

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA



MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

**Desarrollo e implementación de una red de monitoreo
ambiental utilizando Internet de las cosas**

T E S I S

Que para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería

Presenta:

José Luis Zamora García

Dirección de tesis :

Dr. Adolfo Heriberto Ruelas Puente

Mexicali, B.C. México

Junio del 2021

Dedicatoria

A mis padres, Zamora Medina José Luis y García Rafael Victoria, por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, por haberme dado la oportunidad de tener un excelente educación en el transcurso de mi vida y sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida.

A mis hermanos Edith Fidencia, Patricia, Maricela y Marco Antonio, por siempre apoyarme en mis objetivos profesionales y representar la unidad familiar.

A mis familiares y amigos por compartir momentos difíciles y de alegría en esta etapa de mi vida profesional.

Agradecimientos

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Dr. Adolfo Heriberto Ruelas Puente.

Responsable del Programa Educativo de Ingeniero en Computación impartido en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, por su tiempo y confianza al compartir sus conocimientos, guiarme en mi formación, brindarme su amistad y permitirme pertenecer a tan prestigioso equipo de trabajo impulsándome a buscar mi desarrollo profesional .

Ing. Alberto Mexía Sánchez

Director de Redspira la red colaborativa de monitoreo de calidad del aire, por permitirme colaborar en su equipo de trabajo, brindándome su amistad, confianza y conocimientos profesionales impulsando mi desarrollo profesional.

Mtro. Iván Alejandro Martínez Zazueta

Coordinador de tecnología y estadística de Redspira, por permitirme colaborar en su equipo de trabajo, brindándome su amistad, confianza y sabiduría.

A mis sinodales

Dr. Pedro Rosales, Dr. Jorge Eduardo Ibarra y Dr. Alexis Acuña Ramírez, por su tiempo dedicado y observaciones durante la redacción de mi tesis.

Al programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI)

Por permitirme realizar mis estudios de Maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Por la beca otorgada para la realizar mis estudios de Maestría.

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Problemática y justificación	9
1.2. Antecedentes	11
1.3. Objetivo general	15
1.4. Objetivos específicos	15
1.5. Metodología	15
2. Marco Teórico	17
2.1. Clima y calidad del aire.	17
2.1.1. Introducción a la estructura y composición atmosférica	17
2.1.2. División vertical de la atmósfera.	21
2.1.3. Calidad del aire	23
2.2. Internet de las cosas	26
2.2.1. Sensores inteligentes	27
2.2.2. Redes de sensores inalámbricas	28
2.2.3. Computación en la nube.	29
2.2.4. Software de aplicación para Internet de las cosas	29
2.2.5. Áreas de Aplicación	30
2.3. Instrumentación de sensores de bajo costo	30
3. Descripción del monitor ambiental	33
3.1. Descripción de la propuesta	33
3.2. Instrumentos utilizados para diseño de hardware.	34
3.3. Especificación de requisitos	35
3.4. Especificación del proceso	36
3.5. Diagrama de actividades	36

3.5.1.	Actividades del sensor	37
3.5.2.	Actividades por parte de la plataforma WEB	37
3.6.	Especificación del modelo de dominio	38
3.7.	Especificación del modelo de información	39
3.8.	Especificación de nivel de IoT	40
3.9.	Especificación de vista funcional	41
3.10.	Especificación de vista operativa	41
4.	Integración de dispositivos y componentes	43
4.1.	Características del dispositivo	43
4.1.1.	Microcontrolador de 32 bits WROOM-ESP32	43
4.1.2.	Sensor de temperatura, humedad y presión	45
4.1.3.	Sensor de partículas PMS5003	50
4.1.4.	Módulo de tarjeta de memoria externa	52
4.1.5.	Reloj de tiempo real	54
4.1.6.	Puerto comunicación y carga	55
4.1.7.	Módulo elevador de voltaje DC	56
4.1.8.	Batería	57
4.1.9.	Batería de polímero Ion	58
4.2.	Códigos de inicialización	59
4.2.1.	BME280	59
4.2.2.	PMS5003	60
4.2.3.	PCF8523	62
4.3.	Diagramas de circuito esquemático	64
4.4.	Diseño del circuito	64
4.5.	Diseño mecánico	67
4.6.	Impresión y armado	68
5.	Proceso de validación	69
5.1.	Ubicación e instalación de sensores	69
5.1.1.	Mantenimiento preventivo	70
5.2.	Validación sensor SIMCA	70
5.2.1.	Experimentación	71
5.2.2.	Presentación de resultados	73
5.3.	Estudio coubicación a sitio	79

5.3.1.	Experimentación	79
5.3.2.	Presentación de resultados	81
5.4.	Instalación de monitores ambientales en el municipio de Mexicali BC .	86
5.4.1.	Ubicación de sensores utilizados	96
5.5.	Resultados obtenidos aplicando de modelo Índice Aire y Salud	97
5.5.1.	Enero 2020	97
5.5.2.	Febrero 2020	99
5.5.3.	Marzo 2020	101
5.5.4.	Abril 2020	103
5.5.5.	Mayo 2020	105
5.5.6.	Junio 2020	106
5.5.7.	Julio 2020	108
5.5.8.	Agosto 2020	110
5.5.9.	Septiembre 2020	112
5.5.10.	Octubre 2020	114
5.5.11.	Noviembre 2020	116
5.5.12.	Diciembre 2020	118
5.6.	Promedios Generales (PM25)	120
5.7.	Zonas más afectadas de Mexicali	121
5.7.1.	Enero 2020	121
5.7.2.	Febrero 2020	122
5.7.3.	Marzo 2020	123
5.7.4.	Abril 2020	124
5.7.5.	Mayo 2020	125
5.7.6.	Junio 2020	126
5.7.7.	Julio 2020	127
5.7.8.	Agosto 2020	128
5.7.9.	Septiembre 2020	129
5.7.10.	Octubre 2020	130
5.7.11.	Noviembre 2020	131
5.7.12.	Diciembre 2020	132
5.7.13.	Resultados	132

6. Conclusiones	134
------------------------	------------

Capítulo 1

Introducción

La contaminación ambiental se caracteriza por la presencia de sustancias o elementos en el ambiente que causan un daño a la salud y al bienestar del hombre o afectan los ecosistemas. Esto sucede cuando los contaminantes exceden ciertos límites considerados tolerables, se trata en general de fenómenos que evolucionan lentamente en el tiempo y su efecto nocivo se manifiesta por un deterioro progresivo de las condiciones ambientales **(Segob y Cenapred, 2001)**. La contaminación puede presentarse en cualquiera de los diferentes medios en el ambiente, ya sea, aire, agua o suelo, y en cada caso presenta características particulares que requieren medidas de prevención y control específicos.

La contaminación del aire se genera cuando se presentan sustancias o elementos en la atmósfera en concentraciones, tiempo y circunstancias tales que pueden afectar significativamente la salud de las personas **(INE, 2010; Lora y Miró, 1978 en Jiménez, 2001)**. De esta manera, los efectos en la salud humana dependen de factores tales como la concentración y las características del contaminante, además de la susceptibilidad del individuo expuesto y el tiempo de exposición. Ciertos contaminantes del aire han sido agrupados en la categoría de contaminantes criterio 2 y son aquellos que por sus efectos en la salud de la población han sido normados y se han establecido límites máximos permisibles para su concentración en el aire. Estos contaminantes son: el ozono (O₃), el monóxido de carbono (CO), el bióxido de azufre (SO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el plomo (Pb), las partículas suspendidas totales (PST), y las partículas suspendidas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM₁₀ y PM_{2.5}, respectivamente) **(INE, 2010)**. Como consecuencia los contaminantes criterio han sido vinculados a una amplia gama de efectos negativos a la salud, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

El ozono (O₃) puede irritar el sistema respiratorio, provocar tos, causar irritación

en la garganta y/o una sensación de opresión en el pecho.

El monóxido de Carbono (CO) puede reducir la oxigenación del organismo (hipoxia). La hipoxia causada por CO puede afectar el funcionamiento del corazón, del cerebro, de las plaquetas y del endotelio de los vasos sanguíneos.

El material particulado (PM): Las partículas mayores a 10 μm son retenidas básicamente en las vías respiratorias superiores y eliminadas en su mayor parte por el sistema de limpieza natural del tracto respiratorio, por lo que no son consideradas significativamente dañinas para la salud, sin embargo la exposición continua a altas concentraciones de este material puede causar irritación de garganta y mucosas.

Las PM10 (fracción respirable) no son retenidas en las vías respiratorias superiores, cerca de un tercio de ellas penetra hasta los pulmones. Su efecto depende de su composición química, pero pueden producir irritación de las vías respiratorias, agravar el asma y favorecer las enfermedades cardiovasculares, y se relacionan con la enfermedad de los pulmones negros en mineros, silicosis y asbestosis. En el corto plazo la contaminación por PM10 puede causar el deterioro de la función respiratoria, mientras que en el largo plazo se asocia con el desarrollo de enfermedades crónicas, el cáncer o la muerte prematura. De acuerdo con estudios realizados en México, se estima que el riesgo de morir prematuramente se incrementa en 2 % por cada incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10.

Los grupos de la población con mayor susceptibilidad a los efectos de las partículas incluyen: niños, ancianos, personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares previas, fumadores y personas que respiran por la boca. Los estudios recientes demuestran que las PM2.5 tienen la capacidad de ingresar al espacio alveolar o al torrente sanguíneo, incrementando el riesgo de padecer enfermedades crónicas cardiovasculares y muerte prematura .

El monitoreo ambiental juega un rol importante, ya que se realiza con el objetivo de medir la presencia y concentración de contaminantes en el ambiente, esto ayuda a determinar si el hábitat es apto para la salud del ser humano, por ello es usual que se monitoree la calidad del aire, temperatura y humedad en edificios, escuelas, hogares e industria, para tomar medidas preventivas o correctivas, para garantizar la salud de las personas.

En este documento se plantea el desarrollo e implementación de una red de monitoreo ambiental haciendo uso de la tecnología de la información basada en el Internet de las cosas, que sea capaz de medir variables como temperatura, humedad, presión atmosférica y calidad de aire, con el objetivo de brindar a la comunidad un monitoreo de datos en campos estratégicos para lograr obtener el estado actual de la contaminación en

Mexicali Baja California e indicar la zona con mayor concentración de contaminación.

Este proyecto nace a raíz de que Mexicali B.C es una ciudad con altos índices de contaminación, la cual incluso puede verse a simple vista como una nube que impide la visibilidad en algunas épocas del año, a pesar de esto, en la ciudad no se cuenta con un diagnóstico o un sistema que permita obtener en tiempo real el estado de salud del ambiente en las diferentes zonas de la localidad.

El proyecto consiste en realizar un estudio actual de las necesidades o variables de monitoreo ambiental, además del estado actual de la tecnología disponible para realizar una propuesta de un monitor ambiental de bajo costo que pueda replicarse para formar una red de monitoreo ambiental en diferentes puntos estratégicos de Mexicali B.C.

El desarrollo del monitor ambiental plantea realizar un análisis comparativo de los diferentes sensores a través de un estudio experimental, esto para determinar la relación entre el desempeño y costo con el fin de seleccionar el mejor de ellos.

La implementación y validación de la red se realizará instalando diez monitores ambientales en puntos estratégicos de Mexicali B.C, se capturará información durante un periodo de un año determinando la contaminación de cada zona, además se realizará un estudio experimental que consiste en realizar un comparativo entre una estación de monitoreo ambiental profesional con los sensores de bajo costo.

Con la elaboración de la red de monitoreo ambiental se espera generar una propuesta, que con la gestión de fondos en un futuro pueda ser extenderse a lo largo de la ciudad, además de generar un desarrollo tecnológico que pueda utilizarse individualmente en el interior de escuelas, edificios e industrias.

1.1. Problemática y justificación

La alta presencia y concentración de contaminantes en la ciudad es de alto riesgo para el ser vivo, algunas de las consecuencias de estar expuesto a la contaminación podrían ser alergias o enfermedades, agotamiento físico, problemas respiratorios, enfermedades de la piel e inclusive cáncer.

En la ciudad de Mexicali B.C la contaminación del aire es identificada por la mayoría de los habitantes, aunque los niveles más altos de percepción se concentran en zonas periféricas como el suroeste de la ciudad. Las afectaciones a la salud están relacionadas con diferentes niveles de exposición a la contaminación que van desde enfermedades cardiopulmonares y respiratorias, como el asma y alergias, hasta cáncer pulmonar,

donde los grupos de mayor riesgo son principalmente la población infantil y de adultos mayores. M. (2003)

Existe una norma Oficial Mexicana de establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire (OM-156-SEMARNAT-2012) establece que en todo el territorio nacional es de observancia obligatoria para los gobiernos locales, según corresponda, en aquellas zonas o centros de población que cuenten con alguna de las condiciones siguientes:

- Asentamientos humanos con más de quinientos mil habitantes
- Zonas metropolitanas
- Asentamientos humanos con emisiones superiores a veinte mil toneladas anuales de contaminantes criterio primarios a la atmósfera
- Conurbaciones
- Actividad industrial que por sus características se requiera del establecimiento de estaciones de monitoreo de calidad del aire y/o de muestreo de contaminantes atmosféricos.

Como registro se tiene que el municipio de Mexicali B.C cumple con todas las anteriores condiciones:

- Según a estimaciones realizadas por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), en 2018 se cuenta con una población de 1 millón 059 mil 896 habitantes.
- El INEGI, CONAPO y la Secretaría de Desarrollo Social han reconocido la existencia de 2 zonas metropolitanas en Baja California (ZM Tijuana y ZM Mexicali B.C).
- Se tiene en cuenta que más de cien asentamientos superan las 20000 toneladas anuales.
- Mexicali B.C y Tijuana B.C son un conjunto de poblaciones próximas entre ellas, cuyo progresivo crecimiento las ha puesto en contacto.
- Mexicali B.C cuenta con una zona industrial.

Algunas localidades cuentan con un sistema profesional para monitorear la calidad del aire, sin embargo, estos en ocasiones no son suficientes para monitorear una ciudad completa, por lo que se ha optado introducir redes que se interconectan entre ciertos puntos, sin embargo, este tipo de redes interpolan puntos con grandes distancias para estimar las condiciones ambientales de la zona, dificultando el poder determinar las áreas con mayor tráfico de contaminantes, como pudiera ser calles con circulación de automóviles o parques industriales. Aunado a lo anterior se tiene que el costo del equipo e instalación impide implementar una red con diversos nodos, lo que implica que existan huecos en la medición, es decir, si el monitor ambiental se encuentra cerca de un suceso aislado que contamina una pequeña área, este indicara que una gran parte de la ciudad está contaminada.

Mexicali B.C esta catalogada como una ciudad con altos índices de contaminación por tal motivo se propone el desarrollo e implementación de una red de monitoreo ambiental basado en el uso de Internet de las cosas, que sea capaz de medir variables como temperatura, humedad, presión atmosférica y calidad de aire, esto con el objetivo de brindar a la comunidad un monitoreo de datos en campos estratégicos para lograr obtener el estado actual de la contaminación basado en índice aire y salud.

1.2. Antecedentes

La contaminación atmosférica en las ciudades representa el riesgo ambiental para la salud más importante en el mundo, la alta presencia y concentración de contaminantes en la ciudad es de alto riesgo para el ser vivo, actualmente no se tiene un diagnóstico preciso que determine el estado actual de una zona específica y con ello lograr determinar la generación de este contaminante.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que en 2012 murieron de manera prematura 7 millones de personas en el mundo como consecuencia de la mala calidad del aire ?. Esta mortalidad se debe principalmente a la exposición a partículas menores a 10 micrómetros de diámetro (PM10) o menos. En Mexicali B.C se calculan 304 muertes prematuras por el problema de la contaminación, tenemos 537 hospitalizaciones, 25 mil 860 consultas, 25 millones de pesos el costo que se calcula por daños a la salud directos. El ex-secretario de Salud en la entidad, Guillermo Trejo Dozal (23-01-2018).

La ciudad de Mexicali B.C presenta el mayor número de enfermedades relacionadas a la contaminación del aire, la cual se duplica durante la temporada invernal.

En 1992, México y EE.UU. (Integrated Environmental Plan for the Mexican--U.S. border area--IBEP) estableció las metas para la calidad ambiental de la frontera, para 1993 se estableció el acuerdo de La Paz, e inicia formalmente la cooperación entre las autoridades ambientales mexicanas y norteamericanas.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) en Estados Unidos identifica seis "contaminantes criterio" como contaminantes preocupantes debido a sus impactos sobre la salud y el medio ambiente. Los contaminantes son: ozono (O₃), materia particulada (PM), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂) y plomo (Pb). Según la Ley de Aire Limpio, la EPA ha establecido Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS, por sus siglas en inglés) primarios y secundarios para estos seis contaminantes. La Secretaría de Salud (SSA) de México publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF), el 23 de diciembre de 1994, la Norma Oficial Mexicana respecto a la Calidad del Aire, la cual define los valores máximos permisibles de concentración de los mismos seis contaminantes criterio que establece la EPA?

En Mexicali B.C, en el periodo de 1997 a 2005, las altas concentraciones de CO se presentaron en el invierno (en los meses de noviembre, diciembre y enero), y las concentraciones más bajas en verano (entre junio y agosto). Entre 1997 y 2002, los niveles más altos de concentración de CO fueron por encima de las 20 partes por millón (ppm) (cuando la norma establece como límite permisible 11 ppm), aunque a partir del año 2000, se presentó una tendencia a la baja. En 1999 alcanzó el máximo número de días que sobrepasó la norma (78 días), mientras que en el año 2005, de las estaciones que monitorean el CO, la estación COBACH, registró las mayores concentraciones de CO ?.

En respuesta a los problemas de contaminación atmosférica en la ciudad de Mexicali B.C, diferentes instancias y niveles de gobierno instrumentaron programas y acciones como las formuladas a nivel federal en el Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en Mexicali B.C 2000–2005 (Semarnap, Gobierno del Estado de Baja California, Secretaría de Salud, Gobierno Municipal de Mexicali B.C, 1999), mejor conocido como "Proaire", estrategias que buscaban reducir las emisiones de los diferentes contaminantes que rebasaban la normatividad correspondiente.

Por otro parte la tecnología ha estado de la mano en el avance del monitoreo de los datos, principalmente la interconexión de objetos cotidianos transmitiendo sus datos a través del Internet de las cosas. El término Internet de las Cosas (IoT) fue utilizado por primera vez por Kevin Ashton en 1999 que estaba trabajando en el campo de la

tecnología RFID en red (identificación por radiofrecuencia) y tecnologías de detección emergentes.

Sin embargo, la IoT "nació" en algún momento entre 2008 y 2009, en comparación con los métodos de monitoreo tradicionales, existen varias ventajas notables al usar redes de sensores inalámbricos (WSN) para monitorear las propiedades del entorno, tales como en tiempo real, gran cantidad de datos, bajo costo, alta efectividad. Dunfan Ye et al. (2009)

En 2010, el número de objetos físicos cotidianos y dispositivos conectados a Internet fue de alrededor de 12,5 mil millones. En la actualidad hay cerca de 25 mil millones de dispositivos conectados a la IoT, más o menos un dispositivo inteligente por persona. Atzori et al. (2010)

En 2013 Tebje et al utiliza Internet de las cosas para monitoreo de las condiciones ambiental en los hogares, para monitorear las condiciones domésticas regulares a través de un sistema de detección ubicuo de bajo costo, concluyendo que la transmisión inalámbrica con tecnología zigbee es confiable para el monitoreo de datos en tiempo real. Kelly et al. (2013)

En el mismo año el la investigación de Kumar et al analiza varias técnicas de sistemas de monitoreo ambiental (EM) y lo que se requiere para las variaciones en la implementación de hardware y / o la lógica algorítmica. Concluyendo que los sistemas de monitoreo ambiental disponibles tienen limitaciones ya que la calidad del aire y los parámetros ambientales no se pueden medir simultáneamente. Por lo tanto, existe la necesidad de un sistema que pueda medir la calidad del aire y los parámetros ambientales; aunado a lo anterior el monitor ambiental debe ser eficiente en términos de energía, económico, robusto y fácil de operar. Gubbi et al. (2013)

En 2015 se desarrolla un sistema de monitoreo basado en la arquitectura ZigBee utilizando una red de sensores inalámbricos para medir las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles. Estas redes recopilan datos críticos del sistema o del entorno y muestran estos datos en un servidor de monitoreo. Por lo tanto, los supervisores pueden interpretar los datos y, si es necesario, tomar medidas inmediatas en tiempo real. Peng et al. (2015)

Para 2016 se realiza una plataforma WSN reutilizable totalmente personalizada adecuada para su uso en aplicaciones de monitoreo ambiental de IoT a largo plazo y de bajo costo. Se trata de una red de malla inalámbrica que permite entregar datos de sensores incluso si algunos nodos de sensores no pueden comunicarse directamente de forma inalámbrica con el agregador de datos , al requerir que otros nodos transmitan

los datos y los transfieran a este.

Este mismo año se desarrolla un dispositivo con la capacidad de monitorear y detectar la concentración de dióxido de carbono en tiempo real y proporcionar alertas generales de calidad del aire de manera oportuna. Lee & Lin (2016)

Mois et al. en el 2017 Analiza tres sensores inalámbricos basados en Internet de las Cosas para el monitoreo ambiental, determinando que Wi-Fi y Bluetooth de bajo consumo (BLE) son dos tecnologías adecuadas para monitorear aplicaciones que pueden competir con el ampliamente utilizado protocolo ZigBee. Recalca que el Wi-Fi consume más energía pero permite el desarrollo de soluciones con un menor costo ya que utiliza infraestructura existente. Mois et al. (2017)

En el 2017 Corbellini et al trabajo en una red de sensores basada en la nube para monitoreo ambiental, que emplea sensores pequeños operados con baterías, que se conectan a través de un enlace inalámbrico a pequeños receptores capaces de enrutar los datos al sistema de la nube. Además implementó un sistema en la nube para mostrar y descargar la información en tiempo real. El hardware se encuentra tan optimizado energéticamente que cada sensor es capaz de medir la temperatura y la humedad durante más de un año sin asistencia. Una característica que comenta es que no invade la infraestructura disponible. Corbellini et al. (2017)

En el 2018 Chao-Tung et al. realizaron la implementación de un sistema inteligente de monitoreo y gestión ambiental en la nube, en la cual combina sensores ambientales con tecnología inalámbrica Zigbee, para enviar la información a un servidor web. Yang et al. (2018)

En el 2018 Montori et al. tuvieron como objetivo implementar una arquitectura colaborativa de Internet de las cosas para ciudades inteligentes y monitoreo ambiental. En términos generales el proyecto concluye que el uso de tecnología Zigbee en conjunto con una arquitectura distribuida de big data, permite un gran almacenamiento y procesamiento de información en tiempo real e ininterrumpidos. Montori et al. (2018)

En 2019 se logró demostrar la capacidad de los dispositivos de calidad del aire (AQ) IoT para capturar variaciones espacio-temporales de contaminantes atmosféricos de partículas (PM) con el fin de aumentar la conciencia pública sobre los problemas de AQ. Para lograr la transferencia de información se utilizó tecnología LoRaWan. Johnston et al. (2019)

Este mismo año se investigó el posible uso de los datos del sensor IoT para pronosticar casi en tiempo real las concentraciones de PM 2.5 y comprender el movimiento de la pluma PM 2.5 para un sistema de alerta temprana en áreas propensas

a la neblina causadas por la quema de biomasa. Como resultado se obtuvo que es posible pronosticar en tiempo real. Kanabkaew et al. (2019)

1.3. Objetivo general

Implementar una red de monitoreo ambiental para calcular el índice de calidad del aire en Mexicali B.C.

1.4. Objetivos específicos

Como objetivos específicos se tienen los siguientes :

1. Diseñar un monitor ambiental que cuente con la capacidad de obtener variables meteorológicas y de calidad del aire.
2. Aplicar modelo para obtener los datos de las concentraciones de un determinado grupo de contaminantes.
3. Implementar una interfaz de usuario para la comunicación de los sensores y la creación de la red.
4. Aplicar un algoritmo para determinar el estado actual de contaminación en la ciudad de Mexicali B.C en base al Índice Aire y Salud.

1.5. Metodología

Para desarrollar el proyecto planteado, se siguió como base la metodología de diseño de una plataforma IoT del autor Bahga & Madisetti (2014).

Las diferentes etapas de dicha metodología a tomar se muestran en la siguiente lista:

1. Definir el propósito y la especificación de requisitos. Determinar el propósito del sistema, cuál será su comportamiento y los requisitos específicos como recopilación, análisis, privacidad y seguridad de datos.
2. Especificación del proceso. Definir el proceso a utilizarse con la ayuda de casos de uso basados en función del propósito y la especificación de requisitos.

-
3. Especificación del modelo de dominio. Describir conceptos, entidades y objetos que se utilizaran en el dominio del sistema IOT.
 4. Especificación del modelo de información. Definir la estructura de toda la información en el sistema IoT (como atributos, relaciones, etc.)
 5. Especificación de servicio. Definir las entradas / salidas, los puntos finales, los horarios, las condiciones previas y los efectos del servicio.
 6. Especificación de nivel de IoT.
 7. Especificación (Funcional) de vista funcional. Definir las funciones del sistema IoT agrupadas en varios grupos funcionales.
 8. Especificación de vista operativa. Definir las operaciones / opciones relacionadas con el desarrollo del sistema IoT.
 9. Integración de dispositivos y componentes. Integrar los dispositivos, componentes y dibujar un diagrama esquemático de este.
 10. Desarrollo de aplicaciones. Mostrar interfaz gráfica del usuario.
 11. Implementar un algoritmo para el análisis de datos.

Capítulo 2

Marco Teórico

Se denomina red de monitoreo al conjunto de dos o más estaciones de monitoreo, es común que se encuentren ubicadas a grandes distancias intentando cubrir la mayor parte geográfica de la zona.

2.1. Clima y calidad del aire.

2.1.1. Introducción a la estructura y composición atmosférica

Emisiones de contaminantes atmosféricos en la atmósfera

Durante los últimos 50 años la industria ha producido más de 60,000 nuevos compuestos químicos que se han acumulado en el medio ambiente y algunos de ellos bioacumulados en el cuerpo humano. Las emisiones de contaminantes del aire se dispersan en la atmósfera y se transportan a grandes distancias desde sus fuentes. El medio en el que se transportan los contaminantes del aire es la atmósfera, y su dinámica determina su vida útil y su impacto en el medio ambiente y los humanos. Muchos de estos compuestos químicos antropogénicos y xenobióticos han sido transportados a la biosfera y se caracterizan por ser tóxicos o potencialmente dañinos.

Los componentes químicos en forma de partículas gaseosas tienen el potencial de producir cambios en el medio ambiente e incluso en el clima de nuestro planeta. La concentración de estas especies químicas generalmente tienen menos de una parte por millón de partes de aire en volumen (1 ppm) que se denominan gases traza. Durante el siglo pasado, la concentración de ozono (O₃), óxidos de nitrógeno (NO_x), azufre y partículas orgánicas, así como dióxido de carbono (CO₂), ha aumentado

considerablemente con posibles implicaciones para el clima. A menudo asumimos que la contaminación del aire es un fenómeno moderno y que ha empeorado en los últimos tiempos. Sin embargo, desde los albores de la historia, la humanidad ha estado quemando combustibles biológicos y fósiles para producir calor. Las paredes de las cuevas, habitadas hace milenios, están cubiertas con capas de hollín y muchos de los pulmones de los cuerpos momificados del Paleolítico tienen un tono negro (**McNeill 2001**). **Zimmerman (2004)** concluyó que la exposición continua del hombre temprano a las fogatas en áreas cerradas contribuyó a aumentar la incidencia de cáncer nasal. La naturaleza de la contaminación del aire ha cambiado a lo largo de los milenios, ya no se relaciona predominantemente con el humo y el azufre, sino que ahora se asocia con óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles. El término clima está relacionado con la condición de la atmósfera durante un intervalo de tiempo prolongado (intervalo de tiempo mínimo de 30 años) y contiene datos sobre los valores promedio de la temperatura de la atmósfera, la humedad relativa, la precipitación, la capa de nubes y el viento. Sin embargo, el término clima se refiere al estado de la atmósfera en un momento y lugar específicos y está restringido a pequeños intervalos de tiempo (días a una semana) que contienen información.

La atmósfera de la Tierra

El término atmósfera se refiere a la cubierta gaseosa de la Tierra y participa del movimiento de esta. La Tierra gira alrededor de su eje con una velocidad constante y la atmósfera está girando también junto a ella, tiende a moverse hacia el espacio vacío debido al movimiento centrífugo. Esta es la razón por la cual la atmósfera sobre el ecuador es más alta en comparación con la atmósfera sobre los polos. La atmósfera es invisible, inodoro y tiene varias propiedades que favorecen la supervivencia de plantas y organismos vivos, contiene una mezcla de especies químicas gaseosas que se conocen como aire atmosférico y permanecen cerca de la superficie de la Tierra debido a la fuerza de la gravedad. El movimiento de las masas de aire dentro de la atmósfera se denomina circulación atmosférica y se debe principalmente a las diferencias de temperatura entre los trópicos y los polos, al mismo tiempo se ve afectado por la rotación de la Tierra. Se está produciendo la conversión de la radiación del Sol y de la Tierra a otras formas de energía dentro de la atmósfera (por ejemplo, calor y energía cinética). De tal manera la atmósfera puede considerarse como un medio de procesos termodinámicos y mecánicos que son responsables de varios fenómenos. Estos fenómenos que ocurren en la atmósfera

y son observados por los humanos (directos o indirectos con la ayuda de instrumentos) se conocen como fenómenos meteorológicos.

Características de la atmósfera

La masa de la atmósfera se puede calcular a pesar de que su altura no se conoce realmente. Se supone que la Tierra puede aproximarse mediante una esfera con radio $R_e = 6.371 * 10^3 M$, se sabe que su superficie es plana y tiene una presión superficial promedio de $P_0 = 1013.25 \text{ mb} = (1013.25 * 10^2 Nm^2)$ y aceleración por gravedad $g = 9.81 ms^2$. La expresión de la presión atmosférica es la siguiente:

$$P_0 = \frac{F}{S} = \frac{M_a g}{4\pi R_e^2} \Rightarrow M_a = \frac{4\pi R_e^2 P_0}{g} = \frac{4\pi (6.371 * 10^3)^2 * (1013.25 * 10^2)}{9.81}$$

$$M_a = 5.27 * 10^{18} kg$$

donde F es la fuerza aplicada, S la superficie y Ma la masa de la atmósfera. En comparación, la masa total de los océanos está cerca de $1.35 * 10^{21} kg$ y la masa total de la corteza sólida de la Tierra está cerca de $5.98 * 10^{21} kg$. Los cálculos han demostrado que el 50 % de la masa total de la atmósfera está incluida en la capa entre la superficie de la Tierra y la altura de 5,5 km, mientras que el 75 %, 95 % y 99 % de la masa está contenida hasta la altura de 10, 20 y 40 km respectivamente. La densidad del aire está cambiando inversamente proporcional a la altura. Este resultado se debe a la fuerza de gravedad que actúa sobre las moléculas de aire y las concentra cerca de la superficie de la Tierra. La densidad del aire al nivel del mar es cercana a $1.225 \frac{g}{m^3}$.

Contaminantes atmosféricos

Los contaminantes atmosféricos se definen como partículas sólidas / líquidas que están presentes en el aire. El término contaminante incluye el aire en el que están contenidas las partículas, sin embargo, en la literatura muchas veces el término contaminante se refiere sólo a las partículas que se encuentran dentro de la atmósfera. Los contaminantes surgen tanto de fuentes naturales (por ejemplo, polvo de la superficie, volcanes) como de fuentes antropogénicas (por ejemplo, emisiones vehiculares, emisiones de combustión de la industria y las casas). Los contaminantes que se emiten directamente en forma de partículas se caracterizan como contaminantes primarios, mientras que los contaminantes que se forman a partir de moléculas de vapor en el aire se denominan contaminantes secundarios. Los principales mecanismos de eliminación

de contaminantes de la atmósfera son los procesos de deposición húmeda y seca.

- La deposición en seco ocurre cuando una partícula se deposita a través de la sedimentación gravitacional en la superficie de la Tierra.
- La deposición húmeda ocurre con la fusión de partículas con gotas de agua durante la precipitación.

El tiempo de residencia de los contaminantes en la atmósfera depende de las características de emisión de partículas y condiciones climáticas y rangos entre unos días y semanas. Después de la introducción de partículas en la atmósfera, hay varios procesos fisicoquímicos (por ejemplo, nucleación, condensación, coagulación) que conducen a un cambio en su tamaño y forma. La forma de los contaminantes es muy variable y para la determinación del diámetro de una partícula usamos el término diámetro equivalente, lo cual indica que el diámetro de partícula de una partícula esférica que tiene el mismo arrastre que la partícula en estudio. Los contaminantes se separan según su tamaño en dos categorías. Las partículas finas son contaminantes con un diámetro equivalente menor a 2.5 mm, mientras que las partículas gruesas son contaminantes con un diámetro equivalente mayor a 2.5 mm. Los contaminantes finos se pueden dividir adicionalmente al modo de nucleación (diámetro entre 0.005 y 0.1 mm) y al modo de acumulación (diámetro entre 0.1 y 2.5 mm). El modo de nucleación se origina en los procesos de nucleación o la condensación de vapores y las partículas del modo de nucleación crecen a través de la coagulación y la condensación adicional. El modo de acumulación incluye partículas que resultan del modo de nucleación y las partículas en este modo tienen altos tiempos de residencia en la atmósfera debido a la baja velocidad de deposición. Las partículas gruesas se emiten principalmente como partículas primarias en la atmósfera y tienen un tiempo de residencia reducido. Los contaminantes tienen varios impactos importantes en el medio ambiente, tales como:

- Actuar como núcleos de condensación para la formación de nubes.
- Participar en reacciones químicas en la atmósfera y afectar los ecosistemas (por ejemplo, formación de agujeros de ozono en la estratosfera).
- Afecta la salud humana.
- Modifique la intensidad de radiación del Sol a través de la dispersión y absorción de la luz.
- Disminuir la visibilidad a altas concentraciones de partículas ambientales.

2.1.2. División vertical de la atmósfera.

Cambio de temperatura

La atmósfera se puede dividir en varias capas verticalmente según su perfil de temperatura. Puede dividirse en tres áreas distintas; la tropósfera, la estratósfera y la mesósfera. La tropósfera es la capa más baja de la atmósfera y generalmente hay una caída continua de la temperatura frente a la altura, también se llama atmósfera inferior. Se extiende desde la superficie hasta la altura de 12 ± 4 km según la temporada y la latitud del lugar. En particular, la altura de la tropósfera sobre la región polar se extiende hasta la altura de 7 a 8 km, mientras que, sobre la región ecuatorial, la altura es de 16 a 17 km. La tropósfera contiene el 80 % de la masa total de la atmósfera y casi toda la cantidad de vapor de agua. Por lo tanto, la tropósfera es la capa más importante para la meteorología ya que dentro de esta capa se producen todos los procesos atmosféricos y la dinámica del clima.

Cambio de parámetros meteorológicos con altura

La estructura vertical de la atmósfera tiene un cambio continuo debido a varios parámetros físicos. En meteorología, se estudian en detalle tres de los principales parámetros:

1. Temperatura del aire.
2. Densidad del aire.
3. Presión de aire.

Dado que el aire atmosférico es delgado, solo se absorben pequeñas cantidades de calor de la energía recibida del sol. Por el contrario, la superficie de la Tierra se calienta de manera más efectiva y, por lo tanto, las capas de aire que se encuentran cerca de la superficie se calientan más rápido y más eficientemente que el volumen de aire que se encuentra a una altura elevada. A medida que el aire se calienta, se vuelve más ligero y se transporta dentro de la atmósfera. Por lo tanto, el transporte de calor y masa ocurre a alturas elevadas dentro de la atmósfera. Al mismo tiempo, debido a la heterogeneidad de la superficie de la Tierra y al calentamiento desigual de la superficie de la Tierra, los movimientos del aire se desarrollan vertical y horizontalmente, lo que resulta en la mezcla de masas de aire cálido y frío y, en general, la transferencia de

calor. El aire atmosférico puede calentarse o enfriarse por causas puramente mecánicas. Estos cambios se llaman cambios potenciales de temperatura. Los cambios adiabáticos de temperatura ocurren continuamente dentro de la atmósfera. Cuando una masa de aire se mueve hacia arriba dentro de la atmósfera, se mueve a un área con menor presión y, por lo tanto, se expande y se enfría. El enfriamiento de la masa de aire es el resultado de la expansión del aire donde se usa energía térmica y se transfiere a energía cinética. En esta etapa, la masa de aire no está intercambiando calor con el aire atmosférico con el que está rodeada. Más bien, cuando se transporta la masa de aire a un área con una presión más alta (descenso de la masa de aire en la atmósfera) se comprime y contrae, lo que conduce a su calentamiento.

Inversión de temperatura

Hay momentos en que la temperatura del aire en las áreas de la tropósfera inferior aumenta con la altura en lugar de disminuir. Este fenómeno se llama inversión de temperatura. La capa dentro de la cual ocurre este fenómeno se llama capa de inversión. Esta capa se caracteriza por la altura de la base de inversión y su propia altura. Las inversiones de temperatura se pueden dividir de acuerdo con la altura a la que ocurren como:

Inversiones en superficie Este tipo de inversión se produce por el enfriamiento de la superficie de la Tierra durante el periodo de noche. La superficie de la Tierra emite radiación a la atmósfera con grandes longitudes de onda (radiación de la Tierra) y como resultado se enfría. Las moléculas de aire que están cerca de la superficie de la tierra transportan calor a través de la conducción y como resultado, las capas inferiores de aire se enfrían. Debido a la pequeña conductividad térmica del aire, el enfriamiento se observa a bajas alturas con respecto a la superficie de la Tierra. A través de este proceso, se forma una capa de temperatura de inversión con una base en la superficie y la parte superior de la Tierra que alcanza alturas generalmente de 100 a 400 m. Las condiciones climáticas ideales que favorecen la formación de inversión de superficie son el clima despejado (sin nubes) durante la noche y la baja velocidad del viento ($<3 \text{ m/s}$). Las inversiones de superficie se llaman también inversiones de radiación. Estas inversiones son más intensas durante el período de invierno ya que las noches tienen una mayor duración. La radiación solar intensa durante el día provoca la liberación de grandes cantidades de calor en la superficie de la Tierra, lo que también conduce al

calentamiento de las capas inferiores de aire. Esto da como resultado una ruptura de la capa de inversión. Durante la presencia de un campo de alta presión en la atmósfera, no se favorece una ruptura de la capa de inversión durante el día. También es posible que se forme una inversión de superficie durante el día, especialmente sobre áreas cubiertas de nieve. En estos casos, las masas de aire que están en contacto con las superficies cubiertas de nieve utilizan grandes cantidades de calor para la nieve, derritiendo. Como resultado, las capas inferiores de aire se vuelven más frías que las capas elevadas y, por lo tanto, se favorece la creación de inversiones de temperatura. Inversiones de subsidencia. Las inversiones de subsidencia se deben al movimiento descendente de las masas de aire frío desde la atmósfera superior hasta la superficie de la Tierra. En este movimiento descendente, el aire se comprime y se calienta adiabáticamente con un consensuado disminuyendo constantemente la humedad relativa. Después del descenso de la masa de aire, su capa superior es más cálida que la parte inferior. Con el mecanismo anterior se forma una inversión de temperatura elevada que se llama inversión de subsidencia y tiene una estructura similar con la inversión de superficie. Al contrario de las inversiones de superficie que duran unas pocas horas, las inversiones de subsidencia duran unos días o incluso más. Por esta razón, las inversiones de subsidencia están relacionadas con episodios de contaminación del aire.

Inversiones frontales Las inversiones frontales se forman cuando, a una altura específica en la tropósfera más baja, se produce un transporte de masas de aire caliente que anulan una capa de aire frío que se extiende hasta la superficie de la Tierra. Una de las inversiones frecuentes de este tipo son las inversiones frontales que ocurren en los frentes climáticos. Estas inversiones se producen debido al transporte horizontal de aire caliente por encima de una capa de aire más frío (frente cálido) y también debido al transporte de aire frío debajo de una capa caliente (frente frío). Las inversiones frontales tienen implicaciones para la contaminación del aire en el caso de frentes cálidos, ya que los frentes cálidos se mueven lentamente y tienen un pequeño gradiente de su área frontal con la superficie de la Tierra, lo que no permite el transporte vertical de contaminantes.

2.1.3. Calidad del aire

La medición de la calidad del aire en diferentes unidades (partículas por millón, miligramos/metro cúbico) se ha traducido en índices o indicadores que expresan, de manera sencilla y accesible, la relación entre los niveles del contaminante criterio y de

los efectos que puede tener en la salud. En México se utiliza el Índice Metropolitano de Calidad del Aire (Imeca) y se calcula a partir de los valores máximos permisibles que señalan las normas para cada contaminante criterio. El valor máximo permisible establecido en la norma equivale a 100 puntos en el Imeca, por lo tanto, si el valor del Imeca es menor a 100 significa que la calidad del aire es buena y no afecta la salud de la población. El cálculo del Imeca puede proveer una manera sencilla para proporcionar información estandarizada sobre la calidad del aire a la población, así como observar el comportamiento de los distintos contaminantes y comparar la calidad del aire entre zonas que utilicen índices similares.

Criterios de comunicación de la calidad del aire.

El método para calcular las concentraciones de acuerdo con NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud, indica que se basará en las concentraciones promedio por hora informadas por las estaciones de monitoreo, teniendo en cuenta las cifras decimales significativas y en mg / m³ como unidad de medida para PM_{2.5} y PM₁₀ contaminantes. Además, para el cálculo del índice AIRE Y SALUD, la concentración promedio móvil ponderada de 12 horas se basará en este método de cálculo conocido en los Estados Unidos como NowCast, que es utilizado por la Agencia de Protección Ambiental del país en el cálculo y comunicación del Índice de Calidad del Aire (AQI) en tiempo real para estos contaminantes, lo que permite a la población tomar medidas oportunas para reducir su exposición y proteger su salud.

Concentración promedio móvil ponderada de 12 horas.

Para su cálculo se requerirán los promedios horarios de al menos dos de las tres horas más recientes de las 12 involucradas en el cálculo. El cálculo de la concentración promedio móvil ponderado de 12 horas se obtiene aplicando las siguientes dos fórmulas:

Nota: Para aplicar esta metodología de calculo es necesario que se de cumplimiento a las siguientes dos condiciones:

1. Contar con datos para al menos dos de las tres horas mas recientes de medición. Si esta condición no se cumple no se debe efectuar el cálculo del subíndice correspondiente para esa hora.

$$\hat{C} = \frac{\sum_{i=1}^N C_i W^{i-1}}{\sum_{i=1}^N W^{i-1}}$$

Donde

$$W = \left\{ \begin{array}{l} w \text{ si } w > 0.5 \\ 0.5 \text{ si } w \leq 0.5 \end{array} \right. \text{ y } w = 1 - \frac{C_{max} - C_{min}}{C_{max}}$$

$$\hat{C} = \frac{\sum_{i=1}^{12} (C_i W^{i-1})_i}{\sum_{i=1}^{12} (W^{i-1})}$$

C = Concentración promedio móvil ponderada.

$N = 12$

$\sum$ = Sumatoria de datos.

C_i = Concentración promedio horaria de la hora i

i = Hora consecutiva de medición (la hora más reciente de medición es la hora 1 y la primera hora de medición en el conjunto de datos considerados en el cálculo sería la hora 12)

W = Factor de ponderación.

w = Valor del peso.

C_{max} = Concentración promedio horaria máxima en el periodo de 12 horas.

C_{min} = Concentración promedio horaria mínima en el periodo de 12 horas.

Figura 2.1.1: Concentración ponderada móvil para 12 horas según NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud.

-
2. El valor de i (hora consecutiva de medición) debe mantenerse aun en situaciones en las que haya horas en las que no se cuente con concentraciones medidas. Esto es por ejemplo, si de las tres horas mas recientes de medición solo contamos con registros de concentración para la hora 1 y 3, la ponderación de la concentración de la hora 1 deberá ser $C1W0$ y la de la hora tres $C3W2$ y no $C2W1$. Esto es, a la medición de la hora tres le corresponde $i=3$, no $i=2$.

Las bandas de calidad del aire y riesgo que componen el Índice AIRE Y SALUD se construirán considerando los intervalos de concentración señalado en la tabla de la presente Norma Oficial Mexicana, según el contaminante criterio PM2.5.

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM2.5 promedio móvil ponderado de 12 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Buena	Bajo	25
Aceptable	Moderado	>25 y 45
Mala	Alto	>45 y 79
Muy Mala	Muy Alto	>79 y 147
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	>147

Figura 2.1.2: Obtención del Índice AIRE Y SALUD para PM2.5

En la figura 2.1.2 indica que si el cálculo generado es menor a 25 la calidad de aire es buena y su nivel de riesgo es bajo, si se encuentra entre 25 a 45 es aceptable y el nivel de riesgo es moderado, si supera los 45 y es menor a 79 se encuentra en una calidad del aire mala con un nivel de riesgo malo, si supera los 79 y es menor a 147 la calidad del aire es muy mala y tiene un riesgo muy alto, finalmente si supera los 147 la calidad el aire es extremadamente mala y tiene un riesgo extremadamente alto. Por otra parte se plantea difundir a la población estos datos en tiempo real utilizando la nueva tendencia de tecnología llamada Internet de las cosas.

2.2. Internet de las cosas

Muchas organizaciones han dado definiciones sobre el Internet de las cosas, la “IEEE IoT Initiative” proporciona dos definiciones basadas en las complejidades de este sistema, la definición para sistemas de baja complejidad es “Un IoT es

una red que conecta cosas identificables de forma única a Internet”, las "cosas" tienen capacidades de detección / actuación y potencial programabilidad. Mediante la explotación de una identificación y detección únicas, se puede recopilar información sobre la "cosa" y se puede cambiar el estado de la "cosa" desde cualquier lugar, en cualquier momento, por cualquier cosa ". Para sistemas de gran complejidad, la definición dada por IEEE IoT Initiative es la siguiente: “Internet de las cosas visualiza una red compleja, autoadaptable y compleja que interconecta “cosas” a Internet mediante el uso de protocolos de comunicación estándar. Las cosas interconectadas tienen representación física o virtual en el mundo digital, capacidad de detección / actuación, una característica de programabilidad y son identificables de forma única. La representación contiene información que incluye la identidad de la cosa, el estado, la ubicación o cualquier otra información comercial, social o privada relevante. Las cosas ofrecen servicios, con o sin intervención humana, a través de la explotación de identificación única, captura de datos y comunicación, y capacidad de actuación. El servicio se explota mediante el uso de interfaces inteligentes y está disponible en cualquier lugar, en cualquier momento y para cualquier cosa que tenga en cuenta la seguridad" . Ambas definiciones han implicado que IoT tiene cuatro fundamentos: detección, actuación, computación y comunicación.

Se puede definir como una arquitectura emergente basada en la Internet global que facilita el intercambio de bienes y servicios entre redes de la cadena de suministro y que tiene un impacto importante en la seguridad y privacidad de los actores involucrados.

El Internet de las Cosas puede aplicarse a varios ámbitos pues la cantidad de usos que pueda darse a los productos y servicios depende de la creatividad e ingenio de los desarrolladores. La factibilidad de implementar hoy en día los ejemplos a ser mencionados a continuación en las distintas áreas puede ser mayor o menor pero todos ellos constituyen formas en las que eventualmente se puede usar esta plataforma.

2.2.1. Sensores inteligentes

Según el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, un sensor es un transductor que convierte un parámetro físico, biológico o químico en una señal eléctrica y puede devolver datos digitales. Los sensores comunes son sensores de temperatura, sensores de humedad y sensores de gas.

Puede parecer que el término sensores inteligentes se creó junto con IoT, sin embargo en 1997 la IEEE declaró una definición para transductores inteligentes, esto en su

Estándar IEEE 1451. Un transductor incluye sensores y actuadores, para que sea inteligente (en el sentido de IoT) se requiere que cuente con un dispositivo de memoria, en el cual se almacena una hoja de datos electrónicos del transductor (TEDS) que contiene la identificación del transductor, su calibración, los datos de corrección y la información relacionada con el fabricante, esto con el objetivo de permitir el acceso a los datos del transductor desde redes de computadoras con cable o inalámbricas. La aparición de IoT y el progreso en la potencia informática del microprocesador ha permitido a la industria construir sensores inteligentes mediante la fusión de funciones de detección y procesamiento de señales. Un sensor inteligente IoT es la integración de la informática local que transforma un sensor ordinario en un sensor inteligente, la informática local permite que el acondicionamiento de señales, el procesamiento de datos y la interpretación y la toma de decisiones ocurren localmente. Esto conduce a la inteligencia en el dispositivo y a una mayor eficiencia energética debido al tráfico de red reducido. Lee (2000)

Microprocesadores para Internet de las cosas

El alcance principal de una hoja de IoT es el de detectar, recopilar, almacenar, procesar y transmitir información para y desde un sistema físico, esta acción debe habilitarse en un chip pequeño, con conexión de entrada y salida limitada, utilizando un ancho de banda y utilizando un presupuesto de energía muy limitado. Como consecuencia, se debe realizar una primera etapa de procesamiento localmente. Este procesamiento local puede incluir monitoreo de entrada, clasificación, detección de patrones y cifrado de datos recopilados. En las redes de sensores inalámbricos, la energía de los nodos se consume principalmente a través de la comunicación, por lo que elegir un chip de comunicación con bajo consumo de energía y alto rendimiento fue crucial para prolongar la vida útil de los nodos. La optimización de la implementación es un desafío importante en el diseño de WSN, el problema consiste en determinar las posiciones óptimas de los sensores y sumideros para cubrir el entorno y garantizar la conectividad de la red mientras se optimiza una función objetivo como el costo de implementación o la vida útil de la red. Zhu et al. (2012)

2.2.2. Redes de sensores inalámbricas

Las redes de sensores inalámbricas consisten en dispositivos autónomos equipados con sensores distribuidos espacialmente para controlar las condiciones físicas o

ambientales y pueden cooperar con los sistemas RFID para rastrear mejor el estado de cosas tales como su ubicación, temperatura y movimientos. Atzori et al. (2010) Una red de sensores inalámbrica permite diferentes topologías de red y comunicación multihop. Los recientes avances tecnológicos en circuitos integrados de baja potencia y comunicaciones inalámbricas han hecho que estén disponibles dispositivos en miniatura de bajo consumo, eficientes y de bajo costo para su uso en aplicaciones WSN Gubbi et al. (2012). WSN se ha utilizado principalmente en la logística de la cadena de frío que emplea métodos de envasado térmico y refrigerado para transportar productos sensibles a la temperatura (Hsueh & Chang, 2010; White & Cheong, 2012). WSN también se utilizan para mantenimiento y sistemas de seguimiento. Por ejemplo, General Electric (GE) despliega sensores en sus motores a reacción, turbinas y parques eólicos. Al analizar datos en tiempo real, GE ahorra tiempo y dinero asociado con el mantenimiento preventivo.

2.2.3. Computación en la nube.

La computación en la nube es un modelo para el acceso bajo demanda a un conjunto compartido de recursos configurables (por ejemplo, computadoras, redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones, servicios, software) que pueden aprovisionarse como Infraestructura como Servicio (IaaS) o Software como un Servicio (SaaS). Uno de los resultados más importantes del IoT es una enorme cantidad de datos generados a partir de dispositivos conectados a Internet Gubbi et al. (2012). Muchas aplicaciones de IoT requieren un almacenamiento masivo de datos, una gran velocidad de procesamiento para permitir la toma de decisiones en tiempo real y redes de banda ancha de alta velocidad para transmitir datos, audio o video. La computación en la nube proporciona una solución de back-end ideal para manejar grandes flujos de datos y procesarlos para la cantidad sin precedentes de dispositivos IoT y humanos en tiempo real.

2.2.4. Software de aplicación para Internet de las cosas

El Internet de las cosas facilita el desarrollo de una miríada de aplicaciones orientadas a la industria y específicas del usuario, mientras que los dispositivos y las redes proporcionan conectividad física, las aplicaciones Iot permiten las interacciones dispositivo-dispositivo y de persona a dispositivo de una manera confiable y robusta. Las aplicaciones de IoT en los dispositivos deben garantizar que los datos / mensajes

se han recibido y han actuado correctamente en el momento oportuno.

2.2.5. Áreas de Aplicación

El Internet de las cosas puede aplicarse a varios ámbitos pues la cantidad de usos que pueda darse a los productos y servicios depende de la creatividad e ingenio de los desarrolladores. La factibilidad de implementar hoy en día los ejemplos a ser mencionados a continuación en las distintas áreas puede ser mayor o menor pero todos ellos constituyen formas en las que eventualmente se puede usar esta plataforma. Los sistemas de monitoreo y control recopilan datos sobre el rendimiento del equipo, el uso de energía y las condiciones ambientales, y permiten a los gerentes y controladores automatizados rastrear constantemente el rendimiento en tiempo real en cualquier lugar, en cualquier momento. Las tecnologías avanzadas de monitoreo y control, como la red inteligente y la medición inteligente, revelan patrones operativos, detectan áreas de mejora potencial o predicen resultados futuros y optimizan las operaciones, lo que reduce los costos y aumenta la productividad.

2.3. Instrumentación de sensores de bajo costo

Los sensores de bajo costo hacen posible que los ciudadanos recopilen datos sobre la calidad del aire en sus propias comunidades, pero aún requieren instrucciones para obtener resultados óptimos. Si bien los sensores de bajo costo pueden medir muchos de los mismos contaminantes del aire que miden los monitores reguladores más costosos, no están obligados a cumplir con los mismos estándares rigurosos de precisión y confiabilidad. Comprender cómo colocar sensores de bajo costo con monitores reguladores y comparar sus resultados asegura que los datos de los monitores de bajo costo estén a la par con los estándares federales. Idealmente los sensores y monitores de referencia deben estar a menos de 10 metros (30 pies) uno del otro, y las entradas (donde el aire ingresa al sensor / monitor) deben estar aproximadamente a la misma altura, el movimiento del aire del alrededor del sensor no debe ser bloqueado u obstaculizado por ninguna otra estructura o dispositivo.

De acuerdo con los principios de medición de la calidad del aire del Instituto Nacional de Ecología, la medición de contaminantes del aire se puede lograr a través de varios métodos que se agrupan de acuerdo con sus principios de medición en:

1. Muestreo pasivo.

-
2. Muestreo con Bioindicadores.
 3. Muestreo activo.
 4. Método automático.
 5. Método óptico de percepción remota.

Muestreo pasivo.

Este método de muestreo colecta un contaminante específico por medio de su adsorción y/o absorción en un sustrato químico seleccionado. Después de su exposición por un periodo adecuado de muestreo, que puede variar desde una hora hasta meses o inclusive un año, la muestra se regresa al laboratorio donde se realiza la desorción del contaminante para ser analizado cuantitativamente. Los equipos utilizados se conocen como muestreadores pasivos que se presentan en diversas formas y tamaños, principalmente en forma de tubos o discos.

Ventajas: Simplicidad en la operación y bajo costo (no requiere energía eléctrica).

Desventajas: No desarrollados para todos los contaminantes, sólo proporcionan valores promedios con resoluciones típicas semanales o mensuales; no tienen gran exactitud (sirven solo como valor referencial), en general requieren de análisis de laboratorio.

Muestreo con bioindicadores.

Este método implica el uso de especies vivas generalmente vegetales, como árboles y plantas, donde su superficie funge como receptora de contaminantes. Sin embargo, a pesar de que se han desarrollado guías sobre estas metodologías, todavía quedan problemas no resueltos en cuanto a la estandarización y armonización de estas técnicas.

Ventajas: Muy bajo costo, útiles para identificar la presencia y efectos de algunos contaminantes. Desventajas: Problemas con la estandarización de las metodologías y procedimientos algunos requieren análisis de laboratorio.

Muestreo activo.

Requiere de energía eléctrica para succionar el aire a muestrear a través de un medio de colección físico o químico. El volumen adicional de aire muestreado incrementa la sensibilidad, por lo que pueden obtenerse mediciones diarias promedio.

Los muestreadores activos se clasifican en burbujeadores (gases) e impactadores (partículas); dentro de estos últimos, el más utilizado actualmente es el muestreador de alto volumen “HighVol” (para PST, PM10 y PM2.5).

Ventajas: Fácil de operar, muy confiables y costo relativamente bajo (requieren energía eléctrica).

Desventajas: No se aprecian los valores mínimos y máximos durante el día, sólo promedios generalmente de 24 horas; requieren de análisis de laboratorio.

Método automático.

Estos métodos son los mejores en términos de la alta resolución de sus mediciones, permitiendo llevar a cabo mediciones de forma continua para concentraciones horarias y menores. El espectro de contaminantes que se pueden determinar van desde los contaminantes criterio (PM10-PM2.5, CO, SO2, NO2, O3) hasta tóxicos en el aire como mercurio y algunos compuestos orgánicos volátiles. Los equipos disponibles se clasifican en: analizadores automáticos y monitores de partículas. Los analizadores automáticos se usan para determinar la concentración de gases contaminantes en el aire, basándose en las propiedades físicas y/o químicas de los mismos. Los monitores de partículas se utilizan para determinar la concentración de partículas suspendidas principalmente PM10 y PM2.5.

Ventajas: Valores en tiempo real, alta resolución; concentraciones máximas y mínimas; permite por la detección de valores máximos en tiempo real establecer situaciones de alerta para implantar las respectivas medidas de contingencia.

Desventajas: Costo elevado de adquisición y operación; requieren personal capacitado para su manejo; requieren mantenimiento y calibración constantes.

Método óptico de percepción remota.

Los métodos ópticos de percepción remota: se basan en técnicas espectroscópicas. Transmiten un haz de luz de una cierta longitud de onda a la atmósfera y miden la energía absorbida. Con ellos es posible hacer mediciones, en tiempo real, de la concentración de diversos contaminantes. A diferencia de los monitores automáticos, que proporcionan mediciones de un contaminante en un punto determinado en el espacio, pueden proporcionar mediciones integradas de multicomponentes a lo largo de una trayectoria específica en la atmósfera (normalmente mayor a 100 m). Los equipos utilizados se conocen como sensores remotos.

Capítulo 3

Descripción del monitor ambiental

Se determinó crear una red de monitoreo ambiental, para su desarrollo se definió que el diseño del dispositivo sea pequeño y de una forma fácil de instalar. Para lograr este objetivo se realiza la propuesta de utilizar un microcontrolador el cual permitirá realizar las siguientes actividades: conexión a Internet, lecturas de los datos obtenidos por los sensores y lograr obtener un registro en una base de datos. Una vez finalizado lo siguiente es realizar la conexión a una plataforma WEB para la representación de los datos.

3.1. Descripción de la propuesta

En el desarrollo del sensor inteligente de monitoreo calidad del aire (SIMCA), se plantea utilizar el esquema presentado en la figura 3.1.1, el cual señala la forma del manejo de los datos. Este inicia con la etapa de muestreo de aire ambiente, la cual está relacionada con la instalación y configuración de los equipos de medición (sensores), estos se desplegarán representativamente en el área de estudio. Los sensores miden material particulado (PM2.5 y PM10) mediante el método de dispersión láser (lector PMS5003), además de parámetros atmosféricos, tales como temperatura, humedad relativa y presión barométrica (mediante el chip BME280). Una vez instalados, los sensores registrarán en un datalogger interno (memoria SD) las lecturas minutales de los parámetros especificados, y las transmitirá al servidor central a través de una conexión WiFi a Internet. Una vez recibidos, las lecturas se almacenarán en crudo en una base de datos, y posteriormente se procesarán aplicando las reglas de verificación, validación y limpieza de datos. Hecho lo anterior, se procesará la información validada y se generarán

indicadores de Índice AIRE y SALUD para transmitir la información a los usuarios.

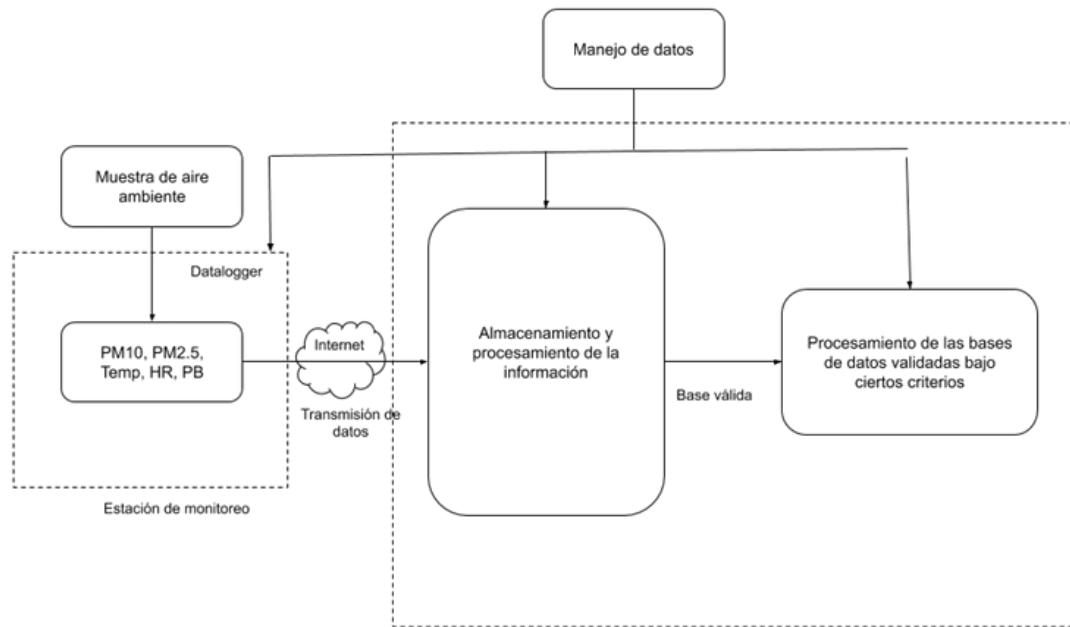


Figura 3.1.1: Definición de propuesta para el manejo de datos de sensor SIMCA

3.2. Instrumentos utilizados para diseño de hardware.

En el desarrollo del diseño propuesto requiere la utilización de componentes, mismos que fueron seleccionados mediante las necesidades requeridas. En la selección de estos instrumentos se tomaron en cuenta las posibilidades de los factores que pueden cambiar su rendimiento a la hora de estar en ejecución, por tal motivo se estableció utilizar instrumentación con una alta comprensibilidad de validez y efectividad para lograr tener un buen rendimiento. Se explicará el funcionamiento de cada uno de los componentes utilizados, incluyendo sus especificaciones técnicas, ambientales y sus restricciones.

3.3. Especificación de requisitos

El sistema de monitoreo tiene como propósito medir la calidad del aire, a través de una red de sensores de bajo costo. El prototipo considera el monitoreo de la concentración de contaminantes (PM2.5 y PM10) y a su vez variables meteorológicas (humedad, temperatura y presión atmosférica) en tiempo real, para determinar indicadores de diagnóstico y recomendaciones respecto a la contaminación de Mexicali, B.C. México. De acuerdo al instituto nacional de ecología y cambio climático (INECC) y los protocolos definidos de muestreo, todas las mediciones de calidad del aire realizadas deben ser transmitidas al centro de cómputo de manera automática y sin interferencia del personal operativo o de mantenimiento, en un periodo no mayor a 15 minutos cada hora. De preferencia, la transmisión de datos horarios debe ser instantánea, simultánea en todas las estaciones en la red automática y total. Con base en las necesidades y comportamiento de los sistemas de monitoreo ambiental, se requiere del registro y visualización de las variables obtenidas por los sensores, además de variables calculadas como el índice de aire y salud. Esto se debe realizar en tiempo real mediante una plataforma Web. Para administrar la red de monitoreo, se realizó un registro en una base de datos utilizando la dirección MAC como identificador del sensor, esto con la finalidad de mostrar en el mapa su ubicación y los datos que proporciona cada sensor en tiempo real. Además los sensores cuentan con una tarjeta de memoria integrada para registrar las lecturas con la hora actual. Una vez obtenido el registro total de las lecturas, se calcularon los promedios de las mismas para determinar la zona con el mayor índice de contaminación en la ciudad de Mexicali B.C. Como requisito de implementación de un sensor, se requiere contar con energía eléctrica y acceso a Internet mediante WiFi. Contando con esta infraestructura lo siguiente es que el usuario acceda mediante una computadora o dispositivo móvil a la configuración del sensor y lo conecte a la red WiFi. Una vez conectado a la red el sensor actúa de forma remota sin la intervención manual. Como parte de la seguridad de la información, el sensor no debe permitir la intromisión de usuarios externos que puedan sustraer o alterar en los datos obtenidos por éste. Por tal motivo, el usuario solamente podrá conectarse al sensor para brindar conexión a Internet. Para realizar esta conexión, el monitor creará un punto de acceso donde se mostrarán los últimos 5 caracteres de la dirección MAC. Como requisito para configurar el sensor, el usuario tendrá que ingresar la dirección MAC completa del mismo, la cual funcionará como mecanismo de verificación del acceso físico al dispositivo. En caso de tener la pérdida de corriente eléctrica, el hardware sensor estará diseñado para la

utilización de dos baterías. La primera permitirá mantenerlo sincronizado con la hora actual y la segunda alimentará completamente al circuito.

3.4. Especificación del proceso

En el proceso se utilizaron diagramas para describir el comportamiento del sensor, la figura 3.4.1 muestra sus estados de ejecución, los cuales cumplen con los siguientes estados:

- **Conectando a red:** Al encender el sensor, intenta conectarse automáticamente a la red WiFi almacenada en la memoria EEPROM, si no se cuenta con una red registrada se agregará una nueva. Una vez conectado a la red WiFi, se cambiará de estado.
- **Sensando:** Cada segundo se obtiene una lectura de las variables y al cumplir el minuto se envía el promedio generado por estas.
- **Conectar con API-REST Plataforma:** Para el envío de los datos hacia la plataforma, se genera un JSON y se envía a través del servicio API-REST.
- **Registrando en SD:** Cuando el dispositivo no cuenta con acceso a Internet, el promedio generado cada minuto se registrará en la memoria SD.



Figura 3.4.1: Diagrama de estados

3.5. Diagrama de actividades

A continuación se muestran las actividades a realizar por el sensor y la plataforma web.

3.5.1. Actividades del sensor

Actividad 1 - “Conectar a Red”

Una vez que el dispositivo está encendido lo siguiente es emparejarlo a una red de WiFi. El sensor crea un punto de acceso que solicita parámetros, nombre y clave de la red a utilizar, si la conexión es correcta, se inicializa la actividad 2, de lo contrario permanecerá en la actividad 1.

Actividad 2 - “Sensar”

El empezar a calcular las variables sirve para obtener el cálculo de las variables meteorológicas y concentraciones de los contaminantes que se encuentran en el ambiente. Una vez que se tienen listos estos valores, lo siguiente es confirmar que se tiene acceso a Internet. Si no se cuenta con acceso a Internet la siguiente actividad a ejecutar es la 3, de lo contrario sería la 4.

Actividad 3 - “Registrar en SD”

Los valores obtenidos son registrados en la tarjeta de memoria con fecha y hora actual, con la finalidad de evitar la pérdida de datos. Una vez que se recupera el acceso a Internet los datos registrados en la SD son enviados a API-REST de la plataforma.

Actividad 4 - “Conectar con API-REST”

Lo siguiente es realizar la comunicación del sensor hacia el API-REST de la plataforma web, y así enviar el/los registro(s) de las lecturas a la base de datos.

3.5.2. Actividades por parte de la plataforma WEB

Actividad 1 - “Consultar registros sensor”.

La función principal de la plataforma es registrar las lecturas del sensor. Si uno o más sensores cumplen con un porcentaje mayor del 70 % de registros, en las últimas 8 horas, se ejecuta la actividad 2.

Actividad 2 - “Mostrar Índice AIRE Y SALUD”.

Se requiere mostrar el valor de la calidad del aire por tal motivo se implementará el modelo Índice AIRE Y SALUD, el cual relaciona la concentración de cada contaminante criterio con una categoría de calidad del aire, asignando un nivel de riesgo y las recomendaciones para la protección de los grupos sensibles y la población en general.

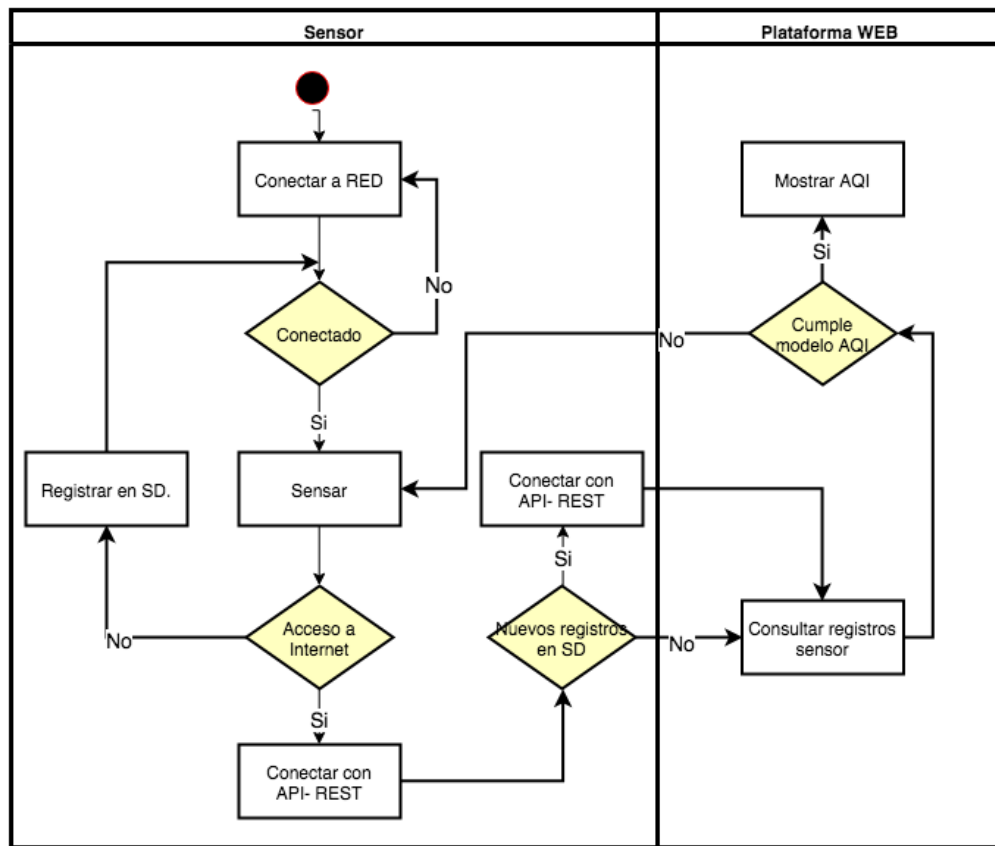


Figura 3.5.1: Diagrama de actividades de sensor y plataforma WEB

En la figura 3.5.1 se observa la representación gráfica de las actividades del sensor y la plataforma WEB.

3.6. Especificación del modelo de dominio

El sensor propuesto cuenta con objetos que son físicos y se representan virtualmente. Se utilizaron tres entidades físicas: PMS que es un contador de partículas láser y virtualmente se representa como “data_pms”; Adafruit_BME280 se representa como “bme”, el cual sirve para llamar la función para leer temperatura, humedad y presión; por último RTC_PCF8523, que crea un objeto “rtc”, con la finalidad de mantener la hora del sensor sincronizada.

La entidad virtual es la representación de la entidad física en el mundo digital. Para la entidad virtual el sensor se representó como un punto localizado en el mapa implementado y permite ver al usuario lo datos generados en base a la entidad física.

3.7. Especificación del modelo de información

Diagrama de clases.

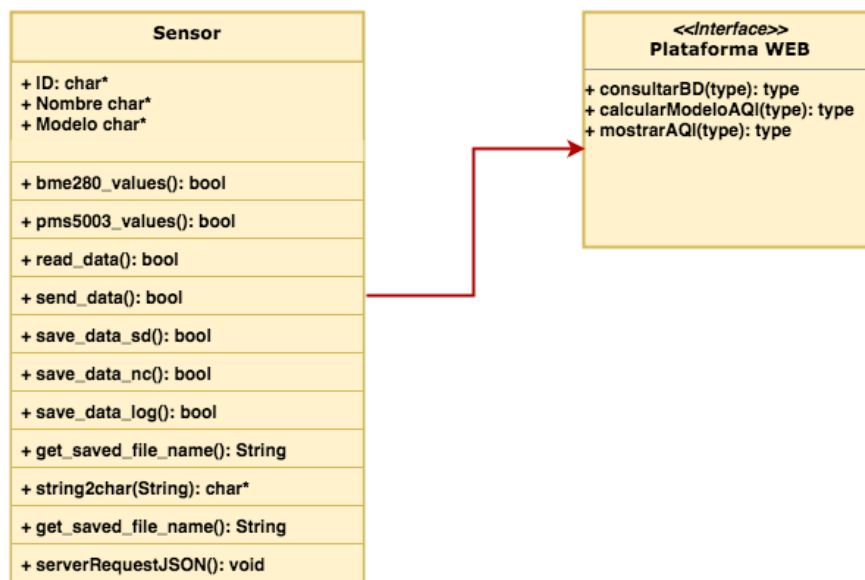


Figura 3.7.1: Diagrama de clases

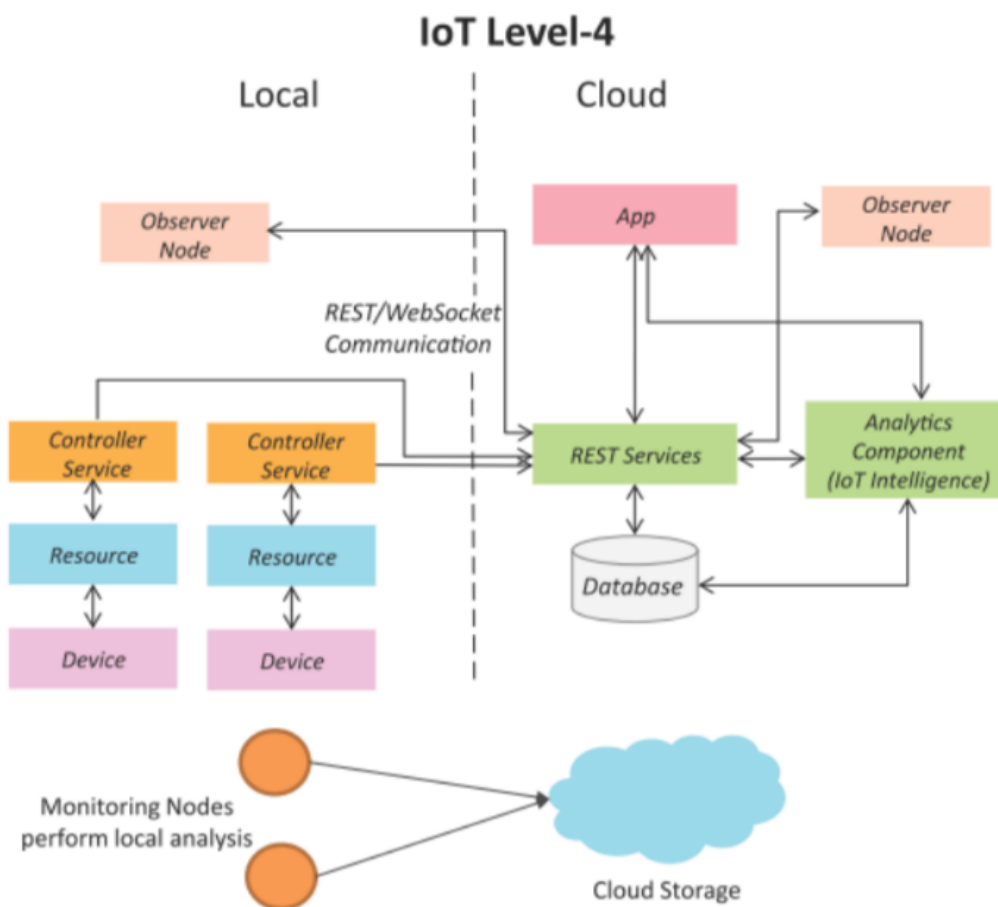
Como se observa en la figura3.7.1, el diagrama se representa mediante las clases “Sensor” y “Plataforma WEB”.

La clase “**Sensor**” cuenta con tres atributos del tipo de dato char*, los cuales se declararon con los nombres ID, Nombre y Modelo, su función principal es identificar los sensores. En el siguiente segmento se muestran las funciones declaradas para obtener lecturas de los contaminantes y variables meteorológicas, generar el registro de datos en la tarjeta de memoria, crear un JSON y finalmente el envío de datos del sensor hacia la segunda clase llamada Plataforma WEB.

La clase “**Plataforma WEB**” es una interfaz utilizada para ejecutar 3 funciones: la primer función cumple con realizar la conexión hacia la base de datos, obtener el registro generado por el sensor y finalmente enviarlo a una base de datos; la siguiente función es calcular el modelo de índice aire y salud, y finalmente la tercera función cumple con representar los valores de manera gráfica .

3.8. Especificación de nivel de IoT

Se requiere de una arquitectura que dé solución a la utilización de múltiples nodos, un gran volumen de datos y requisitos de análisis computacionalmente intensivos. Por tal motivo se tomó la decisión de utilizar una de nivel 4, la figura 3.8.1 muestra que es en función de múltiples nodos independientes que realizan la detección y/o actuación de los datos para el envío hacia la nube.



Bahga & Madiseti, © 2015

Figura 3.8.1: Estructura IOT nivel 4 de Bahga & Madise

3.9. Especificación de vista funcional

Como se observa en la figura 3.8.1, las funciones del sistema IoT se clasifican en dos grupos.

El primero es el grupo local, simboliza el funcionamiento de los sensores, los cuales son representados como nodos. Mediante los servicios establecidos los sensores obtienen los recursos necesarios para generar un registro, el cual es enviado desde un microcontrolador hacia el servicio REST que se encuentra en la nube. El segundo grupo es conocido como “la nube” y tiene como principal función recibir la información emitida por el nodo y enviar ese registro a la base de datos. Desde la aplicación se accede a los registros de base de datos para calcular la concentración del contaminante en base al algoritmo índice y calidad de aire.

Una vez hecho el registro se utiliza nuevamente el servicio REST para desplegar los valores de concentración en el Nodo Observador, consistente en un mapa y gráficas interactivas incrustadas en una plataforma web.

3.10. Especificación de vista operativa

El modelo incluirá una plataforma informática que reciba en tiempo real las lecturas de los dispositivos vía servicios HTTP. Esta plataforma está desarrollada por Redspira, la cual brinda la opción de poder agregar sensores a su red y permite observar los valores registrados ya sea en tiempo real o periódicamente.

Para garantizar la integridad de los datos durante la recopilación y el análisis, su manejo se realizará de conformidad con lo siguiente:

Una base de datos local se almacenará en el dispositivo (en una memoria SD) y se sincronizará cada minuto con la base de datos central. En caso de perderse la conexión, se guardarán los datos no enviados y se sincronizará cuando se recupere el acceso a Internet.

El software que se utilizó para el desarrollo de la plataforma es el siguiente:

Sistema manejador de base de datos: PostgreSQL 12.0 con extensión espacial PostGIS 2.5.

Servicios web: Apache Tomcat 8.0. y Java SDK.

Aplicación web: Apache HTTP Web Server y PHP 7.0.

Scripts de procesamiento de datos: Python 2.7

Comunicación

- API de comunicación: REST API
- Protocolos de comunicación :
- Capa de enlace: 802.11
- N / w: IPV4
- Transporte: TCP
- Aplicación: HTTP

Administración

- Gestión de dispositivos: administración de dispositivo Arduino.
- Gestión de aplicaciones: administración de aplicaciones PHP.
- Gestión de bases de datos: Se utiliza PostgreSQL, es un sistema de gestión de bases de datos relacional orientado a objetos y de código abierto.

En términos de seguridad, el servidor contará con el sistema de monitorización de redes Zabbix, mediante el cual, el coordinador de infraestructura podrá monitorear los servicios de red y el rendimiento del hardware.

Se realizará un respaldo de seguridad de la base de datos cada día y del conjunto del servidor cada semana.

Capítulo 4

Integración de dispositivos y componentes

4.1. Características del dispositivo

Para el desarrollo del diseño propuesto se requiere la utilización de instrumentos, mismos que fueron seleccionados mediante las necesidades requeridas. Se tomaron en cuenta los posibles factores que pueden cambiar su rendimiento a la hora de estar en ejecución, por tal motivo se estableció utilizar instrumentación con una alta validez y efectividad para lograr tener un buen rendimiento. Se explicará el funcionamiento de cada uno de los componentes utilizados, incluyendo sus especificaciones técnicas, ambientales y sus restricciones.

4.1.1. Microcontrolador de 32 bits WROOM-ESP32

ESP32 es un chip combinado de 2,4 GHz con Wi-Fi y Bluetooth, esta tecnología esta diseñada para funcionar con baja potencia utilizando 40 nanómetros y radiofrecuencia, mostrando robustez, versatilidad y fiabilidad en una amplia variedad de aplicaciones. Los módulos MCU ESP32-WROOM-32 de Espressif Systems son potentes y se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones. Estos módulos apuntan a aplicaciones que van desde redes de sensores de baja potencia hasta las tareas más exigentes, como codificación de voz, transmisión de música y decodificación de MP3. Los módulos MCU ESP32-WROOM-32 utilizan el chip ESP32-D0WD en su núcleo. Presenta dos núcleos de CPU que pueden controlarse individualmente, y la frecuencia de reloj de la CPU es

ajustable de 80MHz a 240MHz. El ESP32 integra un amplio conjunto de periféricos, que van desde sensores táctiles capacitivos, sensores Hall, interfaz de tarjeta SD, Ethernet, SPI de alta velocidad, UART, I2S e I2C.

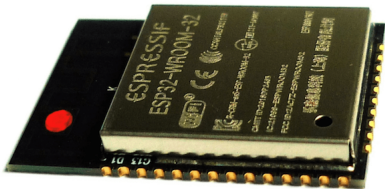


Figura 4.1.1: Microcontrolador ESP32-WROOM-32

ESP32-WROOM-32	
Descripción	Unidad(es)
Voltaje de alimentación	2.7V a 3.6V
Corriente de funcionamiento promedio	80 mA
Protocolo Wi-Fi 802.11 b / g / n	802.11n 2.4 GHz hasta 150 Mbit / s)
Interfaz de tarjeta	SD, UART, SPI, SDIO, I2C
	LED PWM, Motor PWM, I2S e IR
Rango de temperatura	40 ° C a 85 ° C

Figura 4.1.2: Características principales de microcontrolador ESP32-WROOM-32

En la siguiente imagen se observa la representación del microcontrolador ESP32 en diagrama esquemático utilizado en el dispositivo.

ESP3212 MODULE + AUTORESET

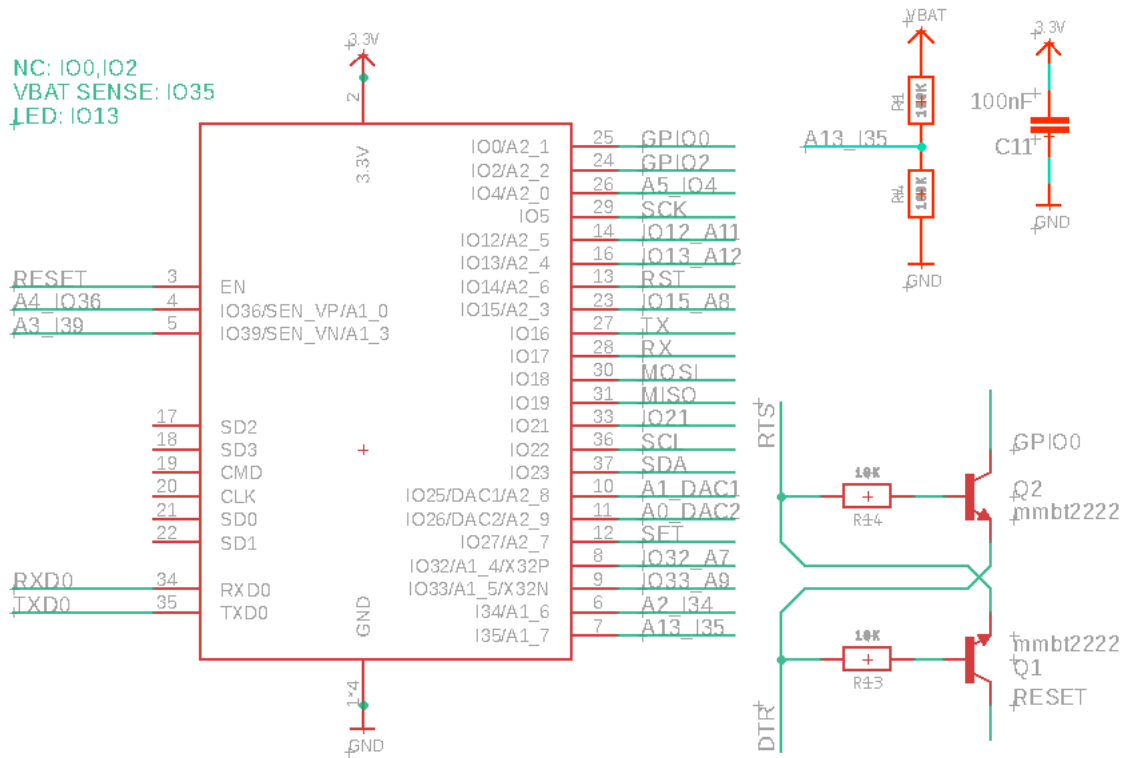


Figura 4.1.3: Esquemático de microcontrolador ESP32

4.1.2. Sensor de temperatura, humedad y presión

BME280 es un sensor ambiental integrado capaz de obtener lecturas de presión, humedad y temperatura. Una de sus principales características es contar con una alta linealidad, alta precisión y bajo consumo de energía. El sensor de humedad presenta un tiempo de respuesta extremadamente rápido que admite requisitos de rendimiento para aplicaciones emergentes y brinda una alta precisión en un amplio rango de temperaturas, el sensor de presión es un sensor de presión barométrica absoluta con características de precisión y resolución excepcionalmente altas con muy poco ruido y el sensor de temperatura integrado ha sido optimizado para generar muy poco ruido y alta resolución. En conjunto el sensor BME280 es ideal para su uso en todo tipo de sensores meteorológicos y ambientales.

BME280	
Descripción	Unidad(es)
Voltaje de alimentación	1.8V - 3.6V DC
Interfaz de comunicación	I2C (dirección 0x76)
Rango de presión	300 hPa 1100 hPa (0.3-1.1bar)
Resolución	0.16 Pa
Precisión absoluta	1 hPa
Rango de temperatura	-40°C a 85°C
Resolución de temperatura	0.01°C
Precisión temperatura	1°C
Rango de humedad relativa	0-100 % RH
Precisión de humedad relativa	+/-3 %
Rango de altura medible	0-9100 M

Figura 4.1.5: Características principales del sensor BME280

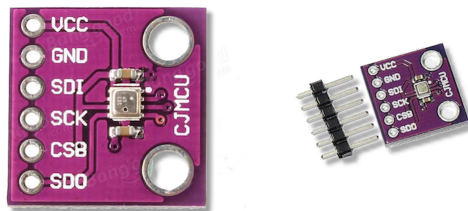


Figura 4.1.4: Sensor ambiental BME280

Especificación General

Una de las principales características del sensor es el poder comunicarse a diferentes destinos mediante los protocolos SPI e I2C. Su voltaje de alimentación va desde 1.8 a 2.6 Volts. La precisión que muestra en sus lecturas es de $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ para temperatura, $\pm 3\%$ de humedad, y finalmente en presión absoluta es de $\pm 1\text{ hPa}$. Para lograr obtener estos valores el sensor debe cumplir con los siguientes rangos de medición: 1) la temperatura soportaba va desde los -40 hasta los 85 grados centígrados, 2) la humedad relativa permitida es de 0 al 100 %, 3) y finalmente la magnitud de la presión va desde los 300 hasta los 1100 Hectopascales.

Flujo de medición

El período de medición BME280 consiste en una medición de temperatura, presión y humedad con sobremuestreo seleccionable. Después del período de medición, los datos

de presión y temperatura se pueden pasar a través de un filtro de respuesta infinita al impulso (IIR por sus siglas en ingles) opcional, que elimina las fluctuaciones de presión a corto plazo. Para la humedad, dicho filtro no es necesario y no se ha implementado.

El flujo se representa en el siguiente diagrama.

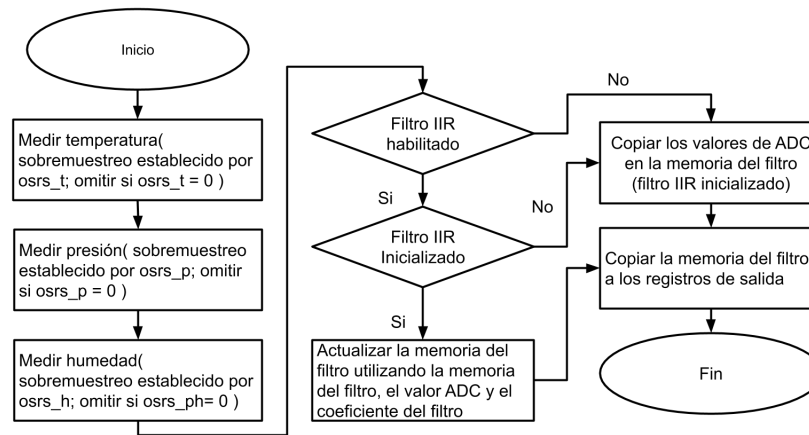


Figura 4.1.6: Ciclo de medición utilizado por sensor BME280

Los bloques individuales del diagrama anterior se detallarán en los siguientes subcapítulos.

Medición de humedad

La medición de humedad se puede habilitar u omitir. Cuando está habilitado, existen varias opciones de sobremuestreo. Para la medición de humedad, el sobremuestreo es posible para reducir el ruido. La resolución de la medición de humedad se fija en una salida ADC de 16 bits.

Medición de presión

La medición de presión se puede habilitar u omitir, cuando está habilitado existen varias opciones de sobremuestreo. Para la medición de presión, el sobremuestreo es posible para reducir el ruido. La resolución de los datos de presión depende del filtro IIR y la configuración de sobremuestreo. Cuando el filtro IIR está habilitado, la resolución de presión es de 20 bits, por otro parte si el filtro IIR está desactivado, la resolución de presión es $16 + (\text{osrs_p}-1)$ bit.

Medición de temperatura

La medición de temperatura se puede habilitar u omitir, omitir la medición podría ser útil para medir la presión extremadamente rápido, cuando está habilitada, existen varias opciones de sobremuestreo. Para la medición de temperatura, el sobremuestreo es posible para reducir el ruido. La resolución de los datos de temperatura depende del filtro IIR y la configuración de sobremuestreo. Cuando el filtro IIR está habilitado, la resolución de temperatura es de 20 bits, por otra parte si el filtro IIR está desactivado, la resolución de temperatura es $16 + (\text{osrs_t}-1)$ bit.

Filtro IIR

El valor de humedad dentro del sensor no fluctúa rápidamente y no requiere filtrado de paso bajo. Sin embargo, la presión ambiental está sujeta a muchos cambios a corto plazo, causados por ejemplo al soplar viento en el sensor. Para suprimir estas perturbaciones en los datos de salida sin causar tráfico de interfaz adicional y carga de trabajo del procesador, el BME280 presenta un filtro interno IIR el cual reduce efectivamente el ancho de banda de las señales de salida de temperatura y presión a 10 bits y aumenta la resolución de los datos de salida de presión y temperatura a 20 bits. La salida del siguiente paso de medición se filtra utilizando la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{DatosFiltradosActuales} - (\text{CoeficienteFiltro} - 1) + \text{DatosADC}}{\text{CoeficienteFiltro}}$$

DatosFiltradosActuales Son los datos que provienen de la memoria del filtro actual, y **DatosADC** son los datos que provienen de la adquisición actual de ADC. **DatosFiltrados** es el nuevo valor de la memoria del filtro y el valor que se enviará a los registros de salida. El filtro IIR se puede configurar para diferentes coeficientes de filtro, lo que hace mas lenta la respuesta a las entradas del sensor. El tiempo de respuesta con el filtro IIR habilitado depende del número de muestras generadas, lo que significa que se debe conocer la velocidad de salida de datos para calcular el tiempo de respuesta real. La cual se puede calcular usando la siguiente fórmula:

$$t_{\text{respuesta,75 \%}} = \frac{1000 * n_{\text{pruebas,75 \%}}}{\text{ODR}}$$

Como ejemplo de la formula anterior se cuenta con una velocidad de datos de 13.51 Hz, el usuario podría seleccionar un coeficiente de filtro de 8. El número de muestras

necesarias para alcanzar el 75 % de una respuesta escalonada usando esta configuración de filtro es 11. El tiempo de respuesta con filtro es por lo tanto:

$$t_{\text{respuesta},75\%} = \frac{1000.11}{13.51} = 814ms$$

Al escribir en el filtro de registro, el filtro se restablece, los siguientes valores de ADC pasarán a través del filtro sin cambios y se convertirán en los valores de memoria iniciales para el filtro. Si se omiten las mediciones de temperatura o presión, la memoria del filtro correspondiente se mantendrá sin cambios aunque los registros de salida estén configurados en 0x80000. Cuando se vuelve a habilitar la medición omitida anteriormente, la salida se filtrará utilizando la memoria del filtro desde la última vez que no se omitió la medición. Si esto no se desea, escriba en el registro del filtro para reiniciar el filtro.

Como observación se tiene que BME280 no muestrea continuamente, debido a esto el filtrado puede obtener señales con una frecuencia superior a la frecuencia de muestreo del sensor. Como ejemplo las fluctuaciones ambientales pueden tener una frecuencia < 5 Hz. En consecuencia, una frecuencia de muestreo de $ODR = 10$ Hz es suficiente para obedecer el teorema de Nyquist.

Compensación de salida

La salida BME280 consta de los valores de salida ADC. Sin embargo, cada elemento sensor se comporta de manera diferente. Por lo tanto, la presión y la temperatura reales deben calcularse utilizando un conjunto de parámetros de calibración.

Diagrama de conexión

Como se observa en la Figura 4.1.7 el sensor BME280 se comunica mediante una interfaz I2C . Las líneas SDA (serial Data) y SCL (serial Clock) son bidireccionales, conectadas al positivo de la alimentación a través de las resistencias de pull-up. Cuando el bus está libre, ambas líneas están en nivel alto. Este sensor se encuentra mapeado a los pines IO22 e IO23 del microcontrolador ESP32 equivalentes a SCL y SDA en Arduino con los pines SCL y SDA del sensor.

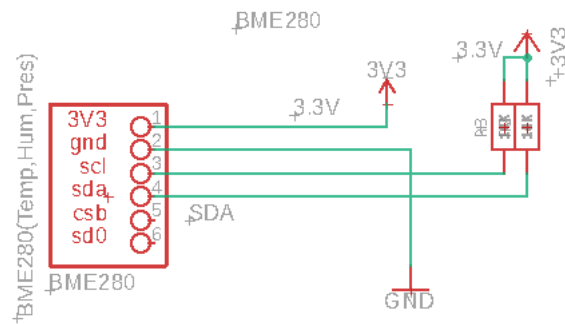


Figura 4.1.7: Esquemático de sensor BME280

4.1.3. Sensor de partículas PMS5003

Es un tipo de sensor de concentración de partículas digital y universal, se puede usar para obtener la cantidad de partículas suspendidas en el aire, es decir, la concentración de partículas y darles salida en forma de interfaz digital. Este sensor se puede insertar en instrumentos relacionados con la concentración de partículas suspendidas en el aire u otros equipos de mejora para proporcionar datos de concentración correctos en el tiempo. El principio de dispersión del láser se utiliza para dicho sensor, es decir, produce una dispersión usando un láser para irradiar partículas suspendidas en el aire, luego recolecta la dispersión luz en cierto grado, y finalmente obtener la curva de cambio de luz de dispersión con tiempo. Al final, el diámetro de partícula equivalente y el número de partículas con diferente diámetro por unidad de volumen puede ser calculado por microprocesador basado en la teoría MIE. Como la calidad y el número de cada partícula con un tamaño diferente por unidad de volumen, el volumen de la unidad del número de partículas es 0.1 L y la unidad de concentración de masa es $\frac{mg}{m^3}$. Existen dos opciones para la salida digital, pasiva y activa. El modo predeterminado está activo después del encendido. En este modo, el sensor enviará los datos en serie al host automáticamente. El modo activo se divide en dos sub-modos: modo estable y modo rápido. Si el cambio de concentración es pequeño, el sensor funcionará en modo estable con el intervalo real de 2.3. Y si el cambio es grande, el sensor cambiará al modo rápido automáticamente con el intervalo de 200 ~ 800 ms, la concentración más alta, el más corto del intervalo.

Plantower elaboró un diseño que evita la acumulación de polvo en la parte frontal de la PCB, donde están montados el láser y el diodo. En comparación con la acumulación de polvo en Dylos, esto garantiza una vida mucho mejor y una precisión de los datos en el tiempo. El sensor cuenta con diferentes rangos de medición 0.3 - 1.0 de 1.0 - 2.5 y 2.5 - 10 micrómetros (mm), el rango de temperatura de trabajo es de -10 a 60 grados centígrados con un rango de humedad que soporta de 0 a 99 %.



Figura 4.1.8: Sensor PMS5003

Especificación General

El sensor puede recibir y enviar comunicación mediante el protocolo Serial, su voltaje de alimentación va desde los 4.5 a 5.5 Volts, cuenta con un rango defectivo que va desde los 0 a 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y su rango de medición utilizado es de 1 a 2.5 y 2.5 a 10 micrómetros.

Diagrama de conexión

Como se observa en la figura 4.1.10, el sensor PMS5003 consta de 6 pines (RST, TX, RX, SET, GND y VCC) y se comunica mediante la interfaz de comunicación UART o mejor conocido como “Serial”. Este sensor se encuentra mapeado a los pines IO16 e IO17 del microcontrolador ESP32 equivalentes a TX y RX en Arduino con los pines RX y TX del sensor.

PMS5003	
Descripción	Unidad(es)
Rango de medición	0.3~1.0 1.0~2.5 2.5~10 μm
Rango efectivo	0~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Rango máximo	* $\geq 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Resolución	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Volumen estándar	0.1L
Voltaje de alimentación	Typ:5.0 / Min:4.5 / Max: 5.5V
Corriente activa	$\leq 100\text{ mA}$
Corriente en standby	$\leq 200 \mu\text{A}$
Rango de temperatura	-10~+60
Rango de humedad	0~99 %

Figura 4.1.9: Especificaciones Generales de sensor PMS5003

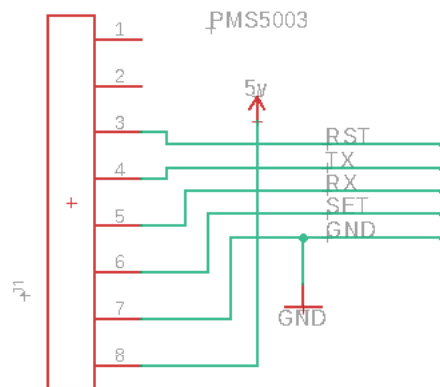


Figura 4.1.10: Esquemático de sensor PMS5003

4.1.4. Módulo de tarjeta de memoria externa

Para el registro de los datos se utiliza una MicroSD, algunas de sus características principales en su alcance de temperatura operativa que maneja de -25 a 85°C , su aplicación de uso es amplia para teléfonos móviles, inteligentes, tabletas inteligentes, etc. Requiere ser energizada con un voltaje entre 2.7 ~ 3.6 Volts, su velocidad de memoria para lectura tiende a hasta 95MB/s con interfaz UHS-1, y su velocidad de escritura maneja hasta 20MB/s con interfaz UHS-1.

Las velocidades de lectura y escritura anteriores se demuestran mediante pruebas

internas realizadas bajo ciertas condiciones controladas, y las velocidades reales pueden variar dependiendo del uso y otras condiciones.

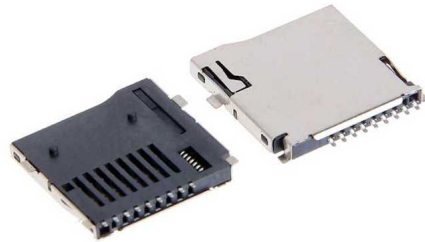


Figura 4.1.11: Adaptador de memoria micro SD a SPI

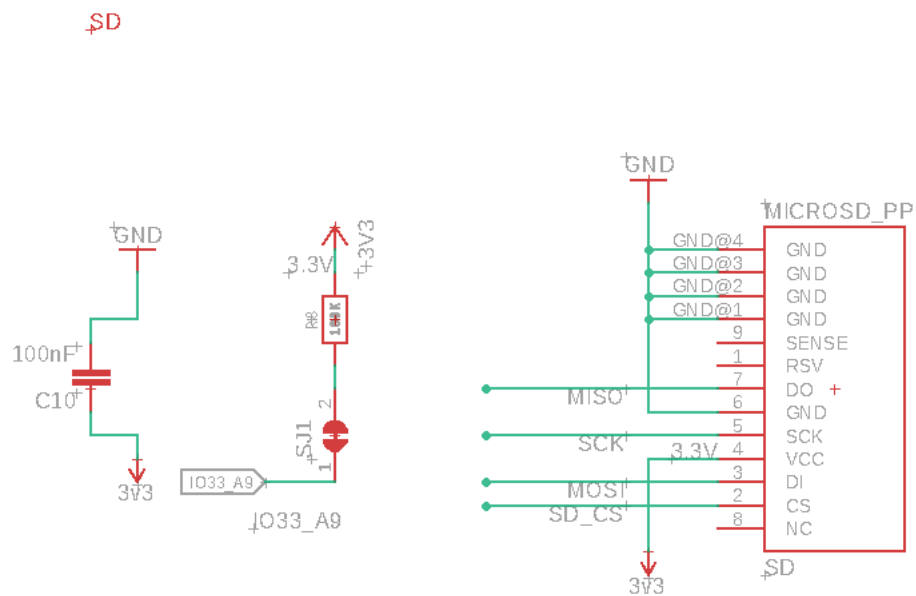


Figura 4.1.12: Esquemático de modulo SD

RTC PCF8523	
Descripción	Unidad(es)
Resolución	Segundos a años
Interfaz de comunicación	I2C (dirección 0x76)
Voltaje de alimentación	1.0 V a 5.5 V
Corriente de alimentación	-50 a 50 mA
Cristal de cuarzo	32.768 kHz
Rango de temperatura	-40 a 85 C

Figura 4.1.14: Especificaciones principales de RTC PCF8523

El conector micro SD se comunica mediante una interfaz SPI, se encuentra mapeado en esta placa a los pines IO5, IO18, IO19 e IO33 del microcontrolador ESP32 (equivalentes a SCK, MOSI, MISO y A9 en Arduino) a los pines SCK, MOSI, MISO y SD_CS del micro SD respectivamente.

4.1.5. Reloj de tiempo real

PCF8523 es un reloj en tiempo real (RTC) optimizado para un bajo consumo de energía, muestra alta efectividad para registrar datos, creación de reloj, marca de tiempo, temporizadores y alarmas.

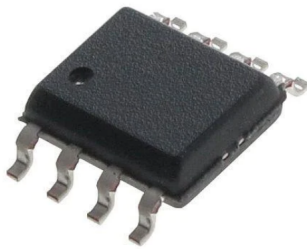


Figura 4.1.13: Modulo PCF8523

Los datos se transfieren en serie a través del bus I2C con una velocidad de datos máxima de 1000 kbit/s. Las funciones de alarma y temporizador están disponibles con la posibilidad de generar una señal de activación en un pin de interrupción. El PCF8523 tiene un circuito de conmutación de batería de respaldo, que detecta fallas de energía y cambia automáticamente al suministro de batería cuando ocurre una falla de energía.

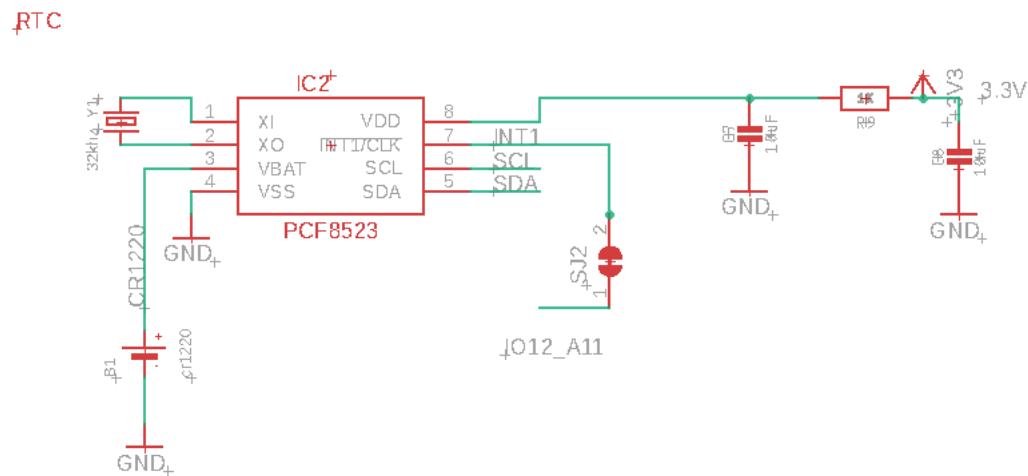


Figura 4.1.15: Esquemático de RTC

Comparte el mismo protocolo de comunicación I2C, por lo que de igual forma se encuentra mapeado a los pines IO22 e IO23 del microcontrolador ESP32 equivalentes a SCL y SDA en Arduino con los pines SCL y SDA del reloj.

4.1.6. Puerto comunicación y carga

Para la comunicación y carga del dispositivo se utiliza un puerto micro USB y el componente CP2104, la combinación de estos dos componentes permite la comunicación entre el ordenador y microcontrolador, facilitando su programación.

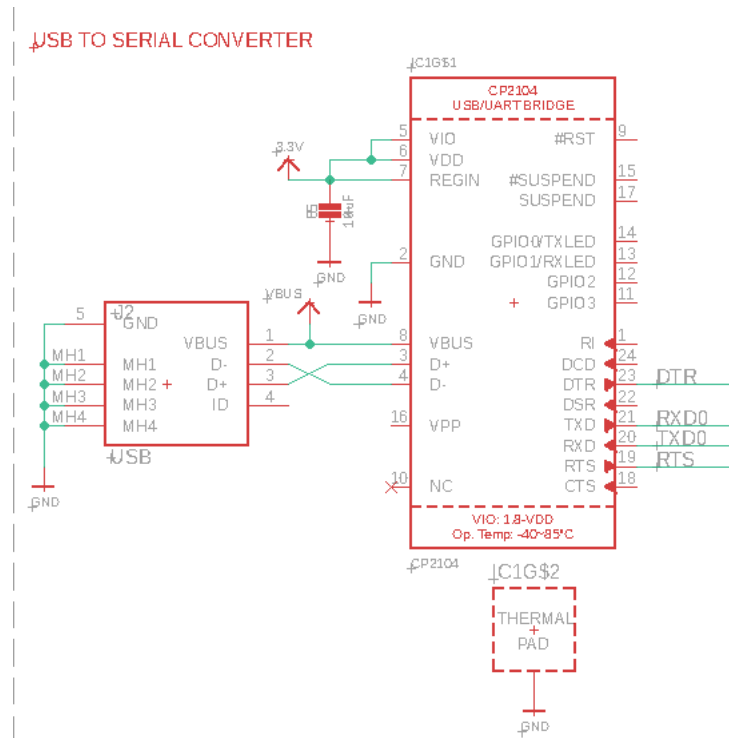


Figura 4.1.16: Esquemático de puerto de comunicación y carga

Como se puede observar en la Figura 4.1.16, el puerto microusb se comunica mediante comunicación SPI a CP2104 y este enlaza con ESP32 utilizando la comunicación Serial.

4.1.7. Módulo elevador de voltaje DC

Debido a que la alimentación generada por la batería LIPO es de 3.3V y el sensor PM5003 requiere 5V de alimentación, se utiliza el componente MT3608, el cual funciona como convertidor de voltaje DC-DC, su frecuencia es constante y está diseñado para aplicaciones de baja potencia. Su arranque suave interno da como resultado una pequeña corriente de entrada y prolonga la vida útil de la batería.

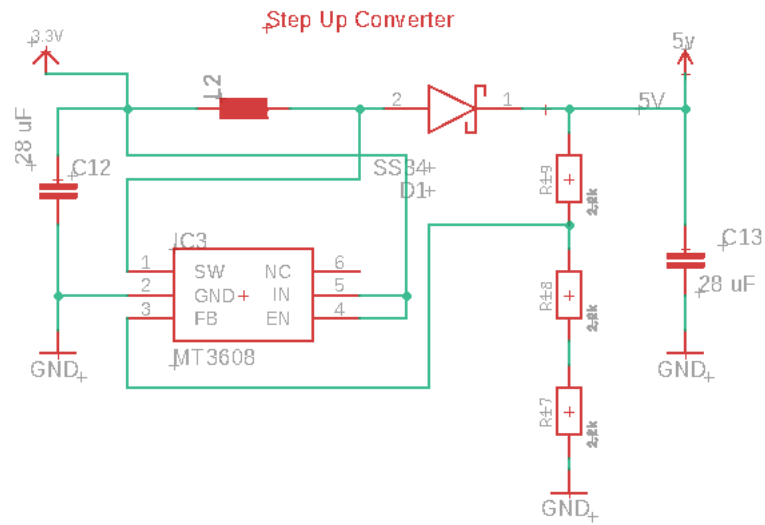


Figura 4.1.17: Esquemático de modulo elevador de voltaje

4.1.8. Batería

CR1220 es una batería de 12mm de diámetro de alta calidad y capacidad, se suministra con un voltaje nominal de 3.0 V y una capacidad nominal de 40 mAh.



Figura 4.1.18: Bateria CR1220

4.1.9. Bateria de polímero Ion

Las baterías de polímero de ión litio (también conocidas como 'lipo' o 'lipoly') son ligeras y potentes, el voltaje de salida varía de 4.2V cuando está completamente cargada a 3.7V, tiene una capacidad de 1200mAh para un total de aproximadamente 4.5 Wh. Para su uso fácil, como se observa en la figura 4.1.19 vienen preinstaladas con un conector JST-PH genuino de 2 clavijas incluyen los circuitos de protección necesarios. Debido a que tienen un conector JST genuino, no una imitación, el cable no se engancha o se atasca en un conector JST correspondiente. El circuito de protección incluido evita que el voltaje de la batería sea demasiado alto (sobrecarga) o bajo (uso excesivo), lo que significa que la batería se cortará cuando esté completamente descargada a 3.0V. También protegerá contra cortocircuitos de salida. Sin embargo, incluso con esta protección es muy importante que solo use un cargador de corriente constante para recargarlos a una velocidad de 500 mA o menos.

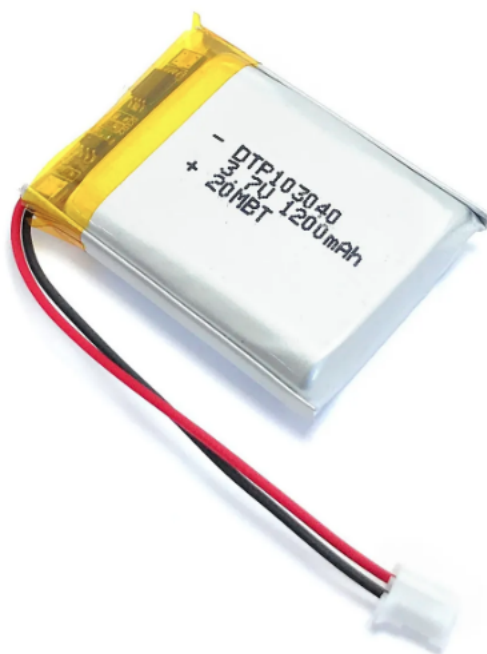


Figura 4.1.19: Bateria polímero

4.2. Códigos de inicialización

Para poder controlar los componentes y/o sensores mediante código de programación, el microcontrolador ESP32 requiere de la utilización de librerías definidas. Estas librerías contienen funciones, las cuales pueden ser llamadas para realizar sus actividades. A continuación se muestran las principales librerías utilizadas.

4.2.1. BME280

El sensor cuenta con una librería llamada “Adafruit_BME280.h” la cual es libre y proporciona las funciones necesarias para su funcionamiento. Esta librería se debe declarar al inicio del código y continuo a esto se declara un objeto, en este caso recibe el nombre de “bme”. Para inicializar el sensor se convoca la función “begin()”, función encargada de inicializar las lecturas de temperatura, humedad y presión. Una vez iniciado el objeto, lo siguiente es mandar pedir los valores generados. Como se observa en la figura 4.2.1 cada variable meteorológica cuenta con su propia función, por ejemplo para leer el valor de la temperatura se requiere mandar llamar la función “readTemperature()” y así simultaneamente.

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME280.h>
Adafruit_BME280 bme; // I2C
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println(F("Iniciando BME280"));
  status = bme.begin();
  Serial.println();
}
void loop() {
  Serial.print("Temperature = ");
  Serial.print(bme.readTemperature());
  Serial.println(" *C");
  Serial.print("Pressure = ");
  Serial.print(bme.readPressure() / 100.0F);
  Serial.println(" hPa");
  Serial.print("Humidity = ");
  Serial.print(bme.readHumidity());
  Serial.println(" %");
  Serial.println();
  delay(1000);
}
```

Figura 4.2.1: Código inicialización sensor BME280

4.2.2. PMS5003

La librería utilizada para este sensor se llama “PMS.h” y se encuentra en el siguiente enlace, esta librería ofrece las funciones necesarias para lograr comunicarlo con el microcontrolador ESP32. Una vez declarado en la cabecera del código, lo siguiente es asignar qué pines se deben utilizar para su comunicación, en este caso se utilizó

“Serial” y se creó un objeto llamado “data” y se utiliza como parámetro al momento de realizar las lecturas por medio del Serial. Un punto muy importante es mencionar que el sensor solo trabaja a una velocidad de 9600 baudios.

```
#include "PMS.h"

PMS pms(Serial);
PMS::DATA data;

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
    if (pms.read(data))
    {
        Serial1.print("PM 1.0 (ug/m3): ");
        Serial1.println(data.PM_AE_UG_1_0);

        Serial1.print("PM 2.5 (ug/m3): ");
        Serial1.println(data.PM_AE_UG_2_5);

        Serial1.print("PM 10.0 (ug/m3): ");
        Serial1.println(data.PM_AE_UG_10_0);

        Serial1.println();
        delay(1000);
    }
}
```

Figura 4.2.2: Código inicialización sensor BME280

4.2.3. PCF8523

Ofrece una librería llamada “RTCLib.h”, la cual permite mantener actualizada la fecha y hora en nuestro dispositivo. Para esto se requiere crear un objeto e inicializarlo, una vez inicializado lo siguiente es ajustar la fecha y hora utilizando la función de “adjust()”.

```
// Funciones de fecha y hora utilizando PCF8523 RTC
// Comunicacion mediante I2c y libreria Wire
#include <Wire.h>
#include "RTCLib.h"
RTC_PCF8523 rtc;

void setup () {
  Serial.begin(57600);
  if (! rtc.begin()) {
    Serial.println("Couldn't find RTC");
    while (1);
  }
  if (! rtc.initialized()) {
    Serial.println("RTC is NOT running!");
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  }
}

void loop () {
  DateTime now = rtc.now();
  Serial.print(now.year(), DEC);
  Serial.print('/');
  Serial.print(now.month(), DEC);
  Serial.print('/');
  Serial.print(now.day(), DEC);
  Serial.print(' ');
  Serial.print(now.hour(), DEC);
  Serial.print(':');
  Serial.print(now.minute(), DEC);
  Serial.print(':');
  Serial.print(now.second(), DEC);
  Serial.println();
  delay(3000);
}
```

Figura 4.2.3: Código inicialización de RTC_PCF8523

4.3. Diagramas de circuito esquemático

Como parte del proceso de desarrollo de la placa impresa, se realizó un diagrama esquemático, el cual representa los diversos tipos de componentes electrónicos utilizados y las conexiones utilizadas para la comunicación entre si.

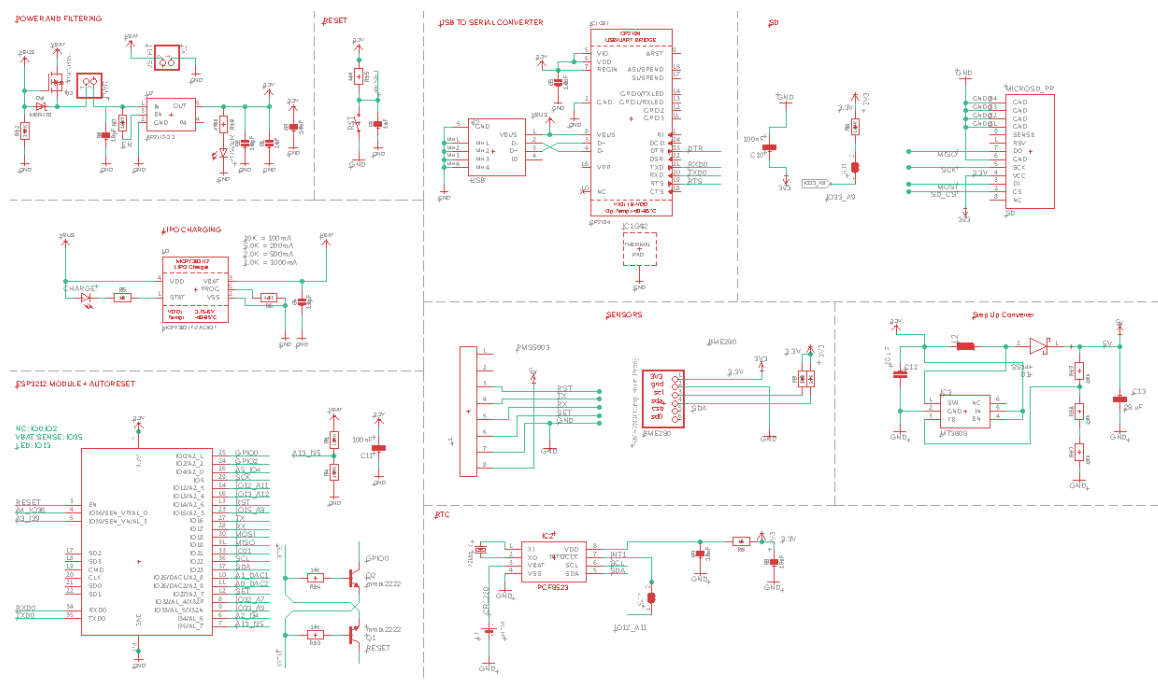


Figura 4.3.1: Esquemático diseño dispositivo

4.4. Diseño del circuito

En base a las conexiones realizadas en el diagrama esquemático del circuito, se realizó un diseño que permite proteger sus conexiones eléctricas y mantener una parte de los sensores al intemperie.

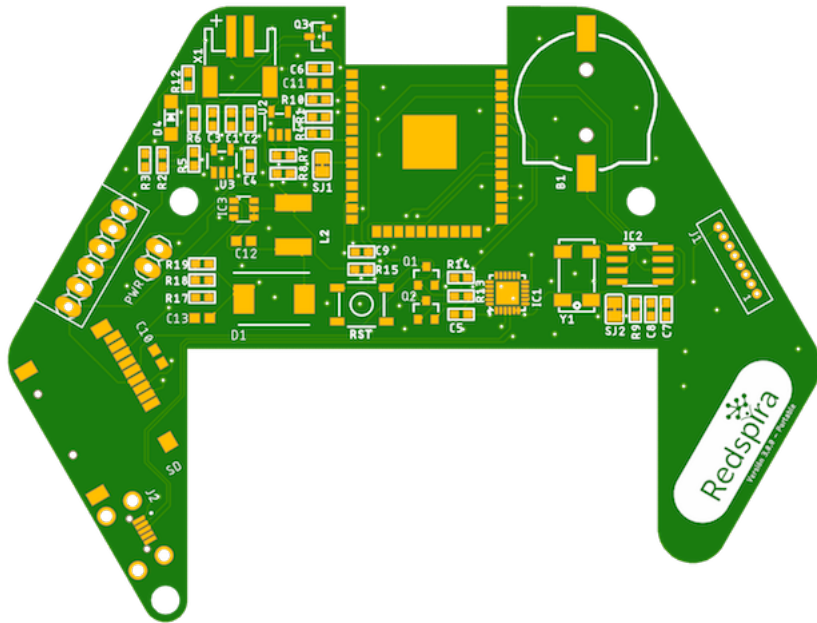


Figura 4.4.1: Esquemático del circuito

Algunas de sus características principales son; está diseñada a dos capas, sus dimensiones son de 79 mm * 53.8 mm con un espesor de 1.6 mm y el tipo de material utilizado es conocido como FR4-Standard Tg que soporta de 130 a 140 grados centígrados. Una vez finalizado el diseño del circuito electrónico se realizó su impresión y montaje de los componentes a la placa.

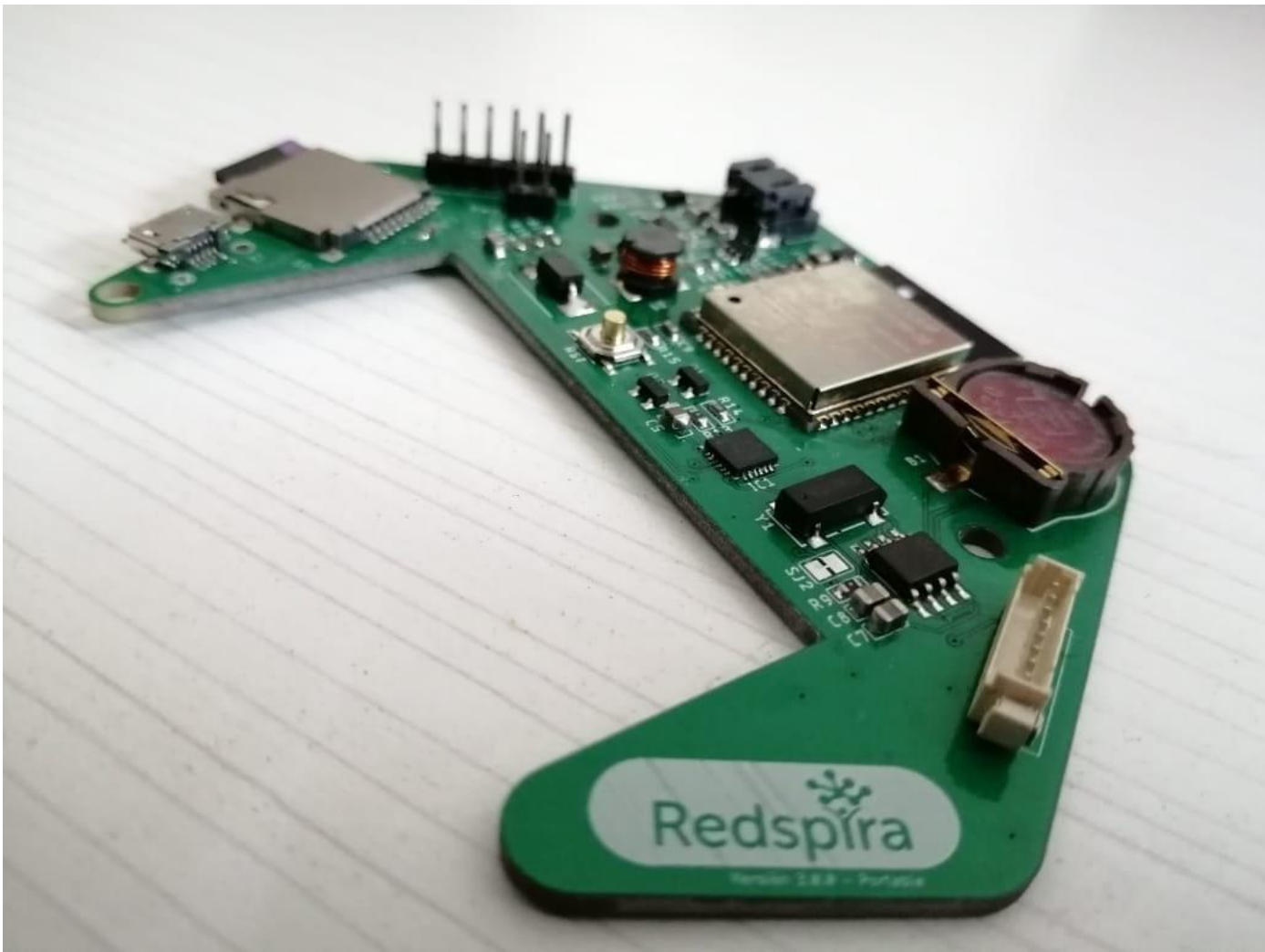


Figura 4.4.2: Esquemático del circuito

En la figura 4.4.2 se observan los componentes soldados sobre el diseño electrónico impreso.

4.5. Diseño mecánico



Figura 4.5.1: Impresion diseño 3D

Debido a los cambios de temperatura y humedad que se presentan en la ciudad de Mexicali B.C, se utilizó una carcasa impresa en material resistente a las bajas y altas temperaturas , esto para evitar un posible daño del circuito electrónico impreso.

4.6. Impresión y armado



Figura 4.6.1: Impresión y armado

En la figura 4.6.1 se observa el armado final del dispositivo.

Internamente el diseño electrónico se mantiene fijo mediante 3 tornillos, en la parte inferior se observan los sensores BME280 y PMS5003 con contacto a la intemperie, se cuenta con un módulo para la tarjeta SD, el conector micro usb y finalmente un switch para controlar el encendido y apagado del dispositivo.

Capítulo 5

Proceso de validación

Aunque los sensores para material particulado (PM2.5 y PM10) utilizan nuevas tecnologías que no se basan en el método de referencia federal (FRM) de la EPA, las SEMARNAT-NOM o los instrumentos del Método Federal Equivalente (FEM) usados para determinar los estándares de calidad del aire, su objetivo es informar los gradientes espaciales en una calidad del aire relativa, que no son observables debido a las escasas ubicaciones en la red de monitoreo regulatorio SEMARNAT-INECC o EPA.

5.1. Ubicación e instalación de sensores

A fin de obtener lecturas confiables, el monitor se instaló lo más cerca posible al suelo, para así estimar exposiciones potenciales del ser humano. Como requisito de instalación se debe cumplir con ciertos criterios definidos por manuales establecidos por la INEE .

Al realizar la instalación se siguieron las siguientes especificaciones: Principalmente se observó que la ubicación del sensor se encontrara a 2 metros o más de separación a cualquier tipo de muro, 20 metros de separación respecto a los árboles, se instalaron a una altura fija de 2 a 15 metros sobre el nivel del piso considerando que se seleccionó la escala de vecindario, el sostener el sensor por encima de un techo en una posición fija es un reto, por tal motivo se utilizó una base de metal galvanizado permitiendo al sensor tener corriente de aire ilimitada mayor o igual a los 270 grados. Una vez terminada la operación, como medida de seguridad, mensualmente se estuvo aplicando mantenimiento preventivo.

5.1.1. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es aquel que se deriva de una programación previa de actividades, con el fin de lograr la operación óptima de los equipos durante su vida útil, reduciendo la posibilidad de daños imprevistos y disminuyendo tanto los tiempos muertos de producción por fallas como los costos. Comprende tanto la inspección de los dispositivos como la detección de las fallas. Como parte de un buen mantenimiento preventivo, se requiere cumplir con las siguientes actividades:

1. a) Aplicación de aire comprimido. El sensor de partículas utiliza un método de dispersión de luz láser para irradiar las partículas suspendidas en el aire, además de que cuenta con un diseño que evita la acumulación de polvo en la parte frontal de la PCB, mediante un ventilador incorporado, sin embargo, al estar expuesto al contaminante por largos períodos de tiempo, su efectividad puede disminuir. Por tal motivo, se requiere la aplicación de aire comprimido para reducir posibles errores en las lecturas.
2. b) Limpieza de circuito electrónico impreso. Un circuito impreso se define como una tarjeta o placa utilizada para realizar el emplazamiento de los distintos elementos que lo conforman y las interconexiones eléctricas entre ellos. Al estar expuesta a la humedad, se genera oxidación o corrosión que produce la pérdida de contacto entre los elementos. Para prevenir esto, se requiere aplicar alcohol isopropílico y frotarlo con un cepillo.
3. c) Revisión de cableado. Ciertos componentes internos utilizan cableado para la transmisión de datos, por lo que se debe revisar que el cable no tenga algún desgaste y que las conexiones estén fijas. En tal caso, será necesaria la sustitución del cableado.

5.2. Validación sensor SIMCA

Con el fin de determinar si los niveles de concentraciones de las partículas del sensor (PMS5003) son similares en comparación a las obtenidas por monitores certificados. Se realizó un diseño experimental con un solo factor (PM2.5) y seleccionado 2 niveles (Estación de monitoreo normada y la propuesta desarrollada). La estación normativa seleccionada se encuentra a cargo del Consejo de Calidad del Aire de California (CARB por sus siglas en inglés).

5.2.1. Experimentación

Descripción del experimento

- Tipo de evaluación: Campo
- Dirección de la ubicación: Ethel Street, Calexico, CA
- Coordenadas Geográficas: $x=-115.4827$ $y=32.6769$
- Distancia de caminos: = 40 metros
- Tipo de camino: Asfalto

Aleatorización de las corridas



Figura 5.2.1: Ubicación sensores SIMCA con estación normativa a cargo del Consejo de Calidad del Aire de California

Como se observa en la 5.2.1, se instalaron 3 sensores con una separación de 10 cm entre sí sobre una cruz de metal que incluye conexión eléctrica a una altura de 1 metro respecto del piso y a dos metros del sensor de la estación normativa. Los sensores cuentan con una altura de alrededor de los 5 metros, evitando tener paredes a su mismo nivel y alejado de los árboles.

Algunas de las principales características de los dispositivos son las siguientes:

Equipo	Normativo	Bajo Costo
Administrado por:	California Air Resources Board - Imperial County Air Pollution Control District	REDSPIRA
Cantidad:	1	3
Modelo/Tipo:	Normative Station (Calexico-Ethel Street)	SIMCA
Sensor / monitor del contaminante a evaluar:	BAMPM2.5	PMS5003
Intervalo de muestreo:	1 hora	1 minuto
Transmisión de datos:	Ethernet	Tarjeta de memoria y WiFi
Voltaje de Alimentación:	Desconocido	5 Volts

Para su instalación en sitio se utilizó el siguiente material:

- Un riel galvanizado de 1.30 metros de altura.
- Un riel galvanizado de 0.40 metros de altura.
- Tornillos punta de broca
- Chilillos
- Cinta perforada galvanizada
- Multicontacto uso rudo 4 contactos
- Clavija de 110V 15A
- Cable de uso rudo 3x16
- Tape negro
- Cinchos de nylon

5.2.2. Presentación de resultados

Resultados CARB_Calexico - Redspira P0037

Los valores se empiezan a tomar desde las 00:00 horas del día 21 de julio de 2020 hasta las 00:00 horas del día 6 de octubre de 2020, tomando como referencia el contaminante PM2.5.

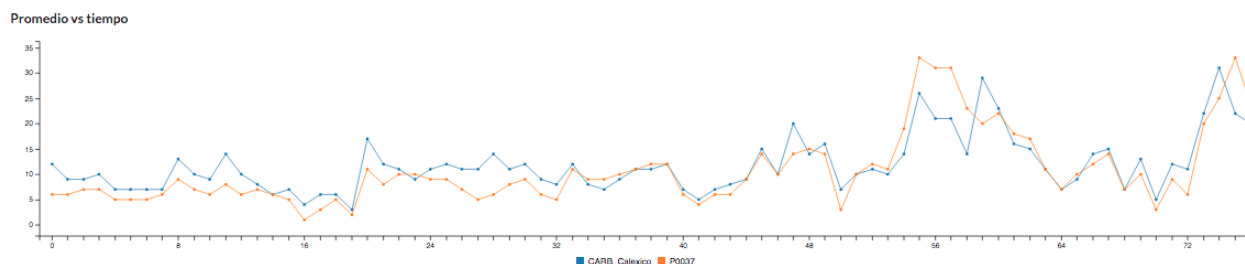


Figura 5.2.2: Comparación sensor CARB_Calexico y P0037

En la figura 5.2.2 se observa el promedio diario durante 77 días. Para generar el promedio diario se debe cumplir con el mínimo requerido del 70 % de datos promediados por hora y cada hora con el 70 % de datos promedios por minuto. Regularmente el índice se encontraba por debajo de los 50, indicando una buena calidad del aire.

CARB_Calexico generalmente muestra concentraciones mayores a las de P0037, sin embargo las lecturas son muy similares y cuentan con una secuencia muy parecida. Regularmente el índice se encontraba por debajo de los 50, indicando una buena calidad del aire.

Resumen de correlación

Indicador	CARB_Calexico	P0037
Número de muestras esperadas	77	77
Número de muestras válidas	77	77
Porcentaje de muestras válidas	100.00% ✓	100.00% ✓
Desviación estándar	2.3228879851839006e-14	1.7116016732934004e-14
Media	11.81	10.75
Mediana	11	9
Máximo	31	33

Figura 5.2.3: Resumen de correlación sensor CARB_Calexico y P0037

En la figura 5.2.3 se observan los resultados de la correlación. Los sensores CARB_Calexico y P0037 muestran un 100 % de efectividad al obtener individualmente

las 77 muestras esperadas. CARB_Calexico muestra una media de 11.81, mediana de 11 y el índice de máximo valor es de 31, por otra parte P0037 muestra una media de 10.75, mediana 9 y el índice con valor máximo a 33.

Correlación de promedio

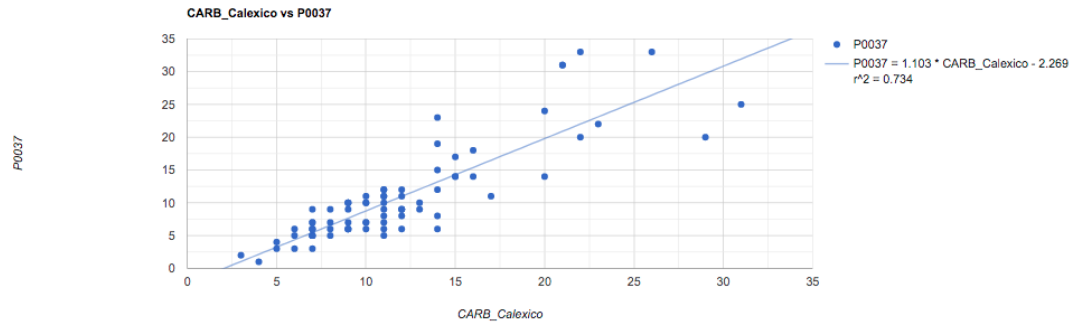


Figura 5.2.4: Correlación de sensor CARB_Calexico vs P0037

En la figura 5.2.4 se observa que el coeficiente de determinación conocida como R^2 es igual a 0.734, lo cual indica una buena correlación entre los sensores CARB_Calexico vs P0037.

Resultados CARB_Calexico - Redspira P0038

Los valores se empiezan a tomar desde las 00:00 horas del día 21 de julio de 2020 hasta las 00:00 horas del día 6 de octubre de 2020, tomando como referencia el contaminante PM2.5. Los datos generados se encuentran en Anexo 5.

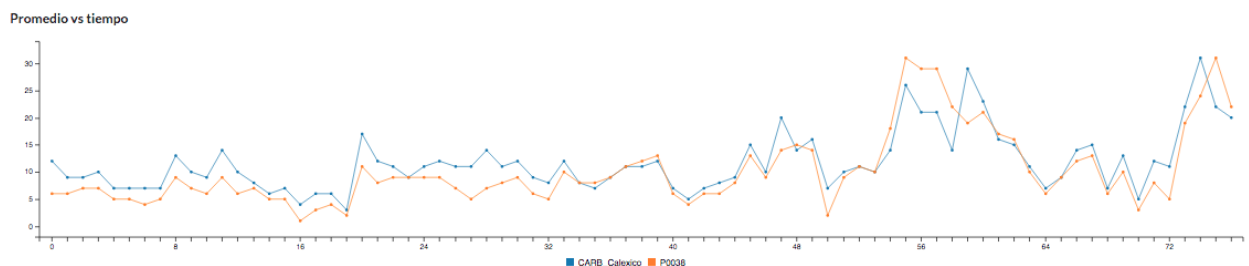


Figura 5.2.5: Comparación sensor CARB_Calexico y P0039

En la figura 5.2.5 se observa el promedio diario durante 77 días. Para generar el promedio diario se debe cumplir con el mínimo requerido del 70 % de datos promediados

por hora y cada hora con el 70 % de datos promedios por minuto. Regularmente el índice se encontraba por debajo de los 50, indicando una buena calidad del aire.

CARB_Calexico generalmente muestra concentraciones mayores a las de P0038, sin embargo las lecturas son muy similares y cuentan con una secuencia muy parecida. Regularmente el índice se encontraba por debajo de los 50, indicando una buena calidad del aire.

Resumen de correlación

Indicador	CARB_Calexico	P0038
Número de muestras esperadas	77	77
Número de muestras válidas	77	77
Porcentaje de muestras válidas	100.00% ✓	100.00% ✓
Desviación estándar	2.3228879851839006e-14	7.335435742686002e-15
Media	11.81	10.25
Mediana	11	9
Máximo	31	31

Figura 5.2.6: Resumen de correlación sensor CARB_Calexico y P0038

En la figura 5.2.6 se observan los resultados de la correlación. Los sensores CARB_Calexico y P0037 muestran un 100 % de efectividad al obtener individualmente las 77 muestras esperadas. CARB_Calexico muestra una media de 11.81, mediana de 11 y el índice de máximo valor es de 31, por otra parte P0038 muestra una media de 10.25, mediana 9 y el índice con valor máximo a 31.

Correlación de promedio

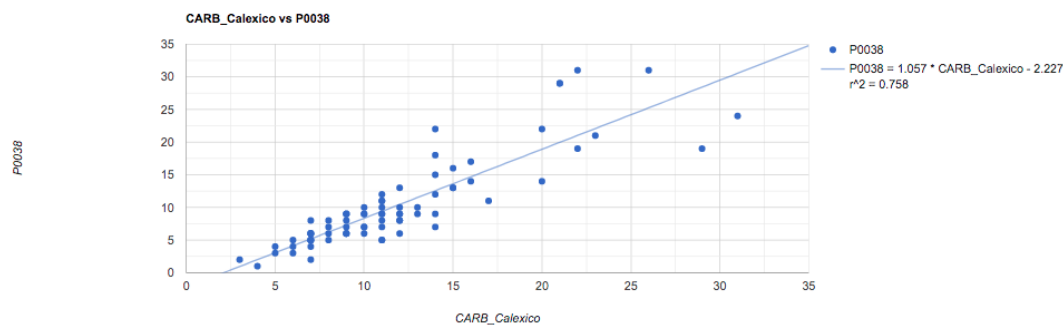


Figura 5.2.7: Correlación de sensor CARB_Calexico vs P0038

En la figura 5.2.7 se observa que el coeficiente de determinación conocida como R^2 es igual a 0.758, lo cual indica una buena correlación entre los sensores CARB_Calexico

y P0038.

Resultados CARB_Calexico - Redspira P0039

Los valores se empiezan a tomar desde las 00:00 horas del día 21 de julio de 2020 hasta las 00:00 horas del día 6 de octubre de 2020, tomando como referencia el contaminante PM2.5. Los datos generados se encuentran en Anexo 5.

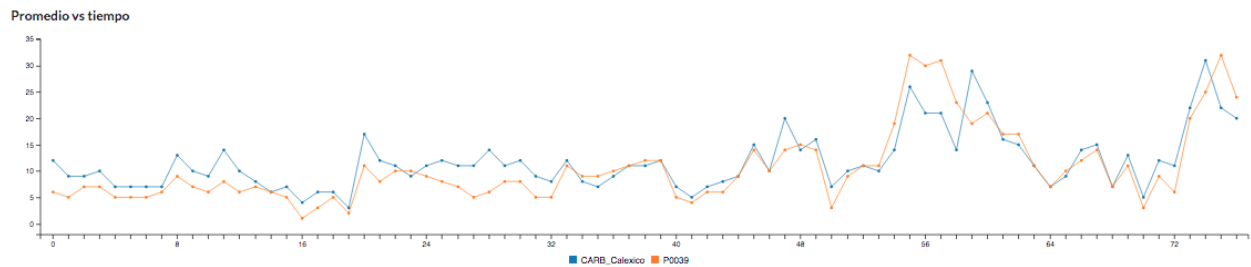


Figura 5.2.8: Comparación sensor CARB_Calexico y P0039

En la figura 5.2.8 se observa el promedio diario durante 77 días. Para generar el promedio diario se debe cumplir con el mínimo requerido del 70 % de datos promediados por hora y cada hora con el 70 % de datos promedios por minuto. Regularmente el índice se encontraba por debajo de los 50, indicando una buena calidad del aire.

CARB_Calexico generalmente muestra concentraciones mayores a las de P0039, sin embargo las lecturas son muy similares y cuentan con una secuencia muy parecida. Regularmente el índice se encontraba por debajo de los 50, indicando una buena calidad del aire.

Resumen de correlación

Indicador	CARB_Calexico	P0039
Número de muestras esperadas	77	77
Número de muestras válidas	77	77
Porcentaje de muestras válidas	100.00% ✓	100.00% ✓
Desviación estándar	2.3228879851839006e-14	2.1802545124094505e-14
Media	11.81	10.60
Mediana	11	9
Máximo	31	32

Figura 5.2.9: Resumen de correlación sensor CARB_Calexico y P0039

En la figura 5.2.9 se observan los resultados de la correlación. Los sensores

CARB_Calexico y P0039 muestran un 100 % de efectividad al obtener individualmente las 77 muestras esperadas. CARB_Calexico muestra una media de 11.81, mediana de 11 y el índice de máximo valor es de 31, por otra parte P0039 muestra una media de 10.60, mediana 9 y el índice con valor máximo a 32.

Correlación de promedio

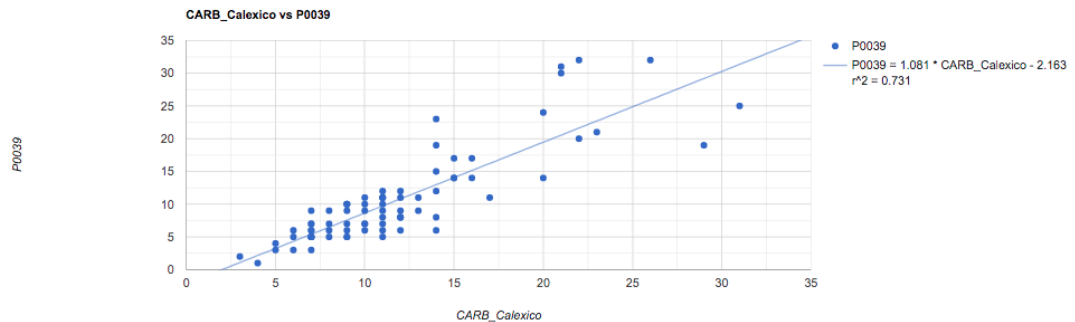


Figura 5.2.10: Correlación de sensor CARB_Calexico vs P0038

En la figura 5.2.10 En la figura 10 se observa que el coeficiente de determinación conocida como R^2 es igual a 0.731, lo cual indica buena correlación entre los sensores CARB_Calexico vs P0039.

Resultados temperatura y humedad.

La temperatura y humedad son factores que pueden afectar la eficiencia de las lecturas obtenidas por los sensores, por tal motivo se tomó la decisión de analizar las variables meteorológicas presentadas durante el periodo de coubicación.

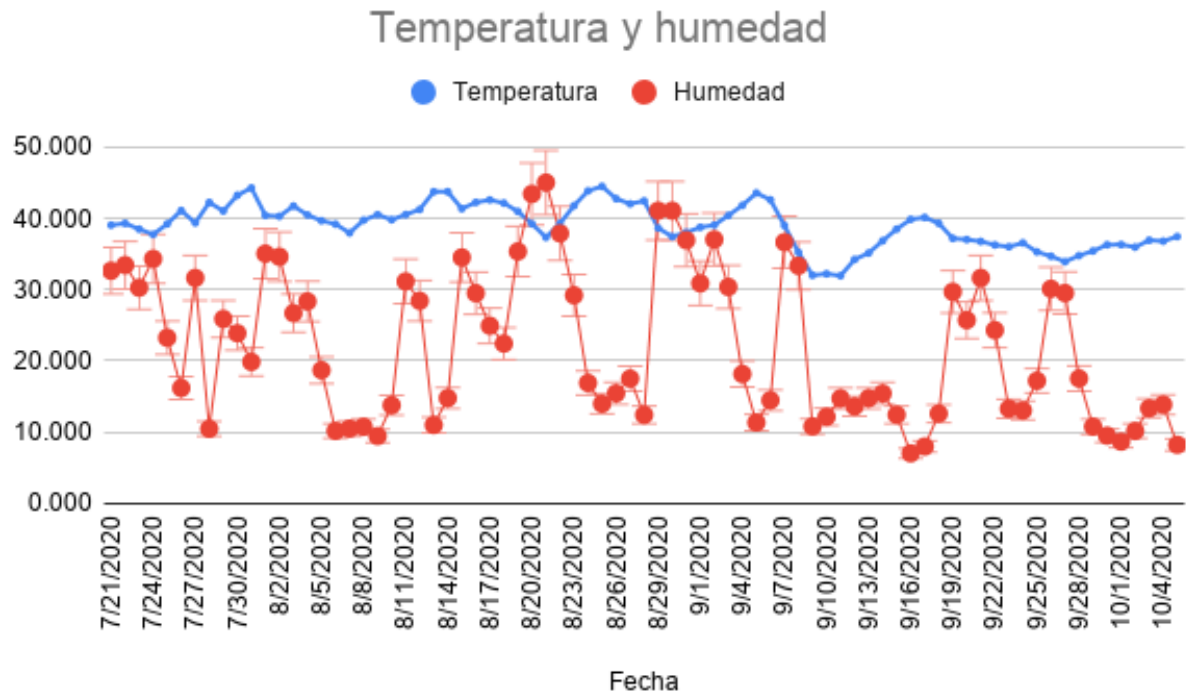


Figura 5.2.11: Temperatura y humedad obtenida por sensores Redspira instalados en Ethel Street, Calexico, CA

En la figura 5.2.11 se observa la temperatura y humedad relativa promedio por día. Durante los 77 días, la temperatura se mantuvo constante dentro del rango de los 34 a 43 grados centígrados. Por otra parte la humedad relativa fue muy variable, mostrando lecturas que van desde el 8 % hasta el máximo de 45 %.

Observaciones

En base a los resultados obtenidos por los sensores Redspira y CARB_Calexico, se concluye que las lecturas de CARB_Calexico se mantienen por encima de obtenida por sensores Redspira sin embargo mantienen una buena secuencia. Sabiendo esto el siguiente paso es realizar una calibración para lograr obtener lecturas más certeras en base a una estación normada.

5.3. Estudio coubicación a sitio

Con el uso del sensor se cree que pueda disminuir la buena calidad de datos, por tal motivo se desea comprobar que después de dos meses de uso, se mantiene una persistencia en las lecturas del sensor en sitio. Para esto se implementó una coubicación en sitio, consiste en seleccionar un sensor que esté en uso y durante una semana compararlo con los 3 sensores que fueron correlacionados mediante estación normativa.

5.3.1. Experimentación

Se tiene como objetivo el evaluar el rendimiento del sensor SIMCA en campo respecto a tres sensores SIMCA correlacionados mediante una estación normativa a cargo del Consejo de Calidad del Aire de California (CARB por sus siglas en inglés).

Descripción del experimento

- **Tipo de evaluación:** Campo
- **Dirección de la ubicación:** Ejido Cucapah Indígena, B.C.
- **Coordenadas Geográficas:** 32.293862,-115.299604
- **Distancia de caminos:** 50 metros
- **Tipo de camino:** Asfalto

Aleatorización de las corridas

El ejido cucapah indígena fue seleccionado aleatoriamente para realizar la coubicación en sitio, cuenta con el sensor Redspira P0042, su conexión a Internet es mediante la compañía de Telnor y brinda un 88 % de señal de conexión.



Figura 5.3.1: Cou-bicacion a sitio sensores SIMCA

Como se observa en la figura 5.3.1, se instalaron 3 sensores con una separación de 10 cm entre sí sobre una cruz de metal que incluye conexión eléctrica a una altura de 1 metro respecto del piso y a 1 metro del sensor ubicado en el ejido cucapah. Los sensores cuentan con una altura de alrededor de los 5 metros, evitando tener paredes a su mismo nivel y alejado de los árboles.

Algunas de las principales características de los dispositivos son las siguientes:

Equipo	Bajo Costo
Administrado por:	REDSPIRA
Cantidad:	4
Modelo/Tipo:	SIMCA
Sensor / monitor del contaminante a evaluar:	PMS5003
Intervalo de muestreo:	1 cyclo/minuto
Transmisión de datos:	Tarjeta de memoria y WiFi
Voltaje de Alimentación:	5 Volts

Para su instalación se utilizó el siguiente material :

- Un riel galvanizado de 1.30 metros de altura.
- Un riel galvanizado de 0.40 metros de altura.
- Tornillos punta de broca
- Chilillos
- Cinta perforada galvanizada
- Multicontacto uso rudo 4 contactos
- Clavija de 110V 15A
- Cable de uso rudo 3x16
- Tape negro
- Cinchos de nylon

5.3.2. Presentación de resultados

Sensor Redspira P0042 - Sensor Redspira P0093

Los valores se empiezan a tomar desde las 14:00 horas del día 20/10/2020 hasta las 14:00 horas del día 27/10/2020, tomando como referencia el contaminante PM2.5.

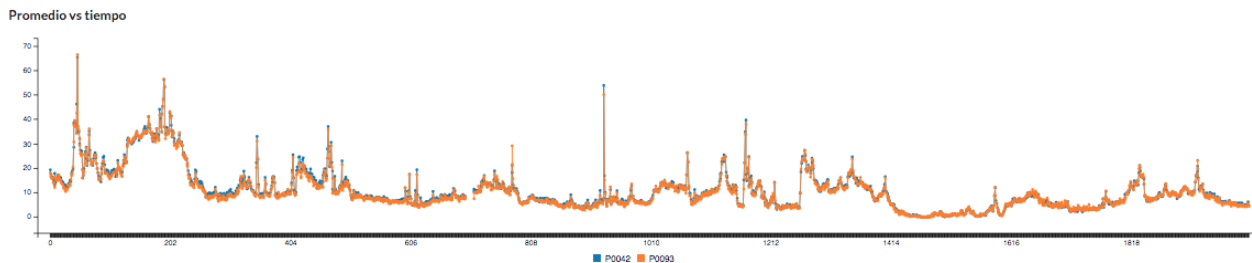


Figura 5.3.2: Comparación sensor P0042 y P0093

En la figura 5.3.2 se observa el promedio generado cada 5 minutos durante 7 días. Regularmente el índice se encontraba por debajo de los 50, indicando una buena calidad del aire.

Resumen de correlación

Indicador	P0042	P0093
Número de muestras esperadas	2016	2016
Número de muestras válidas	2002	2003
Porcentaje de muestras válidas	99.31% ✓	99.36% ✓
Desviación estándar	4.901638677239113e-13	0.12062961132072071
Media	10.84	10.50
Mediana	8.91	8.48
Máximo	65.29	66.37

Figura 5.3.3: Resumen de correlación P0042 vs P0093

En la figura 5.3.3 se observan los resultados de la correlación, se esperaba un total de 2016 lecturas, sin embargo el sensor P0042 generó el 99.31 % con 2002 lecturas y P0093 el 99.46 % con 2003 lecturas. P0042 muestra una media de 10.84, mediana de 8.91 y el índice de máximo valor es de 65.29, por otra parte P0093 muestra una media de 10.50, mediana 8.48 y el índice con valor máximo a 66.37.

Correlación de promedio

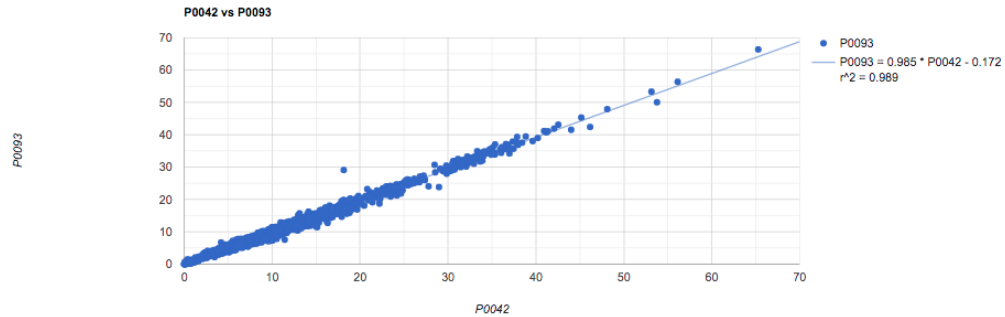


Figura 5.3.4: Resumen de correlación P0042 vs P0093

En la figura 5.3.4 se observa que el coeficiente de determinación conocida como R^2 es igual a 0.989, lo cual indica una muy buena correlación entre los sensores P0042 y P0093.

Sensor Redspira P0042 - Sensor Redspira P0094

Los valores se empiezan a tomar desde las 14:00 horas del día 20/10/2020 hasta las 14:00 horas del día 27/10/2020, tomando como referencia el contaminante PM2.5.

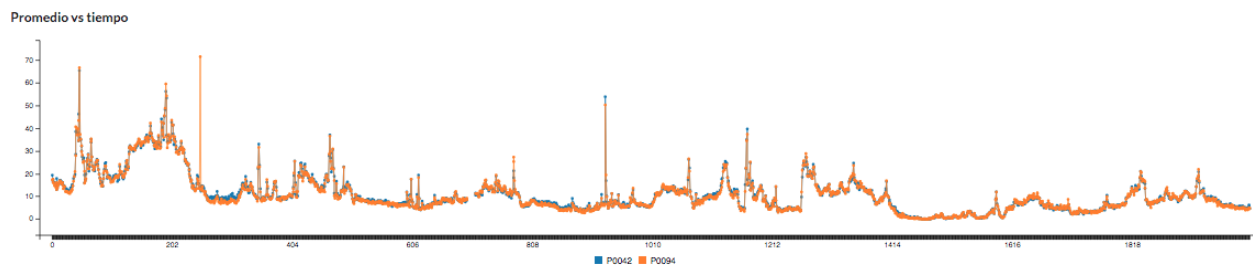


Figura 5.3.5: Comparación sensor P0042 y P0094

En la figura 5.3.5 se observa el promedio generado cada 5 minutos durante 7 días. Regularmente el índice se encontraba por debajo de los 50, indicando una buena calidad del aire.

Resumen de correlación

Indicador	P0042	P0094
Número de muestras esperadas	2016	2016
Número de muestras válidas	2002	1999
Porcentaje de muestras válidas	99.31% ✓	99.16% ✓
Desviación estándar	0.3406164058153575	5.812200223787952e-13
Media	10.84	10.71
Mediana	8.91	8.65
Máximo	65.29	71.39

Figura 5.3.6: Resumen de correlación P0042 vs P0094

En la figura 5.3.6 se observan los resultados de la correlación, se esperaba un total de 2016 lecturas, sin embargo el sensor P0042 generó el 99.31 % con 2002 lecturas y P0094 el 99.16 % con 1999 lecturas. P0042 muestra una media de 10.84, mediana de 8.91 y el máximo valor de índice es de 65.29, por otra parte P0094 muestra una media de 10.71, mediana 8.65 y el índice con valor máximo a 71.39.

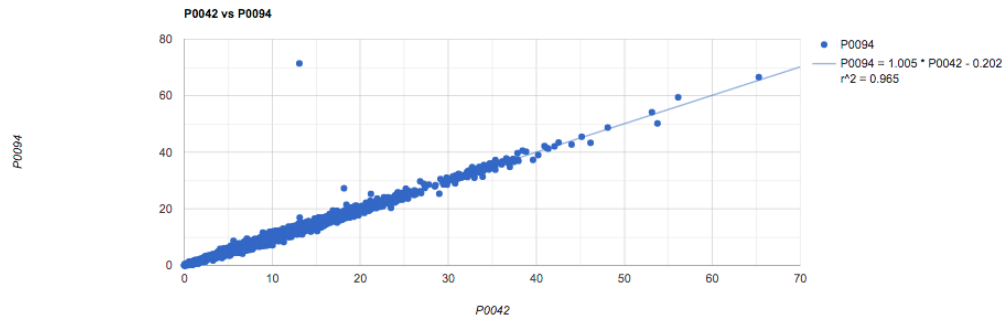


Figura 5.3.7: Resumen de correlación P0042 vs P0094

En la figura 5.3.7 se observa que el coeficiente de determinación conocida como R^2 es igual a 0.989, lo cual indica una muy buena correlación entre los sensores P0042 y P0094.

Sensor Redspira P0042 - Sensor Redspira P0095

Los valores se empiezan a tomar desde las 14:00 horas del día 20/10/2020 hasta las 14:00 horas del día 27/10/2020, tomando como referencia el contaminante PM2.5.

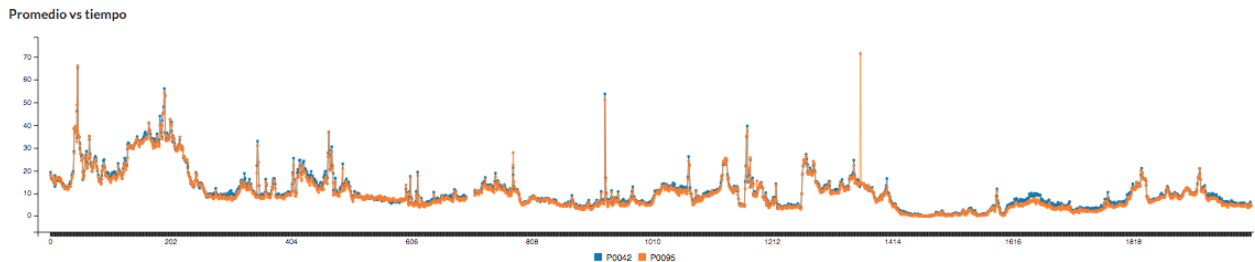


Figura 5.3.8: Comparación sensor P0042 y P0095

En la figura 5.3.8 se observa el promedio generado cada 5 minutos durante 7 días. Regularmente los índices se encontraban por debajo de los 50, indicando una buena calidad del aire.

Resumen de correlación

Indicador	P0042	P0095
Número de muestras esperadas	2016	2016
Número de muestras válidas	2002	2000
Porcentaje de muestras válidas	99.31% ✓	99.21% ✓
Desviación estándar	0.3534641296671875	2.2000290821548338e-13
Media	10.84	10.11
Mediana	8.91	8.11
Máximo	65.29	71.57

Figura 5.3.9: Resumen de correlación P0042 vs P0095

En la figura 5.3.9 se observan los resultados de la correlación, se esperaba un total de 2016 lecturas, sin embargo el sensor P0042 generó el 99.31 % con 2002 lecturas y P0095 el 99.21 % con 2000 lecturas. P0042 muestra una media de 10.84, mediana de 8.91 y el índice con valor máximo es de 65.29, por otra parte P0095 muestra una media de 10.11, mediana 8.11 y el índice con valor máximo a 71.57

Correlación de promedio

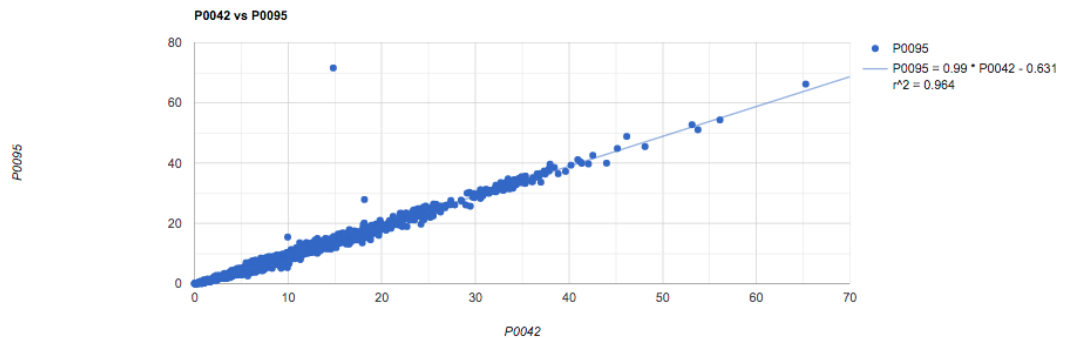


Figura 5.3.10: Resumen de correlación P0042 vs P0095

En la figura 5.3.10 se observa que el coeficiente de determinación conocida como R^2 es igual a 0.964, lo cual indica una muy buena correlación entre los sensores P0042 y P0095.

5.4. Instalación de monitores ambientales en el municipio de Mexicali BC

Si bien Mexicali es una de las ciudades con mayor densidad de puntos de medición de la calidad del aire, resulta necesario dividir la ciudad en zonas con la finalidad de discernir en qué partes de la mancha urbana se presentan mayores o menores índices de contaminación. Para realizar se tomo como base la zonificación efectuada en el Programa de Saneamiento de la Ciudad de Mexicali por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM).

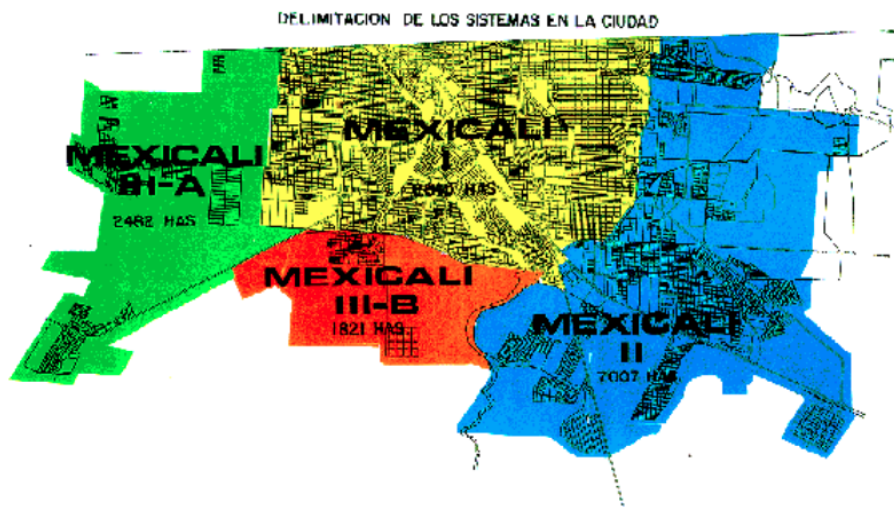


Figura 29. Zonificación del Programa de Saneamiento de la Ciudad de Mexicali.
Fuente: CESPM.

Figura 5.4.1: Zonificación del programa de saneamiento de la ciudad de Mexicali B.C.
Fuente: CESPM

Como se observa en la figura 5.4.1 la ciudad se divide en cuatro zonas:

“Mexicali I” o Zona Central: correspondiente al casco antiguo de la ciudad, el cual limita al norte con la línea internacional, al oriente y poniente con el llamado anillo periférico (Blvd. Manuel Gómez Morin) y al sur con el Blvd. Héctor Terán Terán. Esta zona incluye mayormente actividades comerciales y de servicios, y en menor medida, industriales.

“Mexicali II” o Zona Oriente: la cual es el área con mayor dinamismo en años recientes. Limita al norte con la línea internacional, al poniente con el Blvd. Gómez Morin y el sistema Lagunar-Río Nuevo, y al oriente y sur con el área agrícola del Valle

de Mexicali. Incluye prioritariamente actividades industriales y comerciales.

Esta zona la subdividimos en dos partes: Zona Nororiental y Zona Sureste, las cuales están separadas por el Blvd. Lázaro Cárdenas y la carretera a Islas Agrarias. Añadimos la delimitación con la carretera a San Felipe, para separar el área con mayor presencia de actividades industriales y tener una más fácil referencia zonal al estar delimitada por los principales ejes viales de la ciudad. Esta subdivisión en dos áreas se realizó tomando como base las tendencias históricas recientes del comportamiento de la calidad del aire, en las cuales se puede observar mayores niveles de contaminación en la parte sur-oriental de la zona, que a su vez corresponde con el área con mayor concentración de parques industriales de la ciudad y donde existen numerosas calles sin pavimentar.

“Mexicali III-A” o Zona Poniente: limita al oriente con el Periférico poniente y al sur y oriente con el área agrícola del Valle de Mexicali. Esta zona presenta mayormente características de periurbanización, siendo la de mayor presencia de calles sin pavimentar. Incluye también numerosos predios agrícolas y un par de ladrilleras.

16

“Mexicali III-B” o Zona Sur: Se ubica en el área centro-sur de la ciudad y presenta una gran proliferación de nuevos fraccionamientos. Limita al norte con el Blvd. Gómez Morín, al poniente con la carretera y Tijuana, al oriente con el sistema lagunar México-Xochimilco y al sur con el área agrícola del Valle de Mexicali. A esta zona le añadimos el área al poniente de la carretera a San Felipe, para su mejor referencia.

Una vez identificadas las características de las 4 secciones de la ciudad, se planteó realizar un diagnóstico de las condiciones que se tienen en las diferentes estaciones del año, esto para lograr determinar los puntos idóneos para la instalación de los sensores en el municipio de Mexicali BC. Como herramientas se utilizó la plataforma de Google Earth y HYSPLIT MODEL, las cuales permiten mostrar un punto de referencia y te brindan diversas capas de información con los registros de la base de datos generada por la Secretaría de Protección al Ambiente.

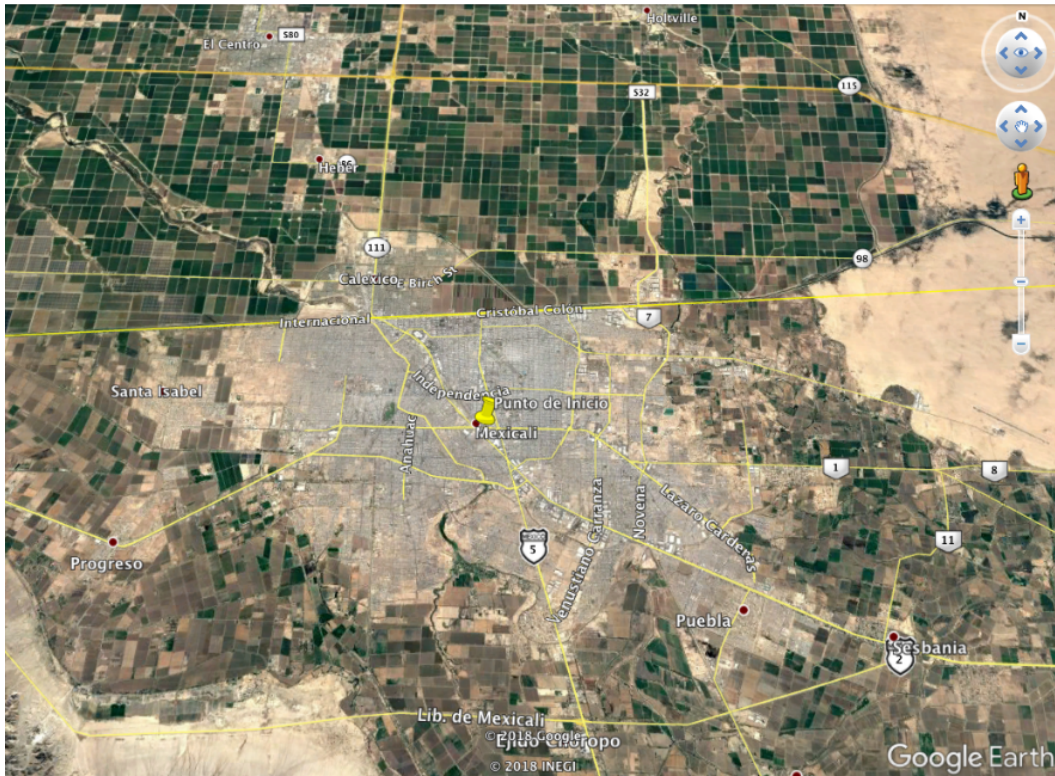


Figura 5.4.2: Punto de referencia en Google Earth

En la figura 5.4.2 se muestra el punto de referencia por el cual iniciará el recorrido de los vientos y dispersión de los contaminantes, esta ubicación tiene una latitud de 32.2402 y su longitud es de 115.2689. Una vez ubicado el punto inicial, se seleccionó un día por estación del año para realizar el estudio correspondiente.

Estación del año	Día seleccionado
Primavera	25 - 03 - 2018
Verano	25 - 07 - 2018
Otoño	25 - 09 - 2018
Invierno	25 - 02 - 2018

Figura 5.4.3: Días seleccionados por estación del año.

Como se observa en la tabla 5.4.3, se seleccionó el día 25 del mes de marzo, julio, septiembre y febrero. Realizando simulaciones de las trayectorias de los vientos y dispersión del contaminante para cada uno de los días.

Primavera

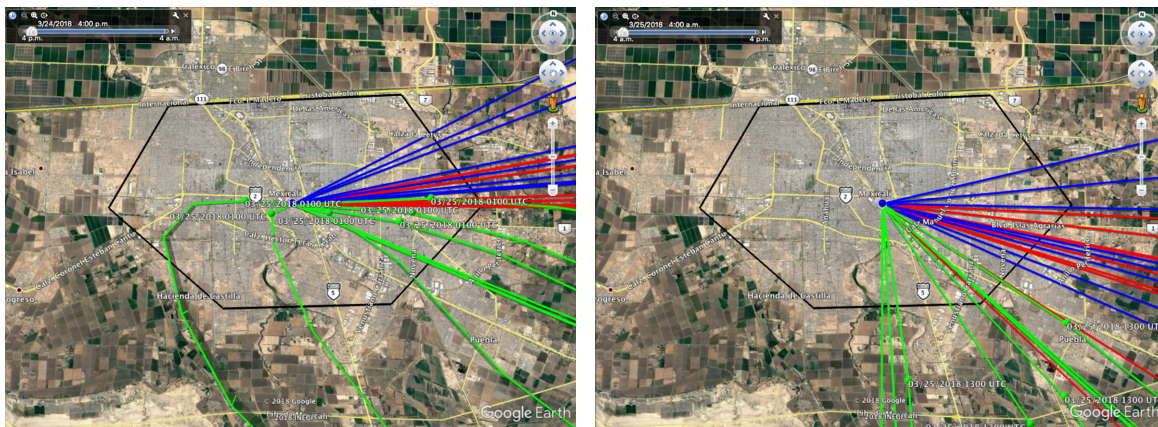


Figura 5.4.4: Modelado de trayectoria del contaminante para el día 25 de marzo de 2018.

La figura 5.4.4 muestra la trayectoria del contaminante para el día 25 de marzo de 2018, en izquierda se muestra el primer periodo de 0 a 12 horas y en derecha el segundo periodo de 12 a 24 horas. Durante el primer periodo se observa que la trayectoria del contaminante se dirige mayormente hacia la zona oriente y un poco a zona sur. De igual manera el segundo periodo mantuvo la trayectoria hacia zona oriente y menos frecuente a zona sur.

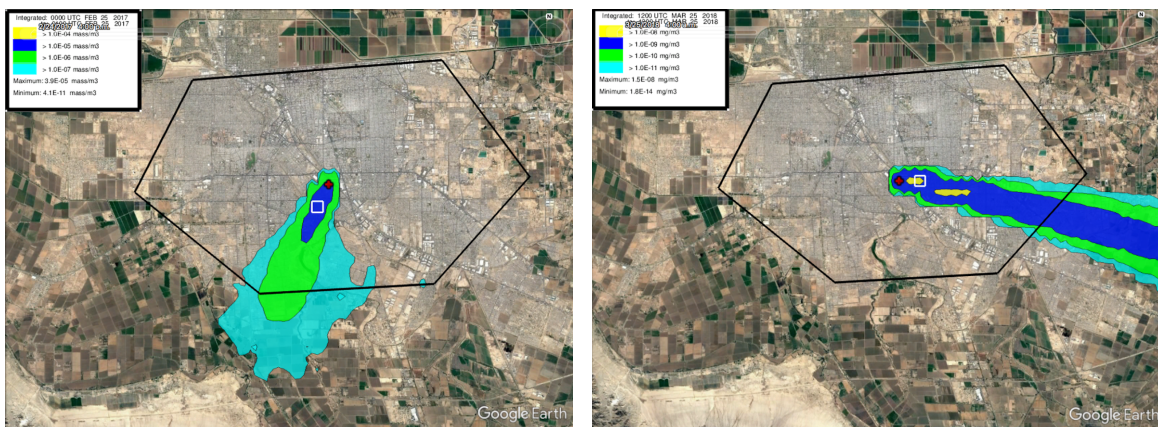


Figura 5.4.5: Modelado de dispersión del contaminante para el día 25 de marzo del 2018.

La figura 5.4.5 muestra la dispersión del contaminante para el día 25 de marzo de 2018, en izquierda se muestra el primer periodo de 0 a 12 horas y en derecha el segundo periodo de 12 a 24 horas. El primer periodo muestra que la concentración del contaminante se mantuvo dispersa sobre zona sur permitiendo una baja concentración.

Por otra parte, el segundo periodo muestra poca dispersión del contaminante, manteniendo una alta concentración en una sección de la zona oriente.

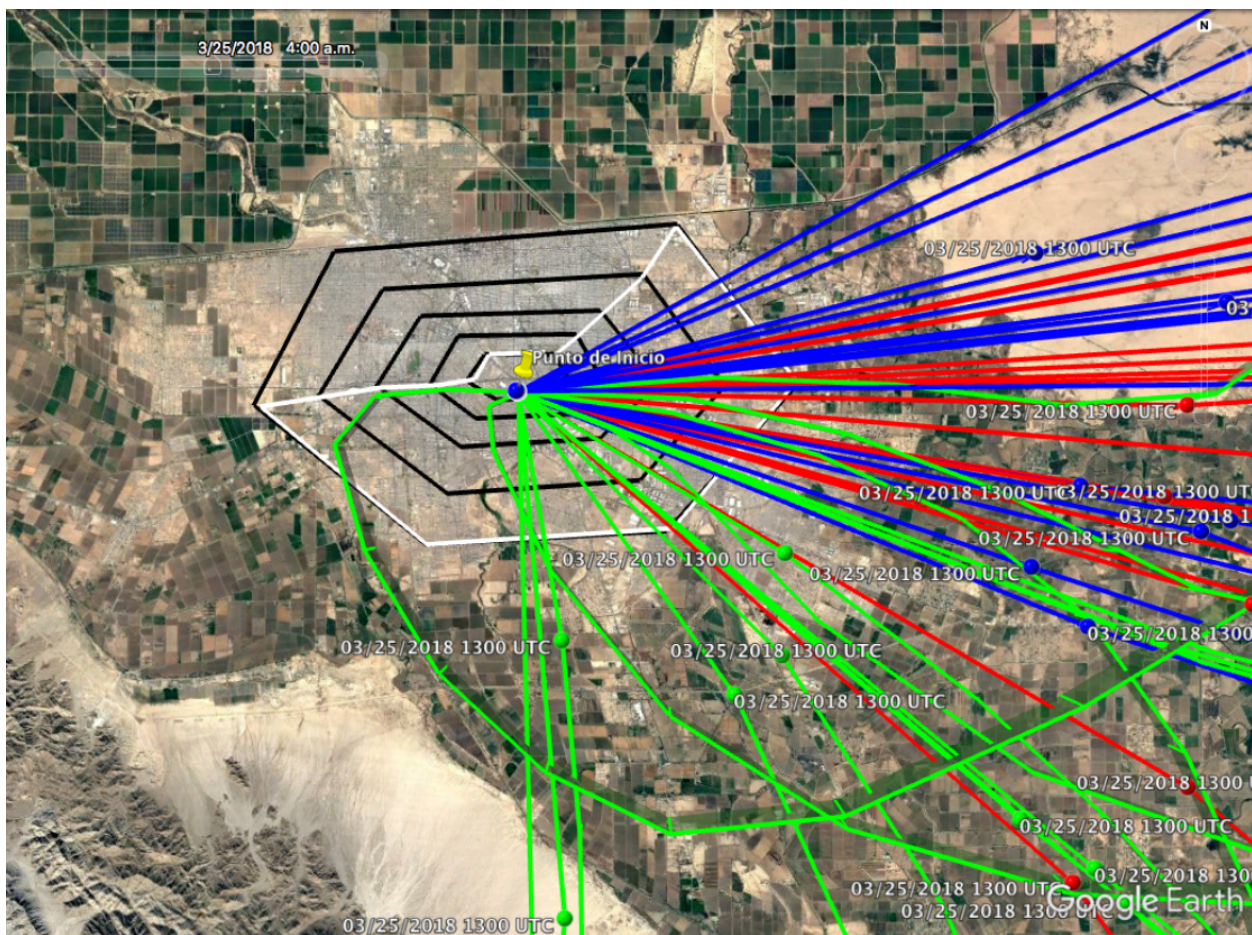


Figura 5.4.6: Cuenca para el día 25 de septiembre de 2018

En la figura 5.4.6 se observa la cuenca atmosférica y trayectoria del contaminante. En base a eso y la dispersión del contaminante se define que durante invierno la zona oriente es la más afectada, teniendo poca dispersión y una alta concentración del contaminante.

Verano

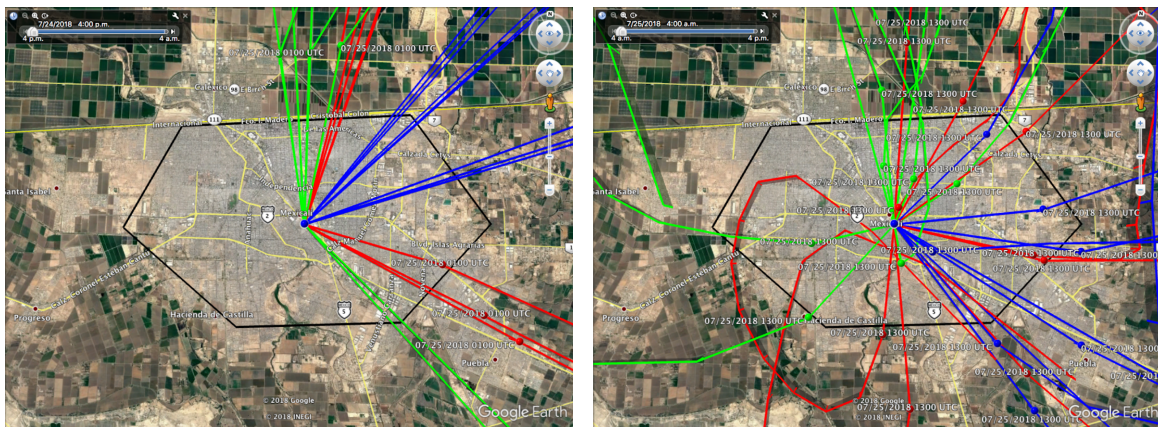


Figura 5.4.7: Modelado de trayectoria del contaminante para el día 25 de julio del 2018.

La figura 5.4.7 muestra la trayectoria del contaminante para el día 25 de julio de 2018, en izquierda se muestra el primer periodo de 0 a 12 horas y en derecha el segundo periodo de 12 a 24 horas. Durante el primer periodo se observa que la trayectoria del contaminante se mantiene mayormente hacia la zona oriente y menos frecuente a a zona sur. De igual manera el segundo periodo mantuvo la trayectoria hacia zona oriente y menos frecuente a a zona sur.

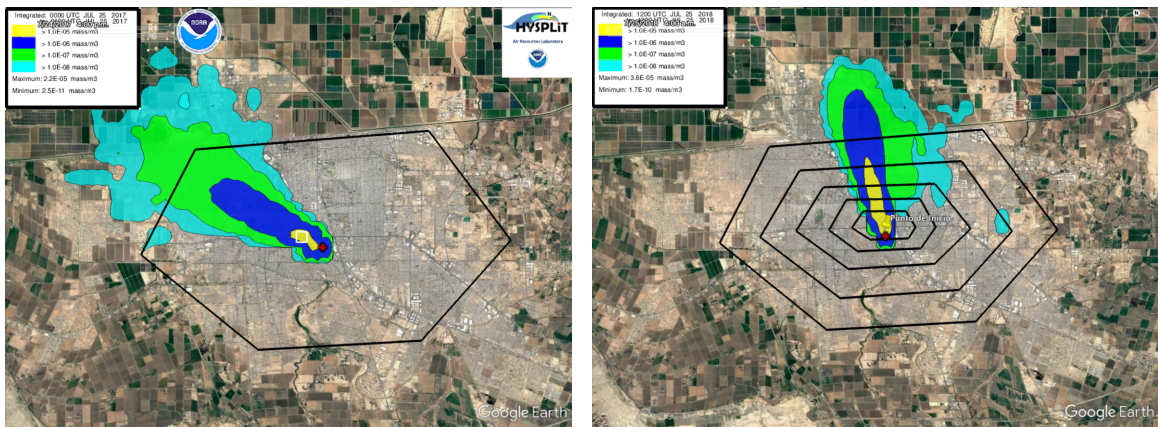


Figura 5.4.8: Modelado de dispersión del contaminante para el día 25 de julio del 2018.

La figura 5.4.8 muestra la dispersión del contaminante para el día 25 de marzo de 2018, en izquierda se muestra el primer periodo de 0 a 12 horas y en derecha el segundo periodo de 12 a 24 horas. El primer periodo muestra que el contaminante se mantuvo disperso sobre zona central y mayormente en zona poniente permitiendo una baja concentración. Por otra parte, el segundo periodo muestra poca dispersión del contaminante, manteniendo una alta concentración en una sección de zona central.

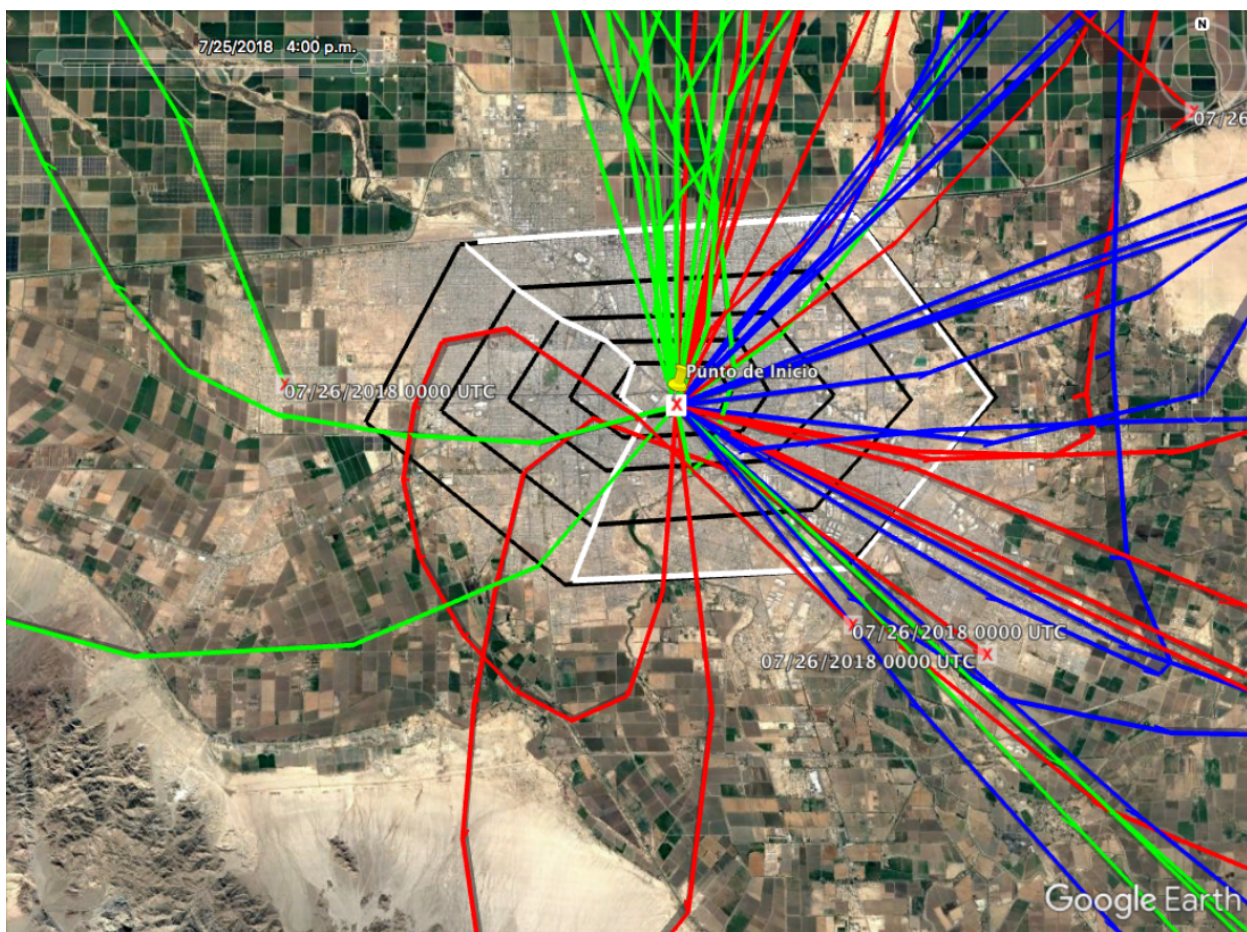


Figura 5.4.9: Cuenca atmosférica para el día 25 de septiembre de 2018

En la figura 5.4.9 se observa la cuenca atmosférica y trayectoria del contaminante. En base a la dispersión y trayectoria del contaminante se define que durante verano la zona oriente y zona sur son las más afectadas, mostrando baja dispersión y alta concentración del contaminante.

Otoño

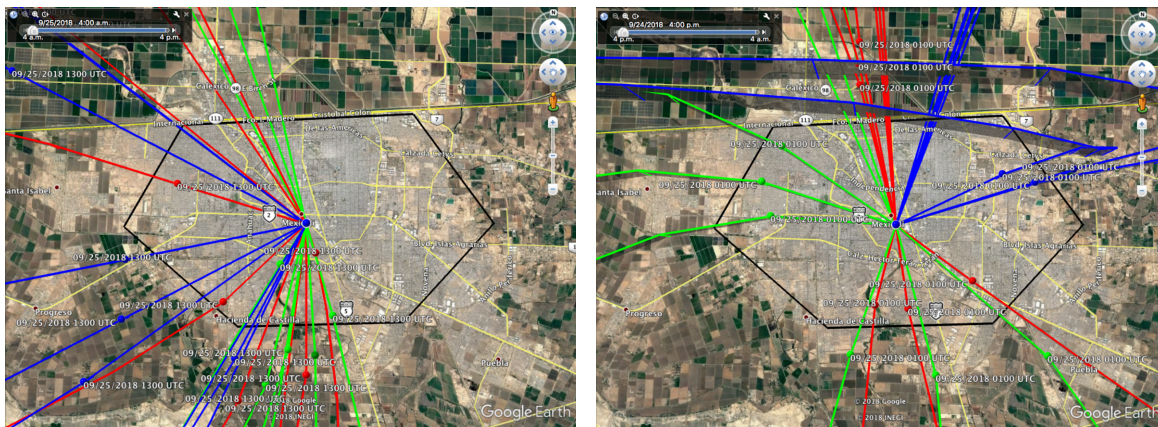


Figura 5.4.10: Modelado de trayectoria del contaminante para el día 25 de septiembre del 2018.

La figura 5.4.10 muestra la trayectoria del contaminante para el día 25 de septiembre de 2018, en izquierda se muestra el primer periodo de 0 a 12 horas y en derecha el segundo periodo de 12 a 24 horas. Durante el primer periodo se observa que la trayectoria del contaminante se dirige mayormente a zona poniente y un poco a zona sur, por otra parte el segundo periodo mantuvo su trayectoria a zona oriente y zona sur.

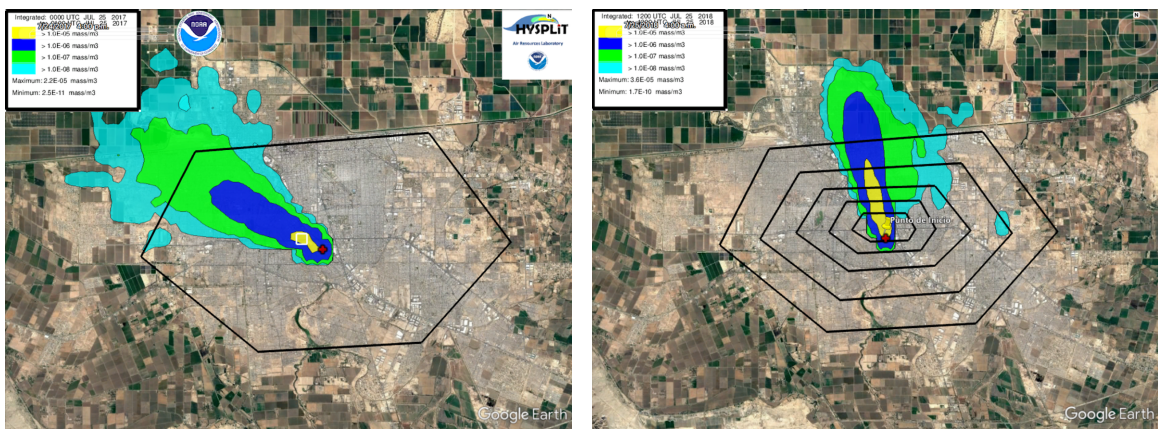


Figura 5.4.11: Modelado de dispersión del contaminante para el día 25 de septiembre del 2018.

La figura 5.4.11 muestra la dispersión del contaminante para el día 25 de marzo de 2018, en izquierda se muestra el primer periodo de 0 a 12 horas y en derecha el segundo periodo de 12 a 24 horas. El primer periodo muestra que el contaminante se mantuvo disperso mayormente en dirección a zona poniente. Por otra parte, el segundo periodo

muestra poca dispersión del contaminante, manteniendo una alta concentración en una sección de zona central.

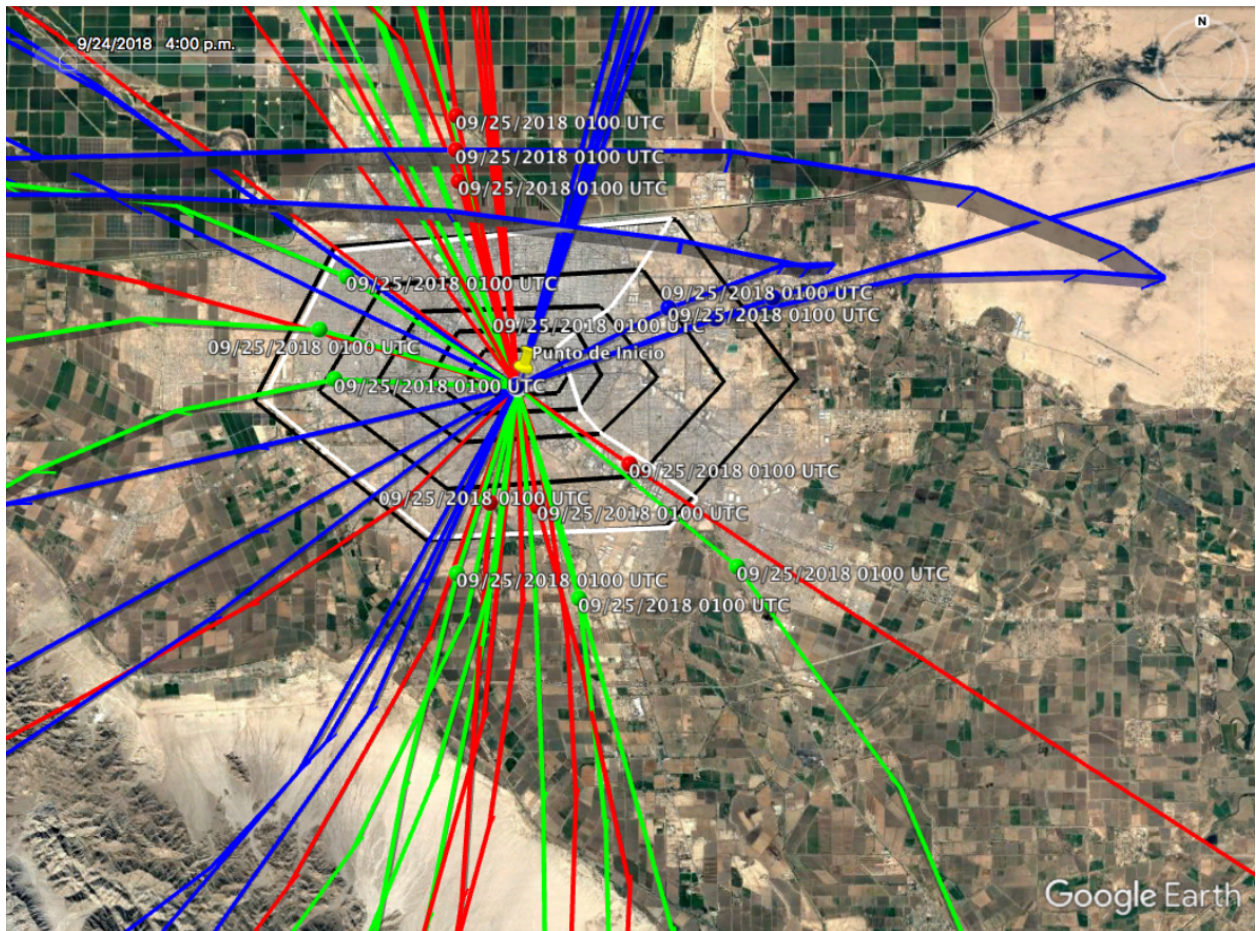


Figura 5.4.12: Cuenca atmosférica para el día 25 de septiembre de 2018

En la figura 5.4.12 se observa la cuenca atmosférica y trayectoria del contaminante. En base a la dispersión y trayectoria del contaminante se define que durante otoño la zona oriente, zona central y zona sur son las más afectadas, mostrando una alta dispersión y baja concentración del contaminante.

Invierno

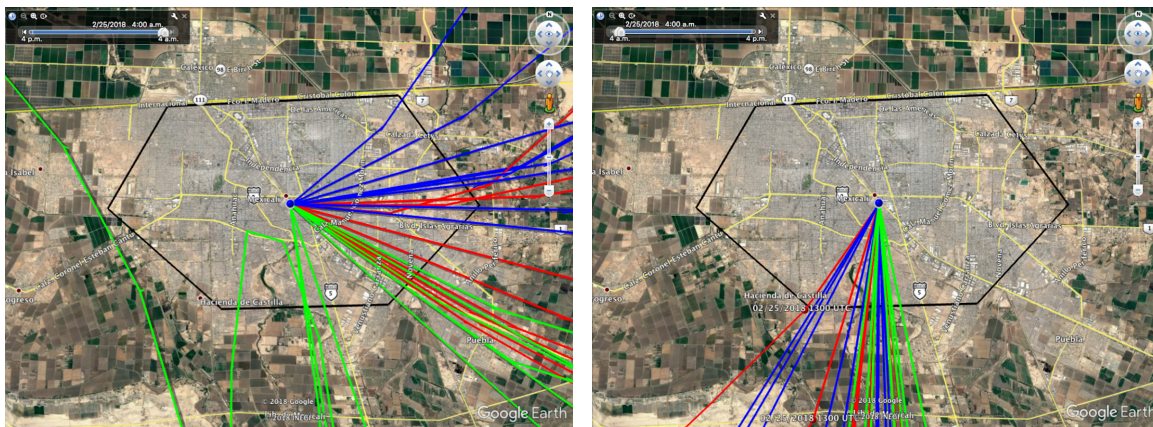


Figura 5.4.13: Modelado de trayectoria del contaminante para el día 25 de diciembre del 2018.

La figura 5.4.7 muestra la trayectoria del contaminante para el día 25 de febrero de 2018, en izquierda se muestra el primer periodo de 0 a 12 horas y en derecha el segundo periodo de 12 a 24 horas. Durante el primer periodo, el contaminante indicó una trayectoria a zona oriente y un poco sobre zona sur. Por otra parte, el segundo periodo mantuvo la trayectoria hacia zona sur.

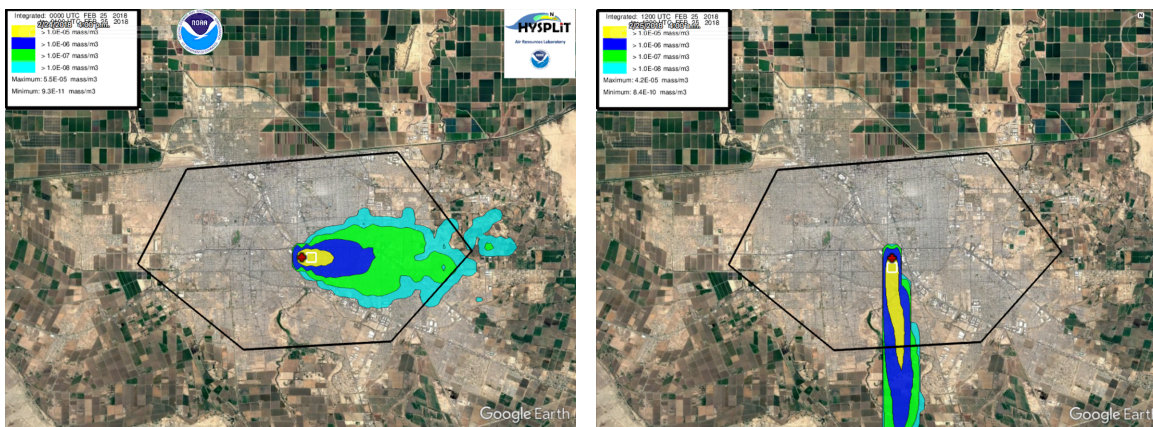


Figura 5.4.14: Modelado de dispersión del contaminante para el día 25 de diciembre del 2018.

La figura 5.4.8 muestra la dispersión del contaminante para el día 25 de febrero de 2018, en izquierda se muestra el primer periodo de 0 a 12 horas y en derecha el segundo periodo de 12 a 24 horas. El primer periodo muestra que la concentración del contaminante se mantuvo dispersa la mayor parte de zona oriente, permitiendo una baja concentración sobre la zona. Por otra parte el segundo periodo muestra poca

dispersión del contaminante, manteniendo una alta concentración en una sección de la zona oriente.

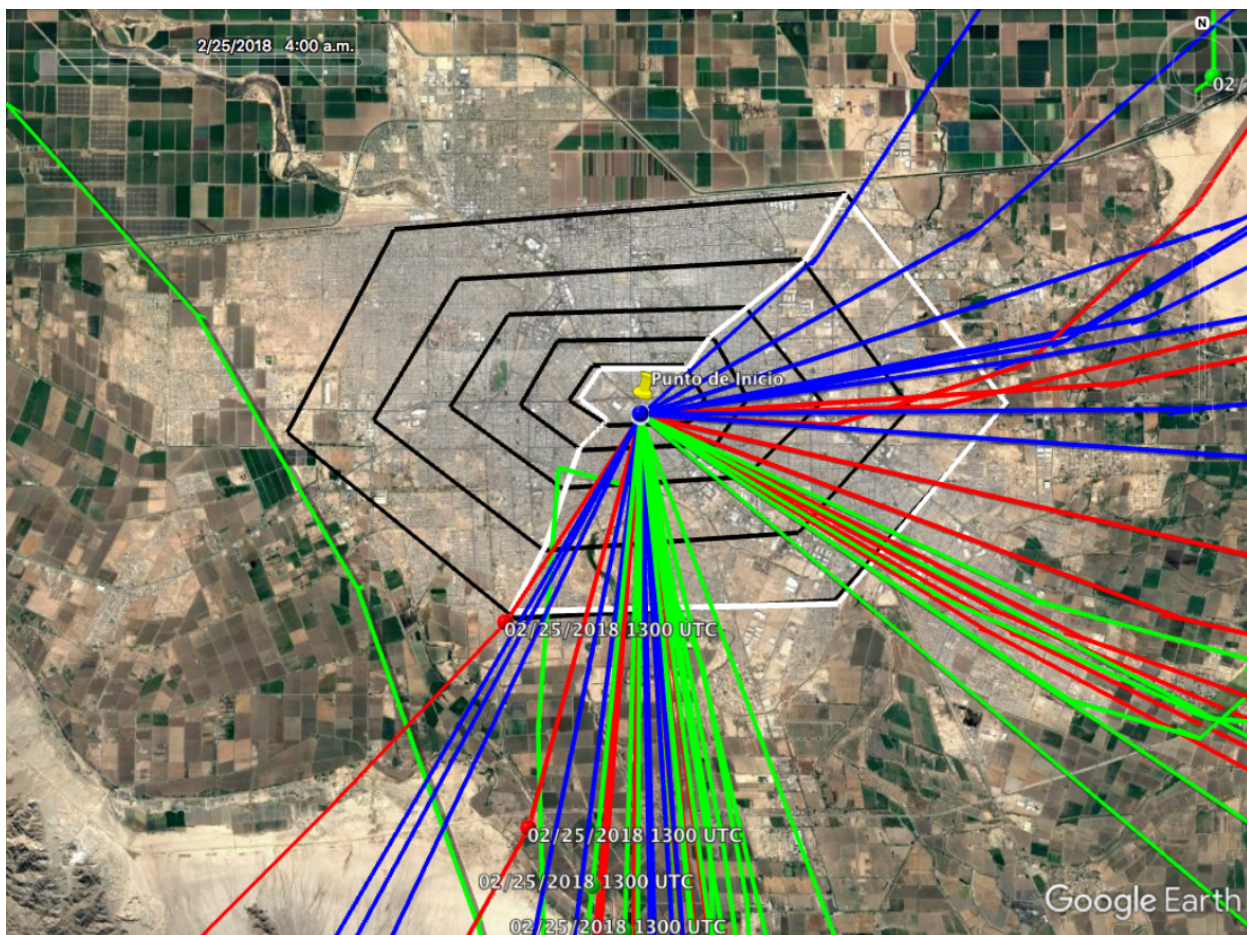


Figura 5.4.15: Cuenca atmosférica para el día 25 de diciembre del 2018

En la figura 5.4.15 se observa la cuenca atmosférica y trayectoria del contaminante. En base a dispersión del contaminante se define que durante invierno la zona oriente es la más afectada, mostrando poca dispersión y una alta concentración del contaminante.

5.4.1. Ubicación de sensores utilizados

En base al estudio realizado y debido a que los sensores necesitan estar en un área segura, contar con corriente eléctrica e Internet, fueron instalados en ubicaciones donde los usuarios voluntarios pueden proporcionar estos servicios. En total se instalaron 10 sensores distribuidos entre las zonas de la ciudad de Mexicali B.C.



Figura 5.4.16: Ubicaciones de sensores utilizados

En la figura 5.4.16 se observa la representación gráfica de las ubicaciones de los voluntarios que resguardan los sensores.

En “Zona Central” se cuenta con 4 sensores que tienen asignados los siguientes ID’s: “A0035” , “M0013” , “M0014” y “A0013”. En “Zona Poniente” se cuenta con el dispositivo “M0003”. En “Zona Nororiente” se cuenta con tres dispositivos “A0014”, “M0008” , “M0011” y finalmente “Zona Suroriente” con dos dispositivos “A0005” y “M0007”.

5.5. Resultados obtenidos aplicando de modelo Índice Aire y Salud

5.5.1. Enero 2020

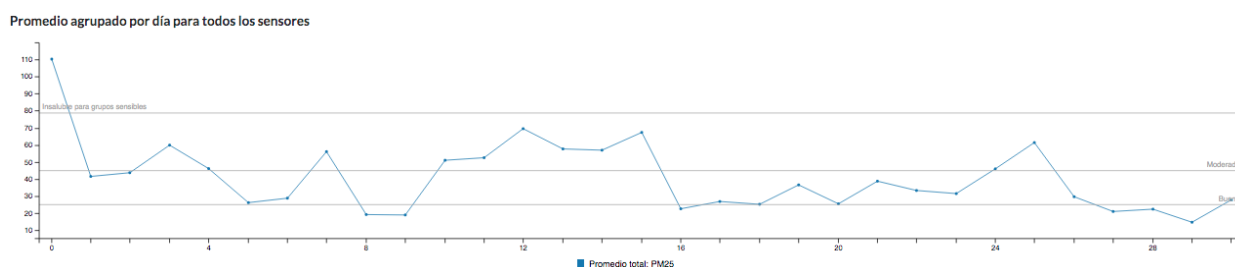


Figura 5.5.1: Promedio diario de PM2.5 para el mes de enero del promedio del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.5.1 se muestran los promedios diarios generados durante el mes de enero por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C.

Se observa que el día 1 de enero fue el día con mayor índice de contaminación llegando a muy mala calidad del aire, por otra parte el día 29 de enero se presentó el día con la mejor calidad del aire.

Promedio agrupado por día para todos los sensores

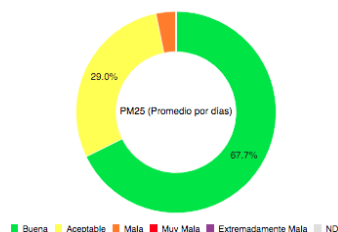


Figura 5.5.2: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de enero de 2020

En la figura 5.5.2 se muestran los porcentajes globales del promedio diario de las concentraciones de pm2.5.

El 67.7 % de los días se encontraron en buena calidad, 29.0 % aceptable y el 3.3 % en muy mala calidad del aire.

Detalle de calidad del aire en base al número total de días y sensores

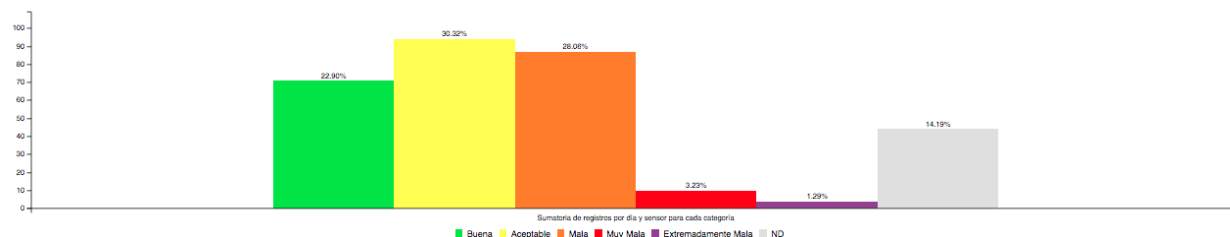


Figura 5.5.3: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de enero del 2020

En la figura 5.5.3 se muestran los porcentajes del total de lecturas obtenidas, en total se obtuvo 22.90 % de calidad buena, 30.32 % de calidad aceptable, 28.06 de calidad mala, 3.23 % calidad muy mala, 1.29 % de calidad extremadamente mala y finalmente el 14.19 % de las lecturas no fueron validas.

Mes: 2020-01 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

CBV																																Buscar	
Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Promedio	
A0005 - Preparatoria y Universidad 16 de Septiembre Campus González Ortega	126.36	-	-	-	-	45.88	46.34	83.04	25.63	21.65	55.33	75.56	71.39	74.72	71.76	85.11	27.44	36.65	35.43	51.71	19.22	44.71	49.36	41.43	64.83	70.72	39.98	31.9	22.02	18.34	36.59	50.82	
A0013 - Difosa Oficinas	67.5	35.4	42.25	47.99	48.32	15.1	20.32	52.38	12.36	15.34	68.47	41.44	75.45	54.89	41.24	67.27	15	7.13	6.6	25.2	26.55	33.83	27.51	16.71	28.88	54.4	23.22	15.94	36.69	-	-	35.49	
A0014 - Residencial Gran Señoría	56.78	33.19	36.66	58.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33.14	25.09	32.6	46.1	22.32	12.79	16.81	1.26	-	30.47	
A0035 - Mario Soto Negocios	151.67	53.04	61.37	91.48	62.61	33.43	38.51	76.02	25.25	25.56	55.99	62.64	83.3	71.82	70.49	78.62	32.46	33.13	30.71	47.69	29.03	55.46	39.75	39.85	60.01	78.85	39.88	28.25	27.49	24.78	32.54	53.29	
M0003 - Santorales	151.17	55.49	64.43	63.24	58.97	43.35	48.05	59.06	25.61	28.54	73.45	73.62	97.86	61.41	72.74	65.91	28.63	40.73	55.84	56.03	45.4	50.81	45.54	53.28	66.8	81.15	46.51	36.34	32.83	30.8	39.64	56.56	
M0007 - Pedregal	152.59	54.63	37.99	-	-	-	-	-	-	-	28.71	54.99	64.09	65.93	74.62	83.08	26.51	39.46	31.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	59.57	
M0008 - Villa del Cedro 1	162.35	37.06	32.49	68.5	39	17.64	15.07	48.88	19.89	13.01	34.48	40.06	50.8	49.85	47.42	64.26	29.05	31.16	17.37	26.69	17.21	27.76	29.88	27.32	51.44	45.25	25.65	17.96	16.99	8.13	22	36.70	
M0011 - Las Garzas	41.14	27.67	28.6	37.45	31.09	8.92	6.78	32.83	10.24	12.98	43.54	38.88	41.53	42.79	39.06	43.92	16.79	4.55	3.13	15.99	18.9	30.94	22.03	19.67	22.76	47.94	18.62	9.18	12.48	7.96	11.15	29.78	
M0013 - Jardines del Lago	137.37	41.91	58.37	59.41	47.23	24.73	41.19	49.74	19.62	19.82	33.74	44.15	82.42	53.7	54.18	64.61	19.23	33.55	29.97	45.98	33.69	37.81	34.32	34.52	49.25	69.79	27.6	19.14	20.35	14.21	30	43.23	
M0014 - Los Pinos	53.67	35.32	37.09	51.5	35.38	20.34	13.96	46.4	14.72	14.48	45.13	41.05	50.62	43.62	40.61	52.69	13.94	15.08	12.81	23.17	23.64	28.59	28.01	22.29	37.39	58.1	22.77	17.36	15.34	12.15	21.96	30.61	
Promedio día	110.28	41.52	43.69	59.86	46.13	26.16	28.76	56.04	19.16	18.92	50.98	52.49	69.52	57.64	56.90	67.33	22.56	26.83	25.18	36.56	25.45	38.74	33.28	31.46	45.97	61.37	29.62	20.96	22.33	14.67	27.70	40.91	

Figura 5.5.4: Promedio diario de cada sensor para el contaminante PM2.5 en el mes de enero del 2020

La figura 5.5.4 muestra el promedio diario de índice de calidad del aire generado por cada uno de los sensores. Los sensores A0014 y M0007 presentaron fallas durante 19 días, esto debido a problemas con el internet y/o corriente eléctrica en el lugar.

En total 8 sensores cumplieron con más del 70 % de lecturas por hora, en base a esto se determina que el sensor M0003 ubicado en “santorales” es el sensor con peor calidad del aire mostrando un promedio de 56.56, por otra parte el sensor M0011 ubicado en la colonia “Las Garzas” presentó el mejor promedio de calidad del aire obteniendo un índice de 23.78.

5.5.2. Febrero 2020

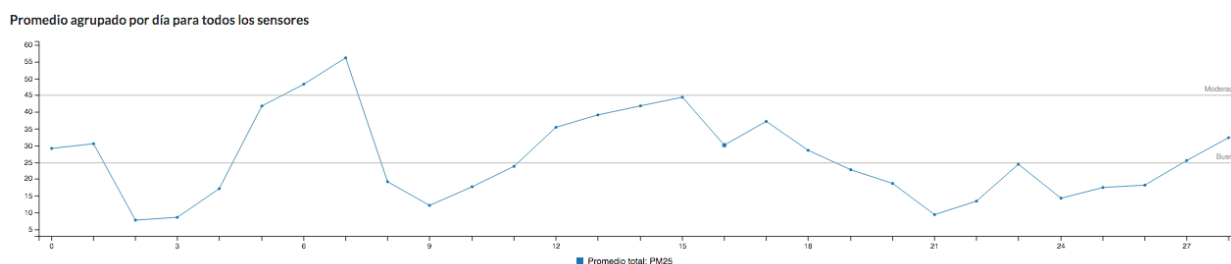


Figura 5.5.5: Promedio diario de PM2.5 para el mes de febrero del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.5.5 se muestran los promedios diarios generados durante el mes de enero por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C.

Se observa que el día 7 de febrero fue el día con mayor índice de contaminación llegando a mala calidad del aire, por otra parte el día 2 de febrero se presentó el día con la mejor calidad del aire.

Promedio agrupado por día para todos los sensores

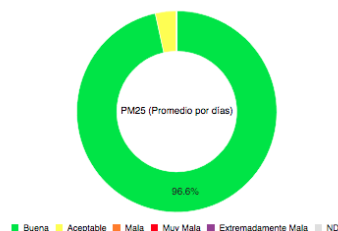


Figura 5.5.6: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de febrero del 2020

En la figura 5.5.6 se muestran los porcentajes globales del promedio diario de las concentraciones de pm2.5.

El 48.3 % de los días se encontraron en buena calidad, 44.8 % aceptable y 6.9 % en mala calidad del aire.

Detalle de calidad del aire en base al número total de días y sensores

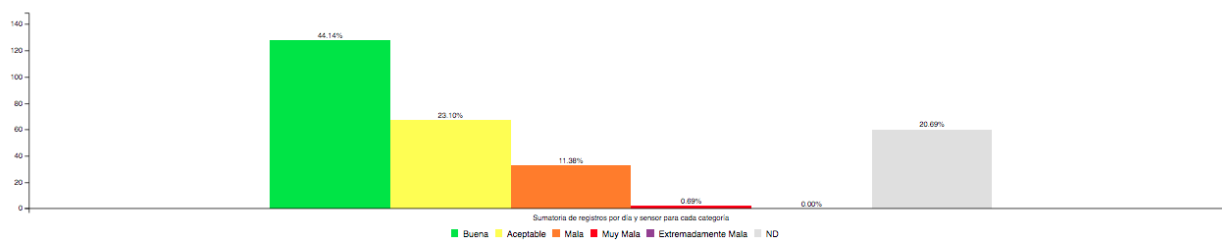


Figura 5.5.7: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de febrero del 2020

En la figura 5.5.7 se muestran los porcentajes del total de lecturas obtenidas, en total se obtuvo 44.14 % de calidad buena, 23.10 % de calidad aceptable, 11.38 de calidad mala, 0.69 % calidad muy mala, 0 % de calidad extremadamente mala y finalmente el 20.69 % de las lecturas no fueron validas.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	Promedi	
A0005 - Preparatoria y Universidad 16 de Septiembre Campus González Ortega	37.16	39.47	8.6	7.62	16.66	35.3	54.78	55.71	14	12.98	17.96	23.97	29.92	41.65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19.64	25.24	32.29	23.51	26.91	
A0013 - Difusa Oficinas	1.13	9.87	3.81	6.7	14.71	41	37.65	52.69	15.95	6.3	16.68	16.74	31.11	24.8	31.21	34.64	29.2	28.92	23.25	16.46	12.82	11.92	9.98	24.48	8.06	17.77	15.67	23.64	31.56	20.44	
A0014 - Residencial Gran Segovia	-	-	-	15.51	16.71	44.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	10.26	15.17	-	-	-	-	-	18.00	
A0035 - Mario Soto Negocios	39.89	39.47	10.66	5.67	19.85	45.93	56.99	64.64	20.85	22.77	25.08	29.69	46.49	47.21	54.09	63.77	35.47	49.7	32.78	29.11	17.53	9.71	11.47	32.9	15.3	22.24	19.44	24.36	34.64	32.06	
M0003 - Santorales	40.53	62.66	22.8	34.62	36.06	60.99	74.15	80.92	49.99	27.15	34.25	52.02	77.12	81.15	58.31	58.99	48.57	55.37	51.13	47.98	48.57	25.3	48.44	46.64	39.16	39.32	44.19	67.66	66.66	51.06	
M0007 - Pedregal	39.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22.37	21.35	27.74
M0008 - Villa del Cedro 1	42	23.94	9.01	1.58	11.01	34.69	42.75	50.73	9.25	9.1	11.76	16.87	21.58	28.16	35.15	34.73	22.9	29.32	25.2	18.43	10.59	5.17	6.36	16.84	9.74	9.29	11.43	16.78	18.15	20.82	
M0011 - Las Garzas	-	14.55	9.28	9.36	5.55	17.85	37.09	32.57	40.87	30.39	9.38	7.13	11.88	25.6	15.35	29.03	37.44	20.01	26.31	18.95	10.79	8.99	4.94	5.93	17.6	5.81	3.78	4.41	12.43	31.65	16.36
M0013 - Jardines del Lago	29.33	41.05	9.57	9.67	11.54	39.58	45.94	61.66	14.69	10.94	17.2	20.92	34.03	45.45	48.69	42.18	30.9	38.37	27.4	22.41	20.71	9.31	9.43	23.52	12.19	14.42	16.94	25.32	37.55	26.03	
M0014 - Los Pinos	17.98	18.43	9.86	5.99	9.71	37.1	41.49	42.41	8.35	5.17	11.35	18.1	22.47	29.21	36.26	37.13	23.65	32.37	21.15	14.14	11.31	6.51	6.03	18.05	9.46	13.46	12.96	15	26.14	18.94	
Promedio día	29.12	30.52	7.71	8.55	17.10	41.78	48.29	56.17	19.18	12.10	17.66	23.77	35.42	39.12	41.82	44.41	30.19	37.19	28.55	22.76	18.65	9.36	13.36	24.40	14.25	17.44	18.16	25.52	32.33	26.37	

Figura 5.5.8: Promedio diario de cada sensor para el contaminante PM2.5 en el mes de febrero del 2020

La figura 5.5.8 muestra el promedio diario de índice de calidad del aire generado por cada uno de los sensores. Los sensores A0005, A0014 y M0007 presentaron fallas durante 11, 23 y 26 días consecutivamente, esto debido a problemas de Internet y/o corriente eléctrica en el lugar.

En total 7 sensores cumplieron con más del 70 % de lecturas por hora, en base a esto se determina que el sensor M0003 ubicado en “santorales” es el sensor con peor calidad del aire mostrando un promedio de 51.06, por otra parte el sensor M0011 ubicado en la colonia “Las Garzas” presentó el mejor promedio de calidad del aire obteniendo un índice de 16.26.

5.5.3. Marzo 2020

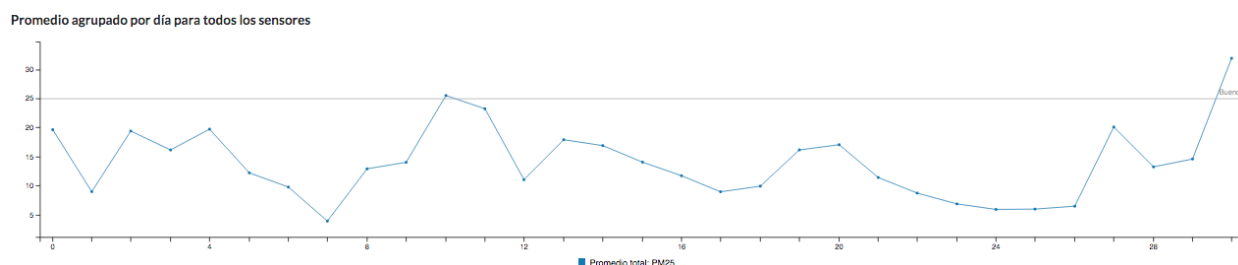


Figura 5.5.9: Promedio diario de PM2.5 para el mes de marzo del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.5.9 se muestran los promedios diarios generados durante el mes de enero por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C.

Se observa que el día 30 de marzo fue el día con mayor índice de contaminación llegando a calidad del aire moderada, por otra parte el día 7 de marzo se presentó el día con la mejor calidad del aire.

Promedio agrupado por día para todos los sensores



Figura 5.5.10: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de marzo de 2020

En la figura 5.5.10 se muestran los porcentajes globales del promedio diario de las concentraciones de pm2.5.

El 93.5 % de los días se encontraron en buena calidad y el 6.5 % aceptable.

Detalle de calidad del aire en base al número total de días y sensores

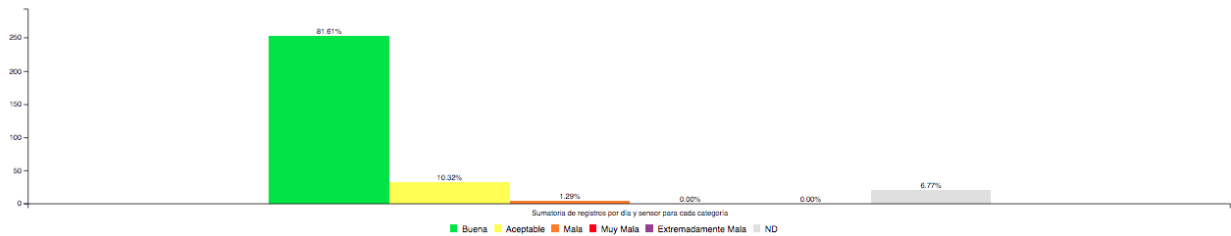


Figura 5.5.11: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de marzo del 2020

En la figura 5.5.11 se muestran los porcentajes del total de lecturas obtenidas, en total se obtuvo 81.61 % de calidad buena, 10.32 % de calidad aceptable, 1.29 de calidad mala, 0 % calidad muy mala, 0 % de calidad extremadamente mala y finalmente el 6.77 % de las lecturas no fueron validas.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Promedio
A0005 - Preparatoria y Universidad 16 de Septiembre Campus González Ortega	12	4.02	15.8	7.09	21.94	11.89	8.19	0.83	8.28	11.91	29.66	22.07	9.35	10.47	13.84	12.68	6.74	8.53	7.51	17.64	16.86	11.3	4.36	4.12	1.86	1.89	3.52	18.99	10.56	10.48	41.49	12.09
A0013 - Difusa Oficinas	7.93	6.12	15.44	14.33	18.29	10.54	16.79	3.95	19.15	13.2	24.85	22.84	11.29	22.41	12.38	14.01	13.34	4.64	8.56	16.4	9.83	10.31	6.04	4.19	3.26	2.71	3.67	18.85	6.58	13.77	22.5	12.05
A0014 - Residencial Gran Segovia	54.74	-	-	-	-	-	-	9.77	12.96	10.7	23.99	24.6	10.85	12.02	18.63	12.15	16.25	7.31	10.68	13.76	19.45	8.07	6.77	8.06	6.77	5.25	4.63	13.3	14.19	13.06	24.61	14.34
A0035 - Mario Soto Negocios	8.84	10.3	19	15.56	24.65	16.21	10.84	1.62	14.77	11.38	26.98	23.9	13.91	22.51	14.71	13.8	11.12	7.34	16.33	17.89	18.69	12.27	7.32	6.29	5.16	4.87	11.66	20.75	9.62	12.85	30.73	14.25
M0003 - Sertoriales	33.77	36.67	37.99	61.59	-	-	21.32	21.78	32.96	44.25	39.03	39.32	32.08	39.22	38.54	41.84	35.52	29.56	26.52	36.54	33.97	31.45	33.3	25.24	26.29	28.78	29.04	42.39	34.1	37.47	63.29	35.65
M0007 - Pedregal	12.78	6.62	27.41	5.97	21.3	15.64	10.55	2.58	10.71	11.23	27.11	24.7	7.5	12.25	15.95	15.83	6.07	7.37	9.36	15.54	-	-	-	-	3.83	2.44	3.74	21.44	13.19	17.83	48.47	13.97
M0008 - Villa del Cedro 1	9.82	2.39	11.92	4.57	14.02	8.62	6.95	0.52	6.88	7.18	20.59	17.83	4.99	8.48	12.41	7.19	2.92	3.54	5.37	11.26	74.2	7.33	2.84	7.38	1.63	3.63	3.09	10.57	16.83	9.2	24.9	8.64
M0011 - Las Garzas	43.64	-	-	-	-	-	2.96	0.3	6.24	7.86	19.92	17.24	4.97	7.02	11.52	5.3	3.79	2.42	6.14	8.01	-	2.67	4.36	2.03	1.85	1.48	2.08	13.31	6.56	5.66	19.92	8.31
M0013 - Jardines del Lago	6.57	2.99	14.12	11.84	21.93	14.74	2.8	0.24	5.82	8.6	23.08	23.15	8.17	19.89	13.43	10.12	6.52	3.28	3.56	12.08	14.09	11.04	4.19	2.49	1.8	0.58	2.37	32.09	7.3	10.83	24.3	10.87
M0014 - Los Pinos	7.83	2.81	13.46	8.25	14.66	7.63	7.67	1.19	13.04	13.73	19.95	17.67	7	15.66	17.38	7.42	14.56	15.2	4.92	11.64	9.16	8.06	9.06	1.73	6.34	7.7	0.65	-	-	-	19.08	10.19
Promedio día	19.63	8.94	19.39	16.13	19.71	12.18	9.74	3.88	12.88	14.00	25.51	23.23	11.01	17.89	16.88	14.03	11.88	8.92	9.88	16.14	17.03	11.39	8.69	6.83	5.88	5.93	6.44	26.09	13.21	14.57	31.93	13.99

Figura 5.5.12: Promedio diario de cada sensor para el contaminante PM2.5 en el mes de marzo del 2020

La figura 5.5.12 muestra el promedio diario de índice de calidad del aire generado por cada uno de los sensores.

En total los 10 sensores cumplieron con más del 70 % de lecturas por hora, en base a esto se determina que el sensor M0003 ubicado en “santorales” es el sensor con peor calidad del aire mostrando un promedio de 35.65, por otra parte el sensor M0011 ubicado en la colonia “Las Garzas” presentó el mejor promedio de calidad del aire obteniendo un índice de 8.31.

5.5.4. Abril 2020

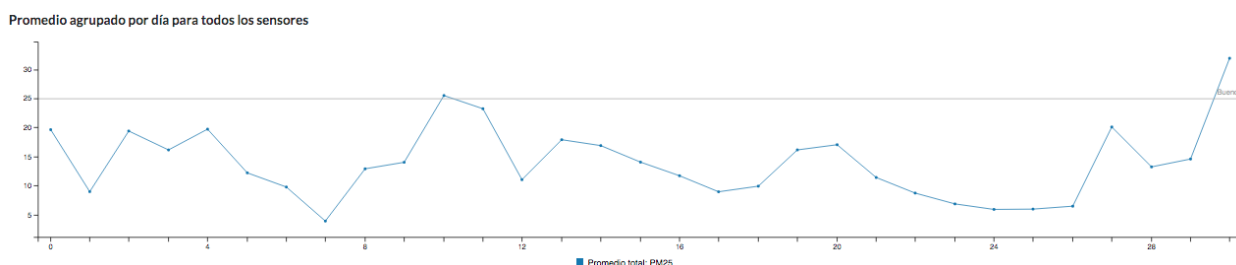


Figura 5.5.13: Promedio diario de PM2.5 para el mes de abril del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.5.13 se muestran los promedios diarios generados durante el mes de abril por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C.

Se observa que el día 10 de abril fue el día con mayor índice de contaminación llegando a calidad del aire moderada, por otra parte el día 7 de abril se presentó el día con la mejor calidad del aire.

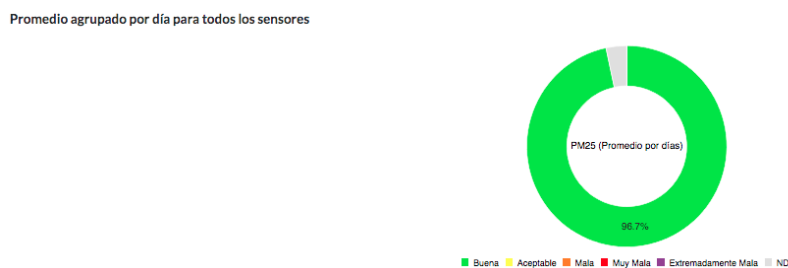


Figura 5.5.14: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de abril de 2020

En la figura 5.5.14 se muestran los porcentajes globales del promedio diario de las concentraciones de pm2.5.

El 93.3 % de los días se encontraron en buena calidad, 3.3 % aceptable y el 3.3 % sin datos.

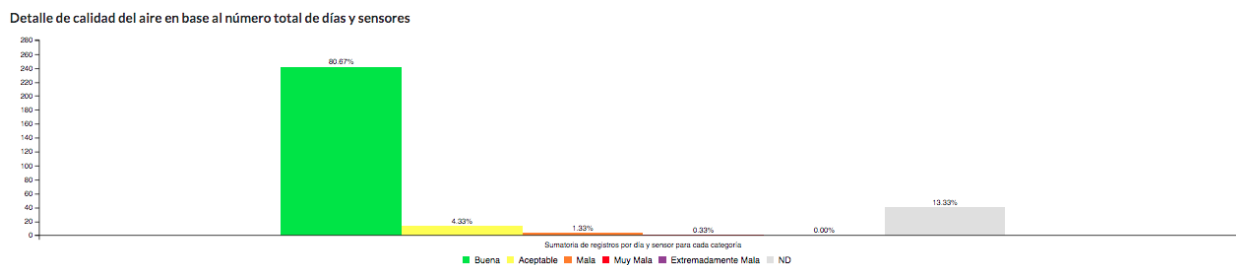


Figura 5.5.15: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de abril del 2020

En la figura 5.5.15 se muestran los porcentajes del total de lecturas obtenidas, en total se obtuvo 80.67 % de calidad buena, 4.33 % de calidad aceptable, 1.33 de calidad mala, 0.33 % calidad muy mala, 0 % de calidad extremadamente mala y finalmente el 13.33 % de las lecturas no fueron validas.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Promedio
A0005 - Preparatoria y Universidad 16 de Septiembre Campus González Ortega	23.05	11.42	9.33	7.46	10.55	6.19	4.38	2.6	5.78	3.34	14.44	-	2.76	10.55	17.08	15.43	8.5	2.13	5.44	4.98	4.68	7.97	15.12	13.83	16.53	3.61	7.15	10.63	7.58	7.66	8.97
A0013 - Difosa Oficinas	30.46	15.07	12.32	9.69	12.28	-	6.32	5.66	11.49	7.41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42.24	15.59	9.62	13.3	16.29	14.11	22.14	15.25
A0014 - Residencial Gran Segovia	24.41	13.89	8.05	11.6	12.79	11.83	9.36	7.37	7.72	3.53	10.87	-	3.19	10.41	15.7	10.22	10.08	3.38	12.36	10.76	9.46	9.21	12.89	10.01	17.69	6.12	4.37	14.26	12.12	11.44	10.58
A0035 - Mario Soto Negocios	33.07	16.8	10.38	11.83	16.45	9.3	6.95	7.8	12.94	8.23	25.77	-	7.28	11.88	17.38	14.37	16.29	7.49	7.78	9.79	8.18	13.89	15.27	20.85	22.96	9.33	7.04	14.43	15.43	15.24	13.59
M0003 - Santorales	62.09	36.84	32.13	42.83	43.26	35.62	36.74	34.89	45.18	45.63	9.7	-	5.8	19.42	14.34	21.57	13.16	4.05	13.25	12.21	10	13.97	24.21	18.82	20.93	10.69	8.62	20.19	18.01	15.81	24.48
M0007 - Pedregal	23.16	14.77	7.67	10.78	20.34	9.91	2.52	3.24	7.49	6.17	15.16	-	4.38	16.2	23.94	18.4	9.1	4.52	11.33	6.09	8.62	11.02	21.29	18.69	30.4	8.95	11.56	12.67	8.72	11.02	11.97
M0008 - Villa del Cedro 1	21.25	10.91	9.88	4.36	10.69	7.34	4.65	1.32	4.6	1.25	5.13	-	3.21	7.86	11.68	11.55	4.82	8.7	6.54	4.07	4.16	7.04	13.78	12.58	13.14	5.96	3.6	9.85	9.41	7.38	7.80
M0011 - Las Garzas	25.98	5.32	6.76	11.68	8.44	8.01	5.92	0.36	4.62	1.37	4.12	-	3.34	5.13	6.6	8.06	7.43	1.65	-	-	-	-	-	-	14.30	3.87	2.52	9.04	11.56	9.02	12.19
M0013 - Jardines del Lago	31.94	11.06	7.31	9.28	14.45	6.67	3.62	0.73	6.96	2.01	13	-	2.99	10.68	14.33	10.87	8.72	2.21	5.92	5.65	4.55	9.12	13.18	15.58	16.1	4.83	3.99	9.91	10.43	10.39	9.18
M0014 - Los Pinos	48.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.12	9.68	11.81	11.38	12.15	7.2	11.14	4.43	7.32	8.91	11.49	10.55	3.65	1.79	7.29	7.07	7.4	10.35
Promedio día	32.43	15.12	11.54	13.26	16.56	11.86	8.94	7.11	11.87	11.80	12.25	-	4.12	10.65	14.41	13.59	9.94	5.14	6.73	8.09	6.76	9.94	15.58	18.23	28.23	6.66	6.39	12.66	11.43	11.94	12.22

Figura 5.5.16: Promedio diario de cada sensor para el contaminante PM2.5 en el mes de abril del 2020

La figura 5.5.16 muestra el promedio diario de índice de calidad del aire generado por cada uno de los sensores. Los sensores A0013 y M0014 presentaron fallas durante 14 y 12 días consecutivamente, esto debido a problemas con Internet y/o corriente eléctrica en el lugar.

En total 8 sensores cumplieron con más del 70 % de lecturas por hora, en base a esto se determina que el sensor M0003 ubicado en “santorales” es el sensor con peor calidad del aire mostrando un promedio de 24.48, por otra parte el sensor M0008 ubicado en la colonia “Villa del Cedro 1” presentó el mejor promedio de calidad del aire obteniendo un índice de 7.80.

5.5.5. Mayo 2020

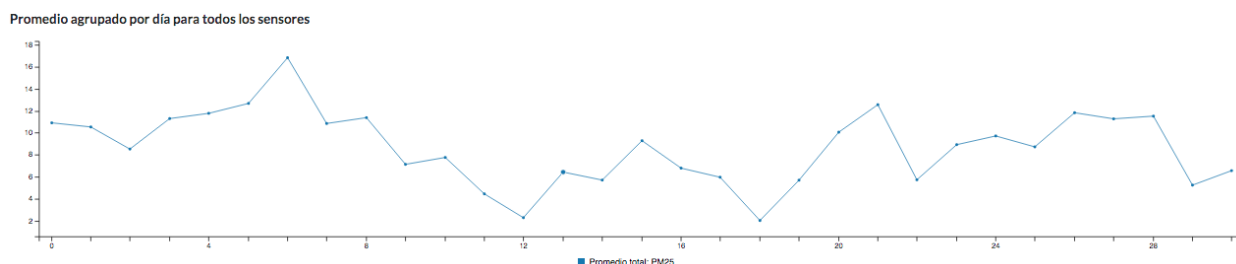


Figura 5.5.17: Promedio diario de PM2.5 para el mes de mayo del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.5.17 se muestran los promedios diarios generados durante el mes de mayo por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C..

Se observa que el día 1 de mayo fue el día con mayor índice de contaminación llegando a muy mala calidad del aire, por otra parte el día 29 de mayo se presentó el día con la mejor calidad del aire.



Figura 5.5.18: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de mayo de 2020

En la figura 5.5.18 se muestran los porcentajes globales del promedio diario de las concentraciones de pm2.5.

El 100 % de los días se encontraron en buena calidad.

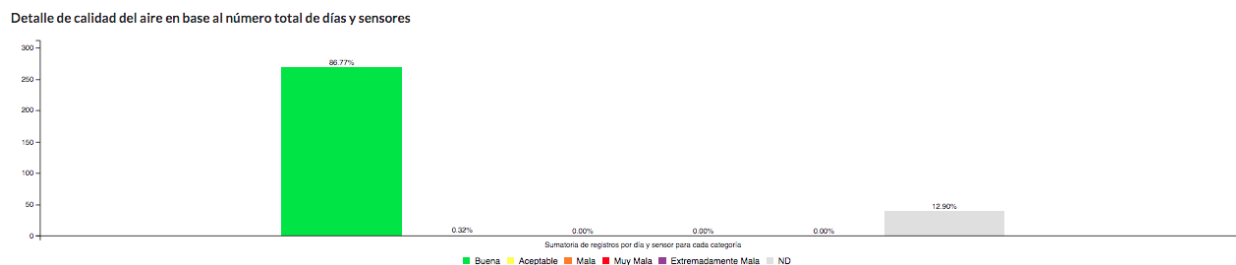


Figura 5.5.19: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de mayo del 2020

En la figura 5.5.19 se muestran los porcentajes del total de lecturas obtenidas, en total se obtuvo 86.77 % de calidad buena, 0.32 % de calidad aceptable, 0 % de calidad mala, 0 % calidad muy mala, 0 % de calidad extremadamente mala y finalmente el 12.90 % de las lecturas no fueron validas.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Promedio
A0005 - Preparatoria y Universidad 16 de Septiembre Campus González Ortega	8.77	7.77	6.68	10.92	12.87	13.25	12.81	8.64	9.37	5.6	6.65	3.14	1.81	5.16	5.29	7.77	4.45	6.07	1.19	4.1	9.27	11.54	5.38	7.28	11.21	8.5	13.21	11.71	5.67	6.17	5.32	7.81
A0013 - Difusa Oficinas	17.04	20.49	16.56	12.14	18.88	14.41	17.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16.77
A0014 - Residencial Gran Segovia	10.02	10.08	7.17	14.08	14.55	12.02	18.17	12.48	12.61	7.45	7.5	3.92	2.77	6.08	3.46	-	-	-	-	-	-	6.29	5.12	9.54	8.44	10.17	10.87	15.54	13.34	5.23	7.37	9.39
A0035 - Mario Soto Negocios	15.38	12.73	10.87	14.84	12.06	15.38	19.34	14.14	13.59	7.32	11.89	10.57	3.63	-	8.88	14.59	11.11	10.7	5.39	7.84	9.64	17.72	7.54	12.18	12.46	10.37	15.67	16.47	14.59	6.54	16.43	11.94
M0003 - Sanctoriales	16.11	13.32	8.75	15.27	12.99	15.52	20.18	15.44	14.42	8.56	9.66	4.93	2.59	11.1	6.42	14.88	9.02	6.94	2.17	7.56	14.98	22.72	7.58	12.98	10.98	14.93	14.79	11.45	16.26	8.33	4.7	11.50
M0007 - Pedregal	9.86	9.21	9.04	17.34	16.97	20.2	18.56	-	-	-	-	-	-	-	6.94	8.99	10.37	6.52	6.07	2.65	8.22	16.53	14.23	9.57	13.23	16.41	13.42	16.07	-	-	-	12.35
M0008 - Villa del Cedro 1	7.3	8.42	6.15	8.65	7.64	13.13	13.53	8.34	8.59	8.66	5.77	2.99	1.03	4.99	5.54	5.46	4.86	4.45	0.94	3.93	15.05	10.91	4.72	8.63	7.22	4.55	7.25	7.48	9.68	3.73	4.5	6.87
M0011 - Las Garzas	7.96	8.97	6.59	5.44	6.52	6.5	13.28	8.94	9.87	7.76	8.81	4.41	2.35	4.81	3.56	7.43	8.06	5.75	1.78	2.3	4.55	8.58	3.14	4.35	6.95	6.33	10.28	13.65	11.29	4.12	3.84	6.71
M0013 - Jardines del Lago	10.23	8.18	5.77	9.85	10	10.87	14.17	11	14.05	6.97	6.69	3.2	2.1	6.39	4.62	7.17	5.45	4.6	1.48	4.05	7.37	13.43	4.85	7.3	9.25	6.44	10.82	9.16	5.66	5.2	3.88	7.56
M0014 - Los Pinos	6.51	6.14	7.84	4.5	4.82	5.64	10.37	7.79	8.52	5.75	5.32	2.43	1.4	5.36	2.57	6.65	4.84	3.1	0.7	7.52	3.18	8	3.87	4.2	4.5	2.78	7.35	6.69	7.84	2.62	2.57	5.21
Promedio día	10.91	10.53	8.52	11.29	11.77	12.67	16.83	10.85	11.38	7.13	7.76	4.45	2.28	6.43	5.70	9.28	6.79	5.96	2.03	5.69	10.06	12.56	5.73	8.52	9.71	8.72	11.82	11.27	11.52	5.24	6.56	8.72

Figura 5.5.20: Promedio diario de cada sensor para el contaminante PM2.5 en el mes de mayo del 2020

La figura 5.5.20 muestra el promedio diario de índice de calidad del aire generado por cada uno de los sensores. El sensor A0013 presentó fallas durante 24 días, esto debido a problemas con Internet y/o corriente eléctrica en el lugar.

En total 9 sensores cumplieron con más del 70 % de lecturas por hora, en base a esto se determina que el sensor M0007 ubicado en “Pedregal” es el sensor con peor calidad del aire mostrando un promedio de 12.35, por otra parte el sensor M0014 ubicado en la colonia “Los Pinos” presentó el mejor promedio de calidad del aire obteniendo un índice de 5.21.

5.5.6. Junio 2020

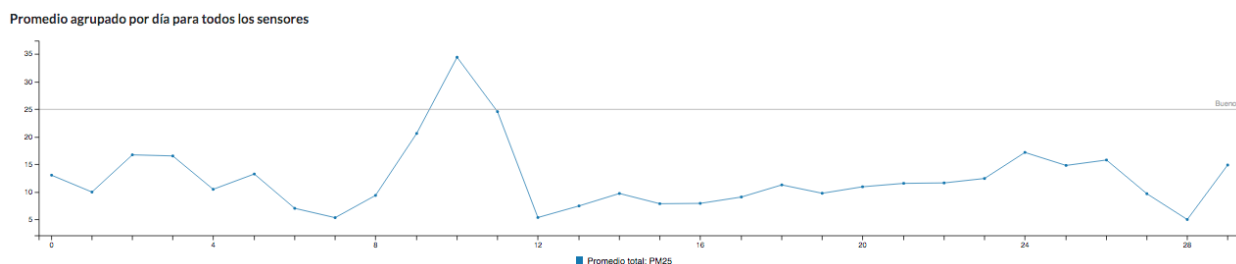


Figura 5.5.21: Promedio diario de PM2.5 para el mes de junio del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.5.21 se muestran los promedios diarios generados durante el mes de junio por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C..

Se observa que el día 10 de junio fue el día con mayor índice de contaminación llegando a calidad del aire moderada, por otra parte el día 28 de junio se presentó el día con la mejor calidad del aire.

Promedio agrupado por día para todos los sensores

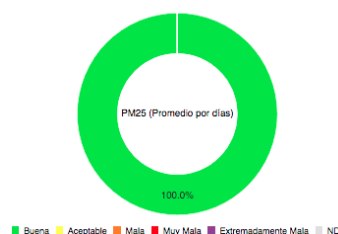


Figura 5.5.22: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de junio de 2020

En la figura 5.5.22 se muestran los porcentajes globales del promedio diario de las concentraciones de pm2.5.

El 93.3 % de los días se encontraron en buena calidad y el 6.7 % aceptable.

Detalle de calidad del aire en base al número total de días y sensores

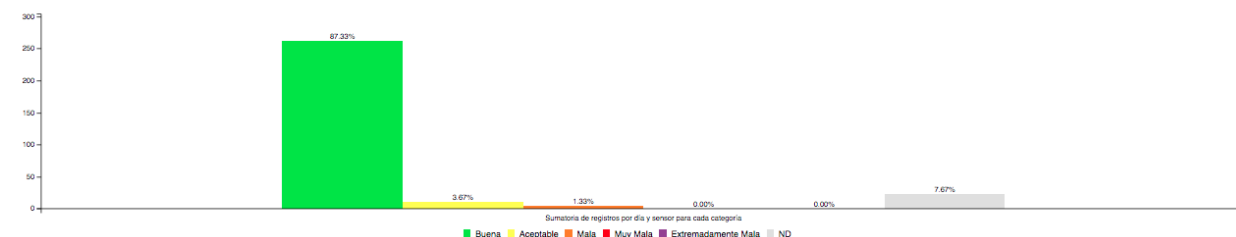


Figura 5.5.23: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de junio del 2020

En la figura 5.5.23 se muestran los porcentajes del total de lecturas obtenidas, en total se obtuvo 87.33 % de calidad buena, 3.67 % de calidad aceptable, 1.33 % de calidad mala, 0 % calidad muy mala, 0 % de calidad extremadamente mala y finalmente el 7.67 % de las lecturas no fueron validas.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Promedio	
A0005 - Preparatoria y Universidad 16 de Septiembre Campus González Ortega	17.7	17.73	23.28	23.35	9.42	6.15	4.03	3.9	10.45	15.95	33.28	20.54	5.74	6.25	8.5	8.01	9.15	9.91	11.45	15.9	17.67	13.95	13.14	16.63	22.92	16.66	21.53	-	1.89	13.68	13.72	
A0013 - Difosa Oficinas	35.59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46.13	13.95	14.64	14.7	17.14	12.08	12.15	15.22	11.42	13.81	17.86	16.78	13.93	19.58	18.36	18.72	20.04	9.12	18.68	18.00	
A0014 - Residencial Gran Segovia	10.37	10.54	20.94	20.04	11.23	5.92	7.51	5.59	4.27	14.64	32.21	26.8	4.43	5.73	14.19	10.53	8.68	10.2	11.57	13.06	13.22	14.29	10.87	12.09	19.36	15.04	17.19	10.97	4.53	14.46	12.68	
A0035 - Mario Soto Negocios	13.12	8.7	19.88	20.84	18.11	55.42	13.28	12.73	12.84	20.18	35.88	25.9	6.32	12.02	9.48	8.23	11.62	10.83	12.26	11.25	12.42	13.22	16.08	15.25	16.45	14.65	16.31	10.75	19.13	22.68	16.56	
M0003 - Santorales	12.91	12.24	18.43	17.72	11.77	8.38	9.16	8.18	12.29	23.84	52.1	24.23	4.28	9.4	12.4	9.5	7.41	12.15	17.12	11.7	15.53	16.28	16.09	17.18	16.63	17.61	17.49	9	3.01	15.15	14.71	
M0007 - Pedregal	10.21	11.15	18.96	13.59	9.38	8.76	7.56	3.98	13.87	16.4	32.27	21.46	4.05	8.94	-	9.58	6.47	10.46	15.19	6.82	8.43	10.91	9.91	11.22	18.2	15.41	14.8	8.84	3.72	13.6	11.80	
M0008 - Villa del Cedro 1	7.45	7.32	13.02	17.19	-	-	-	-	-	-	59.85	26.41	19.07	2.12	6.67	8.01	5.05	5.03	6.7	7.27	6.28	7.28	7.62	7.36	7.3	13.68	11.8	12.09	6.47	1.91	9.58	11.30
M0011 - Las Garzas	9.2	8.95	14.46	-	-	-	-	-	-	3.68	8.92	32.11	23.24	6.89	3.07	8.23	4.43	4.76	5.27	7.7	6.93	6.74	9.04	9.44	10.02	14.74	13.72	14.31	8.38	2.47	16.47	10.11
M0013 - Jardines del Lago	7.82	7.12	10.95	8.16	6.98	6.41	3.99	1.14	14.23	18.09	38.02	20.05	3.45	5.81	5.46	6.04	6.47	8.03	8.74	8.42	7.3	4.97	7.18	11.07	14.73	14.23	13.51	6.05	2	-	9.46	
M0014 - Los Pinos	5.79	6.26	10.52	12.25	6.3	3.61	3.48	1.61	3.16	7.58	27.73	18.2	2.07	1.83	6.33	3.84	5.29	4.84	6.06	5.58	6.77	7.23	9.33	9.53	12.24	10.45	11.83	6.42	1.9	9.57	7.59	
Promedio día	13.02	9.96	16.72	16.52	10.46	13.24	7.00	5.30	9.35	20.61	34.45	24.56	5.33	7.44	9.70	7.84	7.90	9.05	11.26	9.74	10.92	11.54	11.62	12.42	17.15	14.79	15.78	9.66	4.97	14.87	12.44	

Figura 5.5.24: Promedio diario de cada sensor para el contaminante PM2.5 en el mes de junio del 2020

La figura 5.5.24 muestra el promedio diario de índice de calidad del aire generado por cada uno de los sensores. El sensor A0013 presentó fallas durante 10 días , esto debido a problemas con Internet y/o corriente eléctrica en el lugar.

En total 9 sensores cumplieron con más del 70 % de lecturas por hora, en base a esto se determina que el sensor A0035 ubicado en “Mario Soto Negocios” es el sensor con peor calidad del aire mostrando un promedio de 16.56, por otra parte el sensor M0014 ubicado en la colonia “Los Pinos” presentó el mejor promedio de calidad del aire obteniendo un índice de 7.59.

5.5.7. Julio 2020

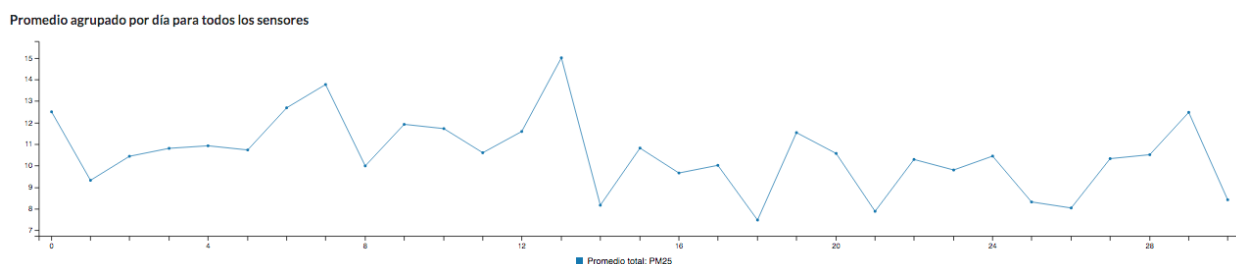


Figura 5.5.25: Promedio diario de PM2.5 para el mes de julio del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.5.25 se muestran los promedios diarios generados durante el mes de julio por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C..

Se observa que el día 13 de julio fue el día con mayor índice de contaminación llegando a muy mala calidad del aire, por otra parte el día 18 de julio se presentó el día con la mejor calidad del aire.

Promedio agrupado por día para todos los sensores



Figura 5.5.26: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de julio de 2020

En la figura 5.5.26 se muestran los porcentajes globales del promedio diario de las concentraciones de pm2.5.

El 100 % de los días se encontraron en buena calidad.

Detalle de calidad del aire en base al número total de días y sensores

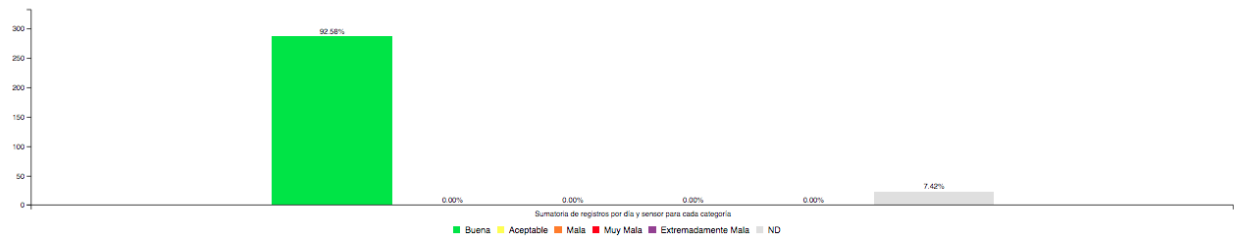


Figura 5.5.27: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de julio del 2020

En la figura 5.5.27 se muestran los porcentajes del total de lecturas obtenidas, en total se obtuvo 92.58 % de calidad buena, 0 % de calidad aceptable, 0 % de calidad mala, 0 % calidad muy mala, 0 % de calidad extremadamente mala y finalmente el 7.42 % de las lecturas no fueron validas.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Promedio
A0005 - Preparatoria y Universidad 16 de Septiembre Campus González Ortega	7.77	7.74	6.92	6.18	7.64	8.65	8.55	10.6	8.83	10.75	7.99	8.6	10.75	13.03	5.99	8.96	7.13	7.23	7.99	11.08	6.45	6.35	7.2	6.48	7.03	6.04	6.14	8.43	7.89	13.35	6.39	8.18
A0013 - Difusa Oficinas	23.08	15.93	17.33	9.36	10.36	15.87	21.19	18.64	18.34	15.61	14.95	10.92	10.39	16.63	13.08	19.64	13.67	12.03	8.39	14.65	19.15	13.82	15.67	17.41	20.07	11.67	12.19	11.71	16.03	14.96	11.91	15.09
A0014 - Residencial Gran Segovia	13.09	9.91	11.13	12.5	11.37	15.48	14.83	16.62	9.1	15.06	13.88	17.94	13.61	21.81	11.81	13.5	13.28	12.73	8.15	17.3	11.32	12.73	12.8	12.7	11.8	10.19	9.99	14.84	11.28	18.52	12.78	13.29
A0035 - Mario Soto Negocios	17.47	14.31	11.47	15.7	14.42	12.92	14.69	17.15	12.96	15.07	-	-	18.32	13.96	14.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14.74
M0003 - Santorales	18.1	13.43	16.45	15.98	11.28	10.81	17.06	13.42	11.54	16.28	18.94	14.19	10.63	15.48	9.18	17.21	10.69	12.15	8.27	16.15	13.3	9.4	11.09	12.88	13.91	11.39	12.96	12.51	14.22	13.83	10.27	13.32
M0007 - Pedregal	10.38	10.11	9.82	12.45	21.29	10.87	14.85	15.79	12.36	11.44	7.22	10.8	14.93	15.48	8.16	9.76	12.32	9.85	12.44	13.19	9.48	8.5	9.99	9.4	9.84	9.32	9.37	13.39	11.05	14.71	10.42	11.74
M0008 - Villa del Cedro 1	8.69	6.66	6.65	6.67	10.47	8.05	9.55	10.3	6.21	8.08	7.75	7.43	9.08	12.08	4.73	8.08	6.76	6.63	6.14	7.93	8.53	5.22	8.82	5.7	6.13	6.13	5.34	7.19	6.53	9.89	5.5	7.51
M0011 - Las Garzas	13.06	5.71	9.28	6.42	5.11	6.65	10.08	12.85	7.26	9.33	10.22	7.7	8.2	16.65	4.77	6.88	7.26	15.91	3.71	7.04	11.22	4.07	-	7.64	8.79	7.93	5.54	-	15.5	9.01	6.34	8.43
M0013 - Jardines del Lago	6.06	4.38	7.26	9.77	6.35	8.15	8.45	12.55	8.08	9.9	11.6	10.01	12.95	13.25	6.46	7.4	10.46	7.93	10.56	8.67	8.21	5.37	9.77	9.54	10.02	6.71	5.68	7.55	8.86	9.9	6.23	8.64
M0014 - Los Pinos	7.89	5.21	8.03	-	-	-	7.58	9.72	7.2	7.71	7.94	7.8	7.39	11.63	3.89	5.9	5.36	5.67	3.64	7.79	7.46	5.47	6.96	6.44	6.4	3.47	5.11	6.38	9.22	9.09	5.9	6.81
Promedio día	12.50	9.32	10.43	10.89	10.92	10.73	12.68	13.76	9.99	11.92	11.72	10.60	11.58	15.00	8.16	10.81	9.66	10.01	7.48	11.53	10.57	7.68	10.28	9.80	10.44	8.32	8.04	10.33	10.51	12.47	8.42	10.54

Figura 5.5.28: Promedio diario de cada sensor para el contaminante PM2.5 en el mes de julio del 2020

La figura 5.5.16 muestra el promedio diario de índice de calidad del aire generado por cada uno de los sensores. El sensor A0035 presentó fallas durante 18 días , esto debido a problemas con Internet y/o corriente eléctrica en el lugar.

En total 9 sensores cumplieron con más del 70 % de lecturas por hora, en base a esto se determina que el sensor A0013 ubicado en “Difosa Oficinas” es el sensor con peor calidad del aire mostrando un promedio de 15.00, por otra parte el sensor M0014 ubicado en la colonia “Los Pinos” presentó el mejor promedio de calidad del aire obteniendo un índice de 6.81.

5.5.8. Agosto 2020

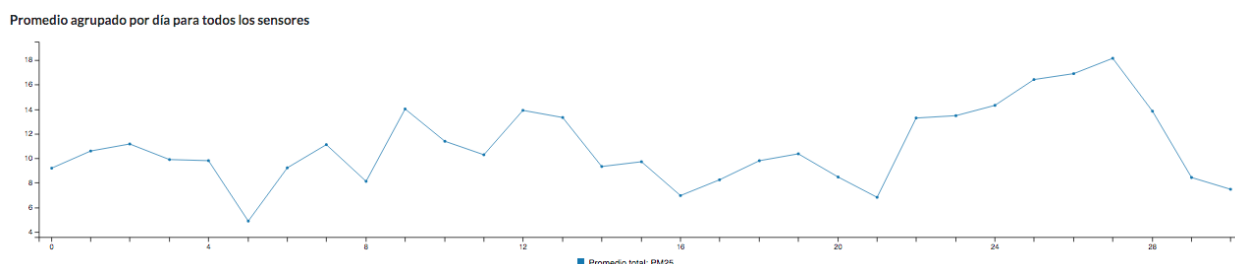


Figura 5.5.29: Promedio diario de PM2.5 para el mes de agosto del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.5.29 se muestran los promedios diarios generados durante el mes de agosto por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C..

Se observa que el día 27 de agosto fue el día con mayor índice de contaminación llegando a muy mala calidad del aire, por otra parte el día 5 de enero se presentó el día con la mejor calidad del aire.



Figura 5.5.30: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de agosto de 2020

En la figura 5.5.30 se muestran los porcentajes globales del promedio diario de las concentraciones de pm2.5.

El 100 % de los días se encontraron en buena calidad.



Figura 5.5.31: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de agosto del 2020

En la figura 5.5.31 se muestran los porcentajes del total de lecturas obtenidas, en total se obtuvo 88.89 % de calidad buena, 0 % de calidad aceptable, 0 de calidad mala, 0 % calidad muy mala, 0 % de calidad extremadamente mala y finalmente el 11.11 % de las lecturas no fueron válidas.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Promedio
A0005 - Preparatoria y Universidad 16 de Septiembre Campus González Ortega	8.38	7.86	8.85	9.29	8.76	1.92	9.72	8.14	8.98	11.49	9.02	8.38	12.04	11.54	6.77	7.08	4.88	7.72	6.85	5.86	6.6	4.73	9.16	10.43	8.35	18.54	14.72	18.17	11.68	4.7	4.4	8.88
A0013 - Difosa Oficinas	13.25	14.95	14.42	11.66	14.78	18.41	16.27	17.58	9.82	21.29	15.14	16.02	14.75	14.22	14.43	17.65	10.52	11.87	15.39	14.8	10.44	12.18	17.61	18.2	15.51	15.17	16.78	17.36	16.57	12.38	12.85	14.94
A0014 - Residencial Gran Segovia	11.71	13.38	13.74	11.88	15.63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.88	20.75	18.08	8.33	19.37	19.16	20.88	19.15	22.28	21.8	18.68	17.3	10.99	16.40
M0003 - Santeales	9.44	13.12	14.07	13.18	11.7	3	13.13	16.12	13.63	19.41	15.72	-	18.21	17.96	10.87	11.42	8.62	8.75	13.06	11.45	6.91	7.56	16.97	14.22	17.6	17.94	18.27	22.5	14.72	9.72	5.92	13.17
M0007 - Pedregal	10.53	11.02	12.23	12.22	13.73	4.71	11.25	17.96	13.33	14.58	11.47	9.35	18.97	17.12	9.99	11.47	7.62	8.95	9.04	9.4	9.61	6.78	11.95	15.49	17.56	19.64	20.3	19.33	15.38	6.5	8.08	12.45
M0008 - Villa del Cedro 1	7.34	7.63	8.5	8.31	7.62	2.46	6.21	7.93	6.84	9.74	8.39	7.24	10.97	10.38	6.42	6.13	4.66	5.75	6.32	5.64	4.69	3.43	8.32	8.46	10.01	13.1	13.46	10.41	10.78	4.43	4.7	7.85
M0011 - Las Garzas	6.64	-	-	-	9.37	3.32	4.73	6.8	3.06	13.13	12.79	11.33	12.61	13.76	9.92	8.95	7.8	10.05	8.82	8.43	8.19	-	-	-	-	-	-	-	11.08	6.95	8.51	8.53
M0013 - Jardines del Lago	7.67	9.45	9.96	8.6	7.89	2.31	7.78	7.92	6.13	13.07	10.28	10.37	13.06	12.35	8.13	8.02	6.02	4.48	9.03	8.99	5.92	5.95	12.35	11.54	-	-	-	-	-	-	-	8.69
M0014 - Los Pinos	7.75	7.09	8.4	5.98	5.69	1.85	4.67	6.4	3.12	9.4	8.24	9.27	10.62	9.21	8.06	6.98	5.5	6.35	7.72	7.8	5.77	5.32	10.08	9.24	9.35	11.35	12.46	12.45	11.76	5.44	4.28	7.66
Promedio día	9.19	10.59	11.16	9.89	9.80	4.87	9.22	11.11	8.11	14.01	11.38	10.28	13.90	13.32	9.32	9.71	6.95	8.24	9.79	10.36	8.47	6.81	13.28	13.47	14.31	16.41	16.90	18.15	13.82	8.43	7.47	10.93

Figura 5.5.32: Promedio diario de cada sensor para el contaminante PM2.5 en el mes de agosto del 2020

La figura 5.5.16 muestra el promedio diario de índice de calidad del aire generado por cada uno de los sensores.

El sensor A0014 presentó fallas durante 13 días , esto debido a problemas con Internet y/o corriente eléctrica en el lugar. En total 9 sensores cumplieron con más del 70 % de lecturas por hora, en base a esto se determina que el sensor A0013 ubicado en “Difosa Oficinas” es el sensor con peor calidad del aire mostrando un promedio de 14.94, por otra parte el sensor M0014 ubicado en la colonia “Los Pinos” presentó el mejor promedio de calidad del aire obteniendo un índice de 7.66.

5.5.9. Septiembre 2020

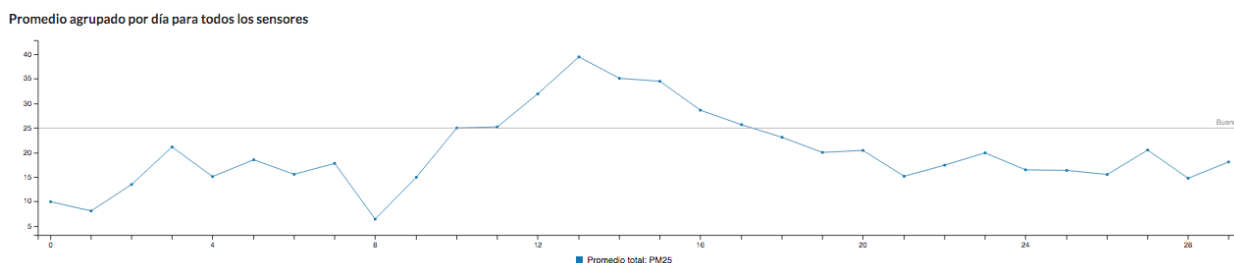


Figura 5.5.33: Promedio diario de PM2.5 para el mes de septiembre del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.5.33 se muestran los promedios diarios generados durante el mes de enero por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C.

Se observa que el día 1 de septiembre fue el día con mayor índice de contaminación llegando a muy mala calidad del aire, por otra parte el día 29 de septiembre se presentó el día con la mejor calidad del aire.



Figura 5.5.34: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de septiembre de 2020

En la figura 5.5.34 se muestran los porcentajes globales del promedio diario de las concentraciones de pm2.5.

El 19.4 % de los días se encontraron en buena calidad, 48.4 % aceptable, 29.0 % mala, y el 3.2 % en muy mala calidad del aire.

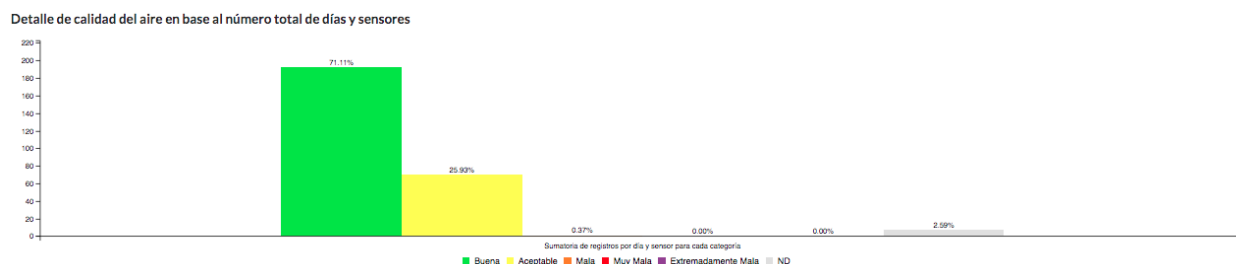


Figura 5.5.35: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de septiembre del 2020

En la figura 5.5.35 se muestran los porcentajes del total de lecturas obtenidas, en total se obtuvo 22.90 % de calidad buena, 30.32 % de calidad aceptable, 28.06 % de calidad mala, 3.23 % calidad muy mala, 1.29 % de calidad extremadamente mala y finalmente el 14.19 % de las lecturas no fueron validas.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Promedio
A0005 - Preparatoria y Universidad 16 de Septiembre Campus González Ortega	6.49	4.21	9.26	18.85	11.82	12.9	10.24	14.83	5.95	16.11	24.35	24.07	32.46	38.41	32.73	30.79	27.19	19.32	18.24	16.05	16.7	12.14	23.07	23.7	12.1	11.8	14.38	17.3	17.84	19.51	18.09
A0013 - Difosa Oficinas	13.33	12.32	17.17	21.78	11.8	26.9	19.33	24.75	13.49	19.83	22.96	22.58	25.78	42.81	35.3	33.68	29.78	29.07	27.4	23.16	23.3	22.34	18.56	17.89	21.35	19.37	17.48	20.82	19.48	19.63	22.45
A0014 - Residencial Gran Segovia	14.39	10.55	21.38	29.41	21.08	26	22.38	21.16	9.8	16.44	29.12	26.87	35.45	39.76	40.43	41.52	34.28	27.44	29.23	23.34	24.19	18.55	26.35	28.51	22.04	21.91	22.82	25.1	16.89	21.26	24.93
M0003 - Santorales	9.33	9.74	17.34	26.56	22	26.55	19.72	18.59	9.14	18.18	31.11	29.27	41.76	48.35	39.97	35.47	31	29.66	28.73	25.1	24.88	19.25	16.72	22.65	16.07	17.02	18.05	25.03	18.9	22.6	24.12
M0007 - Pedregal	9.99	7.32	12.54	25.25	19.24	16.56	14.42	18.05	5.38	16.48	35.85	36.46	38.32	38.99	38.22	38.36	32.52	25.27	22.58	22.27	23.44	16.91	22.68	29.41	18.51	18.48	17.73	23.74	21.13	24.4	23.03
M0008 - Villa del Cedro 1	6.18	6.03	9.15	15.38	12.87	11.07	10.56	12.96	1.8	10.6	24.22	25.67	35.55	34.55	30.83	31.27	25.73	20.46	16.36	15.95	16.23	10.06	13.64	17.27	10.71	11.42	15.63	16.73	11.85	13.55	16.48
M0011 - Las Garzas	8.08	8.37	12.54	17.2	11.45	14.62	14.49	18.2	3.42	9.37	14.61	16.23	23.21	34.51	33.54	35.02	26.89	35.85	20.14	17.72	19.45	12.3	8.75	11.96	21.21	19.17	11.35	14.89	5.89	14.09	17.14
M0013 - Jardines del Lago	15.69	-	-	-	-	-	-	-	6.27	18.23	27.66	27.76	32.16	41.56	34.8	32.64	26.6	34.59	24.03	18.18	18.68	13.33	18.09	15.77	12.91	14.04	13.3	22.93	14.16	18.89	21.40
M0014 - Los Pinos	6.15	5.76	8.86	14.31	10.46	13.48	13.23	13.65	2.52	9.32	15.02	17.8	22.74	35.29	35.09	31.79	23.12	19.23	20.84	18.27	16.85	11.42	8.95	11.98	13.26	13.91	8.81	13.84	6.57	8.67	14.88
Promedio día	9.96	8.09	13.47	21.12	15.09	18.51	15.55	17.78	6.42	14.95	24.99	25.20	31.94	39.47	35.10	34.58	28.61	25.65	23.08	20.80	20.41	15.14	17.42	19.99	16.46	16.35	15.51	20.49	14.74	18.07	20.13

Figura 5.5.36: Promedio diario de cada sensor para el contaminante PM2.5 en el mes de septiembre del 2020

La figura 5.5.16 muestra el promedio diario de índice de calidad del aire generado por cada uno de los sensores. Los sensores A0013 y M0014 presentaron fallas durante 14 y 12 días consecutivamente, esto debido a problemas con Internet y/o corriente eléctrica en el lugar.

En total los 10 sensores cumplieron con más del 70 % de lecturas por hora, en base a esto se determina que el sensor M0003 ubicado en “Residencial Gran Segovia” es el sensor con peor calidad del aire mostrando un promedio de 24.93, por otra parte el sensor M0014 ubicado en la colonia “Los Pinos” presentó el mejor promedio de calidad del aire obteniendo un índice de 14.88.

5.5.10. Octubre 2020

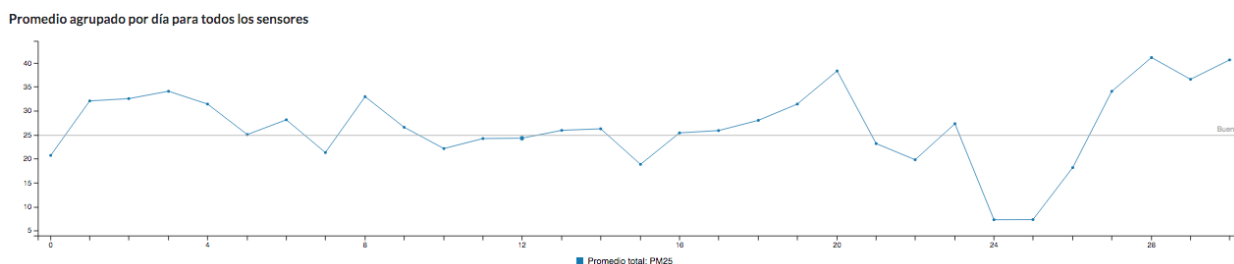


Figura 5.5.37: Promedio diario de PM2.5 para el mes de octubre del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.5.37 se muestran los promedios diarios generados durante el mes de enero por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C..

Se observa que el día 1 de enero fue el día con mayor índice de contaminación llegando a muy mala calidad del aire, por otra parte el día 29 de enero se presentó el día con la mejor calidad del aire.

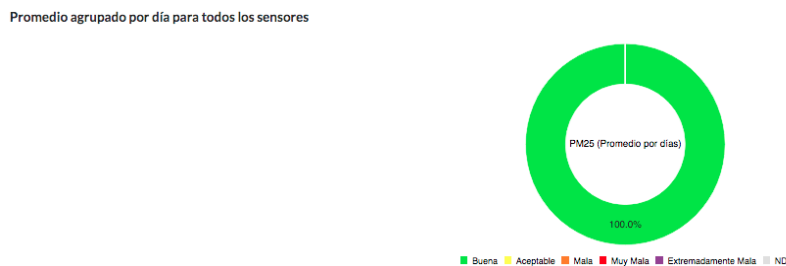


Figura 5.5.38: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de octubre de 2020

En la figura 5.5.38 se muestran los porcentajes globales del promedio diario de las concentraciones de pm2.5.

El 19.4 % de los días se encontraron en buena calidad, 48.4 % aceptable, 29.0 % mala, y el 3.2 % en muy mala calidad del aire.

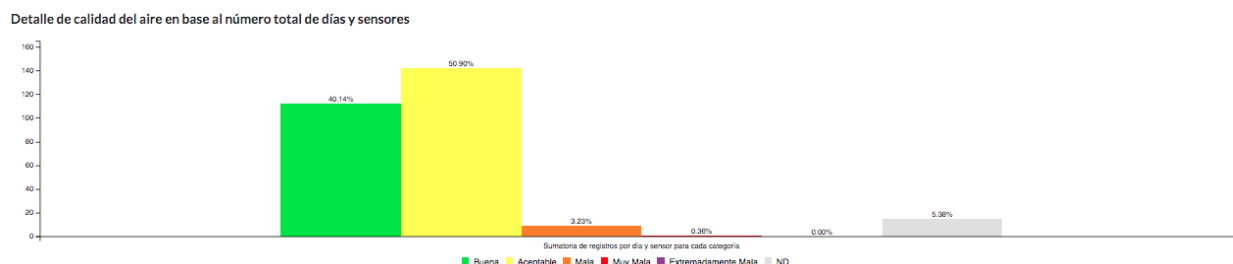


Figura 5.5.39: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de octubre del 2020

En la figura 5.5.39 se muestran los porcentajes del total de lecturas obtenidas, en total se obtuvo 22.90 % de calidad buena, 30.32 % de calidad aceptable, 28.06 de calidad mala, 3.23 % calidad muy mala, 1.29 % de calidad extremadamente mala y finalmente el 14.19 % de las lecturas no fueron validas.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Promedio
A0005 - Preparatoria y Universidad 16 de Septiembre Campus González Ortega	31.68	29.45	29.53	27.9	33.75	25.06	30.97	19.46	27.48	20.32	16.47	30.07	27.26	32.91	28.06	35.87	31.99	25.45	28.26	32.19	29.11	12.02	12.46	17.67	4.74	3.88	18.06	42.83	53.74	58.53	59.48	28.12
A0013 - Difosa Oficinas	19.81	29.21	31.73	41.26	29.2	24.94	30.48	-	-	33.73	19.44	24.91	27.01	27.39	26.2	19.37	26.41	28.97	28.11	31.81	33.09	35.84	24.18	27.93	13.53	16.82	20.35	34.76	36.17	38.35	35.63	28.08
A0014 - Residencial Gran Segovia	27.5	38.81	37.53	38.75	38.19	31.31	30.44	29.92	35.48	29.87	24.89	26.71	26.38	25.37	26.99	16.84	23.61	26.86	33.16	34.5	33.23	21.36	25.11	27.26	12.65	8.45	21.56	30.4	41.79	25.85	28.49	28.20
M0003 - Santorales	22.96	42.94	40.27	39.15	33.44	26.08	22.73	24.02	35.54	30.28	26.88	25.5	34.56	28.29	41.38	24.93	32.24	34.76	31.26	37	29.25	37.18	28.96	41.79	6.35	9.99	23.99	35.05	41.86	52	59.9	32.21
M0007 - Pedregal	25.78	39.47	31.85	32.63	38.27	33.06	33.35	21.69	35.56	34.3	20.78	30.11	30.66	50.74	31.74	27.27	33.87	25.84	31.83	40.58	35.69	15.73	17.35	35.44	8.39	5.82	-	-	-	-	-	29.55
M0008 - Villa del Cedro 1	14.47	26.93	27.54	29.43	28.62	22.24	35.36	17.03	26.09	21.66	19.83	19.23	18.25	16.89	18.92	12.39	19.45	23.23	24.51	30.65	27.02	14.71	14.2	17.19	3.88	3.78	12.36	25.73	36.36	26.66	36.11	21.15
M0011 - Las Garzas	13.19	25.86	27.95	32.21	29.5	23.18	50.12	20.43	46.47	25.24	39.85	24.29	15.27	16	17.99	6.99	11.31	23.53	25.51	22.69	14.61	29.38	-	-	-	-	-	-	-	-	18.61	28.23
M0013 - Jardines del Lago	31.02	32.37	39.76	34.31	27.11	21.47	19.84	18.2	31.14	23.53	18.04	22.14	33.74	31.51	27.5	15.95	33.84	27.72	26.25	30.3	25.83	23.04	24.13	29.91	5.1	5.73	18.75	39.92	44.13	36.24	53.35	26.50
M0014 - Los Pinos	9.74	23.35	26.52	30.89	24.43	18.37	14.73	19.51	25.66	20.98	12.83	14.9	15.38	14.19	19	11.04	15.76	21.41	23.03	22.58	27.44	19.14	16.42	21.12	9.6	4.08	12.93	29.6	33.59	18.2	33.15	19.45
Promedio día	30.68	32.04	32.52	34.06	31.39	25.93	28.11	21.28	32.93	26.55	22.11	24.20	24.28	25.91	26.23	18.82	25.39	25.86	27.99	31.39	38.30	23.16	19.78	27.29	7.28	7.31	18.14	34.04	41.09	36.55	40.59	26.78

Figura 5.5.40: Promedio diario de cada sensor para el contaminante PM2.5 en el mes de octubre del 2020

La figura 5.5.40 muestra el promedio diario de índice de calidad del aire generado por cada uno de los sensores. Los sensores A0013 y M0014 presentaron fallas durante 14 y 12 días consecutivamente, esto debido a problemas con Internet y/o corriente eléctrica en el lugar.

En total los 10 sensores cumplieron con más del 70 % de lecturas por hora, en base a esto se determina que el sensor M0003 ubicado en “santorales” es el sensor con peor calidad del aire mostrando un promedio de 32.21, por otra parte el sensor M0014 ubicado en la colonia “Los Pinos” presentó el mejor promedio de calidad del aire obteniendo un índice de 19.45.

5.5.11. Noviembre 2020

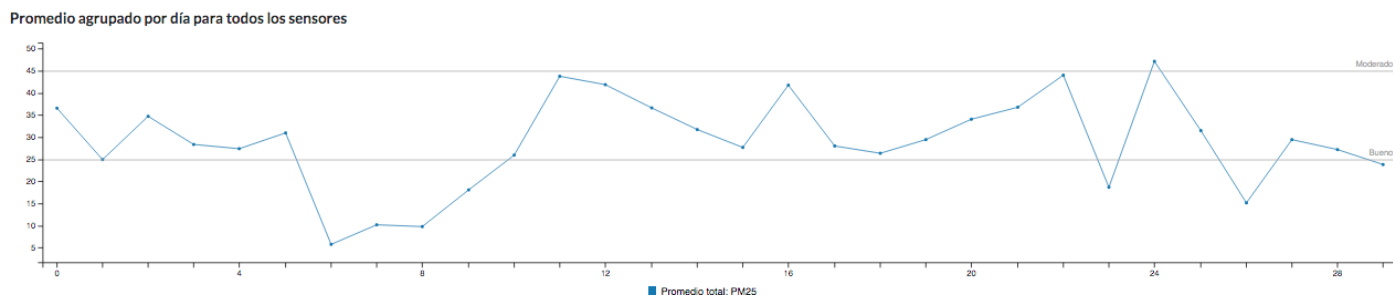


Figura 5.5.41: Promedio diario de PM2.5 para el mes de noviembre del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.5.41 se muestran los promedios diarios generados durante el mes de enero por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C..

Se observa que el día 1 de enero fue el día con mayor índice de contaminación llegando a muy mala calidad del aire, por otra parte el día 29 de enero se presentó el día con la mejor calidad del aire.

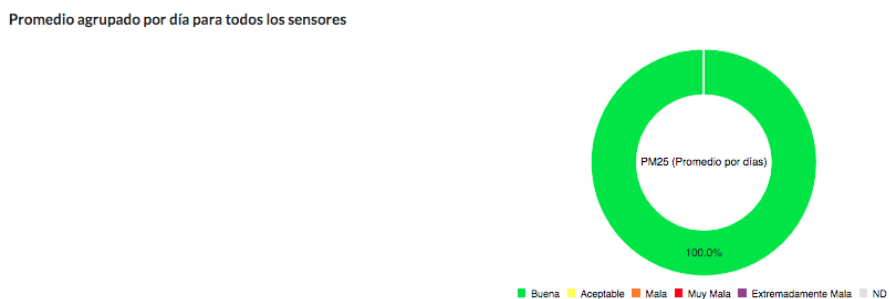


Figura 5.5.42: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de noviembre de 2020

En la figura 5.5.42 se muestran los porcentajes globales del promedio diario de las concentraciones de pm2.5.

El 19.4 % de los días se encontraron en buena calidad, 48.4 % aceptable, 29.0 % mala, y el 3.2 % en muy mala calidad del aire.

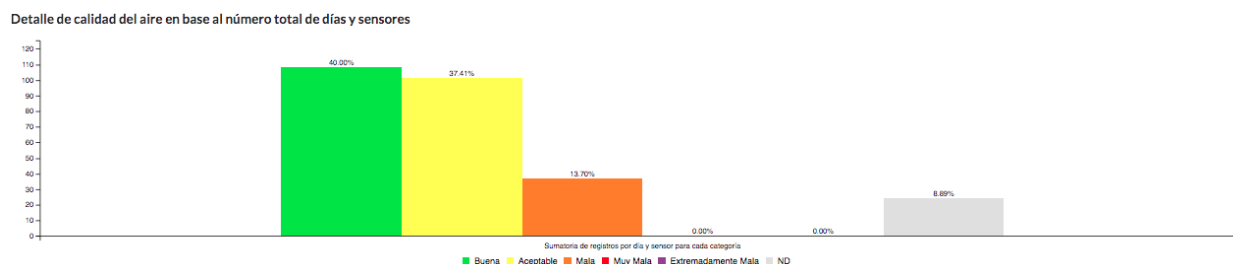


Figura 5.5.43: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de noviembre del 2020

En la figura 5.5.43 se muestran los porcentajes del total de lecturas obtenidas, en total se obtuvo 22.90 % de calidad buena, 30.32 % de calidad aceptable, 28.06 de calidad mala, 3.23 % calidad muy mala, 1.29 % de calidad extremadamente mala y finalmente el 14.19 % de las lecturas no fueron validas.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Promedio
A0005 - Preparatoria y Universidad 16 de Septiembre Campus González Ortega	51.17	51.74	50.43	49.77	42.05	14.49	2.3	8.79	6.1	10.5	30.49	43.33	52.73	37.45	39.76	38.44	51.01	24.18	24.06	35.18	38.93	42.35	47.35	23.55	54.44	44.34	18.11	-	-	30.86	34.07
A0013 - Difosa Oficinas	25.13	33.06	33.37	34.62	29.41	39.34	23.83	13.71	11.92	23.99	31.99	44.32	37.08	40.55	31.38	29.39	34.52	39.39	28.19	25.66	31.5	28.39	57.04	28.83	58.1	31.71	31.15	20.68	22.6	19.47	30.68
A0014 - Residencial Gran Segovia	24.69	13.03	33.42	41.39	18.73	34.5	5.47	7.36	18.36	16.8	26	38.31	39.66	34.74	29.97	40.22	41.34	24.07	27.71	23.92	27.46	30.02	46.15	22.53	50.71	50.36	11.19	25.73	23.06	18.89	26.94
M0003 - Santorales	41.87	42.23	46.87	36.67	43.31	48.38	5.05	11.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48.42	46.12	52.45	61.76	42.77	23.48	58.2	26.68	18.48	46.16	45.3	46.36	39.54
M0007 - Pedregal	59.38	-	-	-	-	24.03	5.51	11.98	18.66	29.28	43.04	65.88	56.25	40.95	42.49	50.56	56.62	30.31	31.21	44.38	47.68	44.98	39.74	22.54	49.53	34.58	17.27	43.08	42.35	32.52	37.86
M0008 - Villa del Cedro 1	31.67	17.62	31.42	26.05	22.16	26.91	2.74	6.95	2.17	-	-	-	-	-	-	-	37.27	20.12	17.32	20.23	34.47	28.22	38.71	10.42	34.35	25.74	9.24	25.93	21.83	15.82	22.96
M0011 - Las Garzas	24.39	6.8	21.74	13.52	9.58	-	1.84	6.64	3.89	8.91	7.28	24.25	25.23	23.79	12.68	8.8	21.52	20	5.9	11	7.7	25.08	39.46	9.23	28.26	21.82	15.62	21.38	8.46	7.6	15.23
M0013 - Jardines del Lago	48.33	31	35.21	30.45	36.12	32.59	2.53	18.09	13.08	21.89	33.79	58.97	46.7	43.05	44.04	32.95	54.68	39.7	38.4	38.31	42.04	43.94	43.88	17.44	55.13	26.51	15.68	35.48	36.45	31.97	35.08
M0014 - Los Pinos	22.15	11.28	25.13	14.01	17.58	27.26	1.99	6.61	4.75	14.89	18.8	31.25	35.39	35.69	21.64	13.72	36.59	26.09	15.79	20.48	24.12	24.04	38.97	10.82	35.58	21.66	9.25	16.94	17.24	10.64	20.34
Promedio día	36.53	24.91	34.79	28.34	27.37	30.94	5.72	10.15	8.74	18.05	25.81	43.76	41.86	36.60	31.71	27.85	41.74	27.98	26.33	29.43	34.04	36.79	44.01	18.65	47.14	31.47	15.11	29.42	27.17	23.79	28.90

Figura 5.5.44: Promedio diario de cada sensor para el contaminante PM2.5 en el mes de noviembre del 2020

La figura 5.5.44 muestra el promedio diario de índice de calidad del aire generado por cada uno de los sensores. Los sensores M0003 presentó fallas durante 10 días consecutivamente, esto debido a problemas con Internet y/o corriente eléctrica en el lugar.

En total 9 sensores cumplieron con más del 70 % de lecturas por hora, en base a esto se determina que el sensor M0013 ubicado en “jardines del lago” es el sensor con peor calidad del aire mostrando un promedio de 35.08, por otra parte el sensor M0011 ubicado en la colonia “Las Garzas” presentó el mejor promedio de calidad del aire obteniendo un índice de 15.23.

5.5.12. Diciembre 2020

Promedio agrupado por día para todos los sensores

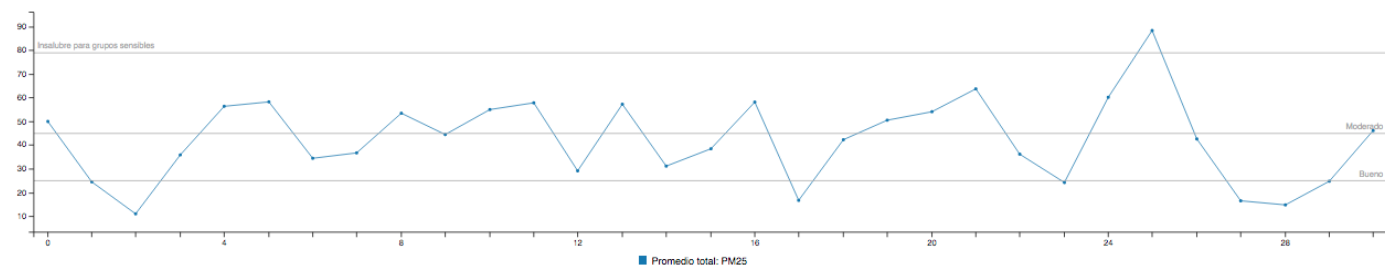


Figura 5.5.45: Promedio diario de PM2.5 para el mes de diciembre del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.5.45 se muestran los promedios diarios generados durante el mes de diciembre por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C..

Se observa que el día 25 de diciembre fue el día con mayor índice de contaminación llegando a muy mala calidad del aire, por otra parte el día 2 de diciembre se presentó el día con la mejor calidad del aire.

Promedio agrupado por día para todos los sensores

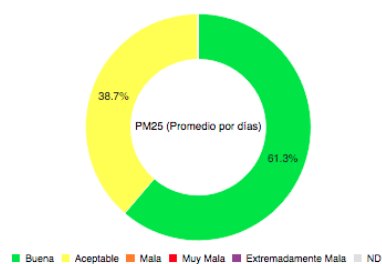


Figura 5.5.46: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de diciembre de 2020

En la figura 5.5.46 se muestran los porcentajes globales del promedio diario de las concentraciones de pm2.5.

El 61.3 % de los días se encontraron en buena calidad y 38.7% aceptable, .

Detalle de calidad del aire en base al número total de días y sensores

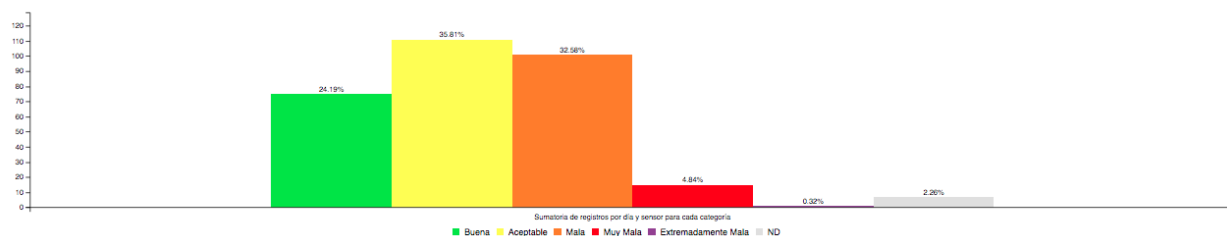


Figura 5.5.47: Porcentaje del contaminante PM2.5 para el mes de diciembre del 2020

En la figura 5.5.47 se muestran los porcentajes del total de lecturas obtenidas, en total se obtuvo 24.19% de calidad buena, 35.81% de calidad aceptable, 32.56 de calidad mala, 4.84% calidad muy mala, 0.32% de calidad extremadamente mala y finalmente el 2.26% de las lecturas no fueron validas.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Promedio
A0005 - Preparatoria y Universidad 16 de Septiembre Campus González Ortega	65.35	41.24	13.69	54.07	88.81	64.81	54.22	41.29	68.77	-	-	-	-	35.1	44.17	47.57	72.66	24.23	73.85	71.29	71.18	82.93	44.52	36.31	84.17	133.22	50.16	28.53	17.94	33.14	46.98	55.56
A0013 - Difosa Oficinas	33.75	25.93	10.15	34.81	33.6	58.55	23.45	53.04	52.26	48.35	58.92	56.68	40.29	60.64	36.6	38.39	57.66	20.18	46.6	34.45	56	75.4	34.83	13.75	38.67	69.7	44.76	17.48	19.51	32.82	52.56	41.08
A0014 - Residencial Gran Segovia	29.74	28.72	12.91	31.47	42.3	35.44	31.13	28.39	40.06	52.6	55.84	63.18	21.12	49.08	25.2	37.68	52.15	20.83	32.33	31.86	37.7	46.99	37.36	18.76	37.68	47.42	35.92	14.96	12.63	21.65	41.69	34.80
A0035 - Mario Soto Negocios	77.61	-	-	-	64.4	60.14	38.82	43.13	56.07	49.87	63.69	63.48	30.15	68.36	30.98	43.11	75.76	17.47	43.18	49.74	63.48	73.95	43.44	22.21	57.58	123.24	44.68	22.71	16.97	25.34	46.88	54.15
M0003 - Santorales	45.73	37.82	19.58	50.51	69.05	81.5	33.23	40.12	86.02	46.72	71.25	78.49	40.7	60.63	31.99	53.35	53.64	15.12	47.65	83.85	65.06	77.37	48.12	42.74	119.22	111.81	44.64	23.48	24.34	28.04	70.1	55.64
M0007 - Pedregal	43.68	26.65	18.75	41.33	84.57	73.79	50.25	35.25	55.14	48.2	65.22	70.19	40.89	75.42	41.23	51.12	76.49	26.53	55.01	74.08	66.41	68	38.9	37.3	89.84	132	60.88	27.15	17.25	26.86	46.68	54.02
M0008 - Villa del Cedro 1	31.94	13.43	5.11	23.67	46.79	63.73	34.12	26.46	36.34	35.46	42.8	55.82	21.09	54.74	24.82	29.18	49.81	11.3	33.12	50.28	43.04	43.15	25.1	17.48	40.22	68.54	37.45	11.48	8.37	18.49	34.87	33.50
M0011 - Las Garzas	18.61	7.13	1.59	16.59	18.25	29.97	16.62	22.02	26.91	35.07	35.94	34.39	12.84	30.11	15.07	16.49	36.69	9.09	16.58	18.84	25.62	41.41	23.07	8.77	17.6	29.44	22.28	2.7	4.31	11.85	32.72	20.36
M0013 - Jardines del Lago	39.64	54.52	13.58	50.21	71.01	68.93	40.29	46.36	72.91	42.61	53.39	54.11	34.7	67.56	36.96	43.98	57.48	13.34	49.47	61.22	72.85	69.17	37.24	25.41	73.61	127.85	53.12	15.7	16.12	32.64	50.79	48.29
M0014 - Los Pinos	18.98	14.63	3.03	19.04	33.55	40.65	27.51	30.33	37.24	40.51	47.18	43.4	19.73	30	23.72	24.39	48.3	8.3	24.26	28.59	38.64	58.04	27.64	18.91	31.9	59.42	31.53	6.11	9.66	15.94	37.41	29.46
Promedio dia	49.88	24.43	10.94	35.99	56.28	58.15	34.36	36.64	53.37	44.38	54.91	57.75	29.07	57.16	31.07	38.38	58.06	16.63	42.21	50.43	54.00	63.64	36.19	24.16	60.08	88.24	42.52	16.43	14.71	24.68	46.07	42.38

Figura 5.5.48: Promedio diario de cada sensor para el contaminante PM2.5 en el mes de diciembre del 2020

La figura 5.5.48 muestra el promedio diario de índice de calidad del aire generado por cada uno de los sensores.

En total los 10 sensores cumplieron con más del 70% de lecturas por hora, en base a esto se determina que el sensor M0003 ubicado en “santorales” es el sensor con peor calidad del aire mostrando un promedio de 55.64, por otra parte el sensor M0011 ubicado en la colonia “Las Garzas” presentó el mejor promedio de calidad del aire obteniendo un índice de 20.36.

5.6. Promedios Generales (PM25)

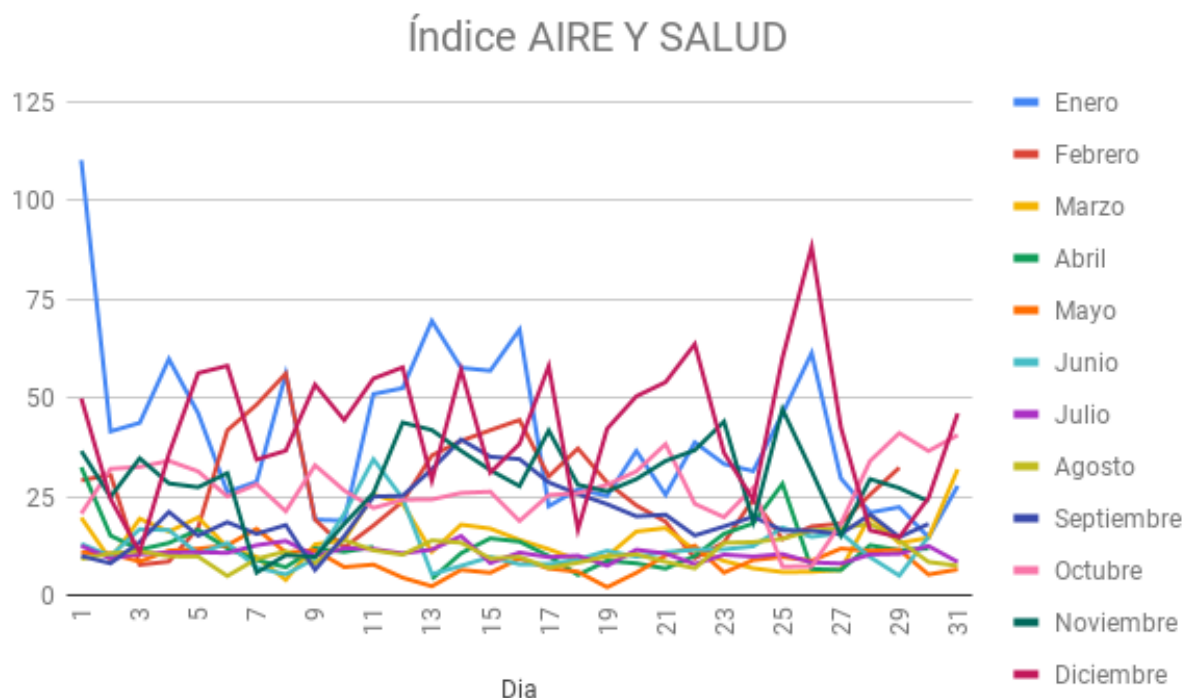


Figura 5.6.1: Promedio global del promedio del conjunto de sensores instalados en Mexicali

En la figura 5.6.1 se muestran los promedios diarios generados por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C. durante el año 2020. Se observa que enero y diciembre fueron los meses que presentaron promedios con mayor índice de contaminación. El 1 de enero fue el día con mayor contaminación, en promedio se tiene un índice de 110.28 señalando una calidad del aire mala y el día 26 de diciembre se llegó al segundo promedio con mayor índice de calidad de aire moderada llegando a 88.24. Estos registros principalmente se obtienen debido a la quema de madera y detonación de fuegos artificiales por celebraciones de año nuevo y navidad.

Los promedios diarios registrados durante los meses de febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre se mantuvieron en calidad de aire buena, manteniéndose por debajo del promedio de 50. Esto no quiere decir que durante el transcurso del día no se tuviera mala calidad del aire, sin embargo ya promediada las horas se muestra buena calidad.

5.7. Zonas más afectadas de Mexicali

Con la finalidad de identificar las zonas más afectadas de Mexicali B.C se realizará un diagnóstico mediante geolocalización, representando las zonas con los promedios de PM2.5 generados mensualmente por cada uno de los sensores utilizados durante el año 2020, esto en base al criterio de índice aire y salud.

5.7.1. Enero 2020

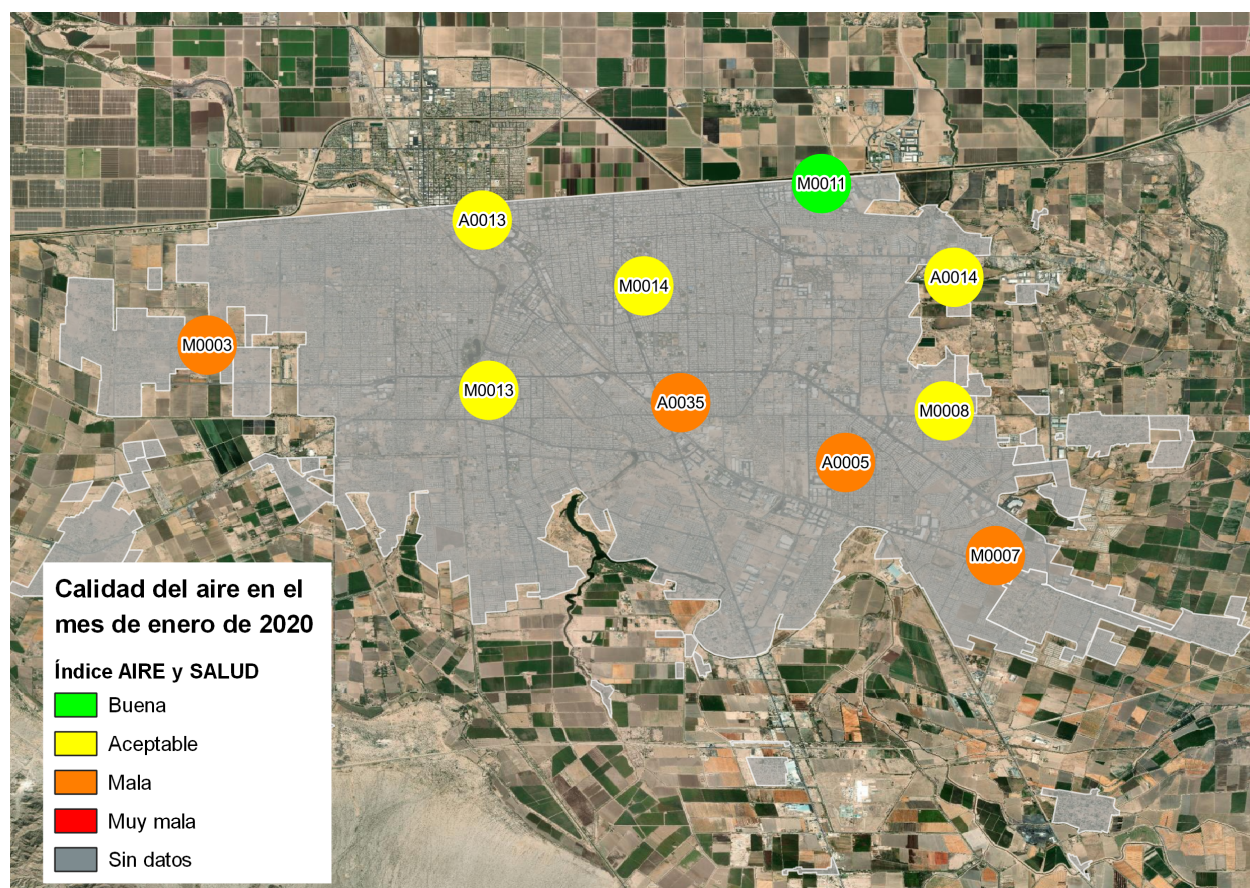


Figura 5.7.1: Promedio del contaminante PM2.5 para el mes de enero de 2020

La figura 5.7.1 muestra el promedio generado por cada uno de los 10 sensores utilizados durante el mes de enero en base al contaminante PM2.5 según el índice aire y salud. Cuatro sensores indicaron una calidad del aire mala, cinco una calidad del aire aceptable y finalmente un sensor indicó una calidad del aire buena. Se observa que las zonas más afectadas son la zona oriente y parte de la zona poniente.

5.7.2. Febrero 2020

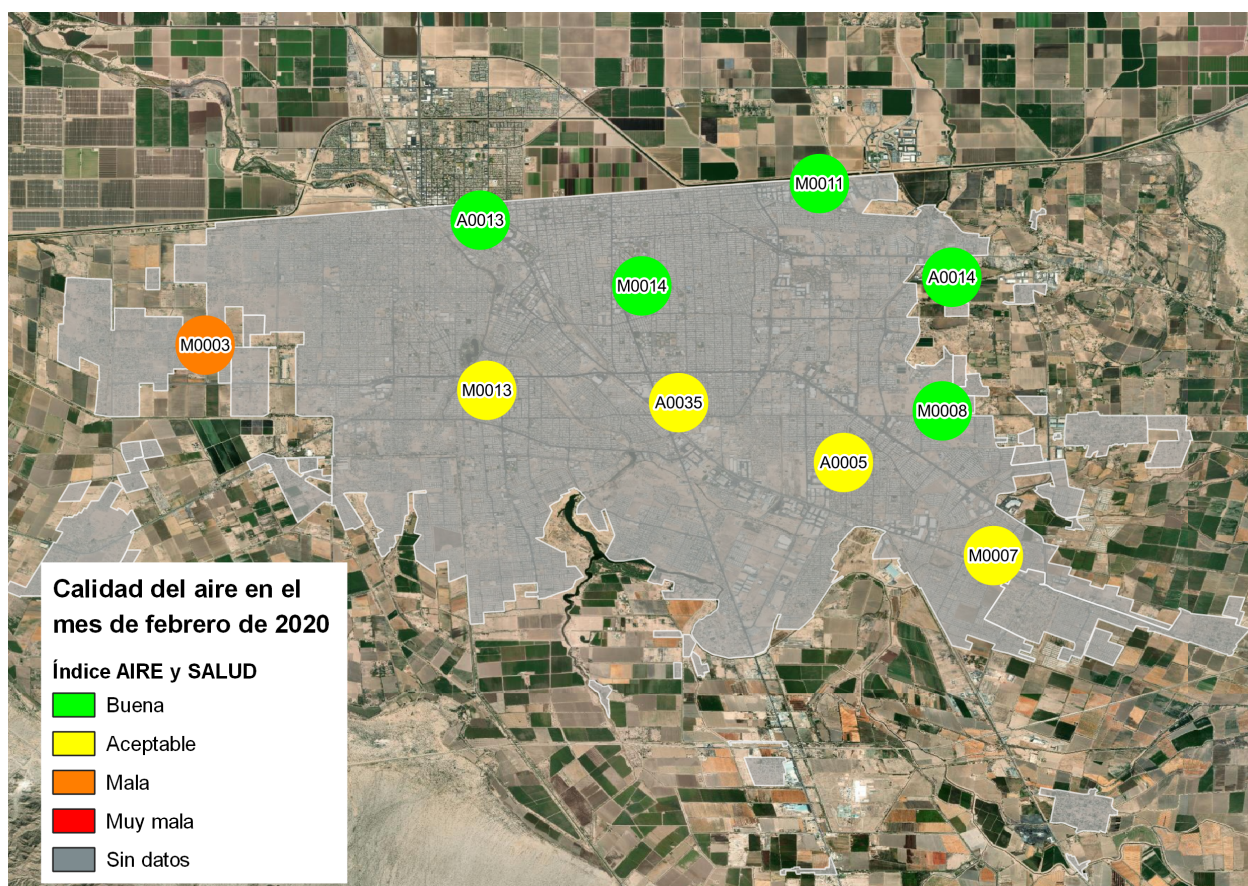


Figura 5.7.2: Promedio del contaminante PM_{2.5} para el mes de febrero de 2020

La figura 5.7.2 muestra el promedio generado por cada uno de los 10 sensores utilizados durante el mes de febrero en base al contaminante PM_{2.5} según el índice aire y salud. En total un sensor indicó una calidad del aire mala, cuatro sensores con calidad del aire aceptable y finalmente cinco sensores indicaron una calidad del aire buena. Se observa que la zona poniente fue la más afectada.

5.7.3. Marzo 2020

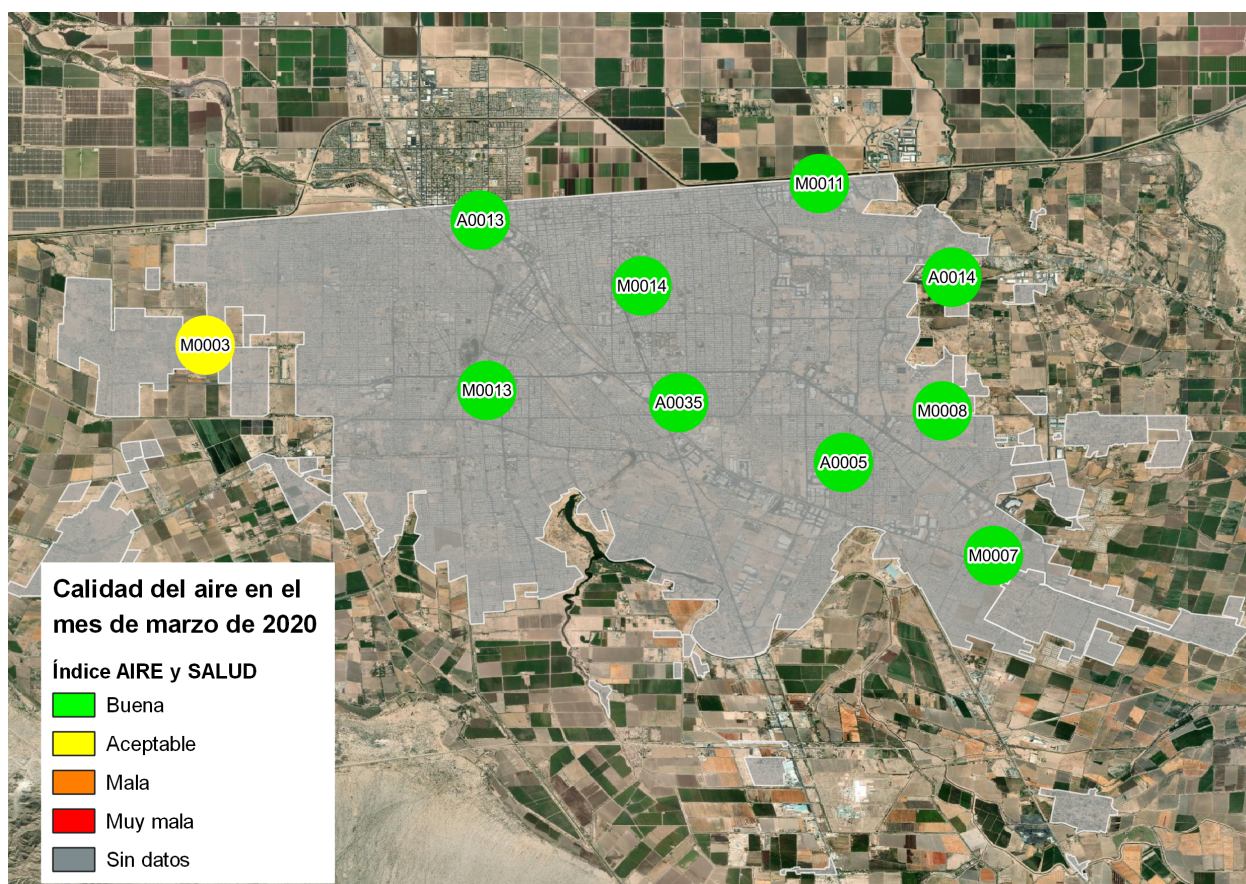


Figura 5.7.3: Promedio del contaminante PM2.5 para el mes de marzo de 2020

La figura 5.7.3 muestra el promedio generado por cada uno de los 10 sensores utilizados durante el mes de marzo en base al contaminante PM2.5 según el índice aire y salud. En total nueve sensores muestran una buena calidad del aire y un sensor indica una calidad del aire aceptable. Se observa que la zona poniente fue la más afectada.

5.7.4. Abril 2020

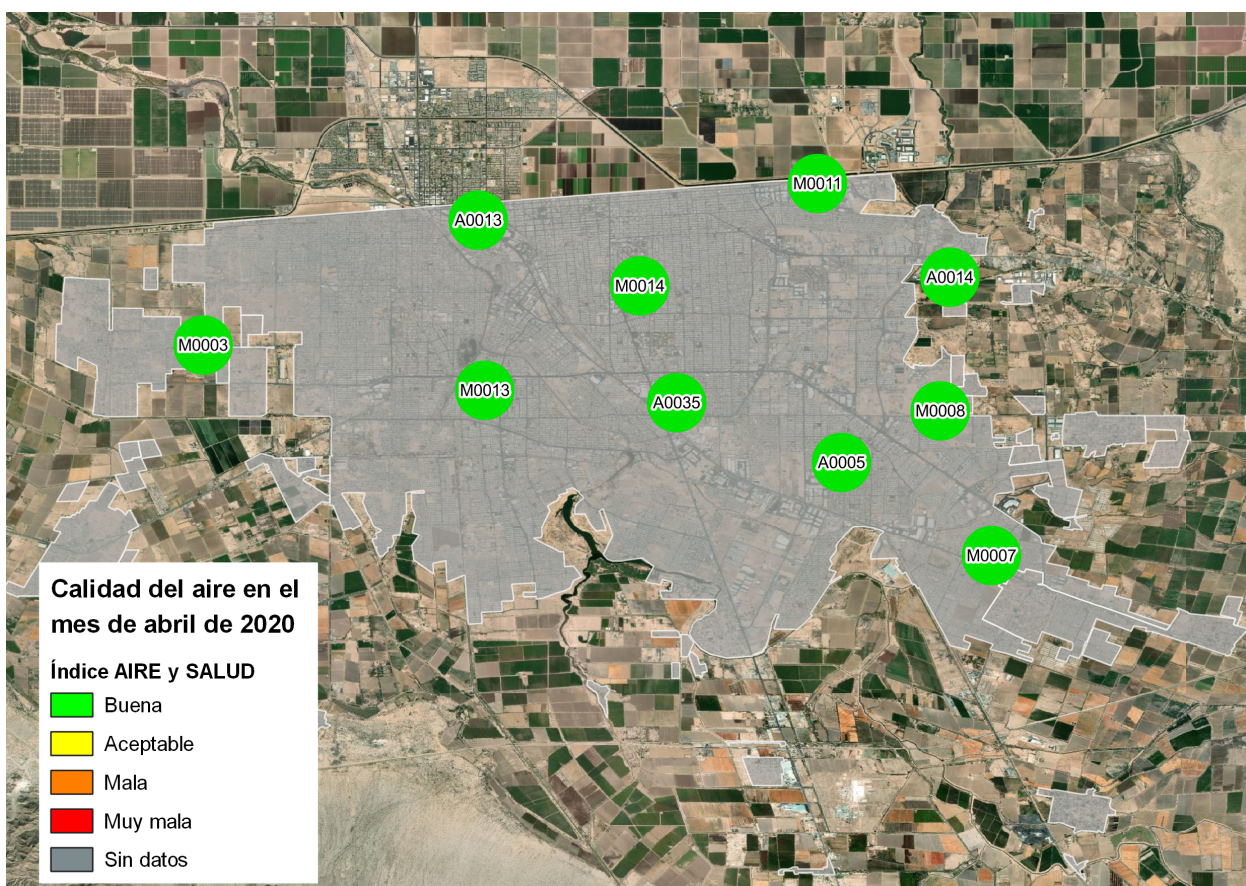


Figura 5.7.4: Promedio del contaminante PM2.5 para el mes de abril de 2020

La figura 5.7.4 muestra el promedio generado por cada uno de los 10 sensores utilizados durante el mes de abril en base al contaminante PM2.5 según el índice aire y salud. En total los 10 sensores muestran una buena calidad del aire.

5.7.5. Mayo 2020

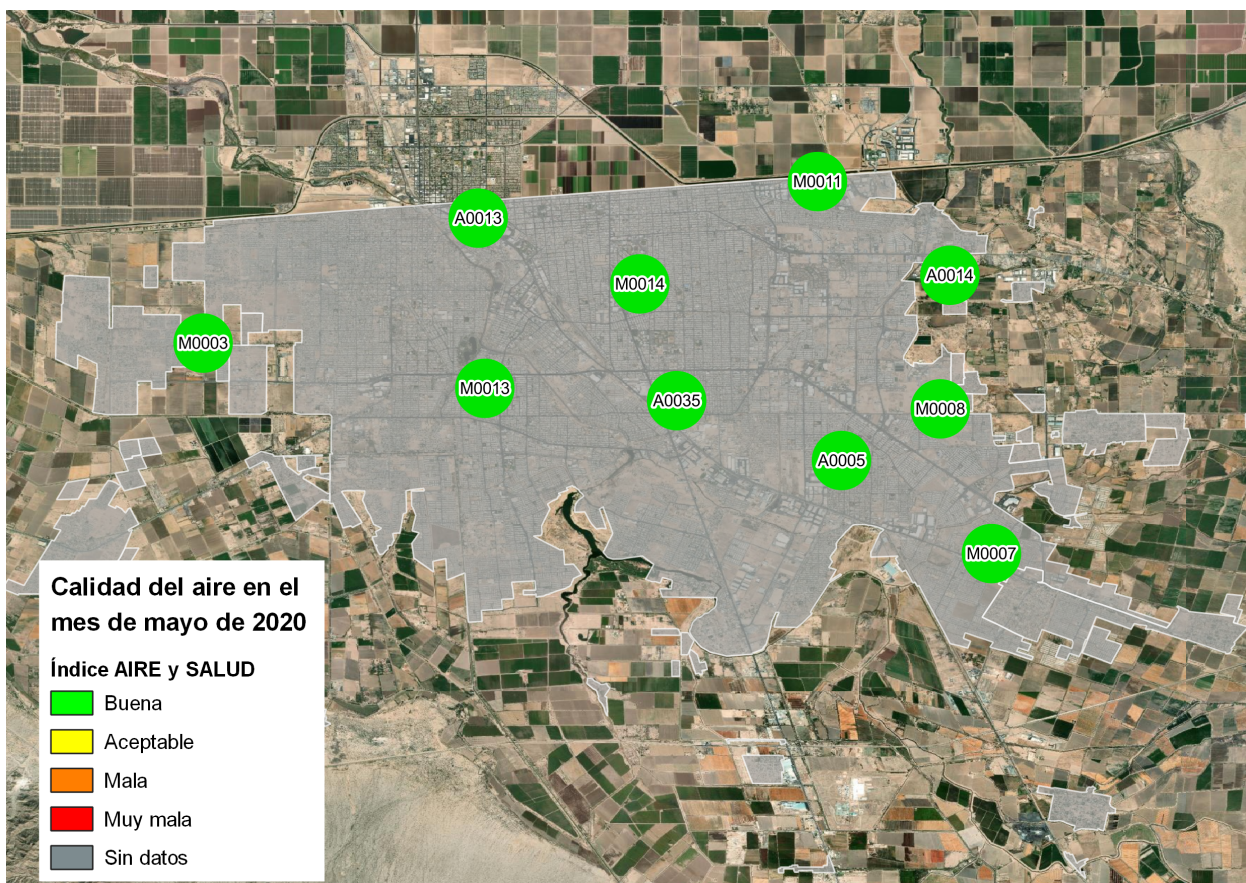


Figura 5.7.5: Promedio del contaminante PM2.5 para el mes de mayo de 2020

La figura 5.7.5 muestra el promedio generado por cada uno de los 10 sensores utilizados durante el mes de mayo en base al contaminante PM2.5 según el índice aire y salud. En total los 10 sensores muestran una buena calidad del aire.

5.7.6. Junio 2020

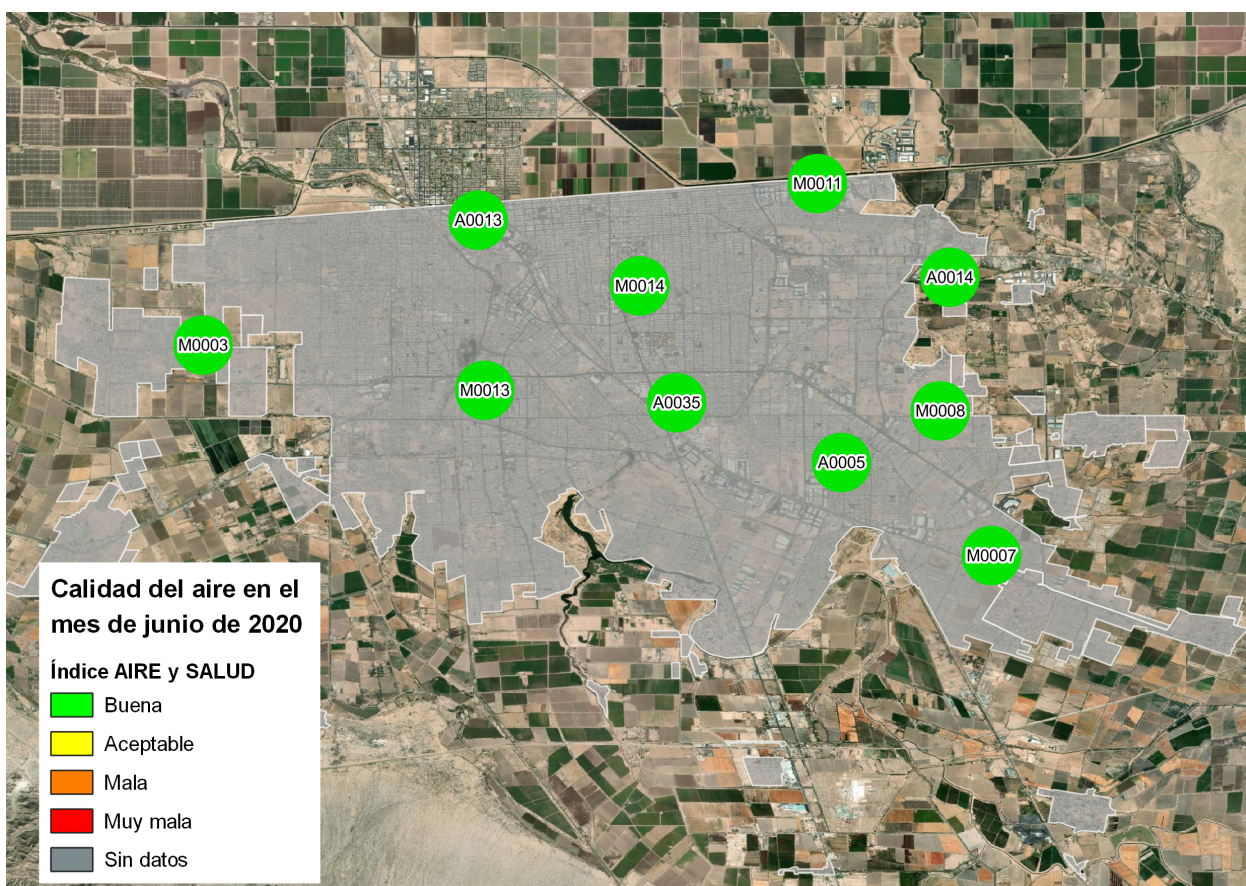


Figura 5.7.6: Promedio del contaminante PM2.5 para el mes de Junio de 2020

La figura 5.7.6 muestra el promedio generado por cada uno de los 10 sensores utilizados durante el mes de junio en base al contaminante PM2.5 según el índice aire y salud. En total los 10 sensores muestran una buena calidad del aire.

5.7.7. Julio 2020

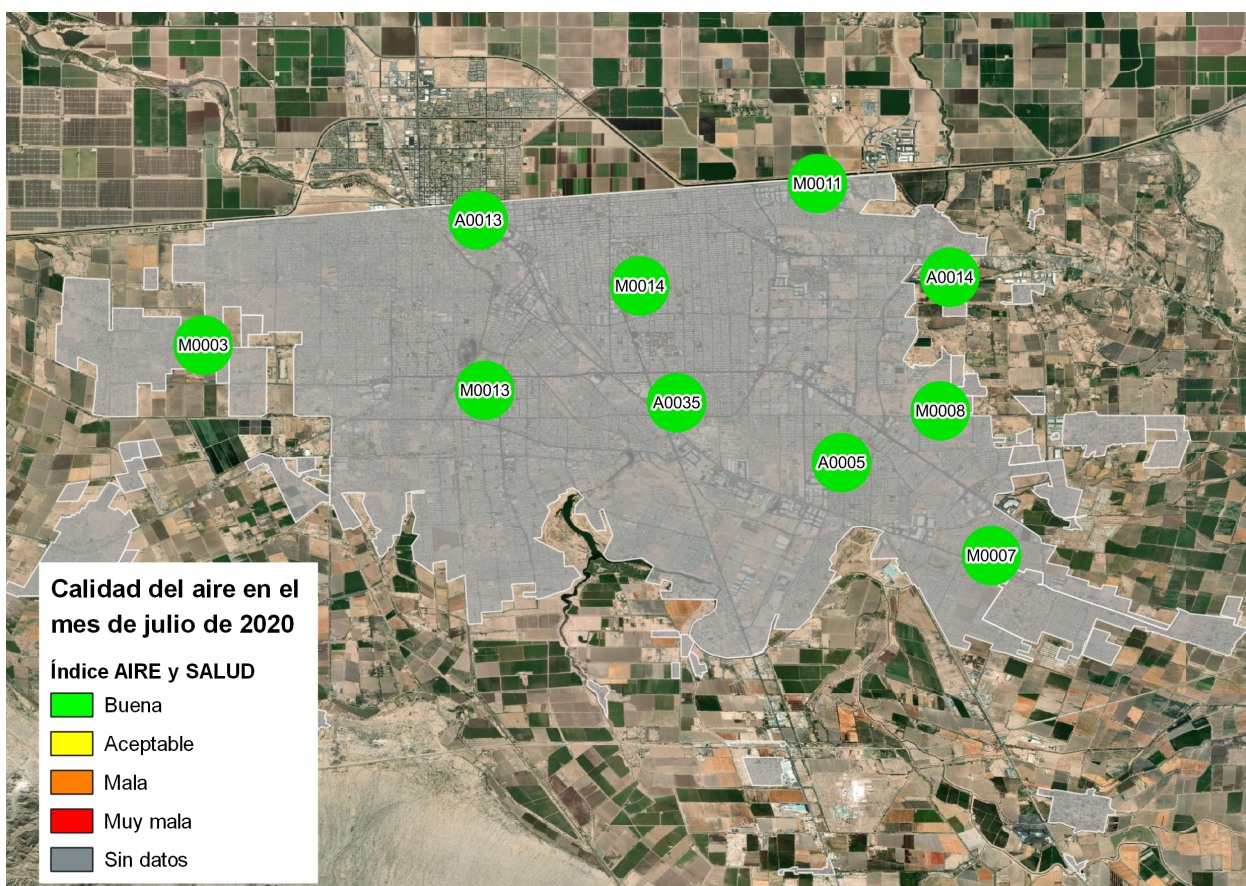


Figura 5.7.7: Promedio del contaminante PM2.5 para el mes de julio de 2020

La figura 5.7.7 muestra el promedio generado por cada uno de los 10 sensores utilizados durante el mes de julio en base al contaminante PM2.5 según el índice aire y salud. En total los 10 sensores muestran una buena calidad del aire.

5.7.8. Agosto 2020

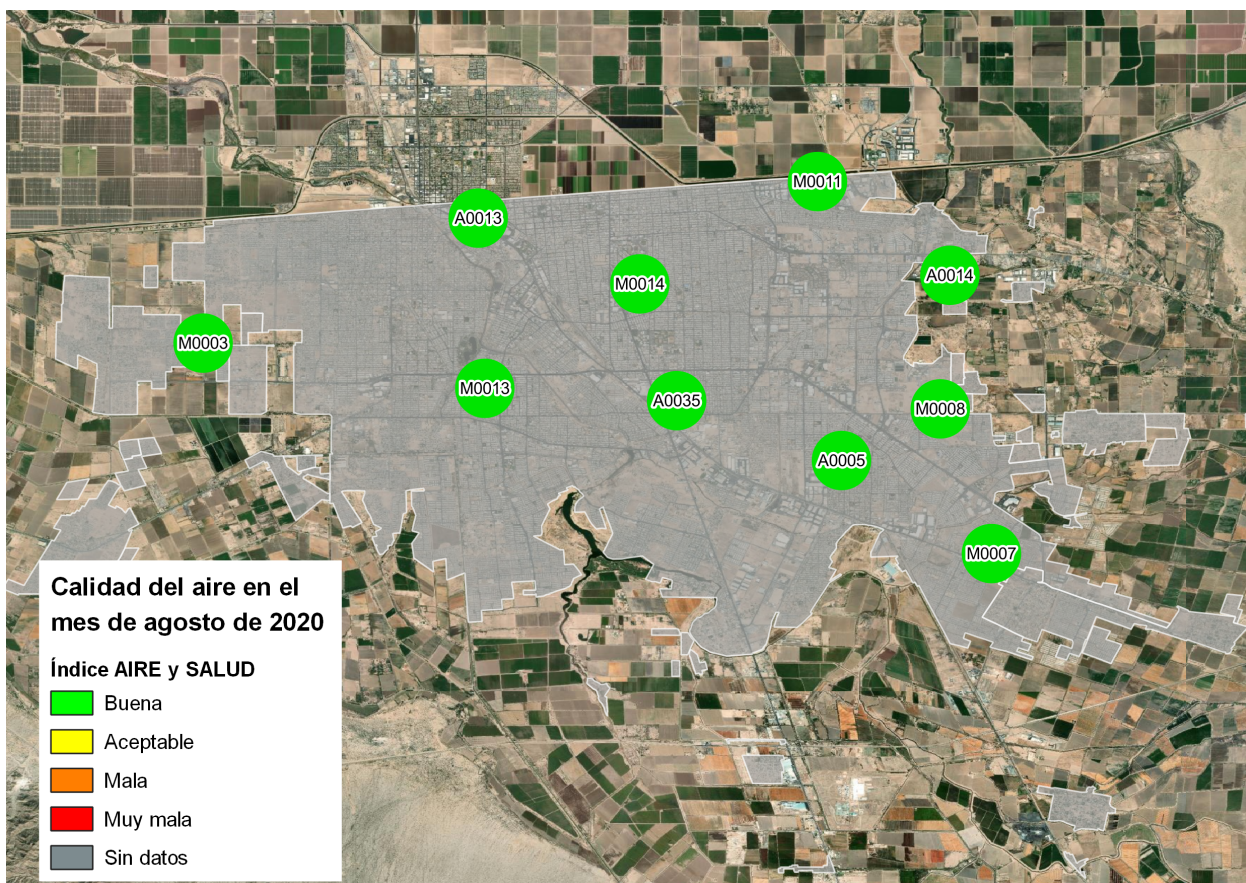


Figura 5.7.8: Promedio del contaminante PM_{2.5} para el mes de agosto de 2020

La figura 5.7.8 muestra el promedio generado por cada uno de los 10 sensores utilizados durante el mes de agosto en base al contaminante PM_{2.5} según el índice aire y salud. En total los 10 sensores muestran una buena calidad del aire.

5.7.9. Septiembre 2020

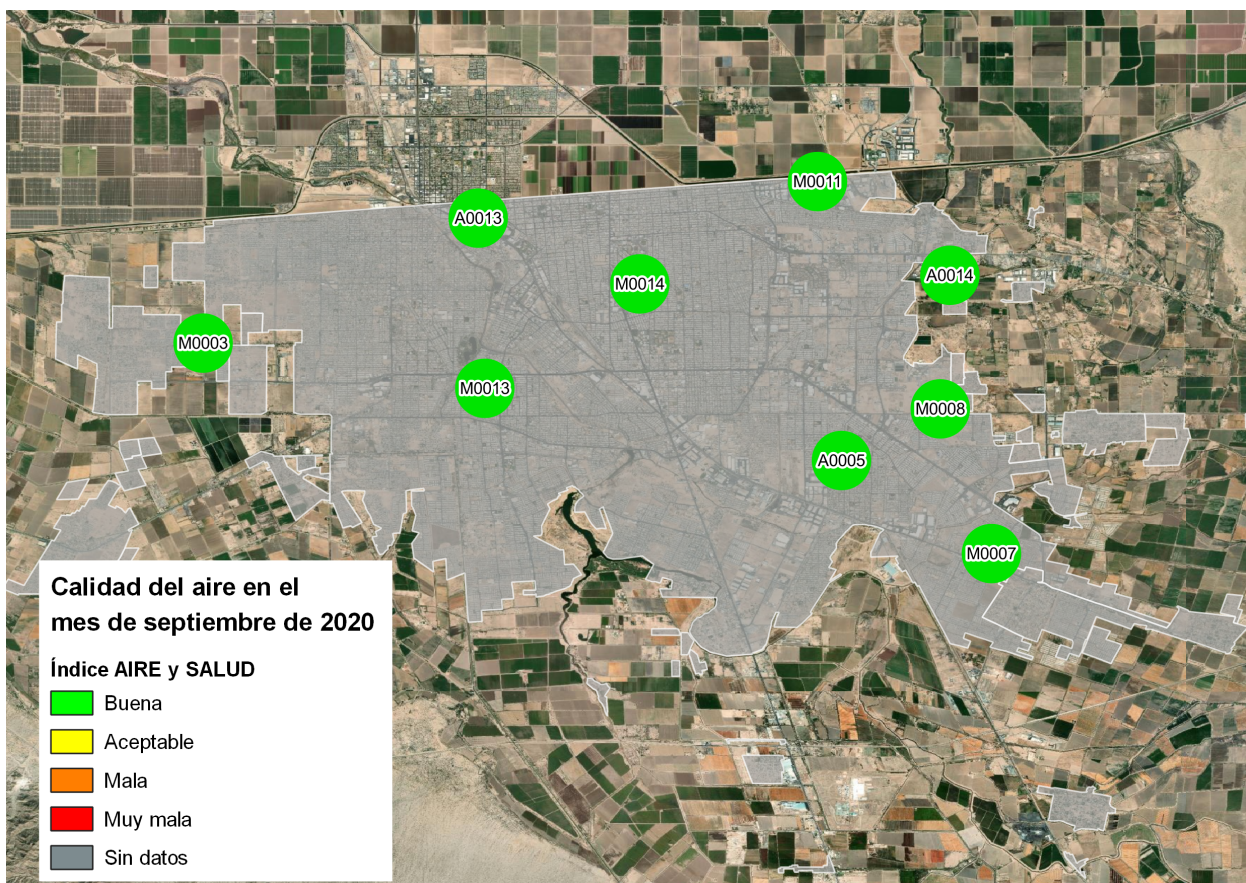


Figura 5.7.9: Promedio del contaminante PM_{2.5} para el mes de septiembre de 2020

La figura 5.7.9 muestra el promedio generado por cada uno de los 10 sensores utilizados durante el mes de septiembre en base al contaminante PM_{2.5} según el índice aire y salud. En total los 9 sensores muestran una buena calidad del aire y un sensor no presenta registro de datos.

5.7.10. Octubre 2020

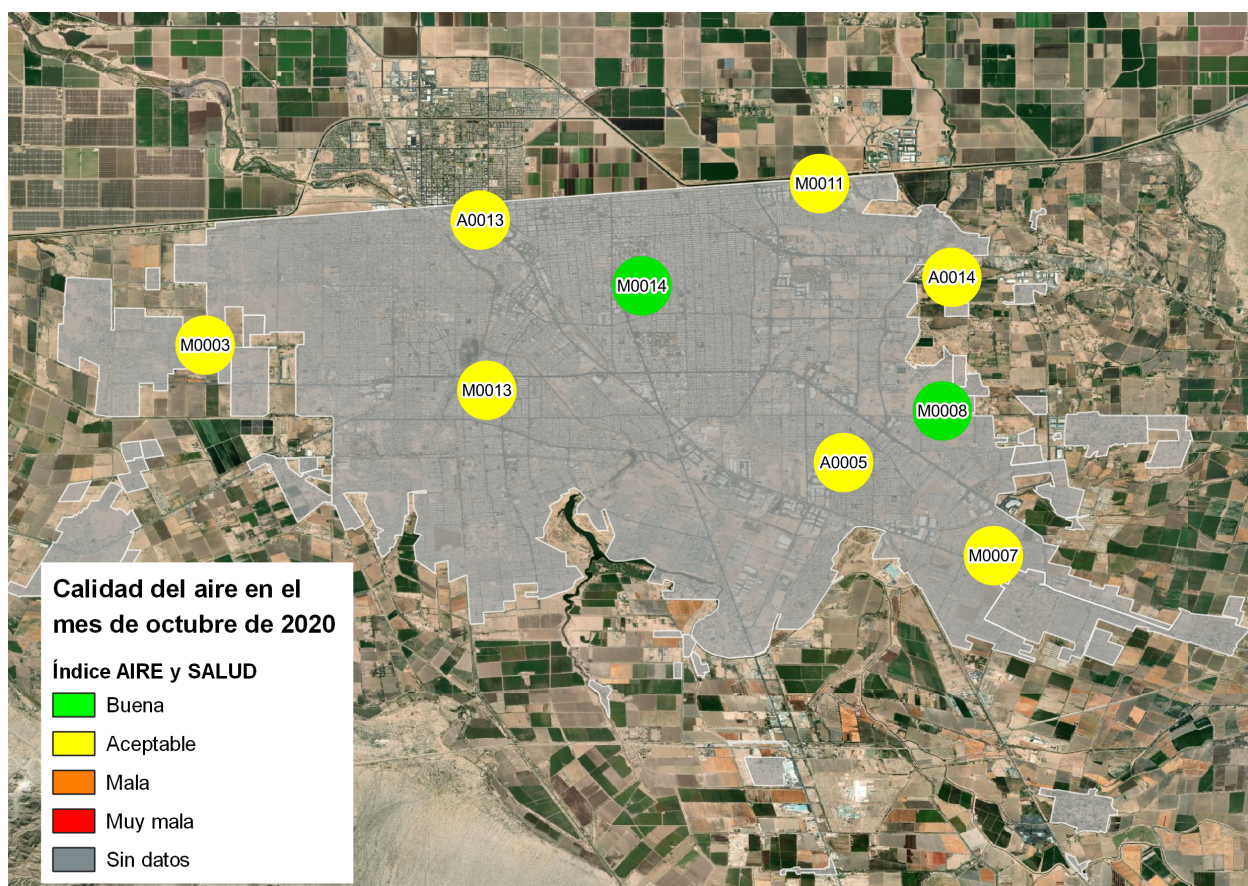


Figura 5.7.10: Promedio del contaminante PM_{2.5} para el mes de octubre de 2020

La figura 5.7.10 muestra el promedio generado por cada uno de los 10 sensores utilizados durante el mes de octubre en base al contaminante PM_{2.5} según el índice aire y salud. En total siete sensores muestran una buena calidad del aire, dos sensores muestran una calidad del aire aceptable y finalmente un sensor no presenta registro de datos.

5.7.11. Noviembre 2020

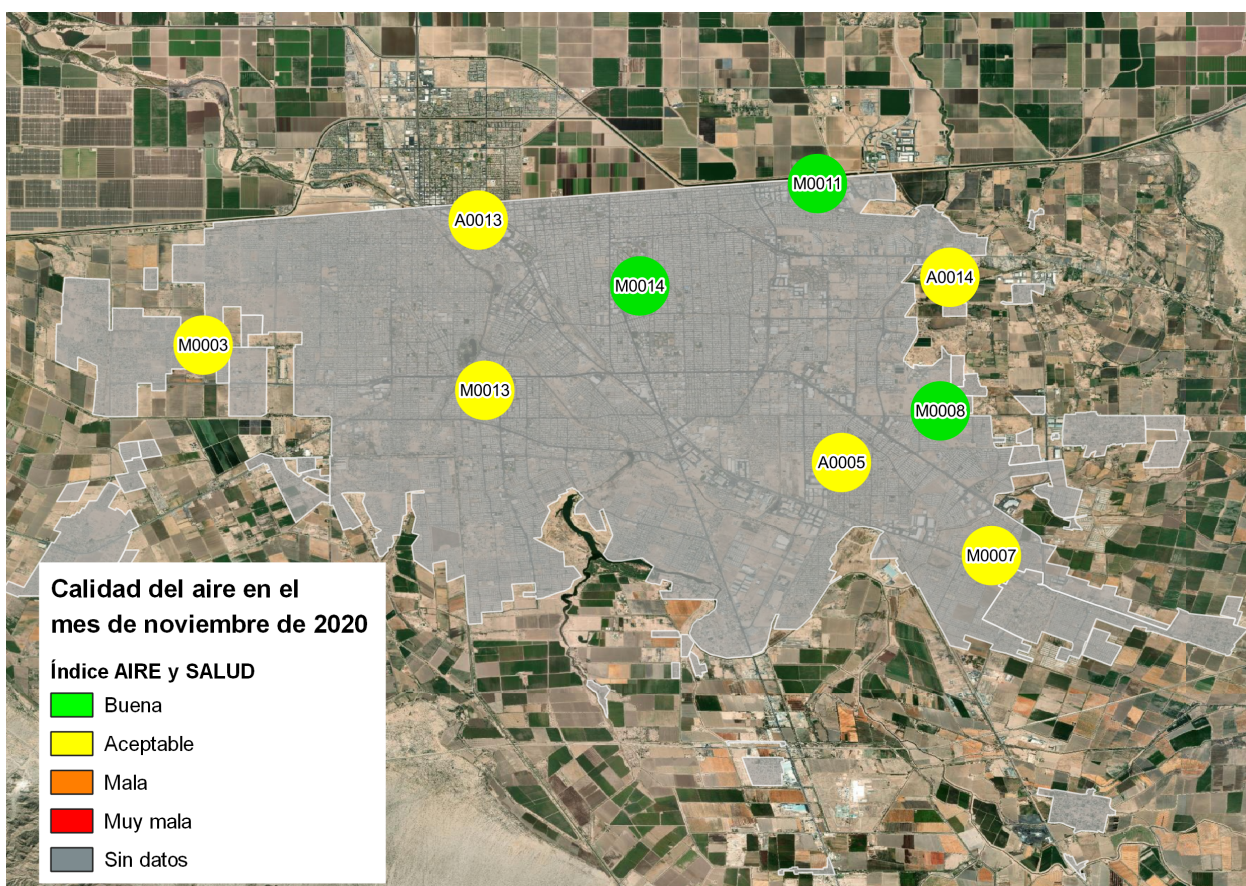


Figura 5.7.11: Promedio del contaminante PM_{2.5} para el mes de noviembre de 2020

La figura 5.7.11 muestra el promedio generado por cada uno de los 10 sensores utilizados durante el mes de noviembre en base al contaminante PM_{2.5} según el índice aire y salud. En total seis sensores muestran una buena calidad del aire, tres sensores muestran una calidad del aire aceptable y finalmente un sensor no presenta registro de datos.

5.7.12. Diciembre 2020

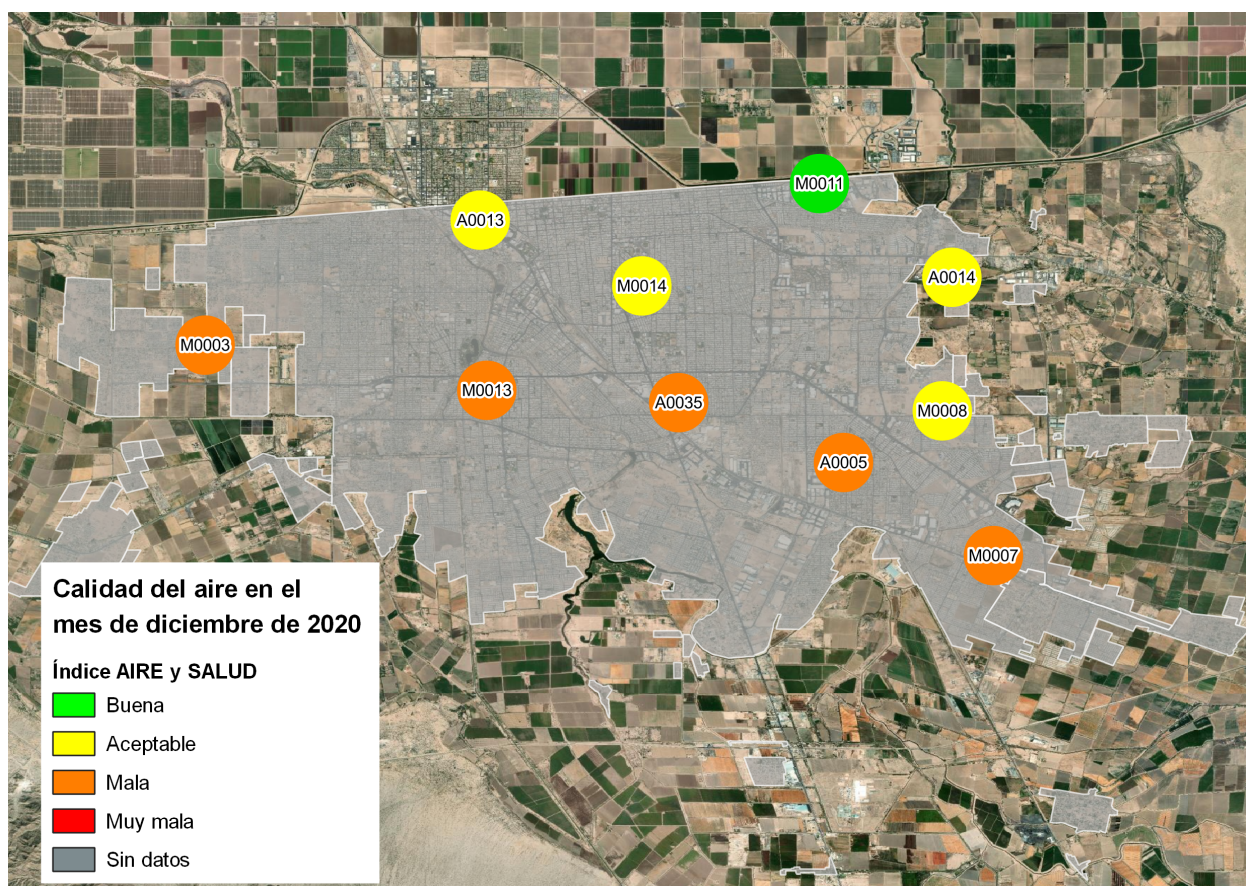


Figura 5.7.12: Promedio del contaminante PM2.5 para el mes de diciembre de 2020

La figura 5.7.12 muestra el promedio generado por cada uno de los 10 sensores utilizados durante el mes de diciembre en base al contaminante PM2.5 según el índice aire y salud. En total cinco sensores indicaron una calidad del aire mala, cuatro una calidad del aire aceptable y finalmente un sensor indicó una calidad del aire buena.

5.7.13. Resultados

En base a los resultados obtenidos, se observa que enero y diciembre fueron los meses con mayor índice de calidad del aire mostrando una calidad del aire insalubre. Febrero, noviembre y octubre presentó calidad del aire moderada y finalmente marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre generalmente presentaron una buena calidad del aire.

Las zonas más afectadas durante este periodo de tiempo, fueron la zona poniente y zona sur oriente. Algunas características de estas dos zonas son las siguientes:

Falta de pavimentación un alto porcentaje de calles. Cuentan con una alta zona industrial. Quema de basura constante en casas abandonadas. Alto porcentaje de automóviles sin verificación vehicular.

Capítulo 6

Conclusiones

En el desarrollo e implementación de la red de monitoreo ambiental utilizando Internet de las cosas, en el cual se considero el diseño del dispositivo electrónico, construcción, validación y análisis experimental en las diversas zonas de Mexicali, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. De acuerdo al estudio experimental realizado para determinar si los niveles de concentración del monitor ambiental propuesto es similar en comparación a las obtenidas por monitores certificados. Arrojaron que una estación de monitoreo normada y la propuesta desarrollada cuentan con una aproximación de hasta el 75 % de correlación, se concluye que la incertidumbre del dispositivo es suficiente para realizar mediciones de monitoreo ambiental.
2. La aplicación del modelo de las concentraciones de un determinado grupo de contaminantes se realizó de acuerdo a la NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019 que aplica los lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud, que en conjunto con las mediciones del dispositivo propuesto permitieron mostrar los valores ponderados móviles para 12 horas.
3. De acuerdo al algoritmo para determinar el estado actual de contaminación en la ciudad de Mexicali B.C en base al Índice Aire y Salud mostraron que:
 - a) Los promedios diarios generados por los 10 sensores instalados en Mexicali B.C. durante el año 2020, mostraron que enero y diciembre fueron los meses que presentaron promedios con mayor índice de contaminación. El 1 de enero

fue el día con mayor contaminación, en promedio se tiene un índice de 110.28 señalando una calidad del aire mala y el día 26 de diciembre se llegó al segundo promedio con mayor índice de calidad de aire moderada llegando a 88.24. Estos registros principalmente se obtienen debido a la quema de madera y detonación de fuegos artificiales por celebraciones de año nuevo y navidad.

- b) Que en el estudio realizado durante el año 2020, hubo 2 meses de calidad de aire insalubre para el ser humano, 4 meses en condiciones moderadas y finalmente 7 meses con una calidad de aire buena. Sin embargo esto no significa que en ciertas horas del día la contaminación no esté en un punto muy insalubre para el ser humano, como se observa en las tablas generadas.
- c) Las zonas más afectadas durante este periodo de tiempo, fueron la zona poniente y zona sur oriente. En base a las características de las zonas mas afectadas, se concluye que la falta de pavimentación en un alto porcentaje de calles, la quema de basura constante en casas abandonadas, la zona industrial y el alto porcentaje de automóviles sin verificación vehicular son factores que se relacionan a mala la calidad del aire.

Bibliografía

- Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4), pp. 393 – 422, 2002.
- Albishi, S., Soh, B., Ullah, A., and Algarni, F. Challenges and solutions for applications and technologies in the internet of things. *Procedia Computer Science*, 124, pp. 608 – 614, 2017.
- Atzori, L., Iera, A., and Morabito, G. The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), pp. 2787 – 2805, 2010.
- Bacardit, N. S., Bargall, E. V., Ugena, J. A., and Vila, L. C. Contaminación atmosférica, riesgo cardiovascular e hipertensión arterial. *Hipertensión y Riesgo Vascular*, 35(4), pp. 177 – 184, 2018.
- Bahga, A. and Madisetti, V. *Internet of Things: A hands-on approach*. Vpt, 2014.
- Boubrima, A., Bechkit, W., and Rivano, H. On the deployment of wireless sensor networks for air quality mapping: Optimization models and algorithms. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 27(4), pp. 1629–1642, 2019.
- Cabaneros, S. M., Calautit, J. K., and Hughes, B. R. A review of artificial neural network models for ambient air pollution prediction. *Environmental Modelling Software*, 119, pp. 285 – 304, 2019.
- Chow, J. C. Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles. *Journal of the Air Waste Management Association*, 45(5), pp. 320–382, 1995.
- Corbellini, S., Francia, E. D., Grassini, S., Iannucci, L., Lombardo, L., and Parvis, M. Cloud based sensor network for environmental monitoring. *Measurement*, 2017.

-
- Corona-Zambrano, E. A. and Rojas-Caldelas, R. I. Calidad del aire y su incorporación en la planeación urbana: Mexicali, baja california. *Estudios fronterizos*, 10, pp. 79 – 102, 2009.
- Dunfan Ye, Daoli Gong, and Wei Wang. Application of wireless sensor networks in environmental monitoring. volume 1, pp. 205–208, 2009.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., and Palaniswami, M. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29, 2012.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., and Palaniswami, M. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), pp. 1645 – 1660, 2013.
- Han, Q., Liu, P., Zhang, H., and Cai, Z. A wireless sensor network for monitoring environmental quality in the manufacturing industry. *IEEE Access*, 7, pp. 78108–78119, 2019.
- Johnston, S. J., Basford, P. J., Bulot, F. M. J., Apetroaie-Cristea, M., Easton, N. H. C., Davenport, C., Foster, G. L., Loxham, M., Morris, A. K. R., and Cox, S. J. City scale particulate matter monitoring using lorawan based air quality iot devices. *Sensors*, 19(1), 2019.
- Kanabkaew, T., Mekbungwan, P., Raksakietisak, S., and Kanchanasut, K. Detection of pm2.5 plume movement from iot ground level monitoring data. *Environmental Pollution*, 252, pp. 543 – 552, 2019.
- Kelly, S. D. T., Suryadevara, N. K., and Mukhopadhyay, S. C. Towards the implementation of iot for environmental condition monitoring in homes. *IEEE Sensors Journal*, 13(10), pp. 3846–3853, 2013.
- Lee, H. and Lin, H. Design and evaluation of an open-source wireless mesh networking module for environmental monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 16(7), pp. 2162–2171, 2016.
- Lee, I. and Lee, K. The internet of things (iot): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), pp. 431 – 440, 2015.

-
- Lee, K. Ieee 1451: A standard in support of smart transducer networking. In *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference [Cat. No. 00CH37066]*, volume 2, pp. 525–528 vol.2, 2000.
- Li, W. and Kara, S. Methodology for monitoring manufacturing environment by using wireless sensor networks (wsn) and the internet of things (iot). *Procedia CIRP*, 61, pp. 323 – 328, 2017.
- M., M. Daneshvar, B. H. M. D. L. H. L. K. y. S. L. Personal pm2.5 exposure and markers of oxidative stress in blood. *Environmental Health Perspectives*, pp. 161â166, 2003.
- Mois, G., Folea, S., and Sanislav, T. Analysis of three iot-based wireless sensors for environmental monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(8), pp. 2056–2064, 2017.
- Montori, F., Bedogni, L., and Bononi, L. A collaborative internet of things architecture for smart cities and environmental monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2), pp. 592–605, 2018.
- Mr. Jerry Winberry Mr. Lance Henning Mr. Richard Crume Midwest Research Institute 401 Harrison Oaks Blvd., Suite 350 Cary, N. C. . Plan de red de monitores del aire ambiental para ciudad acuña y piedras negras, coahuila, méxico. *U.S.-México Border Information Center on Air Pollution*, 1998.
- Peng, C., Qian, K., and Wang, C. Design and application of a voc-monitoring system based on a zigbee wireless sensor network. *IEEE Sensors Journal*, 15(4), pp. 2255–2268, 2015.
- Ramani, S. K. and Iyengar, S. S. Evolution of sensors leading to smart objects and security issues in iot. In Rao, N. S., Brooks, R. R., and Wu, C. Q. (Eds.), *Proceedings of International Symposium on Sensor Networks, Systems and Security*, Cham, Springer International Publishing, pp. 125–136, 2018.
- Saarikko, T., Westergren, U. H., and Blomquist, T. The internet of things: Are you ready for what’s coming? *Business Horizons*, 60(5), pp. 667 – 676, 2017.
- Said, O. and Masud, M. Towards internet of things: Survey and future vision. *International Journal of Computer Networks*, 5, pp. 1–17, 2013.

-
- Spachos, P. and Hatzinakos, D. Real-time indoor carbon dioxide monitoring through cognitive wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 16(2), pp. 506–514, 2016.
- Tomas, L., Damith, R., Mark, H., and Duncan, M. .adding sense to the internet of things - an architecture framework for smart object systems.", volume = "16", journal = "personal and ubiquitous computing", pp. 291–308, 2012.
- Torfs, T., Sterken, T., Brebels, S., Santana, J., van den Hoven, R., Spiering, V., Bertsch, N., Trapani, D., and Zonta, D. Low power wireless sensor network for building monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 13(3), pp. 909–915, 2013.
- Ubilla, C. and Yohannessen, K. Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), pp. 111 – 118. Tema central: Enfermedades respiratorias infantiles, 2017.
- Valls, J. M. Efectos de la calidad del aire sobre la salud. *FMC - Formación Médica Continuada en Atención Primaria*, 24(9), pp. 511 – 514, 2017.
- Wu, F., Wu, T., and Yuce, M. R. Design and implementation of a wearable sensor network system for iot-connected safety and health applications, pp. 87–90, 2019.
- Yang, C.-T., Chen, S.-T., Den, W., Wang, Y.-T., and Kristiani, E. Implementation of an intelligent indoor environmental monitoring and management system in cloud. *Future Generation Computer Systems*, 2018.
- Zhu, C., Zheng, C., Shu, L., and Han, G. A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(2), pp. 619 – 632. Simulation and Testbeds, 2012.