distintas contribuciones que han tenido distintos entes no gubernamentales, y la Facultad de Ciencia Químicas y Farmacia que ha recopilado información acerca de la contaminación del aire desde los años 90 hasta el año 2018. Dado que la actividad que más contribuye al deterioro del aire en Guatemala es el parque vehicular, ya que con el pasar de los años, la cantidad de automóviles y la combustión han aumentado entre un 6 a 14 % anualmente. Estas causas no se han retomado y no ha existido voluntad política para la reactivación de un

reglamento que establezca límites de operación de estos vehículos. Luego de que en el año de 1998, por órdenes de Álvaro Arzú, presidente de la República en ese entonces, deroga el Reglamento de Emisiones Vehiculares que se manejaba en ese entonces, argumentando que dicho reglamento necesitaba ser ajustado técnicamente. En consecuencia, Castañeda (2018) analiza las mediciones recopiladas por los sistemas de calidad de aire en 9 puntos distintos de la Ciudad de Guatemala para encontrar el nivel de NO<sub>2</sub> de estas. Se determinó que los diferentes puntos analizados el Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP) y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) presentaron el mayor nivel de concentración de NO<sub>2</sub> llegando casi al límite establecido como perjudicial para los humanos, según la OMS. Finalmente, los resultados de esta investigación, están puestos a disposición a cualquier persona para que puedan pronunciarse ante tal problemática. Con la ayuda de distintas instituciones no gubernamentales que se caracterizan por velar que el ambiente y todos sus recursos se mantenga libres de contaminación, puedan presentar políticas de calidad del aire con sumo sustento tanto en las pruebas científicas como en la opinión popular.

La relación existente entre la investigación realizada por Castañeda y este proyecto, está en buscar la promulgación de políticas de gestión de la calidad del aire, con el apoyo de organizaciones que estén relacionadas con tema y sobre todo de las personas que conforman la población y potenciales afectados por esta problemática. De tal forma, que pueda iniciarse desde la prevención de estos afectados con la utilización de algún tipo filtro que disminuye considerablemente el paso de los distintos contaminantes hacia su organismo, hasta llegar al punto de regular las emisiones de gases y material particulado que produce la industria y sobre todo de los vehículos que circulan por la ciudad. En conclusión, en la ciudad de Guatemala se necesitan regulaciones en cuanto a las actividades industriales y de transporte para evitar que, en un futuro no muy lejano, el nivel

de contaminación en el aire sea tal que no se pueda transitar por la misma sin exponerse a algún tipo de enfermedad respiratoria.

La página oficial de La Organización Mundial de la Salud (OMS), publicó en el 2018, un artículo informativo con el título: “Calidad de aire y salud”. El tipo de investigación propuesta es de índole explicativa.

El objetivo principal de dicha publicación es informar acerca de los riesgos a la salud que conlleva permanecer en un ambiente con altos niveles de contaminación en el aire. De la misma forma, los objetivos específicos fueron: dar a conocer los distintos agentes contaminantes, sus fuentes y los problemas que causa concientizar, a través de datos recolectados en los últimos años hasta el año 2018; también proponer soluciones para poder frenar el avance de la contaminación del recurso indispensable para la vida como lo es el aire.

El informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS); se enfocó en mostrar, tras diversas investigaciones que se realizaron, los distintos agentes contaminantes como los son: el material particulado, (PM 2.5 y PM 10), el dióxido de carbono, el ozono, los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre donde en su mayoría son procedentes de las emisiones de vehículos o la industria. Además, señaló como principales consecuencias de la exposición a estos contaminantes se tiene un alto riesgo de padecer: infecciones respiratorias, asma, cardiopatías, neumopatías y cánceres. Entre las soluciones que promueve la OMS, está la implementación de una herramienta a escala mundial con nombre: AirQ+ que tiene como objetivo medir el nivel de calidad de aire en la región donde se aplique y dar advertencias de posibles riesgos a la salud por el mismo concepto.

La información abordada en el informe deja claros los fundamentos por los agentes contaminantes debe enfocarse el prototipo a realizar en este proyecto

de investigación, ya que con ello se puede buscar entre la toda la gama de sensores, sensores adquirentes de datos que acepten muestras de gases como los óxidos de nitrógeno, el dióxido de carbono y el ozono. De la misma manera que pueda capturar datos de material particulado. Por consiguiente, se puede concluir, que la medición de los agentes de contaminación mencionados es crucial para reducir la tasa de mortalidad en cualquier región un cierto nivel de urbanización.

De la revista cubana de ciencia informáticas, con los autores Duarte, A., Cangrejo, L., y Delgado, T. (2018) desarrollaron el tema *Alternativa Open Source en la implementación de un sistema IoT para la medición de la calidad del aire* lo que se considera como un tipo de investigación explicativa sobre el uso de distintas tecnologías de libre acceso para el desarrollo de un sistema de medición de calidad de aire conformado.

Según este artículo científico, se persigue como objetivo general: la implementación de un sistema IoT capaz de medir la calidad del aire utilizando tecnologías de libre acceso. Entre los objetivos específicos se puede mencionar: “plantear una arquitectura basada en redes de sensores y software inspirados en la cultura libre e informar a los usuarios mediante la comunicación de protocolos diversos en un escenario de aplicación donde se monitorea la calidad del aire” (Duarte, Cangrejo, y Delgado, 2018, p.1).

El artículo aborda la problemática que existe entre la naturaleza de los datos capturados y los dispositivos de medición con la operabilidad entre los diversos componentes de IoT. De la misma manera, enfatiza en la creación de tecnologías privadas que solucionan el problema de operatividad, pero con la limitante de ser accesibles a cierta parte de la comunidad de desarrolladores de proyectos IoT por colocarles marcas privadas. Debido a esto, se propuso una

arquitectura conformada por una red de sensores y *software* fundamentados en las tecnologías de libre acceso, permitiendo la intercomunicación entre distintos protocolos IoT para que la monitorización de la calidad del aire pueda ser accesible para cualquier usuario.

La información obtenida en este artículo será la base para implementar distintas tecnologías de libre acceso, desde la comunicación entre sensores y microcontroladores, hasta el punto de la visualización que pueda realizar cualquier persona que posee conexión a internet. La utilización de tecnologías gratuitas hará que el propósito de crear un prototipo de medición de calidad de aire de bajo costo, sea factible. De esta manera se evitará el gasto de recursos para enfocarlos en otros problemas que la persona tenga.

Alonso Corredor (2018), quien realizó la tesis de maestría en “Emisiones de material particulado de los vehículos en Bogotá. Estrategias de gestión ambiental para su mitigación”. El trabajo de investigación se realizó en la capital de Colombia, en la ciudad de Bogotá, D.C en la zona urbana de la ciudad y la técnica de recolección de datos fue por medio de un método de observación, donde se analizaron los datos obtenidos por las redes de monitoreo de calidad de aire ya creadas en la región de Bogotá.

Los objetivos propuestos en esta investigación son: analizar la contaminación debido al material particulado en función del parque vehicular en la ciudad de Bogotá, evaluar la actividad vehicular en Bogotá durante los últimos 10 años y comparar la normatividad nacional en contra de la contaminación atmosférica debida al parque vehicular, con la normatividad internacional para esta manera tener un normativo de referencia compuesta de estrategias de Gestión Ambiental que permita la reducción del material particulado.

La investigación desarrollada por Alonso tiene como campo de estudio la contaminación atmosférica y su repercusión directa en la calidad de salud, en distintas ciudades del mundo. Para ello, se revisó la documentación de la calidad del aire en las diversas ciudades de estudio y así proceder con el análisis de la actividad actual del parque vehicular, con la finalidad de registrar una relación directa entre este y las emisiones de material particulado. Así mismo, este estudio se replicó en la ciudad de Bogotá y luego del análisis realizado se determinó que los elevados niveles de material particulado tienen como principal causante a la flota de vehículos en la ciudad. Finalmente, con el propósito de reducir drásticamente las emisiones de material particulado se propusieron nuevas estrategias tales como: incitar a la población a utilizar vehículos compartidos y la consideración de cambiar tecnologías en los vehículos de transporte privado y público, luego de una revisión exhaustiva de las estrategias de gestión ambiental en cada ciudad analizada.

La relación que existe entre esta investigación realizada en Bogotá, Colombia y el proyecto a desarrollar, parte de que ésta muestra la forma en la cual, en la mayoría de las ciudades, el transporte público se ha constituido como el mayor emisor de material particulado. Por lo tanto, la calidad del aire ha sido comprometida más por este sector de la industria que por ningún otro. Con esta información se puede extrapolar y esperar que el sector que más contaminación aporta a la calidad de aire en el casco urbano de la ciudad de Guatemala, también lo sea el transporte público de esa región.

Otra investigación que enriquece este proyecto es la tesis de grado de licenciatura de Calel Otzoy (2018) con título *Diseño e implementación de un dispositivo modular de medición de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera con sistema de ubicación GPS* desarrollada en Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Posee un tipo de investigación

exploratoria-experimental. Tuvo como población el aire que recorre las instalaciones de esta universidad y la muestra estudiada el aire de las instalaciones de la facultad de ingeniería. La técnica de recolección de datos fue por medio de un método de observación y medición de los niveles de dióxido de carbono presente en el aire del lugar estudiado.

El objetivo general de este proyecto es: desarrollar un dispositivo, con Sistema de Posicionamiento Global, GPS (siglas del nombre en inglés), que mida de dióxido de carbono en la atmósfera y los objetivos específicos son: describir la relación existente entre el dióxido de carbono y los problemas de salud en humanos, diseñar sistemas de control y de adquisición de dato y finalmente; enlazar el módulo de control con computadora para visualizarlo en un software de mapas.

Durante el proceso se desarrolló la elaboración y ejecución de un aparato medidor de dióxido de carbono en la atmósfera partiendo de la teoría para fijar los límites de exposición de este. En cuanto a componentes utilizados están, un conjunto de sensores de gas, un módulo GPS, protocolos de comunicación serial y comunicaciones en radiofrecuencias. Con estas consideraciones, se procedió a efectuar el muestreo de concentración del contaminante en estudio, en cinco lugares distintos dentro de la Facultad de Ingeniería de la USAC. Por último, se realizó una visualización de las mediciones de la concentración del contaminante, en conjunto con sus respectivos datos de localización GPS para cada uno de los espacios analizados.

La investigación realizada por Calel Otzoy proporciona las bases de las cuales partirá la investigación propuesta en cuanto a la medición y los parámetros de comparación de los datos de gases que se analizaran, para este caso en particular, el dióxido de carbono y así establecer límites de exposición a



considerar como dañinos para la salud de las personas. Además, aporta conocimientos fundamentales en cuanto a la localización geográfica del prototipo de adquisición de datos utilizando coordenadas GPS.

La tesis de Itzep Mendoza, (2019) con el título *Diseño e implementación de un detector de partículas en el aire, con control y acceso remoto empleando una computadora de placa reducida a través de una red local* desarrollada en Guatemala. Maneja un tipo de investigación descriptiva-experimental. Posee como muestra el aire dentro y fuera de una habitación cualquiera en la ciudad de Guatemala, en la cual utiliza como técnica de recolección de datos, un sensor de polvo en el aire conectado a internet por medio de un microprocesador Raspberry Pi.

Los objetivos de la tesis son: desarrollar un dispositivo que mida los niveles de partículas en el aire, visualizar el nivel de partículas en el aire por medio de un enlace entre el dispositivo y una computadora de placa reducida, reportar los ensayos hechos con el dispositivo en ambientes exteriores e interiores.

El trabajo desarrollado por Itzep plantea el proceso de diseño e implementación de un aparato medidor de niveles de concentración de partículas en la atmósfera y problemas que pueden presentar en la salud de los seres humanos. Para la comprensión del problema se estudió el funcionamiento de un sensor de polvo, la computadora de placa reducida Raspberry Pi, y la comunicación entre el sensor y la computadora de placa reducida, así como, los protocolos de comunicación serial y el protocolo ssh (Itzep Mendoza, 2019). Finalmente, haciendo uso del dispositivo desarrollado, se detallaron las concentraciones de las partículas de un cuarto cerrado y en un lugar a la intemperie.

Esta tesis servirá como base para comprender el monitoreo y la medición del material particulado, PM2.5 y PM10 en el sector urbano objeto de estudio. También formará parte de las factibles propuestas de componentes electrónicos a utilizar para el diseño del prototipo a desarrollarse.

El proyecto de investigación fue realizado por Flores, O., Cortez, R., y Rosa, V. en 2019, con título *Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remotas, utilizando técnicas IoT y big data: fase I. Estación IoT automatizada para el monitoreo de calidad del aire por contaminantes PM2.5 y Pm10* desarrollado en la Universidad Tecnológica de El Salvador tiene un tipo de investigación aplicada o investigación tecnológica, implementada en puntos estratégicos en El Salvador. La recolección de datos fue por medio de un estudio de observación y medición utilizando un sistema de sensores de gas y material particulado.

Los objetivos propuestos por este equipo de investigación, (Flores, Cortez y Rosa 2019), se mencionan los siguientes:

Implementar una estación de IoT para monitoreo que permita capturar información sobre el estado de la calidad del aire y mostrar una visualización en tiempo real y como específicos: aplicar técnicas de IoT en el diseño y construcción de una estación electrónica con sensores para la captura de diversos gases que se encuentran en el aire circundante, utilizar los servicios del *Google Suite Apps* en la configuración de plataforma en la nube para tener acceso a los tableros de visualización desde cualquier equipo conectado a internet y divulgar nuevo conocimiento científico, teórico y práctico sobre el diseño e implementación de sistemas de IoT eficientes y de bajo costo en la automatización de tareas. (p.14).

En el proyecto desarrollado por el equipo de investigadores salvadoreños, se implementó un sistema de vigilancia de los contaminantes atmosféricos, utilizando un conjunto de tecnologías de acceso libre y bajo costo. La primera fase del proyecto consistió en la implementación de sensores IoT y sistemas embebidos en una red de vigilancia remota con la función principal de monitorear la contaminación debida al material particulado en el aire. El fundamento de la metodología de la investigación se fundamentó en prototipos de arquitectura IoT compuestos por componentes electrónicos como Lopy Esp32, un microcontrolador programable en el lenguaje Python. *Google Suite* fue el *software* utilizado para la ejecución de la nube IoT que tenía como propósito de almacenar los datos recopilados por el sistema de medición. Entre los resultados obtenidos destaca el monitoreo, en tiempo real y de libre acceso, de los niveles de contaminación debido a las partículas de distintos materiales.

Con los aspectos abordados en la investigación citada, servirán para poder tener las consideraciones necesarias al momento de diseñar el prototipo. De tal manera que este sea de bajo costo, remoto y que los datos que se puede obtener de las mediciones que este realice sea de acceso en tiempo real y sin restricción para cualquier persona.

El proyecto de investigación desarrollado por Martínez y Cortez (2020) con título *Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remotas*, desarrolló de una plataforma para el análisis de datos y generación de modelos por medio de técnicas de *Big Data* y *Machine Learning* es un tipo de investigación de campo donde se monitorea 8 puntos de la república De El Salvador. La técnica de recolección de los datos fue un método de observación utilizando para este estudio un dispositivo conformado por sensores que medían el material particulado y la temperatura del lugar.

Dentro de los objetivos que desarrollaron, el general consistía en desarrollar una aplicación para el análisis, interpretación y predicción de datos de contaminación por el material particulado, provenientes de las distintas estaciones de monitoreo, utilizando técnicas de *Machine Learning* y *Big data*. Dentro de los objetivos específicos se pueden mencionar: Implementar herramientas de modelado Big data para el diseño de bases de datos, instalar una estación de vigilancia remota dentro del establecimiento de ITCA-FEPADE de Santa Tecla y desarrollar una aplicación de fácil acceso y uso para los usuarios, utilizando bases de datos Big Data para la correcta interpretación de los resultados recopilados en las diferentes estaciones.

El proyecto consistió en construir e instalar 3 centros de vigilancia de calidad del aire en ITCA-FEPADE Santa Tecla, San Miguel y La Unión, en El Salvador. Estos dispositivos miden la concentración de material particulado (PM2.5 y PM10) de diámetro en las zonas donde están instalados. La escuela especializada de Ingeniería, ITCA-FEPADE, desarrolló un software de interpretación y predicción de datos de contaminación ambiental con Big Data y Machine Learning. Los datos capturados en formato Big Data por los distintos centros, son analizados a través de una plataforma web diseñada, en donde se grafica las características de calidad del aire de cualquier zona. Además, se desarrolló un algoritmo de *Machine Learning* que predice la calidad del aire para una región especificada en un lapso de un mes. Los resultados obtenidos en este proyecto permitirán una retroalimentación de los niveles de calidad del aire en El Salvador.

La relación existente entre esta investigación realizada y este proyecto por desarrollar radica en que servirá de base para desarrollar el esquema de almacenamiento y el análisis de los datos obtenidos por el prototipo de medición de calidad de aire. Además, establece un punto de partida para un futuro poder

realizar predicciones utilizando un algoritmo de Machine Learning con los datos obtenidos.

La tesis doctoral con título *Elaboración e implementación de una propuesta metodológica para la evaluación y gestión de la calidad del aire mediante el enfoque de la ciencia de datos* elaborada por Represa, en el año 2020 constituye una investigación de tipo aplicada en los países de España y Argentina, tomando como muestra a analizar, la calidad del aire en las ciudades de La Plata, Buenos Aires y Valencia en Argentina y España, respectivamente.

En cuanto a los objetivos de la investigación, se fijaron los siguientes: realizar una sugerencia metodológica que permita la unión de distintas fuentes de información para gestionar la calidad del aire mediante el enfoque de la ciencia de datos; aplicar un índice de calidad del aire para las ciudades a estudiar y generar informes de la calidad del aire en los diversos sitios de implementación.

Esta investigación se basó en el desarrollo y la implementación de una metodología para la gestión de la calidad de aire, la cual se realizó en tres fases partiendo desde la incidencia de las tecnologías de monitoreo de calidad de aire presentes en las zonas de estudio. El diseño del proceso de monitoreo consistió, principalmente, por medio de los factores meteorológicos, las fuentes de emisión y el marco normativo de cada ciudad, para evaluar la calidad del aire en estas.

Como segunda etapa se estableció el procesamiento de datos obtenidos por los distintos sistemas de adquisición, desde la obtención de cada dato, la limpieza de estos para evitar cualquier fuente de ruido o error y así luego utilizar algún algoritmo para la descripción o bien, para la predicción del comportamiento de las fuentes de emisiones de contaminación.

Finalmente, la última etapa consistió en el análisis de resultados, la elaboración de informes y visualizaciones en función de facilitar la interpretación de estos para el público en general.

La relación existente entre esta investigación y la realizada por Represa radica en que ambas buscan analizar la calidad del aire de una región en particular, posteriormente se comunica al público en general por medio de informes, las condiciones del aire que respiran todo el tiempo. Con la divulgación de los resultados obtenidos, se espera que las autoridades competentes puedan crear campañas de concientización para que la contaminación existente en el aire aminore en la sociedad guatemalteca.

La información presentada en el trabajo de Represa enriquece en gran manera a la propuesta de investigación con la que se cuenta actualmente. Ya que, debido al nivel de desarrollo del tema de calidad de aire en la ciudad de Guatemala, no existe una cultura de información que esté abierta y sea de acceso libre a cualquier persona que la necesite. En conclusión, con la información recabada de esta tesis doctoral se verifica que el concepto popular de calidad del aire es casi desconocido.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **2.1. Contexto general**

La calidad del aire se puede entender como el conjunto de características que debe contar éste para ser considerado respirable o no, en función de los niveles de concentración de contaminantes que posea. El aire es un elemento muy importante de tener en cuenta en el día a día de cada persona, debido al papel protagónico que éste tiene en el proceso de la vida de cada ser humano. La contaminación del aire es un problema serio que ha tomado relevancia con el avanzar del tiempo y de la industria, ya que debido a esta última y a su desarrollo exponencial, la calidad del aire se ha colocado en una condición comprometida. Entre los procesos industriales que más ha afectado la calidad del aire, el sector transporte con el tránsito vehicular y el mal manejo de los desechos gaseosos de estos, ha causado que ciudades por grande o pequeña que sea posea un nivel de contaminación en el aire considerablemente perjudicial para la salud de las personas, decantando en una serie de enfermedades respiratorias.

En la ciudad de Guatemala, en su casco urbano, cuenta con niveles de contaminación alarmantes ocasionado por la actividad vehicular que se puede observar cada día en esta. En la actualidad, se considera que el nivel de contaminación del aire en la capital guatemalteca es muy alto, tanto que si no se toman acciones inmediatas podría entrar en la clasificación al igual que Bombay, India, la cual tiene una clasificación de nivel peligroso.



## **2.2. Descripción del problema**

Popularmente en Guatemala, no se conocen las medidas necesarias para la reducción de contaminación del aire debido al tránsito vehicular. En la actualidad se registran niveles alarmantes de contaminación en el aire y los distintos entes reguladores no se han pronunciado para accionar en contra del aumento de estos. La falta de información de los ciudadanos acerca del problema tiene su origen en que tampoco se cuenta con un sistema de monitoreo de calidad de aire que tenga las disposiciones para que cualquier persona pueda consultar el nivel de contaminación a la que está expuesta. Esta situación sucede independientemente de la zona o región en que se encuentre y lo que pretende es que se pueda tener acceso a estos indicadores e información, independientemente de la persona, su nivel escolar. El objetivo es comprender el nivel de contaminación que está a su alrededor.

Actualmente en el casco urbano de la capital de Guatemala, se cuenta con una red de monitoreo de calidad de aire que pertenece a la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos. Esta unidad de monitoreo ha estado trabajando desde hace más de 17 años. El funcionamiento de este laboratorio se resume en reportar los resultados obtenidos en el lapso de un año a distintos entes gubernamentales y programas que se relacionan con la protección del medio ambiente en el cual presenta recomendaciones para luego considerar medidas de legislación a favor del cuidado de este. De esta manera, se está abordando el tema para crear medidas que contrarresten el aumento de los niveles de contaminación, de acuerdo con la Facultad de Ciencia Químicas y Farmacia. A la fecha, no se cuenta con un ente regulador y tampoco la presión social que permitan incidir en los entes gubernamentales que regulan y diseñan políticas gubernamentales de prevención y corrección de los posibles daños causados a este recurso natural indispensable para cada ser humano. En

consecuencia, debido a la producción desmedida de material particulado y gases de efecto invernadero de parte del parque vehicular, los habitantes en la región urbana de la Ciudad de Guatemala, se ven en alto riesgo de contraer alguna enfermedad de tipo respiratorio, ya que la exposición por largo tiempo a este tipo de materiales y gases ha tenido un directo efecto negativo en la salud respiratoria de las personas expuestas, pudiendo llegar al punto de provocar la muerte, según estudios de la Organización Mundial de la Salud, OMS.

### **2.3. Formulación del problema**

Desconocimiento de los niveles de contaminación en el aire en la ciudad de Guatemala.

#### **2.3.1. Pregunta central**

¿De qué manera se puede disminuir el nivel de contaminación en el aire en el casco urbano de la Ciudad de Guatemala?

#### **2.3.2. Preguntas auxiliares**

¿Cómo se puede comparar el índice de calidad de aire en la ciudad de Guatemala con el índice propuesto por la OMS?

¿Cómo se puede dar a conocer la realidad de los niveles de contaminación en el aire de la Ciudad de Guatemala?

¿Cómo se puede predecir los niveles de calidad de aire en cierta región de la Ciudad de Guatemala con datos recopilados con anterioridad?

#### **2.4. Delimitación del problema**

La problemática presentada se resolverá por medio la recolección y procesamiento de datos de gases y material particulado en distintos puntos de la Ciudad de Guatemala, utilizando un sistema de sensores y un ordenador de placa reducida, que posee la opción de realizar una conexión a un base de datos en la nube para almacenar ahí todas las mediciones recolectadas.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en la línea de investigación de base de datos a nivel del grado de la Maestría en Energía y Ambiente. Además, la investigación también se justifica en la línea de IoT (*Internet Of Things*) para el nivel de grado de licenciatura de Ingeniería electrónica.

El prototipo de sistema de medición de calidad de aire aportará la información necesaria para que cualquier persona con acceso a internet pueda consultar, en tiempo real, el nivel de polución en la que se encuentre el dispositivo de adquisición de datos de elementos contaminantes. Además, se tiene contemplado que los datos monitoreados de calidad de aire se puedan almacenar en una base de datos no relacional con acceso libre para cualquier estudio o análisis que se desee aplicar en un futuro.

Por consiguiente, se pretende entregar como resultado final un sistema de adquisición de datos, compuesto por un conjunto de sensores y un microprocesador. Este será capaz de medir los contaminantes en el aire, en ámbitos urbanos, en el cual el usuario final pueda conocer si se encuentra en un ambiente saludable o no, por medio de la utilización de una página *web* que devolverá el procesamiento de los datos adquiridos.

El prototipo tiene como alcance, beneficiar a personas en el casco urbano de la ciudad de Guatemala de manera en la que cualquier persona esté informada de los niveles de contaminación a su alrededor. De esta manera, puedan tomarse decisiones y acciones, para frenar las actividades de las distintas fuentes que la

provocan y además tomar precauciones extras, en cuanto a la manera de socializar en espacios públicos.

Finalmente, en cuanto a la pertinencia y relevancia social del prototipo, se puede contemplar como una innovación de la manera de cómo se miden los niveles de contaminación. Así se informa a todo un conjunto de personas de las posibles complicaciones de salud que pueden llegar a padecer, por medio de la unificación de las líneas de investigación de base de datos e IoT.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. General

Diseñar un prototipo de sistema de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos de los elementos contaminantes de aire en la Ciudad de Guatemala.

### 4.2. Específicos

- Proponer un sistema embebido de adquisición y envío de datos de elementos contaminantes a través de internet.
- Diseñar una visualización *web* que muestre el nivel de contaminantes en el aire, en una región específica de la Ciudad de Guatemala, en tiempo real.
- Diseñar una plataforma en la nube utilizando una base de datos geoespacial con el fin de almacenar las distintas mediciones realizadas por el prototipo, con el paso del tiempo.



## **5. NECESIDADES PARA CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN**

El prototipo propuesto, pretende informar a la población urbana de la ciudad de Guatemala, el nivel de contaminación presente en el aire que respiran. Debido a los distintos elementos como el material particulado (PM) y los óxidos que la conforman, independientemente del lugar y el momento donde se haga de su uso, con la finalidad de que cualquier persona pueda tomar sus consideraciones necesarias, para no padecer una enfermedad respiratoria.

Se tomarán muestras del aire en el casco urbano, para identificar el nivel de aparición de los distintos elementos contaminantes por medio de la utilización de un sistema de recolección de datos conformado por sensores de gas y polvo, con la finalidad de comparar esos valores obtenidos con el índice de calidad de aire propuesto por la OMS.

Con las mediciones realizadas y el procesamiento de los datos, se creará una visualización de estos, para que el usuario final pueda tener presente a qué nivel de contaminación está expuesto. Todos los datos obtenidos por este sistema de recolección de información de calidad del aire se almacenarán en una base de datos, para que en un futuro pueda usarse para algún estudio de comportamiento de estos.

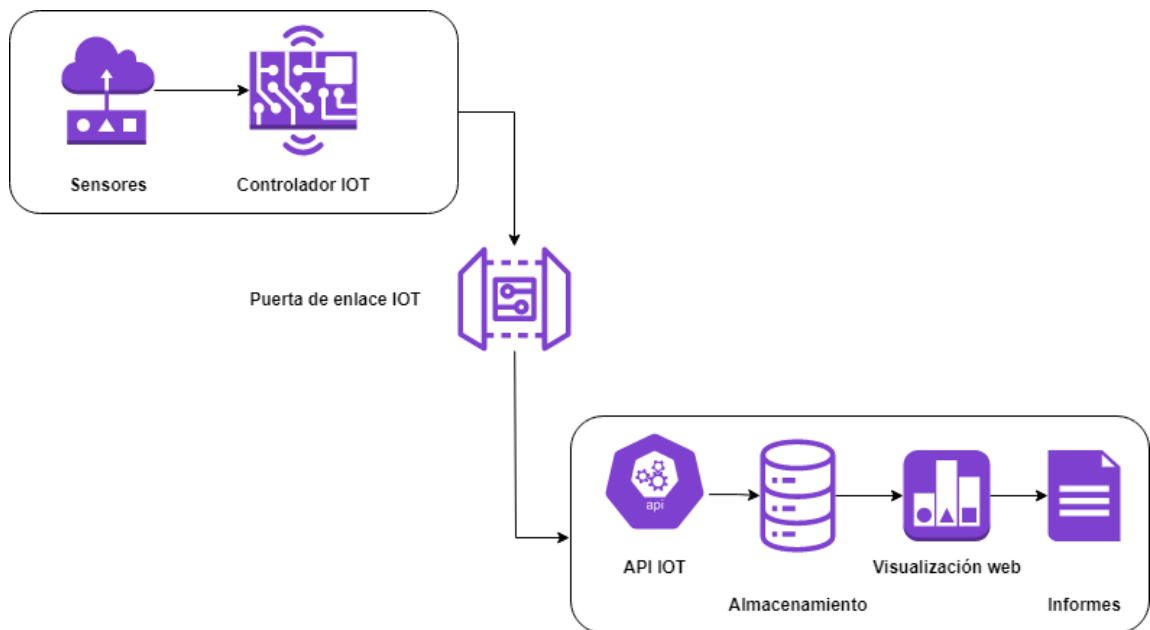
El resultado esperado es la concientización de las personas en cuanto a que nivel de calidad aire posee en la región en donde habita, para que puedan tomar las medidas necesarias y no esperar a que por la exposición a esos agentes contaminantes genere una enfermedad respiratoria que condicione de



alguna manera su existencia. El impacto del conocimiento de esta información que dependiendo del nivel de contaminación se puedan, establecer peticiones a los distintos entes gubernamentales, para que puedan regular actividades industriales y de transporte que son los principales sectores que más influyen en la contaminación del aire.

De esta manera se tiene el siguiente diagrama de la propuesta de solución:

Figura 1. **Diagrama de la propuesta de solución**



Fuente: elaboración propia, realizado con Draw.io.

## **6. MARCO TEÓRICO**

### **6.1. Calidad del aire**

La calidad del aire se puede definir como las características inherentes de este, que permiten juzgar su valor con el fin de determinar si este es bueno o malo para la salud de los seres vivos. Según el proyecto Troposfera de España, define la calidad del aire como “la concentración de contaminantes que llega a un receptor, más o menos lejano de la fuente de emisión, una vez transportado y difundido por la atmósfera” (TROPOSFERA, 2021, p.1). De acuerdo con esta última definición, para tener una mejor comprensión de la calidad del aire hay que referenciar el concepto de contaminación atmosférica.

#### **6.1.1. Contaminación atmosférica**

Según, la guía de calidad de aire y educación ambiental del ministerio de Chile define la contaminación atmosférica como “La presencia en el aire de uno o más contaminantes, o cualquier combinación de ellos en concentraciones o niveles tales que puedan constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental” (Ministerio de medio ambiente, 2016, p.12). De esta manera se toma como una ruta de comprensión más específica del tema de estudio y siguiente paso identificar los principales agentes contaminantes, sus fuentes de emisión y la manera en que estos ponen en riesgo la salud de las personas en un medio ambiente definido.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) y sus estudios realizados, actualmente coloca como principales contaminantes de la atmósfera a las siguientes sustancias químicas: el material particulado de diámetro aerodinámico menor a 2.5 y 10 micrones, (PM 2.5) y (PM10), respectivamente, el ozono (O<sub>3</sub>), el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el monóxido de carbono (CO). Cabe mencionar que cualquier sustancia química que se encuentra naturalmente en la atmósfera, en concentraciones muy elevadas puede considerarse como un indicador de contaminación de esta. Por lo tanto, se puede considerar que cualquier exceso de estos contaminantes críticos coloca en una situación de riesgo la vida del ambiente y a la población.

### 6.1.2. Principales contaminantes

En la siguiente tabla se muestran características principales, fuentes de origen y el posible efecto a salud de los contaminantes descritos anteriormente.

Tabla I. **Contaminantes críticos**

Contaminante	Características	Fuente principal	Efectos sobre la salud
PM10	Material particulado suspendido de diámetro menor a 10 µm. Partículas de material sólido o gotas líquidas suspendidas en el aire. Puede presentarse como polvo, niebla, aerosoles, humo, hollín, etc.	Erosión eólica, tráfico en vías sin pavimento y actividades de construcción. Procesos de combustión (industria y vehículos de automoción)	Produce irritación de las vías respiratorias, agrava el asma y favorece las enfermedades cardiovasculares. Se relaciona con la silicosis y asbestosis. Causa deterioro de la función respiratoria (corto plazo). Asociado con el desarrollo de enfermedades crónicas, cáncer o muerte prematura (a largo plazo).

Continuación Tabla I.

PM2.5	Material particulado suspendido menor a 2,5 $\mu\text{m}$ .	Proceso de combustión (industrias, generación termoeléctrica). Incendios forestales y quemas. Purificación y procesamiento de metales	Tiene la capacidad de ingresar al espacio alveolar o al torrente sanguíneo incrementando el riesgo de padecer enfermedades crónicas cardiovasculares y muerte prematura.
SO2	Gas incoloro de olor fuerte. Puede oxidarse hasta SO3 y en presencia de agua formar H2SO4. Importante precursor de sulfatos e importante componente de partículas respirables.	Procesos de combustión, Centrales termoeléctricas, generadores eléctricos. Procesos metalúrgicos. Erupciones volcánicas. Uso de fertilizantes	Altas concentraciones ocasionan dificultad para respirar, conjuntivitis, irritación severa en vías respiratorias y en pulmones. Causante de broncoconstricción, bronquitis, traqueítis y broncoespasmos, agravamiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares existentes y la muerte.
CO	Gas incoloro, inodoro e insípido.	Procesos de combustión incompleta. Los vehículos a gasolina constituyen la fuente más importante.	La hipoxia (falta de oxígeno) producida por la inhalación de CO, puede afectar al corazón, cerebro, plaquetas y endotelio de los vasos sanguíneos. Asociado a disminución de la percepción visual, capacidad de trabajo, destreza manual y habilidad de aprendizaje.

Fuente: elaboración propia con datos de Secretaría de Ambiente (2016).

Con la información anterior se establece un panorama más amplio, las consideraciones en cuanto a que los posibles efectos negativos que existía en cuanto a la exposición a estas sustancias químicas. Para considerar que un ambiente cuenta con una buena calidad del aire, se debe de conocer más que los efectos negativos de los contaminantes, ya que la exposición a cualquiera de estos es inminente. Por lo tanto, conocer los márgenes confiables para delimitar las cotas mínimas y máximas permisibles es de vital importancia. En la siguiente tabla se contemplan los niveles guías recomendados actualmente por la OMS.

Tabla II. **Niveles guías recomendados para cada contaminante**

<b>Contaminante</b>	<b>Período temporal</b>	<b>Concentración(<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>
PM 2.5	1 año	10
	24 horas	25
PM 10	1 año	20
	24 horas	50
Ozono, O <sub>3</sub>	8 horas, máximo diario	100
Dióxido de nitrógeno, NO <sub>2</sub>	1 año	40
	1 hora	200
Dióxido de azufre, SO <sub>2</sub>	24 horas	20
	10 minutos	500
Monóxido de carbono, CO	24 horas	6000 (5 ppm)
	1 hora	30000 (25 ppm)

Fuente: elaboración propia con información de WHO (2021).

Con la información resumida en la tabla II, se establecen los rangos de confianza óptimos para que las lecturas del prototipo puedan alertar a los usuarios de este de posibles concentraciones anormales, considerables como perjudiciales a la salud de las personas y del medio ambiente.

Debido a la complejidad que pueda presentar la lectura de información correspondiente a las concentraciones de las especies químicas en estudio, se hace uso de una herramienta que brinde un breve análisis de la situación por la cual pueda estar expuesta una persona en relación con el nivel de contaminación atmosférica.

### 6.1.3. Índice de calidad del aire

El índice de calidad de aire es una herramienta de medición que cuenta con un rango de 0 a 500, que contempla un comportamiento en el cual cuando más cerca del valor cero, menos es el nivel de contaminación atmosférica y por ende menor será el riesgo que haya para la salud. Además, este se divide en seis categorías que pertenecen a un distinto nivel de prevención para la salud. Estas divisiones poseen un color que facilita, al público, determinar con rapidez si la calidad del aire es saludable o no en el ambiente donde se encuentren. La siguiente figura explicativa de la AIQ (*air quality index*: calidad del aire) resume los límites de exposición en los cuales se puede encontrar un medio ambiente en función de la contaminación del aire que este posea.

Figura 2. Índice de calidad de aire

Color diario AQI	Niveles de preocupación	Valores de índice	Descripción de la calidad del aire
Verde	Bueno	0 a 50	La calidad del aire es satisfactoria y la contaminación del aire presenta poco o ningún riesgo.
Amarillo	Moderado	51 a 100	La calidad del aire es aceptable. Sin embargo, puede haber un riesgo para algunas personas, particularmente aquellas que son inusualmente sensibles a la contaminación del aire.
Naranja	Insalubre para grupos sensibles	101 a 150	Los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud. El público en general es menos probable que se vea afectado.
Rojo	Insalubre	151 a 200	Algunos miembros del público en general pueden experimentar efectos en la salud; los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos de salud más graves.
Púrpura	muy poco saludable	201 a 300	Alerta de salud: El riesgo de efectos en la salud aumenta para todos.
Granate	Peligroso	301 y superior	Advertencia sanitaria de condiciones de emergencia: todos tienen más probabilidades de verse afectados.

Fuente: AirNow (2021)

## **6.2. Arquitectura del sistema IoT**

Una arquitectura de un sistema consta de distintas etapas que validan el funcionamiento y la calidad de servicio que este llegue a prestar. En cuanto a una arquitectura IoT consta de cuatro etapas comprendidas desde los sensores conectados a través de una red privada o pública hasta llegar al punto de almacenamiento, procesamiento y análisis de los datos recolectados.

En la primera etapa de una arquitectura IoT se encuentran los sensores y los actuadores, los dispositivos encargados de captar los datos de algún fenómeno físico o bien controlar la ejecución de alguna acción determinada como proceso físico, respectivamente.

Seguidamente, se encuentra la etapa de adquisición de datos, que consta de tomar estos sin ningún tipo de procesamiento de parte de los sensores para convertirlos de un estado o tipo analógico a uno digital. En esta etapa se busca comprimir y filtrar los datos para tener un óptimo volumen para que su transmisión por la red sea ligera. Por otra parte, la tercera etapa consta del análisis de los datos digitalizados previamente, con la finalidad de realizar un tipo de análisis previo al análisis final y concluyente que se necesite. La calidad de los datos se mejora, buscando que al momento de almacenarlos en un centro de datos convencional o en la nube pueda aportar información importante e incidencia relevante.

Finalmente, la cuarta etapa consta del análisis a profundidad de los datos. En esta etapa, los datos se almacenan en distintas bases de datos con la finalidad de ofrecer información contundente y presentable para que por medio de aplicaciones externas se pueda tomar como referencia para la presentación de

informes acerca de los comportamientos determinados a lo largo de todo el proceso de la arquitectura.

Debido a las características de este estudio y la factibilidad al acceso de la información acerca de la problemática de la calidad del aire en Guatemala, la implementación de esta arquitectura no contempla el aspecto de análisis de predicción de comportamientos de la variable calidad del aire. De esta manera la arquitectura a establecer con este estudio está en función de las etapas uno, dos y cuatro, según los descrito anteriormente.

### **6.2.1. Sensores**

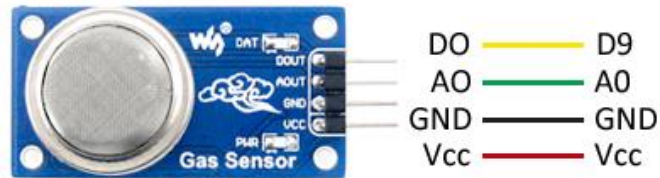
Un sensor es un dispositivo que capta los distintos cambios de un fenómeno físico y los convierte en una señal eléctrica tal como el voltaje o corriente pudiendo ser estos valores analógicos o digitales.

Para la finalidad de este estudio se utilizará sensores que detectan sustancias químicas y material particulado, según los expuesto en la Tabla II. Los sensores indicados para este tipo de mediciones son la familia de sensores MQ. Según Castiblanco y Cañon (2019), la gama de sensores MQ son dispositivos analógicos diseñados para la detección de sustancias químicas que se sitúan en el aire. Estos sensores son del tipo electroquímicos y se caracterizan por poseer una resistencia variable en función de los compuestos químicos que detecte.

En cuanto al esquema electrónico que utiliza la familia de sensores MQ, consiste en módulo que consta de 4 pines, GND (tierra), Vcc (Voltaje directo) y las salidas analógicas A0 y directa D0.



Figura 3. Diagrama esquemático de un sensor MQ



Fuente: Luis Llamas. *Detector de gases con Arduino y la familia de sensores MQ*. (2013) [En línea], 21 de octubre de 2021 [revisado 21 de octubre de 2021]. Disponible en Internet: <https://www.luisllamas.es/arduino-detector-gas-mq/>

De acuerdo con el estudio, se necesitan sensores que puedan medir Ozono O<sub>3</sub>, Dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>, Monóxido de carbono CO y Dióxido de azufre SO<sub>2</sub>, en cuanto a los gases. El apartado de material particulado se detalla más adelante. Entre los sensores con características particulares para medir los gases mencionados anteriormente se encuentran los siguientes:

Tabla III. Características de algunos sensores MQ

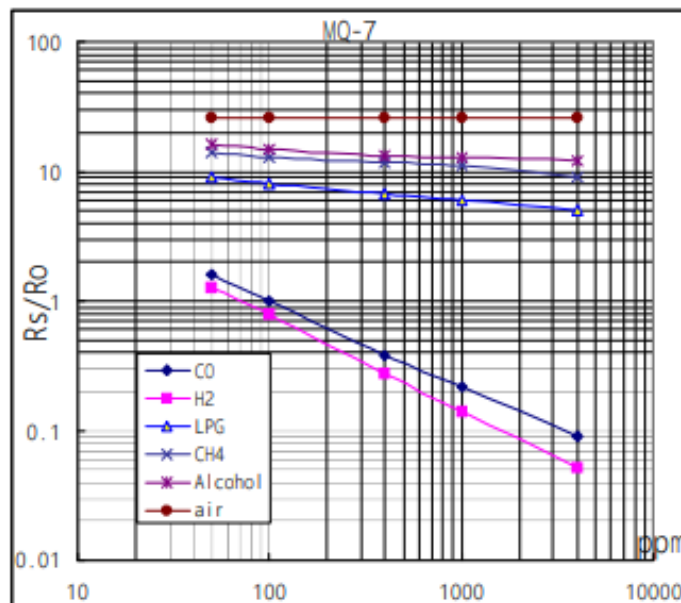
Modelo	Sustancia detectada	Alimentación eléctrica	Rango de detección
MQ-7	Monóxido de carbono	Entre 1.4V y 5V	20-2000 ppm
MQ-131	Ozono	6V	10ppb – 2 ppm
MQ-135	NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , alcohol, CO <sub>2</sub> , etc.	5V	10 – 1000 ppm

Fuente: elaboración propia con datos de Millán (2016).

### 6.2.1.1. Sensor MQ-7

Es un sensor que cuenta con una alta sensibilidad al monóxido de carbono CO, una vida útil considerablemente larga y la implementación de este es sencilla. Cada sensor MQ cuenta con una curva de calibración que debe ser tomada en cuenta para realizar mediciones correctas.

Figura 4. Curva de calibración del sensor MQ-7



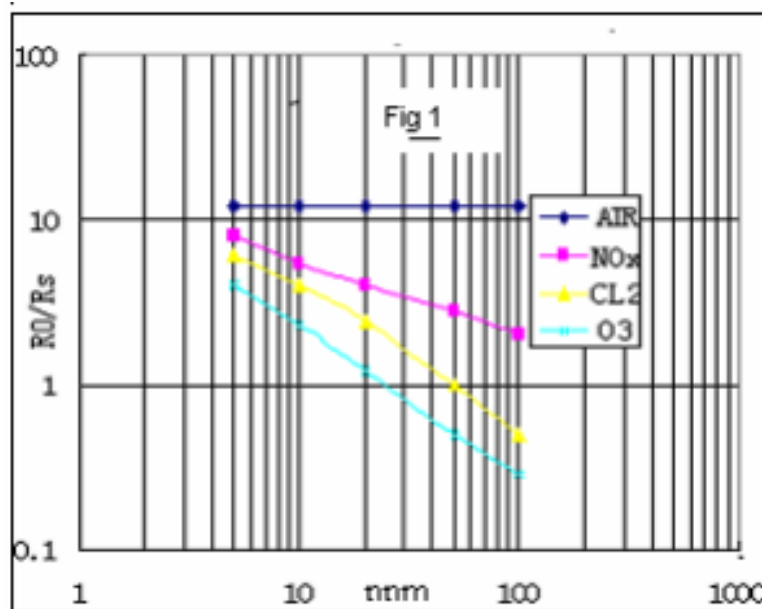
Fuente: HANWEI ELETRONICS CO, TECHNICAL DATA MQ-7 GAS SENSOR.  
<http://www.vistronica.com/images/Documentos/MQ-7.pdf>, Consulta: 21 de octubre de 2021

### 6.2.1.2. Sensor MQ-131

Este sensor cuenta con una sensibilidad alta al Ozono  $O_3$ . Posee características tales como una fácil implementación y una vida media antes de

algún fallo considerablemente alta. La curva de calibración del sensor es la siguiente:

Figura 5. **Curva de calibración del sensor MQ-131**



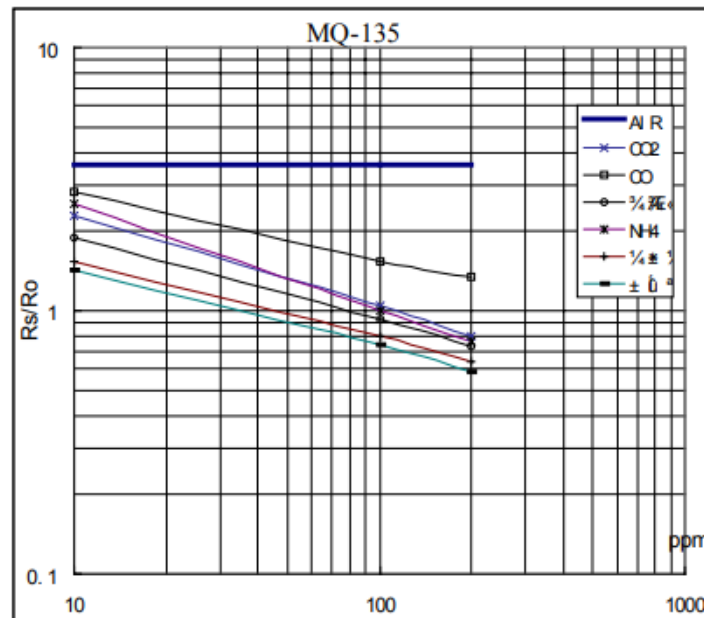
Fuente: *Electronicaplugandplay, Technical daa MQ-131 Ozono Sensor.*

[https://www.electronicaplugandplay.com/component/edocman/?task=document.viewdoc&id=216](https://www.electronicaplugandplay.com/component/edocman/?task=document.viewdoc&id=216&Itemid=)  
&Itemid=, Consulta: 21 de octubre de 2021

### 6.2.1.3. **Sensor MQ-135**

Este sensor de calidad de aire es utilizado para la detección de NO<sub>x</sub>, benceno, alcohol, humo y CO<sub>2</sub>. Este sensor cuenta con características como: rango de medición amplio, sensibilidad alta y rápida respuesta al dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> y una duración media antes de fallas por uso considerablemente larga.

Figura 6. **Curva de calibración del sensor MQ-135**



Fuente: HANWEI ELETRONICS CO, TECHNICAL DATA MQ-135 GAS SENSOR.

<http://www.vistronica.com/images/Documentos/MQ-135.pdf>. Consulta: 21 de octubre de 2021

#### 6.2.1.4. **Sensor de Dióxido de azufre**

Debido a que dentro de la familia de sensores MQ no se encuentra uno con la función específica de detectar dióxido de azufre se hará uso del sensor 2SH12.

El sensor 2SH12 es utilizado para la detección de gas en el ambiente, específicamente para la detección de dióxido de sulfuro SO<sub>2</sub> en un rango de medición de 1 a 500 ppm. Entre los parámetros de este sensor se encuentran:

- Tensión de funcionamiento: DC5V (CC máximo 24V)
- Corriente de funcionamiento: 150 mA

- Resistencia de carga: 10 K (ajustable)
- Sensibilidad: 3 %
- Tiempo de respuesta: 30 s
- Consumo de energía: 0.8 W
- Humedad: 95 % RH (humedad nominal 65 % RH)
- Vida: útil: 5 años

Figura 7. **Sensor de dióxido de sulfuro 2SH12**



Fuente: *Sensor 2SH12*. <https://es.dhgate.com/product/wholesale-amp-retail-semiconductor-type-gas/176073137.html>. Consulta: 22 de octubre de 2021

#### **6.2.1.5. Sensor de material particulado**

El dispositivo destinado para la detección de material particulado PM2.5 y PM10, es el sensor de polvo PMS3003. De acuerdo con Pilozo (2020), este sensor utiliza el principio de dispersión láser para obtener la curva de dispersión del cambio de luz con el tiempo con la finalidad de obtener el diámetro y el número de partículas suspendidas en el aire por unidad de volumen.

## **6.2.2. Computadora de placa reducida**

Una computadora de placa reducida se puede comprender como una computadora que se encuentra alojada en un solo circuito. Este tipo de computadora cuenta con las características principales de una computadora de placa base como las memorias RAM y ROM, los puertos de entrada y salida, con la peculiaridad de tener un tamaño reducido. A pesar de poseer un tamaño reducido, esta cuenta con la potencia de procesamiento necesaria para desarrollar tareas que serían consideradas demasiado complejas para un ser humano.

### **6.2.2.1. Raspberry Pi Pico ®**

Este es el dispositivo destinado para la etapa de adquisición y procesamiento de datos obtenidos por la etapa de sensores de gases y material particulado. La Raspberry Pi Pico es una computadora de tarjeta reducida basada en el microcontrolador RP2040. Es posee características como un procesador de dos núcleos ARM Cortex-M0+ que tiene una frecuencia de reloj de 133 MHz cada uno, una memoria RAM de 264 KB y una memoria flash de 2 MB, un voltaje de operación de 3.3 V, puertos UART, I2C y SPI dentro de sus 26 pines entrada/salida. Esta tarjeta de desarrollo cuenta con las opciones de ser programado utilizando lenguajes como C/C++ o MicroPython.

#### **6.2.2.1.1. Lenguaje de programación interpretado MicroPython**

MicroPython es una implementación sintetizada del lenguaje de programación Python 3. Esta incluye un repertorio reducido de las bibliotecas estándar de Python con la finalidad de transferir y ejecutar cualquier rutina de

código creada en computadora, en microcontroladores o sistemas integrados que soportan este lenguaje. Esta implementación de Python cuenta con características avanzadas como el manejo de listas de comprensión, generadores, excepciones entre otras con la particularidad que todas esas características pueden ejecutarse en un espacio de 16 KB de memoria RAM (George Robotics Limited, 2021).

### **6.2.3. Sistema de posicionamiento global GPS**

El sistema de Posicionamiento Global GPS (por sus siglas en inglés) es un conjunto de satélites que orbitan un promedio de dos veces al día alrededor de la Tierra. Este fue desarrollado por los Estados Unidos de América con la intención de ser un servicio militar que luego fue se enfocó en proporcionar un servicio de radionavegación y posicionamiento para cualquier usuario alrededor del mundo.

#### **6.2.3.1. Receptor GPS**

La función principal de un receptor GPS es calcular y mostrar la ubicación terrestre exacta de un usuario que esté utilizando este dispositivo. Para ello, previamente se debe utilizar un principio matemático llamado “trilateración” que consiste en localizar entre cuatro a más satélites que orbitan en el espacio, calcular la distancia que hay entre este y cada uno de los satélites para finalmente dar la ubicación exacta.

### **6.2.4. Base de datos geoespaciales**

Sepúlveda (2017) indica que una base de datos geoespaciales (BDG) es un conjunto de datos geográficos organizados de tal manera que permiten la

realización de análisis y la gestión del territorio dentro de aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica. El modelo de datos, el modelo entidad-relación y el modelo relacional tienen un papel muy importante en la BDG. Esto debido a que en estos describen las entidades geográficas físicas, con las que se debe realizar una abstracción que satisfaga las exigencias de la promulgación de la información y el almacenamiento de datos obtenidos para obtener el mejor provecho de las consultas que se realicen a la BDG.

La implementación de una BDG contempla la utilización de las coordenadas GPS obtenidas por el receptor GPS en conjunto con los datos obtenidos por la herramienta adquisidora de datos presentados en una misma visualización.

#### **6.2.4.1. Servicios BDG en la nube**

Para garantizar elasticidad, fiabilidad y el escalamiento del proceso de recolección y análisis de los datos obtenidos por el prototipo de adquisición de datos de calidad de aire se propone la implementación de una BDG en la nube. Para solventar esta situación se contempla la utilización de un servicio de almacenamiento gratuito como *Google My Maps*. *Google My Maps* es un servicio de Google en la nube que permite crear mapas personalizados con base a los mapas ya creados por *Google Maps* contando con la única limitación que para hacer uso de este servicio se debe contar con una cuenta de *Google* como tal. *Google My Maps* cuenta con las características de ser escalable, de fácil implementación y con la gran ventaja de contar con soporte para dispositivos móviles.



### **6.2.5. Página web**

Una página web es un documento que puede ser accedido por cualquier navegador que posee un acceso a internet. Este documento es capaz de contener distintos formatos de información tales como texto, sonido, imágenes, videos entre otros los cuales pueden ser accedidos por medio de una búsqueda en la internet.

Para el desarrollo de la visualización de las mediciones y el análisis de los datos de calidad de aire captados por el sistema de adquisición de datos se hará uso de un compendio de tecnologías para presentar informes gráficos explícitos y entendibles para la población en general, acerca de la situación de la contaminación atmosféricas a la cual pudieran estar expuestos.

#### **6.2.5.1. Tecnologías involucradas**

Dentro del marco tecnológico web que concierne al desarrollo del proyecto se conforma por la utilización JavaScript, HTML y CSS.

##### **6.2.5.1.1. JavaScript<sup>1</sup>**

Es un lenguaje de programación interpretado, orientado a objetos, imperativo, basado en prototipos con un débil tipado. JavaScript es usado principalmente para implementar funciones de creación, modificación y el control de eventos en páginas HTML o XHTML haciendo de estas un ambiente más dinámico con la implementación de JQuery.

---

<sup>1</sup> <https://www.javascript.com/>

### **6.2.5.1.2. HTML<sup>2</sup>**

Proviene del acrónimo HyperText Markup Language (Lenguaje de marcado de hipertexto, en español), que hace referencia al lenguaje de marcado para la creación de páginas web. HTML es considerado el lenguaje más importante en la proliferación de tecnologías en toda la web. Es un estándar a cargo de World Wide Web Consortium (Consortio WWW, en español) que un código que permite indicar la estructura de un documento mediante etiquetas. Este lenguaje ofrece una gran adaptabilidad, una estructuración lógica y una fácil interpretación para la creación de contenido de una página web como texto, imágenes, videos, sonido entre otros.

### **6.2.5.1.3. CSS<sup>3</sup>**

De las siglas en inglés Cascading Style Sheets (Hojas de estilos, en español) es un lenguaje de diseño gráfico para definir la estructura de un documento creado con lenguaje de marcado HTML. Este lenguaje controla los aspectos de presentación como: fuentes, colores, interlineado, animación de los documentos que se puedan crear en HTML. Este lenguaje tiene la función de dar la calidad de presentación de la interfaz web de calidad de aire.

---

<sup>2</sup> <https://html.com/>

<sup>3</sup> <http://www.w3schools.com/css/>



## 7. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS  
ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

### 1. CALIDAD DEL AIRE Y SUS IMPLICACIONES

1.1. Calidad del aire

1.2. Contaminantes del aire y sus efectos en la salud

1.2.1. Material particulado PM 10

1.2.2. Material particulado PM 2.5

1.2.3. Ozono

1.2.4. Monóxido de carbono

1.2.5. Dióxido de azufre

1.2.6. Dióxido de nitrógeno

1.3. Fuentes de emisión

1.4. Índice de calidad de aire según OMS

1.4.1. Límites de exposición

1.4.2. Indicadores de calidad de aire

1.5. Marco legal

- 1.5.1. Normativa a nivel internacional
  - 1.5.2. Normativa Guatemalteca
  
- 2. TEORÍA DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS
  - 2.1. Sensores y características de operación
    - 2.1.1. Sensor MQ-135
    - 2.1.2. Señor MQ-7
    - 2.1.3. Sensor PMS5003
  - 2.2. Emisor GPS
  - 2.3. Computadora de placa reducida
  - 2.4. Base de datos geoespaciales
    - 2.4.1. Servicio en la nube de almacenamiento de datos
  - 2.5. Página web
    - 2.5.1. JavaScript
    - 2.5.2. HTML
    - 2.5.3. CSS
  
- 3. DISEÑO DE ARQUITECTURA IOT DE LA HERRAMIENTA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE CALIDAD DE AIRE
  - 3.1. Diseño de herramienta adquisidora de datos
  - 3.2. Arquitectura IOT
  - 3.3. Protocolos de comunicación
    - 3.3.1. Comunicación entre computadora de placa reducida y base de datos
    - 3.3.2. Comunicación entre base de datos y página web
  - 3.4. Visualización
  - 3.5. Pruebas de entorno

3.6. Informes

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ANEXOS



## **8. METODOLOGÍA**

### **8.1. Características del estudio**

El enfoque del estudio propuesto es cualitativo, ya que a pesar de obtener datos de nivel de contaminación únicamente se pretende informar a la población del estado en el que se encuentra el aire que respiran. Si fuera el caso, la posibilidad de que pudieran estar en una situación de contraer alguna enfermedad respiratoria.

El alcance de este estudio es descriptivo ya que con el análisis de la adquisición de datos que se realice del aire en el área, se especificarán propiedades, características e importantes rasgos en contraste con el índice de calidad de aire avalado por la OMS.

El diseño de la investigación será no experimental pues la información obtenida del prototipo de adquisición de datos de calidad de aire se analizará tal y como se manifiesta en su ambiente natural sin hacer manipulaciones intencionalmente de las variables de estudio. Además, será transversal pues se estudiará la calidad del aire en la ciudad guatemalteca en los periodos de obtención de información, sin hacer referencias de evolución con respecto a la contaminación de años anteriores.

### **8.2. Unidades de análisis**

La población en este estudio será el flujo de aire que esté presente en el casco urbano de la ciudad de Guatemala. Esta población se encuentra dividida



en subpoblaciones dadas por las mediciones de aire tomadas por la herramienta de adquisición de datos ubicada en la región de estudio. Todo el conjunto de mediciones será tomado de forma aleatoria simple y procesado en su totalidad.

### 8.3. Variables

Tabla IV. Variables

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Calidad de aire	Cifra que refleja la cantidad contaminantes presentes en el aire	Ppm (partes por millón) presentes de cada elemento contaminante presente en las muestras tomadas por los sensores de gases y material particulado.
Índice de calidad de aire	Es una escala de referencia en la que se compara la concentración de un elemento contaminante su límite permitido	Comparación entre valores medidos experimentalmente y datos teóricos.
Visualización web	Herramienta que se utiliza para contener información, ubicándola en una dirección determinada de internet	Tecnologías como HTML, CSS, JavaScript y Google Maps darán una visualización de la información presente en el aire de la región estudiada.

Fuente: elaboración propia.

### 8.4. Fases del estudio

El estudio consta con cinco fases.

#### 8.4.1. Revisión de literatura

En esta fase se debe obtener el conocimiento teórico para poder realizar los distintos experimentos y de esa manera obtener una solución para el

problema de investigación. Para la realización de esta, será necesario investigar en diferentes fuentes de información como lo son, libros, revistas, artículos científicos, tesis de trabajos de postgrado.

Este trabajo de investigación desarrolla un sistema de adquisición de datos de calidad de aire utilizando los conceptos de *Internet of Things* y *Big data* para lo cual se es necesario tener una base de conocimiento a través de revisión de documentos que desarrollen temas como:

- Microcontroladores, microprocesadores y computadoras de placa reducida
- Sensores de gas y material particulado
- Computación de la nube
- Base de datos GIS
- Aplicación web

#### **8.4.2. Diseño del sistema embebido adquisidor de datos**

La información acerca de la calidad del aire del casco urbano de la ciudad de Guatemala se obtendrá mediante las mediciones realizadas por el dispositivo adquisidor de datos, ubicado en un lugar en particular de esta zona, dejándolo en constante operación por un tiempo limitado.

En esta fase se establecerán los diferentes componentes y su funcionalidad en el diseño de la herramienta de recolección de datos de calidad de aire.

#### **8.4.2.1. Selección de sensores de gases y material particulado**

- Representación de los valores obtenidos de los elementos analizados en ppm.
- Límites y bondades de los posibles sensores a utilizar.

#### **8.4.2.2. Computadoras de placa reducida para IoT**

La computadora por utilizar debe contar con las siguientes características:

- Conexión Wifi
- Puertos entrada/salida analógicos y digitales
- Conexión UART/TTL
- Comunicación vía Ethernet
- Soporte lenguaje Python

#### **8.4.2.3. Módulo GPS**

Este módulo será utilizado para la geolocalización de la herramienta de adquisición de datos y por ende de las mediciones de los elementos contaminantes.

#### **8.4.2.4. Almacenamiento de las mediciones realizadas**

Este apartado tiene como propósito crear un histórico de todas las mediciones que se realicen con la finalidad de que estas puedan ser utilizadas a futuro para el pronóstico de índices de calidad de aire en las regiones analizadas.

Para esta tarea se utilizará un servicio de almacenamiento en la nube de una base datos geoespacial como PostGis o Google My Maps.

### **8.4.3. Diseño de herramienta de visualización web**

En esta fase se desarrolla el entorno visual donde el usuario final tendrá la información recolectada, mostrando en todo tiempo:

- La región estudiada utilizando un mapa representativo.
- El elemento contaminante, así como su concentración.
- La comparación entre las mediciones y el índice de calidad de aire.
- El histórico de mediciones realizadas en un lapso determinado.
- Alertas cuando un elemento sobrepase la concentración límite.

Para la implementación de esta herramienta se consideran las siguientes etapas:

#### **8.4.3.1. Creación de página web**

Para el correcto funcionamiento de la visualización web se creará cada uno de los elementos interactivos, desde los vínculos dentro de esta hasta la implementación de los mapas.

#### **8.4.3.2. Diagrama de bloque para la representación de la visualización web**

- Identificación de los elementos en el entorno (gráficos, escalas, índices).
- Identificación de la capa de comunicación.
  - Comunicación entre microcontrolador y página.

- Comunicación con la base de datos.
- Comunicación externa hacia otros sistemas.

#### **8.4.4. Interpretación de información**

Estos resultados se utilizarán para informar a las personas, habitantes de la zona en estudio, de cuál es la situación y los posibles riesgos a los que están expuestos.

#### **8.4.5. Redacción del informe final**

Para finalizar, se realizará el informe final detallando los resultados de cada una de las fases anteriores.

## 9. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

### 9.1. Indicadores de calidad del aire

Se utilizarán los indicadores basados en las recomendaciones de calidad de aire de la OMS con el fin de realizar una comparación directa con los valores obtenidos por la herramienta de adquisición de datos.

Figura 8. Indicadores de calidad del aire

Pollutant	Averaging time	2005 air quality guideline	2021 AQG level
<b>PM<sub>2.5</sub>, µg/m<sup>3</sup></b>	Annual	10	5
	24-hour <sup>a</sup>	25	15
<b>PM<sub>10</sub>, µg/m<sup>3</sup></b>	Annual	20	15
	24-hour <sup>a</sup>	50	45
<b>O<sub>3</sub>, µg/m<sup>3</sup></b>	Peak season <sup>b</sup>	–	60
	8-hour <sup>a</sup>	100	100
<b>NO<sub>2</sub>, µg/m<sup>3</sup></b>	Annual	40	10
	24-hour <sup>a</sup>	–	25
<b>SO<sub>2</sub>, µg/m<sup>3</sup></b>	24-hour <sup>a</sup>	20	40
<b>CO, mg/m<sup>3</sup></b>	24-hour <sup>a</sup>	–	4

Fuente: (WHO, 2021)

## 9.2. Índice de calidad del aire

Debido a la simplicidad de interpretación que ofrece un índice, se utilizará esta técnica para que el público pueda informarse o bien realizar un análisis breve de la situación en la cual se pueda encontrar la calidad del aire que respira. De la misma forma que con los indicadores se utilizará el índice de calidad de aire propuesto por la OMS.

Figura 9. Índice de calidad del aire

Color diario AQI	Niveles de preocupación	Valores de índice	Descripción de la calidad del aire
Verde	Bueno	0 a 50	La calidad del aire es satisfactoria y la contaminación del aire presenta poco o ningún riesgo.
Amarillo	Moderado	51 a 100	La calidad del aire es aceptable. Sin embargo, puede haber un riesgo para algunas personas, particularmente aquellas que son inusualmente sensibles a la contaminación del aire.
Naranja	Insalubre para grupos sensibles	101 a 150	Los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud. El público en general es menos probable que se vea afectado.
Rojo	Insalubre	151 a 200	Algunos miembros del público en general pueden experimentar efectos en la salud; los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos de salud más graves.
Púrpura	muy poco saludable	201 a 300	Alerta de salud: El riesgo de efectos en la salud aumenta para todos.
Granate	Peligroso	301 y superior	Advertencia sanitaria de condiciones de emergencia: todos tienen más probabilidades de verse afectados.

Fuente: *Índice de calidad del aire*. <https://www.airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>.

Consulta: 21 de octubre de 2021

## 10. CRONOGRAMA

Tabla V. Cronograma

Actividades/ Tiempo en semanas	FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO					JUNIO				JULIO							
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5			
<b>1. Diseño de sistema embebido adquisidor de datos</b>																													
Selección de Hardware necesario: sensores, microprocesador, gps y resto de componentes electrónicos.																													
Implementación de técnicas de muestreo en función de cada sensor																													
Armado del sistema embebido																													
<b>2. Aplicación web</b>																													
Lógica, diseño y estructura (gráficos, multimedia, funciones, etc.)																													
Protocolo de comunicación con el sistema embebido con la aplicación web																													
Pruebas de conexión entre aplicación web y sistema embebido																													
<b>3. Almacenamiento de información</b>																													
Obtención de servicio de base de datos G.I.S en la nube																													
Verificación de correcto almacenamiento de datos obtenidos por sistema embebido en la base de datos																													
<b>4. Recolección de información</b>																													
Toma de muestras de aire																													
<b>5. Análisis de información</b>																													
Codificación de programas para análisis comparativo de datos con el índice de calidad de aire según OMS.																													
<b>6. Detección y corrección de errores</b>																													
Verificación de correcto funcionamiento de la herramienta adquisidora de datos.																													
<b>7. Informe de resultados</b>																													
Creación de informe digital de la calidad de aire que posee el casco urbano de la ciudad de Guatemala.																													
<b>8. Redacción de informe final</b>																													
Segundo capítulo																													
Tercer capítulo																													
Discusión de resultados																													
Conclusiones y recomendaciones																													
Detalles finales (Revisiones, asesorías y presentación)																													

Fuente: elaboración propia, realizado en Word.





## 11. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

### 11.1. Factibilidad económica

Tabla VI. Factibilidad económica

Recurso	Propósito	Precio	Cantidad	Subtotal
Sensores				
MQ-135	Medir concentración de NOx y CO2	\$9	1	\$6
MQ-7	Medir concentración de CO	\$6	1	\$6
PMS5003	Medir material particulado PM 2.5-10	\$10	1	\$10
Raspberry	Procesamiento de información proporcionada por los sensores	\$100	1	\$100
Módulo GPS	Geolocalizar cada medición realizada por la herramienta	\$45	1	\$45
Batería Lipo	Alimentación de corriente de la herramienta de adquisición de datos	\$40	1	\$40
Combustible/transporte	Realizar mediciones en distintas localizaciones del casco urbano de la ciudad de Guatemala	\$75	1	\$75
Armazón de la herramienta de adquisición de datos	Para resguardar el conjunto de componentes electrónicos que componen la herramienta.	\$25	1	\$25
Alquiler de servidor de base datos en la nube	Almacenamiento de mediciones tomadas por la herramienta de adquisición de datos	\$50 por mes	1	\$50
Asesoría profesional	Costos de honorarios de ingeniero asesor del proyecto de investigación	\$150	1	\$150
<b>Total</b>				<b>\$510</b>

Fuente: elaboración propia, realizado en Word.

## 11.2. Factibilidad operativa

- Acceso a un medio de transporte

Se necesita contar con un medio de transporte terrestre para movilizarse a realizar las mediciones en los distintos puntos del casco urbano de la Ciudad de Guatemala.

- Acceso público

Las mediciones se realizarán en área que cuente con acceso a todo público. Esto con el fin de evitar retrasos en la ejecución del proyecto.

## 11.3. Factibilidad técnica

- Ancho de banda de internet:
  - Plan de internet de 50MB
- Software por utilizar:
  - Lenguaje de programación *Python* [Pitón].
  - Lenguaje de programación *JavaScript*
  - Lenguaje de marcado HTML y CSS
  - Lenguaje estructurado de consultas SQL
  - Computación de la Nube e IoT
  - Protocolos de comunicación
    - UART
    - I2C
    - Ethernet
    - Wifi

- Hardware necesario:
  - Computadora de placa reducida
  - Conjunto de sensores
    - Calidad de aire
    - Dióxido de azufre
  - Computadora con prestación tal como:
    - Memoria RAM de 12GB o preferiblemente más.
    - Tarjeta de gráfica
    - Procesador Intel Core i5, AMD Rizen 5 o superiores.
    - Disco duro con 250 GB de estado sólido



## 12. REFERENCIAS

AirNow. (15 de octubre de 2021). *AirNow*. Recuperado de <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/>

Alfonso, C. (2019). *Prototipo de bajo costo para monitoreo de calidad del aire en ambientes interiores*. Universidad piloto de Colombia. Bogotá.

Alfonso, D. (2018). *Emisiones de material particulado de los vehículos en Bogotá. Estrategias de gestión ambiental para su mitigación* (tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Colombia. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/38114>.

Calel, M. (2018). *Diseño e implementación de un dispositivo modular de medición de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera con sistema de ubicación GPS*. (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Campoli, E. (2016). *Sistema de monitoreo de la calidad del aire integrado a IoT* (tesis de licenciatura). Instituto Universitario Aeronáutico. Argentina. Recuperado de <https://rdu.iua.edu.ar/handle/123456789/1126>

Castañeda, A. (2018). *Determinación de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) por difusión activa, como indicador de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala* (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de <https://biblioteca-farmacia.usac.edu.gt/Tesis/Q238.pdf>

- Corado, K. (2019). *Control, monitoreo y simulación de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala*. (tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/12120/1/Kenneth%20Lubeck%20Corado%20Esquivel.pdf>
- Duarte, A., Cangrejo, L., y Delgado, T. (2018). Alternativa Open Source en la implementación de un sistema IoT para la medición de la calidad del aire. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 12(1). Recuperado de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2227-18992018000100014](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-18992018000100014)
- Flores Cortez, O. O., Cortez Reyes, R. A. y Rosa Urrutia, V. I. (2019). *Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remotas, utilizando técnicas IoT y big data. Fase I - Estación IoT automatizada para el monitoreo de calidad del aire por contaminantes PM2.5 y PM10*. San Salvador. El Salvador. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11298/1144>
- George Robotics Limited. *MicroPython*. [en línea]. <<https://micropython.org/>> [Consulta: 10 de noviembre de 2021].
- Gómez, F. (2017). *Sistema web para la visualización de calidad del aire*. (tesis de licenciatura). Universidad de Talca.Chile. Recuperado de <http://dspace.otalca.cl/bitstream/1950/12123/3/tutcur-20170006.pdf>
- Itzep Mendoza, K. E. (2019). *Diseño e implementación de un detector de partículas en el aire, con control y acceso remoto empleando una computadora de placa reducida a través de una red local*. (tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Martínez Pérez, E. M., & López Menéndez de Jiménez, R. E. (2020). *Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remotas: desarrollo de una plataforma para el análisis de datos y generación de modelos por medio de técnicas de Big Data y Machine Learning*. La Libertad. El Salvador. ITCA Editores.

Millán, F. (2016). *Diseño e implementación de un sistema de medida de gases con Arduino*. Universidad Zaragoza. España. Recuperado de <https://zaguán.unizar.es/record/59102/files/TAZ-TFG-2016-2689.pdf>

Ministerio de medio ambiente. (2016). *Guía de calidad de aire y educación ambiental*. Gobierno de Chile. Recuperado de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Guia-para-Docentes-Sobre-Calidad-del-Aire-003.pdf>

Organización Mundial de la Salud. (2018). *Calidad del aire y salud*. Recuperado de [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)

Pilozo, K. (2020). *Implementación de un sistema de monitoreo para detectar concentraciones de contaminantes atmosféricos en la Av. Guayaquil de la ciudad de Quevedo, provincia de Los Ríos*. (tesis de licenciatura). Universidad técnica estatal de Quevedo. Ecuador. Recuperado de <https://repositorio.uteg.edu.ec/bitstream/43000/6176/1/T-UTEQ-124.pdf>



Represa, N. S. (2020). *Elaboración e implementación de una propuesta metodológica para la evaluación y gestión de la calidad del aire mediante el enfoque de la ciencia de datos*. (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. España. Recuperado de [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/94380/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/94380/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Secretaria de Ambiente. (2016). *Informe de calidad del aire 2016*. Quito, Ecuador. Obtenido de <http://www.quitoambiente.gob.ec>

Troposfera. (31 de octubre de 2021). *Troposfera*. Portal temático de contaminación atmosférica. Recuperado de <https://www.troposfera.org/#>

WHO (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>