



*"El saber de mis hijos
bará mi grandeza"*

UNIVERSIDAD DE SONORA



DIVISIÓN INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
Y METALURGIA

“SENSORES DE BAJO COSTO PARA EL
MONITOREO DE LA CALIDAD DEL
AIRE EN LA CIUDAD DE HERMOSILLO,
SONORA”

Tesis

Que para obtener el Título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta:

Kenia Guadalupe Rico Soto

Director:

M. I. Gilberto García Navarrete

Hermosillo, Sonora

Diciembre 2018

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

DEDICATORIA

A **Mis Padres**, Alberto Rico y Guadalupe Soto,
por los cuales soy todo lo que soy y por su apoyo
en cada paso que he dado. Porque son
y siempre serán mi más grande motor.

A **Mi Hermano**, que ha compartido de una forma
o de otra mi vida y la ha vuelto más bella.

A **Roberto**, por acompañarme en esta travesía,
por su apoyo y paciencia en todo momento.

A **Mis Tías**, Elizabeth y Sandra que me apoyaron
desde el primer día que inicie este viaje.

A **Mi Yo** de 7 años por haber escogido
la carrera correcta y dejarme llegar hasta aquí,
“omnia mecum porto”.

A **Mis Maestros** por obligarme a salir
de mi zona de confort y a mejorar constantemente.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora y muy especialmente al Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia.

A mi director de tesis el M.I. Gilberto García Navarrete, por su tiempo, su paciencia y enseñarme durante cada momento que pase con usted.

A mis sinodales M.A. Manual Balcazar y Dr. Armando Lucero por el tiempo invertido en la revisión de mi trabajo.

A mi sinodal L.E. Joel Alonso Zepeda Ibarra por su apoyo en las correcciones de mi trabajo y proporcionarme información que ayudo a nutrirlo.

Al Instituto Municipal de Ecología por facilitarme el acceso a la información con la que cuentan.

A PROTOCOOL INTERNACIONAL S.A. DE C.V. por involucrarme en un proyecto tan ambicioso que dio como resultado este trabajo.

INDICE

INDICE DE FIGURAS	IV
INDICE DE TABLAS	V
INDICE DE CUADROS	VI
RESUMEN	VIII
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS.....	5
OBJETIVO GENERAL.....	5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
JUSTIFICACIÓN	6
1. ANTECEDENTES	8
1.1. Desarrollo histórico del monitoreo de calidad de aire	10
1.1.1. En México.....	11
1.1.2. En Hermosillo	13
1.2. Tecnología actual.....	19
1.3. Problemas planteados para resolver	22
2. SENSORES DE BAJO COSTO.....	24
2.1. Sensores Meteorológicos	25
2.2. Sensores para calidad del aire	27
3. MONITOREO	32
3.1. Muestreo	36
3.2. Normatividad nacional vigente en calidad del aire	39
3.2.1. Normas de la Secretaria de Salud (SSA).	40

3.2.2.	Normas de la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).	42
3.2.3.	Normas adicionales	45
3.2.4.	Comparación de la normatividad internacional.	46
3.3.	Índices de calidad del aire	47
3.3.1.	Air Quality Index (AQI)	53
3.3.2.	Pollution Standard Index (PSI)	63
3.3.3.	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA)	65
3.3.4.	Efectos sobre la salud	75
3.3.5.	Programa para el cálculo de índices	81
3.4.	Obtención y procesamiento de datos	81
3.4.1.	Calibración	84
3.4.2.	Características deseadas de los datos obtenidos	88
3.4.3.	Descarte de datos	89
4.	SELECCIÓN DE LOS SENSORES DE BAJO COSTO DE ACUERDO A LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE LA NORMATIVIDAD VIGENTE.	91
4.1.	Listado completo de sensores que conforman la unidad integral de monitoreo.	94
4.2.	Propuesta de integración de una unidad compacta de monitoreo.	94
5.	PROPUESTA DE UNA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE CON SBC.	97
5.1.	Análisis de costos.	102
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	104

6.1. Conclusiones	104
6.2. Recomendaciones	104
7. BIBLIOGRAFIA.....	106
<u>Bibliografía</u>	106
8. ANEXOS.....	112
8.1. Definiciones básicas	112
8.2. Instituciones involucradas en calidad del aire en México.....	119
8.3. Contaminantes criterio	120

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de los componentes de la estación de prueba del estudio de la EPA de 2015 (Jiao, Hagler, & Williams, 2015).	8
Figura 2. Localización de estaciones de la red manual de monitoreo atmosférico operada por el municipio de Hermosillo y condiciones de pavimentación (CCA , 2014).	17
Figura 3. Ejemplos de SBC para temperatura	25
Figura 4. Ejemplos de SBC para presión	26
Figura 5. Ejemplos de SBC para humedad relativa	27
Figura 6. Ejemplos de SBC para PM ₁₀ , PM _{2.5} y PM _{1.0}	30
Figura 7. Ejemplos de SBC para Ozono (O ₃).....	30
Figura 8. Ejemplos de SBC para Dióxido de Azufre (SO ₂).....	30
Figura 9. Ejemplos de SBC para Dióxido de Nitrógeno (NO ₂).	31
Figura 10. Ejemplos de SBC para Monóxido de Carbono (CO)	31
Figura 11. Grafica descriptiva del PSI (Correa, 2011).....	64
Figura 12. Carcasa de la unidad de monitoreo compacta con SBC.....	95
Figura 13. Localización del municipio de Hermosillo en el estado de Sonora, México.....	97
Figura 14. Casco urbano del municipio de Hermosillo, vista satelital (GOOGLE, 2018).	99
Figura 15. Plano del casco urbano del municipio de Hermosillo, Sonora, México (Google, 2018).	100
Figura 16. Mapa de estaciones de monitoreo compactas con sensores de bajo costo.....	101

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones de monitoreo.....	14
Tabla 2. Periodos de red de medición de calidad del aire.....	15
Tabla 3. Red manual de monitoreo en Hermosillo.	18
Tabla 4. Métodos actuales	21
Tabla 5. Nuevos enfoques de detección presentados en el EPA 2013: taller de sensores de aire.....	24
Tabla 6. Normas de calidad del aire en materia de salud vigente.....	41
Tabla 7. Resumen de las normas emitidas por la secretaria de salud en calidad de aire	42
Tabla 8. Normas técnicas en calidad del aire vigentes.	44
Tabla 9. Normas adicionales en calidad del aire.....	45
Tabla 10. Límites de concentración recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y comparación con la normatividad vigente en México, Estados Unidos (USEPA), California (CARB-US) y Unión Europea (UE).	46
Tabla 11. Punto de quiebre e interpretación actual del PSI.	49
Tabla 12. Punto de quiebre e interpretación actual del AQI.....	50
Tabla 13. Metodología para calcular el AQI.	51
Tabla 14. Puntos de quiebre y método actual del IMECA para el O ₃	52
Tabla 15. Descripción de peligro del AQI.....	54
Tabla 16. Significado del AQI.....	56
Tabla 17. Puntos de quiebre para cálculo del AQI para PM ₁₀	57
Tabla 18. Puntos de quiebre para cálculo del AQI para PM _{2.5}	58
Tabla 19. (Continuación) Puntos de quiebre para cálculo del AQI para PM _{2.5} . .	59
Tabla 20. Puntos de quiebre para cálculo del AQI para Ozono (O ₃).....	60
Tabla 21. Puntos de quiebre para cálculo del AQI para Dióxido de azufre (SO ₂)	61
Tabla 22. Puntos de quiebre para cálculo del AQI para Dióxido de Nitrógeno	

(NO ₂).	62
Tabla 23. Puntos de quiebre para cálculo del AQI para Monóxido de Carbono (CO).	63
Tabla 24. Intervalos de concentración para asignación de colores.	66
Tabla 25. Ecuaciones para el cálculo del IMECA para ozono (O ₃).	69
Tabla 26. Ecuaciones para el cálculo del IMECA para dióxido de Nitrógeno (NO ₂).	70
Tabla 27. Ecuaciones para el cálculo del IMECA para dióxido de azufre (SO ₂).	71
Tabla 28. Ecuaciones para el cálculo del IMECA para monóxido de Carbono (CO).	72
Tabla 29. Ecuaciones para el cálculo del IMECA para partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀).	73
Tabla 30. Ecuaciones para el cálculo del IMECA para partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5}).	74
Tabla 31. Temperatura.	91
Tabla 32. Presión.	92
Tabla 33. Humedad Relativa.	92
Tabla 34. PM10 y PM2.5.	93
Tabla 35. Ozono.	93
Tabla 36. Dióxido de Azufre.	93
Tabla 37. Dióxido de Nitrógeno.	93
Tabla 38. Monóxido de Carbono.	94
Tabla 39. Sensores seleccionados con rango y método de calibración.	96
Tabla 40. Costo de SBC seleccionados.	102

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Comparación de métodos de muestreo.	38
---	----

Cuadro 2. Escala de colores (NADF, 2006).	65
Cuadro 3. Calificación asociada al color de la calidad del aire (NADF, 2006). .	67
Cuadro 4. Mensajes de riesgos a la salud y acciones asociados al color de la calidad del aire (NADF, 2006).	67
Cuadro 5. Efectos a la salud por exposición a contaminantes criterio.	75
Cuadro 6. Descripción de la opción 1 de calibración.	86
Cuadro 7. Descripción de la opción 2 de calibración.	87
Cuadro 8. Descripción de la opción 3 de calibración.	88
Cuadro 9. Banderas usadas en la limpieza de datos (INE(5), 2018).	89

RESUMEN

El constante crecimiento las ciudades tiene una desventaja marcada en cuanto a calidad de vida se refiere, el deterioro de la calidad del aire se ha convertido en uno de los retos más complejo a resolver por la humanidad. La normatividad actual en México, en tema de calidad del aire no se encuentra con las posibilidades de competir con las tecnologías actuales y la velocidad con la que se genera y maneja información con estas. La opción que se presenta son los sensores de bajo costo (SBC), debido a su diseño compacto y las ventajas económicas de operación es la base de nuevos proyectos en tema de calidad del aire tanto en la Unión Europea como en U.S.A. El presente trabajo realiza un análisis de las condiciones y tecnología actuales en monitoreo y muestreo de calidad del aire, al igual que la propuesta de la sustitución de esta por una estación de monitoreo formada con sensores de bajo costo, proponiendo una posible estructura para una red de monitoreo con estas estaciones para la ciudad de Hermosillo, Sonora.

INTRODUCCIÓN

La gestión de la contaminación del aire se vuelve importante debido a afirmaciones como las siguientes: “A causa del desarrollo industrial y avance tecnológico se estima que aproximadamente 1200 millones de personas en el mundo están expuestas a niveles de dióxido de azufre (SO₂) muy por encima de las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y aproximadamente 1400 millones de personas están expuestas a niveles excesivos de humo y material articulado (PM)” (Schwela, 2006).

Es por ello que “El objetivo de la gestión de la calidad del aire urbano es proteger la salud pública y el medioambiente de los efectos dañinos de la contaminación del aire, y eliminar o reducir al mínimo la exposición de las personas a los contaminantes nocivos” (Schwela, 2006).

“En algunos países la falta de control en la planificación urbana, ha permitido a las fuentes industriales de contaminación ser construidas cerca de áreas residenciales densamente pobladas” (Schwela, 2006). A este problema se le suman la falta de equipo de monitoreo, técnicas y criterios de evaluación, así como de un marco legal que resulte útil al panorama actual y futuro. El resultado de este descuido se refleja en que la contaminación puede alcanzar niveles críticos en ciudades en algunos países en desarrollo (Schwela, 2006).

La industria en constante crecimiento dentro de las grandes ciudades ha generado efectos sobre la salud humana, a consecuencia de un aumento en la contaminación del aire, como en el caso de Louisville en Estados Unidos, en donde se encontró una relación directa con el aumento de personas afectadas por el asma y el aumento de la concentración de contaminantes en el aire ambiente.

Una alternativa al monitoreo ambiental presentada por la Environmental Protection Agency (EPA) y ampliamente apoyada por los programas de investigación de la Unión Europea son los sensores de bajo costo, que presentan ventajas en tamaño, facilidad de uso y como su nombre lo indica en costos. El inconveniente es que no existe un protocolo de validación de datos obtenidos por sensores de bajo costo en la normatividad nacional, así como tampoco se cuenta con un protocolo de calibración ni un método de referencia como en el caso de los equipos de monitoreo de alto volumen que se establece en la NOM-035-SEMARNAT-1993.

La tecnología normada de alto volumen maneja un protocolo de operación costoso y tardado mientras que los sensores de bajo costo proponen una opción que proporciona información en tiempo real y es barata al generar datos en volumen. Al crecer la industria se consideraba que sólo se contaba con efectos positivos, generación de empleos, crecimiento económico, sin embargo, los efectos nocivos en el ambiente y en la salud fueron haciéndose evidentes, por lo que se vio la necesidad de conocer la nueva composición del aire, de entender como afectaba a la salud humana y al medio ambiente.

La EPA por su parte durante todos estos años se enfocó en la búsqueda de alternativas al monitoreo con estaciones grandes y costosas, que a diferencia del de sensores de bajo costo, no presenta información en tiempo real, en su búsqueda una de sus principales motivaciones era encontrar la forma tener un control más estricto de la exposición personal a la contaminación atmosférica, es de esta forma que los sensores de bajo costo pasan a ser protagonista no solo de la industria sino también del área ambiental.

Con el surgimiento del internet y avance tecnológico acelerado se han desarrollados dispositivos con principios de dispersión de luz para la medición de concentración de partículas suspendidas, así como dispositivos con la capacidad de proporcionar información en tiempo real, lo cual no sólo nos brinda un valor promedio diario de concentración de contaminantes, si no que nos permite

obtener un perfil del comportamiento de ésta durante el día, así como las horas en que llega a su máximo y finalmente poner al alcance de los ciudadanos esta información, para conocimiento de su propia exposición. A esta gama de dispositivos se les denomina sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire (Williams, Watkins, & Long, 2014).

Se han presentado a nivel comercial varios sensores de bajo costo (SBC), con rangos de concentración diversos, que presentan una alternativa más práctica al monitoreo de alto volumen mediante estaciones, sobre todo para las ciudades en desarrollo que se enfrentan a problemas como los que la Ciudad de México tuvo que enfrentar en los años 40 (SIMAT, 2018). Estos sensores incluyen dispositivos de monitoreo de material particulado (PST, PM₁₀, PM_{2.5} y PM_{1.0}) y dispositivos de concentración de gases (NO_x, SO_x, ozono, COVs, entre otros); además, de dispositivos de monitoreo de condiciones atmosféricas (velocidad del aire, temperaturas, %HR, radiación uv, entre otros) (Williams, Watkins, & Long, 2014).

La normatividad nacional vigente en tema de calidad del aire se puede dividir en tres partes, la primera emitida por la Secretaría de Salud (SSA1) que nos plantea los límites permisibles de los contaminantes criterio, la segunda parte incluye las normas emitidas por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la cual plantea las técnicas de monitoreo, muestreo y cálculo de promedios diario, por hora, por cada ocho horas, mensual, trimestral o anual según sea el caso, y finalmente la tercera parte se considera de manera adicional dado que son normas aplicables en temas generales, son dos normas la que la conforman, la primera es aplicable al cálculo del Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA), mientras que la segunda dicta los lineamientos generales para la aplicación de cualquier sistema de monitoreo de calidad del aire.

El presente trabajo busca plantear la implementación de sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire mediante el desarrollo de una unidad de monitoreo móvil cuyos componentes principales sean sensores de bajo costo. Lo

que denota el objetivo general planteado que es establecer la viabilidad de la aplicación de sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire.

El cumplimiento de los objetivos específicos planteados para este trabajo sería en el siguiente orden:

- Seleccionar sensores de bajo costo para el monitoreo de los parámetros de calidad del aire.
- Diseñar un protocolo de calibración para los sensores de bajo costo.
- Establecer criterios de validación de datos para PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , NO_x y SO_2 .
- Establecer un programa en Excel para el filtrado de los datos en función de los índices de calidad del aire.

En el presente trabajo se realizará un desarrollo histórico del monitoreo de calidad del aire, para la Ciudad de México y para la ciudad de Hermosillo, Sonora. Posteriormente se planteará la tecnología actual de monitoreo, así como los problemas que implica.

Se describirán los principales sensores de bajo costo, así como su clasificación. Se desarrolla un análisis de la normatividad nacional vigente emitida en tema de calidad del aire. Por otra parte, también se realiza una breve descripción de los índices de calidad de aire.

Posteriormente se desarrollarán las bases del monitoreo para plantear lo necesario para la obtención y procesamiento de datos. En esta sección se presentan opciones de calibración y las características para la obtención de datos de calidad.

Finalmente, se presenta la propuesta aplicable a una estación compacta funcional de monitoreo cuyos componentes principales son los sensores de bajo

costo, una propuesta para una red de monitoreo con esta y un análisis del costo de la estación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Establecer la viabilidad de la aplicación de sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar sensores de bajo costo para el monitoreo de los parámetros de calidad del aire.
- Diseñar un protocolo de calibración para los sensores de bajo costo.
- Establecer criterios de validación de datos para PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, CO, NO₂ y SO₂.
- Establecer un programa en Excel para el filtrado de los datos en función de los índices de calidad del aire.

JUSTIFICACIÓN

La importancia del monitoreo de calidad del aire ha incrementado con los años, el desarrollo de la industria y el uso de combustibles fósiles aunado al crecimiento demográfico nos presenta un nuevo reto a resolver, la contaminación atmosférica que presenta un aumento de concentración de contaminantes criterio y la influencia directa de estos en la salud de la población de todos los países, sin importar su condición económica. Nos hemos visto en la necesidad de crear herramientas y mecanismos para poder minimizar el efecto de los contaminantes en la salud, sin embargo, hasta hace 10 años aun nos encontrábamos con la limitante de la tecnología a nuestra disposición. Era en base a esa tecnología limitada que se generó la normatividad en calidad de aire que aún se encuentra vigente desde 1993, en nuestro país no se ha actualizado ninguna norma técnica, referente a la forma de realizar las mediciones de los contaminantes criterio. Actualmente el desarrollo tecnológico crece de manera exponencial en poco tiempo y es por esta razón que la aplicación de la tecnología actual debe ser planteada para el beneficio de toda la sociedad, en este trabajo se plantea el uso de tecnología de punta como son los sensores de bajo costo (SBC) y las conexiones en tiempo real para el mejoramiento de la calidad de vida. Resulta por tanto una necesidad el que se analice la normatividad actual y se adapte a las herramientas de este siglo.

“Las universidades y asociaciones científicas que trabajan en el campo ambiental tienen un espacio natural para intervenir en el proceso de fijación de normas y ejercen una influencia favorable, gracias a la capacidad de sus profesionales calificados, el manejo de lenguaje técnico, su capacidad de generar información local, de vincularse con las redes científicas internacionales y los centros de investigación universitaria. Para que el proceso de fijación y revisión de normas sea eficaz, debe incluir los diferentes grupos de la sociedad. Los actores del

proceso de fijación de normas ambientales son: el estado, las universidades y asociaciones científicas, el sector empresarial y las organizaciones sociales” (Korc, 2000).

El desarrollo histórico nos ha mostrado que todo avance en la industria muestra una contraparte negativa, principalmente en el área ambiental, es competencia del Ingeniero Químico la búsqueda de alternativas ante tal problemática. El presente trabajo plantea la alternativa que ofrece el siglo XXI al problema de la calidad del aire, buscando reducir la exposición humana ante contaminantes criterio.

En México con las actuales normas se vuelve incosteable obtener la información necesaria para todos los interesados, tanto los ciudadanos por su exposición como las industrias y el estado, para la regulación y control de emisiones.

1. ANTECEDENTES

En 2013 la EPA llevo a cabo un taller para el desarrollo de sensores de bajo costo en el cual se planteaban los avances y la aplicación de dispositivos compactos y de bajo costo que permitirían la generación de información sobre la calidad del aire. La diversidad de principios, la comunicación en línea de los dispositivos y la falta de estándares en calibración representaban el principal objetivo de este evento (Williams, Watkins, & Long, 2014).

Para el 2015 se comienza el desarrollo de un proyecto para la conformación de una estación de monitoreo con este tipo de sensores, probando la efectividad de diferentes modelos de sensores de casi todos los contaminantes criterio, lo cual permitió probar la estabilidad del equipo en línea con un planteamiento de desarrollo de dos años. Los resultados de interferencia entre los sensores de diferentes variables es la información más relevante que se obtuvo de este documento, ya que la variación de las configuraciones no están del todo clara y las ubicaciones de las estaciones no varían en comparación con las estaciones convencionales (Jiao, Hagler, & Williams, 2015).



Figura 1. Ejemplo de los componentes de la estación de prueba del estudio de la EPA de 2015 (Jiao, Hagler, & Williams, 2015).

En 2017 se publicó el artículo de un proyecto realizado en la ciudad de Lima Perú, cuyas variables principales fueron el SO₂ y el CO₂, utilizando SBC, el cual se centraba en la búsqueda de un modelo para la predicción de las concentraciones mediante la aplicación de algoritmos de redes neuronales como la conexión entre las diferentes estaciones móviles colocadas. Cabe mencionar que el estudio no obtuvo resultados exitosos, sus predicciones fueron muy alejadas de las reales (Luna, Talavera, & Cano, 2017).

La variable más popular para la aplicación de esta tecnología es el material particulado, como el caso de PST con los detectores de humo, pero en especial las partículas PM₁₀, PM_{2.5} y PM_{1.0}. Para 2018 la EPA se encuentra con la aplicación de un proyecto de la mano de AirMappear para el uso de un monitreador compacto móvil (similar al tamaño de una hielera pequeña) para la detección de material particulado. Por su parte en España se desarrolló una tesis para la creación de un módulo de detección de PM₁₀ y PM_{2.5}, enfocada al desarrollo de un sensor para estas variables, a la selección del tipo de hardware y la comunicación con Arduino a un teléfono celular con Android como sistema operativo (Pérez Maquieira, 2018). De igual manera debido a las limitaciones de esta tecnología se cuenta con artículos que evalúan su calidad y buscan alternativas de calibración de los sensores de PM disponibles en el mercado (Wang, y otros, 2015).

En un principio los sensores de bajo costo se desarrollaron para mejorar la calidad de vida, mejorando la calidad del aire en el interior de casas habitación. Como en el caso de sensores para control de ruidos, detectores de humo en caso de incendios, entre otros. Se busca desarrollar un sistema que monitoree por completo una casa (casa inteligente) y que permita detectar cualquier problema que se presente en esta, principalmente para adultos mayores que viven solos.

1.1. Desarrollo histórico del monitoreo de calidad de aire

“Aun cuando las acciones de control de la contaminación del aire se remontan por lo menos a fechas tan lejanas como el siglo XIII, la mayor parte del esfuerzo principal en el mundo ha tenido lugar desde 1945. Antes de ese momento, otros asuntos se encontraban en lugares más alto de la lista de prioridades de la sociedad. En las décadas de 1930 y 1940, la chimenea de una fábrica que emitía una gruesa columna de humo se consideraba con un signo de prosperidad y algunas oficinas gubernamentales la incluían en sus símbolos oficiales” (De Nevers, 1998).

“Antes de 1945, los esfuerzos de la contaminación industrial del aire estaban dirigidos a controlar las emisiones de las grandes fábricas, de contaminantes que habían conducido a entrar en conflicto con los vecinos de las mismas. Gran parte de esto no comprendía la intervención del gobierno sino, más bien, era una respuesta a litigios por daños provocados por molestias o la amenaza de esos litigios” (De Nevers, 1998).

“En EUA, entre 1945 y 1969, conforme aumento gradualmente la adquisición de conciencia de los problemas de la contaminación del aire, se iniciaron algunos esfuerzos locales, para controlar esa contaminación. Entre 1963 y 1967 el gobierno federal empezó a vigilar y coordinar los esfuerzos locales y estatales sobre el control de la contaminación del aire” (De Nevers, 1998).

Antes del año 1969, el interés de la población en general sobre el tema de contaminación del aire no era significativo. Alrededor de esta época aumento de manera dramática y ha permanecido así hasta estos días (De Nevers, 1998).

“En los últimos años de la década de 1980, un nuevo tema entró a la arena de la contaminación del aire: la contaminación global del aire. Hasta 1980, la mayor parte de los problemas sobre este particular se percibían como locales. Los contaminantes de interés duraban poco en la atmosfera, o bien, eran emitidos en cantidades tan pequeñas que no se concebían como un problema lejos del lugar

del cual se emitían. De este modo, parecía lógico dejar que los gobiernos locales o estatales se enfrentaran a ellos. En la década de 1980 surgieron tres problemas relacionados con contaminantes de mayor duración y con aquellos que son acarreados a través de largas distancias antes de que produzcan su daño: la lluvia ácida, la destrucción de la capa de ozono por los clorofluorocarbonos y la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera. La estructura legal y administrativa, desarrollada en la década de 1970 para enfrentar los problemas locales de contaminación del aire, parece inútil para habérselas con estos problemas internacionales o globales” (De Nevers, 1998).

1.1.1. En México

En México el primer indicador del deterioro ambiental fue la visibilidad, en la década de los 40 era de 4 a 10 km y en los años 50 se redujo de 2 a 4 km (SIMAT, 2018).

Para 1950 en la Dirección de Higiene Industrial de la Secretaría de Salubridad y Asistencia realizó las primeras investigaciones en la Ciudad de México donde se confirmaba la existencia de contaminación ambiental. En 1960 se publicó el “Estudio del depósito de polvo por gravedad en la Ciudad de México” en el cual se describe que existían áreas en las que se depositaron hasta 70 ton/km²/mes de polvo en la época de tolván. En 1966, se instalan las primeras 4 estaciones para el monitoreo de dióxido de azufre, partículas suspendidas, polvo sedimentable y acidez. Para el año siguiente, en 1967 la Organización Panamericana de la Salud instaló la “Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación del Aire (REDPANAIRES)” con 10 estaciones además de las 4 existentes (SIMAT, 2018).

En 1973 el gobierno mexicano y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) adquieren equipos para aumentar a 22 estaciones de monitoreo e integrar la “Red Computarizada Automática de Monitoreo

Atmosférico del Valle de México” o “Red Philips”. Para 1976 se suspende el monitoreo de la Red Philips y solo quedan en operación los equipos manuales para el muestreo de partículas suspendidas (SIMAT, 2018).

En 1985 la Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) adquiere un nuevo sistema de monitoreo atmosférico con 25 estaciones, un centro de cómputo y procesamiento, dos radares sónicos y 10 torres meteorológicas. Al año siguiente inicia formalmente la operación de la “Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)” con 25 estaciones automáticas para la medición de O₃, CO, SO₂, NO_x, y equipos manuales para PST y su contenido de Pb. En 10 de estas estaciones se instalaron equipos para medir temperatura ambiente, humedad relativa, dirección y velocidad del viento. Para el 87 se inició el Programa de Precipitaciones Acidas en la Zona Metropolitana del Valle de México con 4 sitios de muestreo equipados con colectores convencionales (SIMAT, 2018).

En 1993 se amplía la cobertura de la RAMA, aumentando a 32 estaciones automáticas de monitoreo, tres años después entran en operación 10 estaciones más con equipo automático para el monitoreo de Partículas Menores a 10 micrómetros (PM₁₀). Para 1996 se instala en 10 estaciones de la RAMA equipo para la medición de radiación UV (SIMAT, 2018).

En el año 2000 se integra el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), unificando a la RAMA, REDMA, REDMET, REDDA. Además de una unidad móvil de Monitoreo Atmosférico, un Laboratorio de Transferencia de Estándares, Laboratorio de Gravimetría y un centro de cómputo. Tres años después inicia el monitoreo de partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) con 8 equipos automáticos y 7 con equipos manuales. En 2007 se amplía la cobertura del SIMAT con tres nuevas estaciones Iztacalco (ITZ), Acolman (ACO) y Chalco (CHI) al SIMAT. Para 2009 se instala una red para el monitoreo de hidrocarburos tóxicos y reactivos en el aire ambiente de la Zona Metropolitana del Valle de México (SIMAT, 2018).

Para 2011 se da un rediseño del SIMAT. Se eliminan 10 estaciones de monitoreo que ya no cumplían con los objetivos de calidad del aire. Se refuerzan 13 estaciones con nuevos parámetros. Se inicia el monitoreo BTES y el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México cumple 25 años de operación continua. En el año siguiente, 2012, se integran al SIMAT cinco nuevas estaciones Cuautitlán (CUT), Santa Fe (SFE), UAM Xochimilco (UAX), Ajusco (AJU) y Hospital General de México (HGM) (SIMAT, 2018).

1.1.2. En Hermosillo

“La medición de la calidad del aire en la ciudad de Hermosillo se inició en 1989 con una red manual compuesta de tres estaciones para el muestreo de PST” (CCA , 2014).

En el periodo de 1990 a 1995 se realizaron por parte de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) y la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) muestreos de partículas suspendidas totales PST. En 1994 se inicia el monitoreo de PM₁₀. Se muestreó la calidad de aire de la ciudad de Hermosillo en cuatro sitios distribuidos estratégicamente en el casco urbano, la Tabla 1 presenta la localización de las estaciones de muestreo, así como la cantidad y tipo de aparatos muestreadores utilizados (Barajas Olvera, 2007).

Tabla 1. Estaciones de monitoreo.

Sitios	Ubicación	Numero de muestreadores		Altura del muestreo (m)
		PM ₁₀	PST	
CESUES	Ley Federal del Trabajo s/n, colonia Apolo	1	1	6.80
MAZON (Centro)	Guerrero y Elías Calles, colonia Centro		1	12.94
SEMESON	Mendoza y Rep. de Panamá, colonia El Sahuaro		1	5.50
Cuauhtémoc	Teotihuacán, colonia Cuauhtémoc	1		13.00

Fuente: (Barajas Olvera, 2007).

El Municipio de Hermosillo inicia de manera formal el Programa de Monitoreo de la Calidad del Aire en el año 2004, los aparatos de muestreo son donados al municipio por la SEMARNAT y son reinstalados en sitios céntricos pese al crecimiento urbano que ha rebasado en kilómetros las zonas marginales de diez años atrás (Barajas Olvera, 2007).

De acuerdo con La Subdirección de Evaluación de Emisiones y Monitoreo Atmosférico (SEEMA) y la delegación de la SEMARNAT en Sonora es posible señalar tres periodos relacionados con el desarrollo de la red de medición de calidad del aire en el municipio de Hermosillo (CCA , 2014). En la Tabla 2 se presenta el resumen de estos periodos.

Periodo	Año	Programa	Características
1	90's	Programa Ambiental Mexicano y el Programa Ambiental Fronterizo.	Se donaron equipos para iniciar el programa de monitoreo local.
2	2000	Programa de Gestión y Evaluación de la Calidad del Aire.	Diagnostico operativo , rehabilitación y reubicación de algunos equipos donados.
3	2008	Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (CEDES).	se creó la Red Estatal de Información e Infraestructura de la Calidad del Aire (REIICA).

Fuente: (CCA , 2014)

En este sentido, el gobierno de Sonora recibió apoyo del presupuesto del Programa de Egresos de la Federación a través del ramo 16 en 2008 y 2010, con lo cual se pudieron adquirir:

- Muestreadores de PM₁₀ en 2008 para renovar algunos equipos antiguos y obsoletos, y ampliar la cobertura de la Red a otros 3 municipios: Guaymas, Navjoa y Puerto Peñasco;
- Cuatro estaciones automáticas en 2010 instaladas en Agua Prieta, Ciudad Obregón, Nogales y Hermosillo, y que entraron en operación en abril de 2011 (CCA , 2014).

Sin embargo, a partir de principios de 2012, la REIICA no ha contado con información actualizada; la operación de las estaciones automáticas ha presentado problemas de operación por falta de personal capacitado y recursos; empero, la red manual de partículas mantiene su funcionamiento y es operada por el municipio de Hermosillo (CCA , 2014).

La red de monitoreo manual consiste en cuatro estaciones para PST y PM₁₀. La red automática, operada por el estado, tiene una estación en Hermosillo. En ella se miden los parámetros que se presentan en la tabla 3. De acuerdo con la información obtenida por el Secretariado, el programa de monitoreo presenta dificultades de orden técnico-financiero, las cuales se suman a los cambios administrativos que afectan al personal técnico a cargo de la operación de la red manual (CCA , 2014).

Asimismo, se contó durante el primer semestre de 2012 con una unidad móvil automática, propiedad del estado de Sonora, localizada en la Universidad de Sonora, a cargo de personal técnico de la REIICA, mientras que el personal del CEDES se encarga de procesar los datos. (CCA , 2014).

A partir de enero de 2018 se integraron a la red muestreadores de bajo volumen para el monitoreo de PM_{2.5} al Programa Estatal de Monitoreo de Calidad del Aire (PEMCA), estos equipos fueron prestados por la UNISON por medio del Dpto. de Geología y la Dra. Diana Meza. Este periodo se terminó el mes de julio del mismo año.

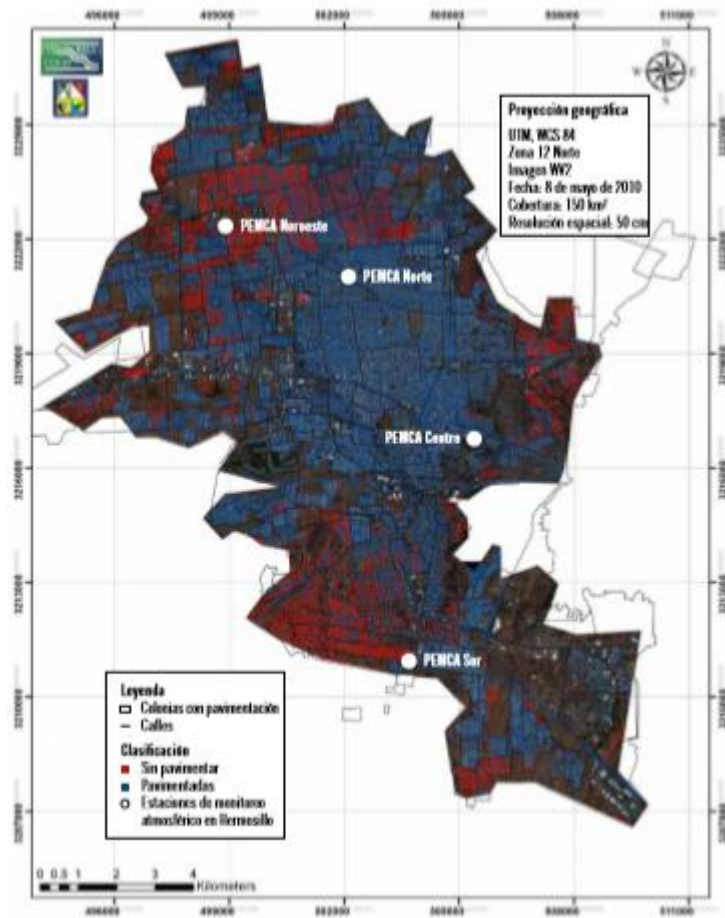


Figura 2 Localización de estaciones de la red manual de monitoreo atmosférico operada por el municipio de Hermosillo y condiciones de pavimentación (CCA , 2014).

Tabla 3. Red manual de monitoreo en Hermosillo.				
Núm.	Localización	Dirección	Coordenadas	Parámetros
1	Norte	Sobre un edificio del Cesues ubicado en Ley Federal del Trabajo s/n, Col. Apolo	N29°07'23.3" W110°57'40.3"	PST y PM ₁₀
2	Noroeste	Sobre un edificio del CBTIS ubicado en República de Colombia,, entre Cocorit y Bacobampo, Col. Misión	N29°07'12.3" W111°00'24.4"	PST y PM ₁₀
3	Centro	Sobre un edificio del H. Ayuntamiento, conjunto Morelia, ubicado en Av. Morelia núm. 220, entre Carbó y Palma, Col. Centro	N29°04'49.7" W110°56'31.7"	PST
4	Sur	Sobre un edificio del Cobach, plantel "Villa de Seris", ubicado en Blvd. Vildosola Sur s/n y Av. Bachilleres, Col. Villa de Seris.	N29°02'45.9" W110°57'30.4"	PST y PM ₁₀

Fuente: (CCA , 2014)

Debido a la falta de continuidad en el monitoreo de calidad del aire en el municipio de Hermosillo de manera formal no se cuenta con datos referentes a cada contaminante criterio en la ciudad de Hermosillo, Sonora. La información disponible se limita en su mayoría a PST y PM₁₀.

Se cuenta con diversos estudios de la calidad del aire, pero en su mayoría enfocados a la presencia de metales pesados y a la calidad microbiológica del aire. De manera formal no se cuenta con un inventario de emisiones, sin embargo, por parte de SEMARNAT se cuenta con el registro de las fuentes de

emisión industriales de manera indirecta por medio de las Cédulas de Operación Anual.

Por parte del Instituto Municipal de Ecología (IME), mediante el Programa Estatal de Monitoreo de Calidad del Aire (PEMCA) se cuenta con datos de PST desde el año 2000 hasta la fecha, por otro lado, también se cuenta con información de PM_{10} durante dos periodos, interrumpidos entre sí por 3 años por motivos administrativos. El primer periodo de 2000 a 2012, mientras que el segundo inicia a partir de 2016 y continua hasta la fecha. Como se mencionó anteriormente en el periodo enero-julio de 2018 se generaron datos para $PM_{2.5}$, sin embargo, es la única información con la que se cuenta.

Cabe mencionar que los datos antes mencionados no cumplen con lo establecido en las normas para considerarse válidos, dado que no cuentan con datos suficientes para cumplir con el 75% que solicita la normatividad vigente. Además, la distribución de la toma de datos varía en cada año.

1.2. Tecnología actual

La contaminación del aire es la presencia en el aire de materiales nocivos producidos por el hombre, en cantidades bastante grandes como para producir efectos nocivos. (De Nevers, 1998). Bajo este principio se desarrolló normatividad en base a aquellas sustancias que se consideraban más dañinas al ser humano, en México las sustancias normadas para calidad de aire son: el ozono (O_3), el monóxido de carbono (CO), el bióxido de azufre (SO_2), el bióxido de nitrógeno (NO_2), el plomo (Pb), las partículas suspendidas totales (PST), y las partículas suspendidas menores a 10 y a 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$).

Los métodos utilizados (INE(1), 2018) en nuestro país actualmente para análisis de muestra son:

- Métodos Volumétricos

- Métodos Gravimétricos.
- Métodos fotométricos.
- Espectrofotometría.

En la Tabla 4 se presentan en forma resumida los métodos de referencia aplicados para cada contaminante, los equipos que se utilizan según el método de referencia y los métodos equivalentes que de forma alternativa pero igualmente valida pueden aplicarse para determinar la concentración de los contaminantes criterio.

Tabla 4. Métodos actuales

Contaminantes	Método de referencia normado	Equipos según el método de referencia	Métodos equivalentes
Dióxido de azufre (SO₂)	Pararrosanilina	-	Fluorescencia ultravioleta y Fluorescencia pulsante
Monóxido de carbono (CO)	absorción en el infrarrojo	Fotómetro no dispersivo	Fotometría infrarroja (IR) de filtro de correlación de gas
Dióxido de nitrógeno (NO₂)	quimioluminiscencia en fase gaseosa	Analizador de quimioluminiscencia	-
Ozono (O₃)	Luminiscencia química	Monitor para ozono	fotometría ultravioleta
Partículas suspendidas totales (PST)	Muestreo: alto volumen. Análisis: gravimetría	Muestreador de alto volumen	Métodos de atenuación de radiación beta (BAM) y de microbalanza de elemento agudo oscilante (TEOM)
Partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)	No se cuenta con una NOM de métodos de medición		Métodos de atenuación de radiación beta (BAM) y de microbalanza de elemento agudo oscilante (TEOM)
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5})	No se cuenta con una NOM de métodos de medición		Métodos de atenuación de radiación beta (BAM) y de microbalanza de elemento agudo oscilante (TEOM)
Plomo (Pb)	No se cuenta con una NOM de métodos de medición		

1.3. Problemas planteados para resolver

Uno de los principales problemas que enfrenta la tecnología actual es la falta de acceso a los datos obtenidos de forma inmediata, en un mundo en el que las comunicaciones permiten estar conectado con casi cualquier parte del mundo, la limitante de contar con información desfasada en tiempo y que en su mayoría solo proporcionan un promedio diario, es el principal reto. Por otro lado, el costo de operación dadas las necesidades de las instalaciones, los suministros y el personal calificado, vuelve costoso el método actual de monitoreo de calidad del aire. El error humano es bastante común en este caso y la posibilidad de pérdidas de datos es mayor en casos en los que aún se tiene que muestrear de manera manual. A pesar de que se cuenta con algunos equipos automáticos y semiautomáticos, la disponibilidad de los datos en tiempo real a la comunidad en general sigue estando muy lejos de esta tecnología.

Los sensores de bajo costo por su parte también plantean retos que son necesarios resolver para su aplicación formal al monitoreo de la calidad del aire. Es a partir del 2013 que la EPA comienza a buscar la forma de implementar sensores de bajo costo en el área ambiental, se comenzó a hablar de la disponibilidad de estos en el mercado y la opción de su uso, planteando un alcance que beneficie a la sociedad para aplicación de monitoreo, prevención y control de exposición, al igual que para programas de remediación.

En 2015 se da inicio al diseño de una estación de monitoreo que permita el uso de estos sensores como parte de un monitoreo constante, en estados unidos también se plantea la opción de una estación ubicada en una banca en un parque en St. Louis. En Sudamérica se plantea una red de sensores de bajo costo para realizar un monitoreo de calidad del aire mediante la programación de redes neuronales para generar un modelo de predicción de concentración de contaminantes, cabe mencionar que no se obtuvieron resultados favorables del todo. Pero estos permitieron ver la necesidad de ajustes que requiere el uso de esta tecnología.

El principal problema que encontramos es que no se cuenta con protocolos estandarizados de calibración para los sensores de bajo costo, lo que vuelve difícil determinar cómo datos de calidad todos los datos obtenidos, por otra parte, aún no se tiene un rango de detección específico, es decir no se cuenta con un área definida en la que se puedan tomar como iguales los valores otorgados por los sensores.

En cuestión de diseño si bien no se tiene tal vez la sensibilidad deseada en rango, se cuenta con sensores de bajo costo disponibles en el mercado que nos presentan rangos aceptables en el caso de medición de gases, la sensibilidad de los sensores sería el punto a resolver en este tema. Por su parte la temperatura de operación nos pone en un inconveniente al tratarse de equipos que se colocaran al aire libre en ciudades de climas extremos como es el caso de la Cd. De Hermosillo Sonora. Los rangos promedio de los sensores disponibles son de 45°C a 55°C como máximo y si bien no se llega a temperaturas tan altas en la sombra, es posible sobrepasarlas cuando se encuentren expuestos directamente al sol. El resto de los parámetros de operación no parecen presentar mayor problema debido a que manejan rangos amplios de humedad relativa.

El problema principal a enfrentar es la calidad del aire, mientras no se tenga de forma clara la situación a la que nos enfrentamos no será posible implementar medidas para resolverla. Es por este motivo que se plantea una herramienta alternativa que son los sensores de bajo costo para obtener información suficiente para plantearnos cuál es la situación actual de calidad del aire en la ciudad de Hermosillo Sonora.

2. SENSORES DE BAJO COSTO

La definición de sensores de bajo costo varía un poco dependiendo del autor, sobre todo en que se considera bajo costo. Los sensores de bajo costo son como su nombre lo indica sensores, pero tienen la particularidad de que su precio debe ser inferior a un valor máximo, este límite puede variar entre los \$100.00 y los \$500.00 dólares (Williams, Watkins, & Long, 2014). En la Tabla 5 se presentan los principios que se encuentran en desarrollo para su aplicación en SBC para calidad del aire.

Tabla 5. Nuevos enfoques de detección presentados en el EPA 2013: taller de sensores de aire.

Contaminación	Enfoques emergentes de lectura directa
Partículas	MEMS con una capa de carga de un resonador acústico
	Miniaturización de dispersión de luz
	Sintonización de horquilla de cristal
	Oclusión de luz entre fibras ópticas
Gases	Óxido de metal
	Electroquímica (3 o 4 diente)
	Sintonización impresa de horquilla de cristal
	Nanotubos de carbono
	Semiconductores orgánicos
	Cromatografía de fases miniaturizados
	Electrospun compuesto de polímero de nano fibras
	Sensor infrarrojo no dispersivo miniaturizado
Colorimétrico	

Fuente: (Williams, Watkins, & Long, 2014)

Dado que se pretende sustituir a las estaciones de monitoreo convencionales, también es necesario considerar los SBC para variables meteorológicas, es por eso que se consideraran también en la selección de los SBC que conformaran la unidad de monitoreo.

2.1. Sensores Meteorológicos

Los sensores meteorológicos que se pueden considerar son sensores de temperatura, presión, radiación UV, lluvia, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. En particular para el presente trabajo tomaremos en consideración de esta categoría solo los sensores de presión, temperatura y humedad relativa, que para efectos prácticos nos permitirán realizar correcciones en los sensores de calidad del aire.

Temperatura

Se podría decir que son los más sencillos y de menor precio. Se encuentran disponibles a nivel comercial sensores que registran la temperatura, pero también los hay en forma modular, es decir que contienen más de un sensor que detecta más de una variable. En la Figura 3 se muestran ejemplos de los sensores de temperatura disponibles en el mercado.

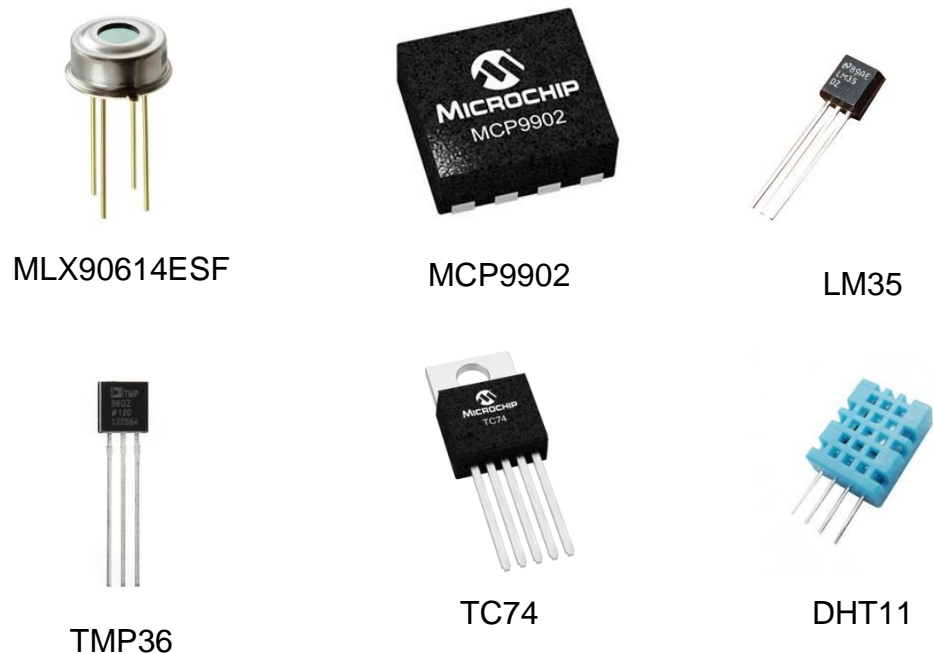


Figura 3 Ejemplos de SBC para temperatura

Presión

Suelen encontrarse en forma modular y tener también la opción de también detectar temperatura. En la Figura 4 se muestran ejemplos de los sensores disponibles en el mercado para esta variable.



BMP180 (T)



BMP085 (T)



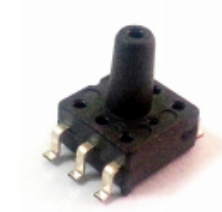
BMP280 (T)



CS100



CS106



MPS20N0040D-S

Figura 4 Ejemplos de SBC para presión

Humedad Relativa

La mayoría cuenta con la variable de temperatura incluida y se pueden encontrar en forma modular, incluyendo también presión. En la Figura 5 se muestran algunos ejemplos de los sensores disponibles comercialmente para Humedad Relativa.



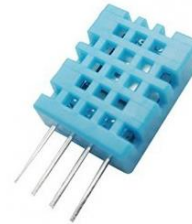
Si7021-A20



RHT03



DHT22



DHT11

Figura 5 Ejemplos de SBC para humedad relativa

2.2. Sensores para calidad del aire

Los sensores de calidad del aire incluyen los sensores para la detección de gases (SO_x , NO_x , O_3 , VOC's, entre otros), partículas suspendidas (PST, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y $\text{PM}_{1.0}$) y metales pesados (Pb).

El surgimiento de estos sensores se da principalmente como una forma de controlar la exposición del personal en plantas donde se producen estas sustancias, por lo que se cuenta con bastantes sensores de bajo costo disponibles en el mercado para medición de calidad de aire en interiores.

Sensores químicos para gases.

Definiendo un sensor químico como “un dispositivo analítico capaz de detectar determinadas especies químicas de manera continua y reversible, el cual consta de un transductor acoplado a una fase de reconocimiento o químicamente selectiva” (Escalona, Manganiello, López, & Vega, 2012).

Basándonos en la información química que genera el sensor y las características del transductor que lo conforma es posible clasificarlos en tres tipos,

electroquímicos, piezoeléctricos y ópticos (Escalona, Manganiello, López, & Vega, 2012).

Sensores piezoeléctricos

“Se fundamentan en micro-gravimetría, es decir, la medición de cambios de masa que ocurren como una característica de la interacción de las especies químicas con el sensor. Su diseño consta de un material piezoeléctrico sometido a oscilación” (Escalona, Manganiello, López, & Vega, 2012).

Sensores electroquímicos

“Los sensores electroquímicos se clasifican en potenciométricos, voltimétricos y conductimétricos. El mecanismo de funcionamiento depende principalmente del principio físico que los gobierna de acuerdo a su clasificación” (Escalona, Manganiello, López, & Vega, 2012).

Potenciométricos: “obtienen su información útil de una relación explícita entre el potencial de un electrodo indicador o contador y la concentración de la especie de interés. Debido a que no se puede medir el potencial de una sola fase se introduce un segundo electrodo, también conocido como electrodo de referencia, con el cual se medirá una diferencia de potencial entre el electrodo indicador y el de referencia” (Escalona, Manganiello, López, & Vega, 2012). Estos sensores se pueden subdividir conforme a la base de funcionamiento del electrodo que utilizan en dos tipos (Escalona, Manganiello, López, & Vega, 2012):

- Sensores basados en electrodos selectivos de iones conocidos como ISE (por sus siglas en inglés de Ion Selective Electrodes).
- Sensores basados en transistores de efecto de campo.

Voltimétricos: “se basan en la medición de la relación corriente-voltaje, donde se aplica un potencial al sensor y se mide una corriente proporcional a la especie electro-activa de interés; un caso especial de este tipo de sensor es el amperométrico, en el cual el voltaje aplicado se mantiene constante. Este tipo de

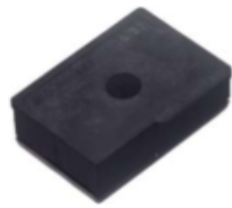
sensores funciona al reaccionar con el compuesto que se desea determinar (en este caso gas) produciendo una señal eléctrica proporcional a la concentración de gas” (Escalona, Manganiello, López, & Vega, 2012).

Conductimétricos: “están relacionados con la medición de la conductividad a una serie de frecuencias. Dependen de los cambios de la conductividad eléctrica de una capa o la mayor parte de un material, ocasionados por la presencia del compuesto de interés” (Escalona, Manganiello, López, & Vega, 2012).

Sensores ópticos

“Los sensores ópticos se basan en la detección de un haz de luz u otras ondas electromagnéticas durante la interacción con las especies químicas que se desean determina. Los principios físicos y arreglos desarrollados en el área de los sensores ópticos para la detección de gases son numerosos, como son por lo tanto los distintos métodos de detección de señal, por ejemplo: detectores infrarrojos (que trabajan con señales en el espectro infrarrojo) y por fotoionización (señales ubicadas en el espectro ultravioleta)” (Escalona, Manganiello, López, & Vega, 2012).

En las Figuras 7, 8, 9 y 10 se muestran ejemplos de diferentes modelos de sensores de bajo costo que se encuentran disponibles en el mercado para cada variable de interés en la calidad del aire, estos mismos modelos son los que se tomaron en consideración para la conformación de la unidad de monitoreo compacto planteada. Al igual que en los sensores meteorológicos se pueden encontrar en forma modular y con la posibilidad de detectar más de una variable. En el caso de gases esta última característica puede generar interferencias cruzadas.



GP2Y1010
(SHARP, 2018)



SM-PWM-01C
(TELAIRE, 2018)

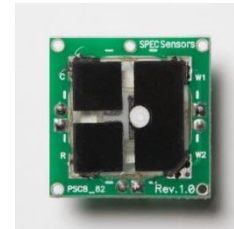


HK-A5
(Bjhike, 2018)

Figura 6 Ejemplos de SBC para PM₁₀, PM_{2.5} y PM_{1.0}.

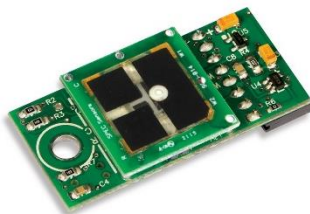


DGS-O3 968-042
(SPEC, 2018)



3SP_O3_5 P Package 110-407
(SPEC, 2018)

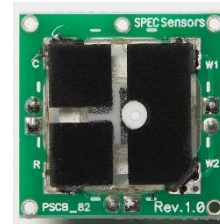
Figura 7. Ejemplos de SBC para Ozono (O₃)



DGS-SO2 968-038
(SPEC, 2018)



C03-0973-100
(ICON, 2018)



3SP_SO2_20P Package 110-601
(SPEC, 2018)

Figura 8. Ejemplos de SBC para Dióxido de Azufre (SO₂)



DGS-NO2 968-043
(SPEC, 2018)



ME3-H₂S
(Winsen, 2018)

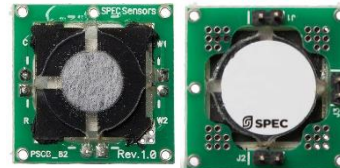


NO2-A1
(Alphasense, 2018)

Figura 9. Ejemplos de SBC para Dióxido de Nitrógeno (NO₂).



3SP_CO_1000 Package 110-109
(SPEC, 2018)



3SP_CO_1000 Package 110-102
(SPEC, 2018)

Figura 10. Ejemplos de SBC para Monóxido de Carbono (CO)

3. MONITOREO

Partiendo de la definición de monitoreo como “una actividad consistente en observar una situación para detectar los cambios que ocurren con el tiempo” (INE(1), 2018) y considerando al monitoreo de la calidad del aire como “el conjunto de metodologías diseñadas para muestrear, analizar y procesar en forma continua y sistemática las concentraciones de sustancias o de contaminantes presentes en el aire” (INE(1), 2018).

“El propósito final del monitoreo no es simplemente recoger datos, sino entregar la información necesaria a los científicos, formuladores de políticas y planificadores para tomar decisiones fundamentadas para la gestión y el mejoramiento del medio ambiente. El monitoreo tiene un rol central en este proceso, entregando las bases científicas sólidas para el desarrollo de políticas y estrategias, establecimiento de niveles de actividad de las fuentes contaminantes, conformidad de las mediciones en comparación a metas y la aplicación de acciones. Sin embargo, ningún programa de monitoreo, bien fundado y diseñado, puede esperar cuantificar compresiblemente los patrones de contaminación del aire tanto en tiempo como en espacio. En el mejor de los casos, el monitoreo entrega una ilustración incompleta (pero útil) de la calidad del aire actual” (Schwela, 2006).

En el caso particular del monitoreo planteado para sensores de bajo costo mediante una unidad integral de monitoreo de la calidad del aire se enfocará en cumplir con los siguientes objetivos (Schwela, 2006) propios del monitoreo:

- Determinación de la exposición de la población y evaluación del impacto en la salud.

- Determinación del cumplimiento con los estándares nacionales e internacionales.
- Entregar el aporte de objetivos para la gestión de la calidad del aire, planificación del tráfico y el uso de suelos.
- Desarrollo de políticas y priorización de acciones.
- Desarrollo/validación de herramientas de gestión (modelos, Sistemas de Información Geográficos, etc.).
- Calificación de tendencias, para identificar futuros problemas o progreso en comparación con los objetivos de la gestión/control.

Los siguientes son los requerimientos esenciales (Schwela, 2006) que deben cumplir las mediciones, para que se cumplan todos los objetivos de monitoreo:

- Exactitud y precisión de las mediciones.
- Trazabilidad a estándares de metrología.
- Integridad temporal (recopilación de datos).
- Representatividad espacial y cobertura.
- Consistencia de lugar en lugar y en el tiempo.
- Comparabilidad/homologación internacional.

El número de captadores de muestras usados en un estudio (Schwela, 2006), también depende de:

- Uso/objetivo de los datos requeridos.
- Área a ser cubierta.
- Variabilidad espacial de los contaminantes.
- Disponibilidad de los recursos.
- Instrumentos utilizados.

“El monitoreo implica la evaluación del comportamiento tanto en tiempo como en espacio. Los datos básicos por si mismos tienen una utilidad limitada. Estos primero deben ser depurados (por validación) y cotejados para producir datos confiables y creíbles. El siguiente paso en la gestión de datos es el análisis e

interpretación, diseñado para entregar información útil en un formato apropiado para los usuarios finales” (Schwela, 2006).

“Para lograr una perspectiva global de la calidad del aire de una ciudad, es necesario desarrollar indicadores para evaluar cada componente de dicha capacidad” (Schwela, 2006). En este caso particular nos centraremos en dos de los cuatro índices desarrollados como conjuntos de indicadores, los de interés para este proyecto son los siguientes:

- Índice de capacidad de medición de calidad del aire. Evaluando el monitoreo del aire llevándose a cabo en una ciudad, y también la exactitud, precisión y representatividad de los datos.
- Evaluación de datos e índices de disponibilidad. Evaluando de qué manera los datos de calidad del aire son procesados para mejorar su valor y entregar información en forma relevante para la toma de decisiones. El índice también evalúa hasta qué punto hay acceso a la información y datos de la calidad del aire a través de diferentes medios.

La comunicación bilateral entre las comunidades locales y aquellos responsables de la calidad del aire es esencial, y requiere del uso de muchas técnicas para tener éxito. “el éxito de las estrategias de gestión de calidad del aire con frecuencia involucra la acción en todos los niveles de la comunidad” (Schwela, 2006).

Reportar información de calidad del aire en una forma que sea generalmente entendible para el público presenta un gran reto. “Un planteamiento es el uso de un índice estándar de contaminantes. Este sistema permite reportar un amplio rango de componentes de la calidad del aire, concentraciones y promedios sobre el tiempo al público en una cifra simple y normalizada” (Schwela, 2006).

Localmente, el monitoreo de las condiciones de salud proporciona información sobre el nivel de contaminación atmosférica y entregará datos para decidir deben tratarse estos problemas. Además, los gobiernos locales necesitan poner al

alcance de las personas la información suficiente para protegerse de la exposición directa a dicha contaminación (Schwela, 2006).

“Los temas del medio ambiente no pueden ser tratados de forma aislada; la protección del medio ambiente debe asumirse teniendo en mente un número de factores sociales y económicos, incluyendo política económica y de salud. La colaboración entre los actores involucrados y los ministerios de gobierno es necesaria para el exitoso control de la contaminación atmosférica” (Schwela, 2006).

“Para llevar a cabo el monitoreo de calidad del aire se utilizan diversos equipos, como analizadores, monitores y sensores que se agrupan en un espacio físico confinado denominado estación de monitoreo. Un grupo de estaciones de monitoreo forma redes de monitoreo, las cuales forman parte del sistema de medición de la calidad del aire” (INE(1), 2018).

Una estación de monitoreo consiste en una caseta que contiene diversos equipos, como analizadores automáticos, monitores, sensores meteorológicos, entre otros, destinados a monitorear las concentraciones de uno o más contaminantes del aire y, por lo general, algunos parámetros meteorológicos; con la finalidad de evaluar la calidad del aire en un área determinada. Por otro, se denomina red de monitoreo al conjunto de dos o más estaciones de monitoreo. Finalmente, un Sistema de Medición de la Calidad del Aire está destinado a medir, registrar y procesar información sobre calidad del aire. Está formado por estaciones de muestreo, de monitoreo y de estaciones meteorológicas, sistemas de transmisión de datos, centro de control, oficinas, laboratorios y talleres (INE(1), 2018).

Si bien se sabe que “no hay una estrategia universal de gestión de calidad del aire que pueda ser aplicada a todas las ciudades alrededor del mundo. Cada área urbana es única en términos de sus problemas de contaminación del aire, patrones temporales y espaciales de sus fuentes de contaminación y características culturales, económicas, físicas y sociales” (Schwela, 2006), los

fundamentos generales para el monitoreo son los mismos para todas las ciudades, la definición de los objetivos son los que varían dependiendo de cada caso.

3.1. Muestreo

“Muestreo es seleccionar un subconjunto de casos o individuos de una población. Una muestra estadística se obtiene con la intención de inferir las propiedades de la totalidad de la población, por lo que la muestra debe ser representativa” (INE(1), 2018).

Los métodos de medición para contaminantes atmosféricos se pueden agrupar de acuerdo a sus principios de mediciones en cinco tipos:

- 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 de 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 (INE(1), 2018).
- Muestreo con Bio-indicadores: Este método implica el uso de especies vivas generalmente vegetales, como árboles y plantas, donde su superficie funge como receptora de contaminantes (INE(1), 2018).
- 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 (INE(1), 2018).
- Método automático: 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. Las muestras colectadas se analizan utilizando una variedad de métodos los cuales incluyen espectroscopia y cromatografía de gases. Permite llevar a

cabo mediciones de forma continua para concentraciones horarias y menores (INE(1), 2018).

- Método óptico de percepción remota: Se basan en técnicas espectroscópicas. Transmiten un haz de luz de una cierta longitud de onda a la atmosfera y miden la energía absorbida. Con ellos es posible hacer mediciones, en tiempo real, de la concentración de diversos contaminantes (INE(1), 2018).

En el cuadro 1 se muestra un comparativo entre las ventajas y desventajas que presentan los métodos planteados.

Cuadro 1. Comparación de métodos de muestreo

Método	Ventajas	Desventajas	Equipos
Muestreo pasivo	Simplicidad en la operación y bajo costo (no requiere energía eléctrica).	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.	muestreadores pasivos: principalmente en forma de tubos o discos.
Muestreo con bio-indicadores	Muy bajo costo, útiles para identificar la presencia y efectos de algunos contaminantes.	Problemas con la estandarización de las metodologías y procedimientos; algunos requieren análisis de laboratorio.	-
Muestreo activo	Fácil de operar, muy confiables y costo relativamente bajo (requieren energía eléctrica).	No se aprecian los valores mínimos y máximos durante el día, sólo promedios generalmente de 24 horas; requieren de análisis de laboratorio.	muestreadores activos: burbujeadores (gases) e impactadores (partículas)
Método automático	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.	Costo elevado de adquisición y operación; requieren personal capacitado para su manejo; requieren mantenimiento y calibración constantes.	analizadores automáticos y monitores de partículas.
Método óptico de percepción remota	Valores en tiempo real, alta resolución; útiles para mediciones de emisiones de fuentes específicas, de multi-componentes y para mediciones verticales en la atmósfera.	Costo de adquisición muy elevado; requieren personal altamente capacitado para su operación y calibración; no son siempre comparables con los analizadores automáticos convencionales.	sensores remotos.

Análisis de muestras

“Con la tecnología actual este paso es esencial para la conservación de calidad y validación de los datos obtenidos mediante el monitoreo de la calidad ambiental” (INE(1), 2018), en el actual proyecto se propone omitir este paso.

3.2. Normatividad nacional vigente en calidad del aire

El gobierno federal es el responsable de establecer los estándares para la protección de la salud pública y vigilar su cumplimiento. Estos estándares se encuentran publicados en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y son de observación obligatoria en todo el país. Las NOM describen los límites permisibles para los contaminantes criterio. Estas normas están condicionadas a una revisión periódica para reflejar la información reciente sobre los efectos en la salud y la gestión de la calidad del aire (SEDEMA, 2018).

En el monitoreo de la calidad del aire se emplean dos tipos de normas: las NOM de salud ambiental que establecen los límites permisibles para los contaminantes criterio y las NOM técnicas que definen los métodos de medición de los contaminantes criterio. Dichas normas son emitidas por dos secretarías, la Secretaría de Salud y la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) respectivamente.

La aportación de cada secretaría en materia de calidad del aire es la siguiente:

- Secretaría de Salud. Los criterios para evaluar la calidad del aire respecto a los contaminantes criterio; los valores normados para las concentraciones de contaminantes criterio en el aire ambiente (INE(1), 2018).
- SEMARNAT. Los métodos de medición para determinar la concentración de contaminantes criterio en el aire ambiente y los procedimientos de calibración de los equipos de medición (INE(1), 2018).

3.2.1. Normas de la Secretaria de Salud (SSA).

Las normas emitidas por la Secretaria de Salud son las siguientes:

- o NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O_3) en el aire ambiente y criterios para su evaluación.
- o NORMA Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
- o NORMA Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2010, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO_2). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO_2) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.
- o NORMA Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO_2). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO_2) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.
- o NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente y criterios para su evaluación.
- o NORMA Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993. "Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población".

Las NOM en materia de salud vigentes son las siguientes:

Tabla 6. Normas de calidad del aire en materia de salud vigente.

Contaminantes	NOM	Publicación	Descripción
Dióxido de azufre (SO₂)	NOM-022-SSA1-2010	8 de septiembre de 2010	0.110 ppm, máximo promedio de 24 horas
			0.200 ppm, segundo máximo anual como promedio móvil de 8 horas
			0.025 ppm, promedio anual
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	23 de diciembre de 1994	11.0 ppm, máximo anual como promedio móvil de 8 horas
Dióxido de nitrógeno (NO₂)	NOM-023-SSA1-1993	23 de diciembre de 1994	0.210 ppm, promedio horario
Ozono (O₃)	NOM-020-SSA1-2014	19 de agosto de 2014	0.095 ppm, promedio horario
			0.070 ppm, máximo anual promedio móvil de 8 horas
Partículas suspendidas totales (PST)			Derogado
Partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)	NOM-025-SSA1-2014	20 de agosto de 2014	75 µg/m ³ , promedio 24 horas
			40 µg/m ³ , promedio anual
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5})	NOM-025-SSA1-2014	20 de agosto de 2014	45 µg/m ³ , promedio 24 horas
			12 µg/m ³ , promedio anual
Plomo (Pb)	NOM-026-SSA1-1993	23 de diciembre de 1994	1.5 µg/m ³ , en un periodo de tres meses como promedio aritmético

Fuente: (SEDEMA, 2018)

Tabla 7. Resumen de las normas emitidas por la secretaria de salud en calidad de aire

Contaminante y NOM	Concentración		Tiempo
	(ppm)	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
Ozono (O_3)	0.095		1 hr
NOM-020-SSA1-2014	0.070		8 hrs
Monóxido de Carbono (CO)	11	12,595	8 hrs
NOM-021-SSA1-1993			(móvil)
Dióxido de azufre (SO_2)	0.200	524	8 hrs
NOM-022-SSA1-2010	0.110	228	24 hrs
	0.025	66	Anual
Dióxido de Nitrógeno (NO_2)	0.021	395	1 hr
NOM-023-SSA1-1993			
Partículas suspendidas totales (PST)	n/a	210	24 hrs
NOM-025-SSA1-1993			
PM ₁₀	n/a	75	24 hrs
NOM-025-SSA1-2014	n/a	40	Anual
PM _{2.5}	n/a	45	24 hrs
NOM-025-SSA1-2014	n/a	12	Anual
Plomo (Pb)	n/a	1.5	trimestral
NOM-026-SSA1-1993			

3.2.2. Normas de la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Las normas emitidas por SEMARNAT son las siguientes:

- o Norma Oficial Mexicana NOM-034-SEMARNAT-1993. Establece los métodos de medición para determinar la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
- o Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993. Establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición.

- o Norma Oficial Mexicana NOM-036-SEMARNAT-1993. Establece los métodos de medición para determinar la concentración de ozono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
- o Norma Oficial Mexicana NOM-037-SEMARNAT-1993. Establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de nitrógeno en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.
- o Norma Oficial Mexicana NOM-038-SEMARNAT-1993. Establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición

Las NOM técnicas definen los métodos de medición recomendados para el monitoreo de los contaminantes criterio. Estos métodos de medición pueden ser de referencia o equivalentes. Generalmente los métodos de medición propuestos por la NOM tienen una correspondencia con los designados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés), por lo que cuando no existe una NOM para un contaminante criterio se utiliza la recomendación de la US EPA.

Las NOM técnicas vigentes se describen a continuación:

Tabla 8. Normas técnicas en calidad del aire vigentes.			
Contaminantes	NOM	Publicación	Descripción
Dióxido de azufre (SO ₂)	NOM-038-SEMARNAT-1993	18 de octubre de 1993	Método equivalente fluorescencia ultravioleta
Monóxido de carbono (CO)	NOM-034- SEMARNAT-1993	18 de octubre de 1993	Método de referencia: absorción en el infrarrojo
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	NOM-037- SEMARNAT-1993	18 de octubre de 1993	Método de referencia: quimioluminiscencia en fase gaseosa
Ozono (O ₃)	NOM-036- SEMARNAT-1993	18 de octubre de 1993	Método equivalente: fotometría ultravioleta
Partículas suspendidas totales (PST)	NOM-035- SEMARNAT-1993	18 de octubre de 1993	Muestreo: alto volumen Análisis: gravimetría
Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)	No se cuenta con una NOM de métodos de medición, sin embargo, se considera el método equivalente que recomienda la US EPA		Gravimetría o atenuación de radiación beta
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	No se cuenta con una NOM de métodos de medición, sin embargo, se considera el método equivalente que recomienda la US EPA		Gravimetría o atenuación de radiación beta
Plomo (Pb)	No se cuenta con una NOM de métodos de medición		

Fuente: (SEDEMA, 2018)

3.2.3. Normas adicionales

Las 2 normas adicionales que se consideraran son las siguientes:

- o Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006, que establece los requisitos para elaborar el índice metropolitano de la calidad del aire.
- o Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire.

Existen dos normas más, una que establece los requisitos para la elaboración del índice de calidad del aire -publicada en 2006 por el Gobierno del Distrito Federal- y la segunda que regula el establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire -publicada en 2012 por el Gobierno Federal. En la Tabla 9 se describen las normas anteriores.

Tabla 9. Normas adicionales en calidad del aire.		
Norma	Publicación	Descripción
NADF-009-AIRE-2006	29 de noviembre de 2006	Establece los requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de Calidad del Aire
NOM-156-SEMARNAT-2012	16 de julio de 2012	Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire

Fuente: (SEDEMA, 2018)

3.2.4. Comparación de la normatividad internacional.

En la tabla 10 se puede observar claramente como los límites permisibles son en su mayoría más altos que en el caso de los otros países y OMS.

Tabla 10. Límites de concentración recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y comparación con la normatividad vigente en México, Estados Unidos (USEPA), California (CARB-US) y Unión Europea (UE).

Contaminante	Tiempo para el promedio	México	NAAQS-USEPA	CARB-US	OMS	UE
PM₁₀	24 horas	75 µg/m ³	150 µg/m ³	50 µg/m ³	50 µg/m ³	50 µg/m ³
	Anual	40 µg/m ³	-----	20 µg/m ³	20 µg/m ³	40 µg/m ³
PM_{2.5}	24 horas	45 µg/m ³	35 µg/m ³	-----	25 µg/m ³	-----
	Anual	12 µg/m ³	12 µg/m ³	12 µg/m ³	10 µg/m ³	25 µg/m ³
Ozono (O₃)	1 hora	0.095 ppm	-----	0.090 ppm	-----	-----
	8 horas	0.070 ppm	0.070 ppm	0.070 ppm	0.050 ppm	0.060 ppm
	10 minutos	-----	-----	-----	0.191 ppm	-----
Dióxido de azufre (SO₂)	1 hora	-----	0.075 ppm	0.250 ppm	-----	0.134 ppm
	3 horas	-----	0.500 ppm	-----	-----	-----
	8 horas	0.200 ppm	-----	-----	-----	-----
	24 horas	0.110 ppm	-----	0.040 ppm	0.008 ppm	0.048 ppm
	Anual	0.025 ppm	-----	-----	-----	-----
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)	1 hora	0.210 ppm	0.100 ppm	0.180 ppm	0.106 ppm	0.106 ppm
	Anual	-----	0.053 ppm	0.030 ppm	0.021 ppm	0.021 ppm
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	-----	35 ppm	20 ppm	-----	-----
	8 horas	11 ppm	9 ppm	9 ppm	9 ppm	9 ppm

México: Calidad del aire

NAAQS-USEPA. National Ambient Air Quality Standards.

CARB-US. California Air Resources Board.

UE. Unión Europea.

OMS – Organización Mundial de la Salud

Fuente: (INECC-SEMARNAT, 2016)

3.3. Índices de calidad del aire

Se centrará en tres índices a revisar, el Índice Metropolitano de la calidad del Aire (IMECA), el Pollution Standard Index (PSI) y finalmente el Air Quality Index (AQI).

El IMECA ha pasado a ser el índice oficial de contaminación del aire en México, desde la década de los 80 del siglo pasado, normado para su cálculo por SEMARNAT. “Inicialmente, se obtenía para cada contaminante basado en dos puntos de quiebre que se consideraban valores estadísticamente conocidos, por encima de los cuales ocurren alteraciones significativas en la fisiología humana. Así, las rectas que unen dichos puntos sirven para convertir valores de concentraciones de contaminantes en el aire, a cifras en una escala arbitraria que va de 0 a 200 puntos. A partir de entonces, este índice fue aceptado como una adaptación del Pollution Standard Index (PSI) utilizado en Estados Unidos de Norteamérica” (Correa, 2011).

“Esta técnica en principio supone que la calidad del aire afecta la salud de la población en forma lineal lo cual teóricamente no corresponde con la realidad, porque definitivamente el propósito del PSI no es explicar los efectos en la salud asociados con los principales contaminantes debido a esto, la USEPA publicó en 1999 el Air Quality Index (AQI) que sustituyó al PSI” (Correa, 2011).

Algunas de las diferencias principales entre estos índices son (Correa, 2011):

- 1) El AQI incorpora revisiones de salud pública, basado en los estándares nacionales de calidad del aire ambiente, por ejemplo, para el O₃ al nivel de suelo;
- 2) Incluye una nueva categoría 101-150 designada insalubre para grupos sensibles, y la adición opcional de una declaratoria preventiva que puede utilizarse en los límites superiores del rango del O₃ a 8-horas estándar moderada
- 3) Incorpora una nueva matriz de valores (Tabla 11 y 12).

Algunas de las diferencias y similitudes entre estos índices IMECA/AQI son:

- 1) los intervalos de clase son diferentes;
- 2) El IMECA no incorpora áreas que requieren un reporte de O₃ a 8-horas (Tabla 11,12-13,14). En cambio, los tonos utilizados para los rangos son los mismos, y los nuevos métodos (ver ecuaciones Tablas 13 y 14) para elaborar estos índices no muestran cambios significativos con respecto al método propuesto inicialmente (Correa, 2011).

Tabla 11. Punto de quiebre e interpretación actual del PSI.									
Punto de quiebre PSI							Igualar éstos PSIs		
O ₃ (ppm)	O ₃ (ppm)	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	NO ₂ (ppm)	PSI	Category	Categoría
8-horas	1-horas	µg/m ³	µg/m ³						
0.000-0.069	-	0-54	0.0-5.4	0.0-4.4	0.000-0.034	(²)	0-50	Good	Buena
0.070-0.084	-	55-154	15.5-65.4	4.5-9.4	0.035-0.144	(²)	51-100	Moderate	Moderada
0.085-0.104	0.125-0.164	155-254	65.5-100.4	9.5-12.4	0.145-0.224	(²)	101-150	Unhealthy for sensitive groups	Insalubres para grupos sensibles
0.105-0.124	0.165-0.204	255-354	100.5-150.4	12.5-15.4	0.225-0.304	(²)	151-200	Unhealthy	Insalubre
0.125-0.374	0.205-0.404	355-424	150.5-250.4	15.5-30.4	0.305-0.604	0.65-1.24	201-300	Very unhealthy	Muy insalubre
(0.155-0.404) ⁴									
(³)	0.405-0.504	425-504	250.5-350.4	30.5-40.4	0.605-0.804	1.25-1.64	301-400		
(³)	0.505-0.604	505-604	350.5-500.4	40.5-50.4	0.805-1.004	1.65-2.04	401-500	Hazardous	Peligrosa

Fuente: (Correa, 2011)

Tabla 12. Punto de quiebre e interpretación actual del AQI.							
Nueva Matriz del Índice de Calidad del Aire (AQI) antes PSI en US							
	Moderada	Insalubres para grupos sensibles	Insalubre	Muy insalubre		Peligrosa	
Contaminante/ punto de quiebre	51-200	101-150	151-200	201-300	301-400	401-500	501
Valor del punto de quiebre correspondiente al índice	51	101	151	201	301	401	501
O ₃ 1 hr	No tiene en corto tiempo AQS	0.13 ppm	0.16 ppm	0.20 ppm	0.40 ppm	0.50 ppm	0.60 ppm
O ₃ 8 hr	0.064 ppm	0.084 ppm	0.104 ppm	0.124 ppm	0.374 ppm	Sin valor dado-tratar igual que 1 hr	
PM ₁₀ 24 hr	15.4 µg/m ³	40.4 µg/m ³	65.4 µg/m ³	150.4 µg/m ³	250.4 µg/m ³	350.4 µg/m ³	500.4 µg/m ³
PM _{2.5} 24 hr	54 µg/m ³	154 µg/m ³	254 µg/m ³	354 µg/m ³	424 µg/m ³	504 µg/m ³	604 µg/m ³
CO 8 hr	4.4 ppm	9.4 ppm	12.4 ppm	15.4 ppm	30.4 ppm	40.4 ppm	50.4 ppm
SO ₂ 1 hr	0.034 ppm	0.144 ppm	0.224 ppm	0.304 ppm	0.604 ppm	0.804 ppm	1.04 ppm
NO ₂ 1 hr	Sin criterio disponible en corto tiempo			0.65 ppm	1.25 ppm	1.65 ppm	2.04 ppm

Fuente: (Correa, 2011)

Tabla 13. Metodología para calcular el AQI.	
Fórmula para calcular el PSI	
$I_p = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}} (C_p - BP_{LO}) + I_{LO}$	Ejemplo: $\frac{(101 - 150)}{(0.104 - 0.085)} (0.087 - 0.085) + 101 = 106.157 = 106$
En donde	
I_p = Índice para el contaminante	
C_p = Redondeo de la concentración del contaminante	
BP_{HI} = Punto de quiebre \geq que C_p	¹ Áreas que requieren valores de O ₃ basados en 8 hrs para divulgar el PSI
BP_{LO} = Punto de quiebre \leq que C_p	² NO ₂ que no tiene ningún corto tiempo NAAQS, sólo se puede generar un PSI por arriba de 200 PSI
I_{HI} = El valor correspondiente del PSI para BP_{HI}	³ Los valores de 8-horas de O ₃ no definen valores más arriba de PSI (\geq 301). Los valores de PSI 301 o más se calculan con concentraciones de O ₃ de 1 hr.
I_{LO} = El valor correspondiente del PSI para BP_{LO}	⁴ Los valores entre paréntesis están asociados con valores de 1 hr, para ser utilizados sólo en esta categoría de traslape

Fuente: (Correa, 2011)

Tabla 14. Puntos de quiebre y método actual del IMECA para el O₃.

Contaminante	Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones en ppm	Ecuaciones de transformación	Ecuación simplificada
O ₃	0-50	0.000-0.055	$I[O_3] = C[O_3] * \frac{50}{0.055}$	$I[O_3] = C[O_3] * \frac{100}{0.11}$
	51-100	0.056-0.110	$I[O_3] = 50 - 0.055 + C[O_3] * \frac{50}{0.055}$	
	101-150	0.111-0.165	$I[O_3] = 100 - 0.111I[O_3] = C[O_3] * \frac{100}{0.11}$	
	151-200	0.166-0.220	$I[O_3] = 150 - 0.165 * \frac{50}{0.055} + C[O_3] * \frac{50}{0.055}$	
	>200	>0.220		

Fuente: (Correa, 2011)

3.3.1. Air Quality Index (AQI)

“El AQI es un índice para la notificación de la calidad del aire a diario. Indica el grado de pureza o contaminación atmosférica y los efectos para la salud conexos que le podrían preocupar. El AQI gira en torno a los efectos en la salud que una persona puede sufrir en unas cuantas horas o días tras respirar aire contaminado. La EPA calcula el AQI para cinco contaminantes atmosféricos principales reglamentados por la Ley del aire puro: ozono a nivel del suelo, contaminación por partículas, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. La EPA estableció normas nacionales sobre la calidad del aire para la protección de la salud humana conforme a cada uno de estos contaminantes. El ozono al nivel del suelo y las partículas en la atmósfera son los dos contaminantes que presentan la mayor amenaza a la salud de las personas en este país” (EPA, 2018).

El AQI tiene un rango de 0 a 500. Entre más alto es el valor del AQI, mayor es el nivel de contaminación atmosférica y mayor el riesgo para la salud. Por ejemplo, un valor del AQI de 50 representa buena calidad atmosférica con escaso potencial para afectar a la salud pública, pero un valor del AQI superior a 300 representa una calidad atmosférica peligrosa (EPA, 2018).

“Por lo general, un valor del AQI de 100 se corresponde con la norma nacional de calidad del aire para el contaminante, que es el nivel que la EPA estableció para proteger la salud pública. Por lo general, los valores de AQI inferiores a 100 se consideran satisfactorios. Cuando los valores del AQI son superiores a 100, la calidad del aire se considera insalubre, en primer lugar, para ciertos grupos de personas sensibles, y luego para todos a medida que los valores del AQI aumentan” (EPA, 2018).

El objetivo del AQI es ayudar a la población en general a comprender el significado de la calidad del aire local para su salud. A fin de facilitar su interpretación, el AQI se divide en seis categorías, las cuales están descritas en la Tabla 15.

Tabla 15. Descripción de peligro del AQI		
Valores del índice de la calidad del aire (AQI)	Niveles preocupantes para la salud	Colores
Cuando el AQI se encuentra en esta gama:	...la condición de la calidad del aire es:	...conforme se representa con el color:
0 a 50	Buena	Verde
51 a 100	Moderada	Amarillo
101 a 150	Insalubre para grupos sensibles	Naranja
151 a 200	Insalubre	Rojo
201 a 300	Muy insalubre	Morado
301 a 500	Peligrosa	Granate

Fuente: (EPA, 2018)

Cada categoría corresponde con un nivel diferente de preocupación para la salud. Los seis niveles de preocupación para la salud y su significado son:

- “Bueno”: El AQI oscila entre 0 y 50. La calidad del aire se considera satisfactoria y la contaminación atmosférica presenta un riesgo escaso o nulo (EPA, 2018).
- “Moderado”: El AQI oscila entre 51 y 100. La calidad del aire es aceptable, pero para algunos contaminantes podría existir una preocupación moderada para la salud de un grupo muy pequeño de personas. Por ejemplo, las personas que son excepcionalmente sensibles al ozono pueden padecer síntomas respiratorios (EPA, 2018).
- “Insalubre para grupos sensibles”: El AQI oscila entre 101 y 150. Si bien las personas en general no van a sufrir en esta gama del AQI, las personas con enfermedades pulmonares, los adultos mayores y los niños son más susceptibles a la exposición al ozono, mientras que las personas con cardiopatías y enfermedades pulmonares, los adultos mayores y los niños son más susceptibles a la presencia de partículas en el aire (EPA, 2018).

- “Insalubre”: El AQI oscila entre 151 y 200. Todos pueden comenzar a padecer efectos adversos para la salud y los miembros de los grupos sensibles pueden padecer efectos más graves (EPA, 2018).
- “Muy insalubre”: El AQI oscila entre 201 y 300. Esto desencadenaría una alerta sanitaria que implica que todos pueden padecer efectos más graves para la salud (EPA, 2018).
- “Peligroso”: El AQI es superior a 300. Esto desencadenaría una advertencia sanitaria de condiciones de emergencia. Son mayores las probabilidades de que toda la población esté afectada (EPA, 2018).

La EPA ha asignado un color específico a cada categoría del AQI para ayudar a las personas a interpretar rápidamente si la contaminación del aire está llegando a niveles insalubres en sus comunidades. Por ejemplo, el color naranja significa que las condiciones son “insalubres para grupos sensibles” y el rojo significa que las condiciones pueden ser “insalubres para todos”, entre otros (EPA, 2018).

Tabla 16. Significado del AQI.		
Niveles del índice de calidad del aire preocupantes para la salud	Valor numérico	Significado
Buena	0 a 50	La calidad del aire se considera satisfactoria y la contaminación atmosférica presenta un riesgo escaso o nulo.
Moderada	51 a 100	La calidad del aire es aceptable, pero para algunos contaminantes podría existir una preocupación moderada para la salud de un grupo muy pequeño de personas excepcionalmente sensibles a la contaminación ambiental.
Insalubre para grupos sensibles	101 a 150	Los miembros de grupos sensibles pueden padecer efectos en la salud. Probablemente no afectará a las personas en general.
Insalubre	151 a 200	Todos pueden comenzar a padecer efectos en la salud y los miembros de grupos sensibles pueden padecer efectos más graves.
Muy insalubre	201 a 300	Advertencias sanitarias de condiciones de emergencia. Son mayores las probabilidades de que toda la población este afectada.
Peligrosa	301 a 500	Alerta sanitaria: todos pueden padecer efectos sanitarios más graves.

Fuente: (EPA, 2018)

Dado que el cálculo del AQI tiene el mismo fundamento que el PSI, en las Tablas de la 17 a la 23 se presentan los puntos de quiebre (Break Points) para su el cálculo en el caso de cada contaminante.

Tablas de punto de quiebre para AQI:

Tabla 17. Puntos de quiebre para cálculo del AQI para PM ₁₀ .						
Parámetro	Descripción de la duración	Categoría AQI	AQI LO	AQI HI	BP LO	BP HI
PM ₁₀ total 0-10um STP	24 HORAS	BUENO	0	50	0	54
PM ₁₀ total 0-10um STP	24 HORAS	MODERADO	51	100	55	154
PM ₁₀ total 0-10um STP	24 HORAS	POCO SALUDABLE PARA LOS SENSIBLES	101	150	155	254
PM ₁₀ total 0-10um STP	24 HORAS	INSALUBRE	151	200	255	354
PM ₁₀ total 0-10um STP	24 HORAS	MUY INSALUBRE	201	300	355	424
PM ₁₀ total 0-10um STP	24 HORAS	PELIGROSO	301	400	425	504
PM ₁₀ total 0-10um STP	24 HORAS	PELIGROSO	401	500	505	604
PM ₁₀ total 0-10um STP	24 HORAS	PELIGROSO	501	999	605	99999
PM ₁₀ total 0-10um STP	24-HR BLK AVG	BUENO	0	50	0	54
PM ₁₀ total 0-10um STP	24-HR BLK AVG	MODERADO	51	100	55	154
PM ₁₀ total 0-10um STP	24-HR BLK AVG	POCO SALUDABLE PARA LOS SENSIBLES	101	150	155	254
PM ₁₀ total 0-10um STP	24-HR BLK AVG	INSALUBRE	151	200	255	354
PM ₁₀ total 0-10um STP	24-HR BLK AVG	MUY INSALUBRE	201	300	355	424
PM ₁₀ total 0-10um STP	24-HR BLK AVG	PELIGROSO	301	400	425	504
PM ₁₀ total 0-10um STP	24-HR BLK AVG	PELIGROSO	401	500	505	604
PM ₁₀ total 0-10um STP	24-HR BLK AVG	PELIGROSO	501	999	605	99999

Fuente: (EPA, 2018)

Tabla 18. Puntos de quiebre para cálculo del AQI para PM _{2.5} .						
Parámetro	Descripción de la duración	Categoría AQI	AQI LO	AQI HI	BP LO	BP HI
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24 HORAS	BUENO	0	50	0	12
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24 HORAS	MODERADO	51	100	12.1	35.4
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24 HORAS	POCO SALUDABLE PARA LOS SENSIBLES	101	150	35.5	55.4
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24 HORAS	INSALUBRE	151	200	55.5	150.4
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24 HORAS	MUY INSALUBRE	201	300	150.5	250.4
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24 HORAS	PELIGROSO	301	400	250.5	350.4
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24 HORAS	PELIGROSO	401	500	350.5	500.4
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24 HORAS	PELIGROSO	501	999	500.5	99999.9
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24-HR BLK AVG	BUENO	0	50	0	12
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24-HR BLK AVG	MODERADO	51	100	12.1	35.4
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24-HR BLK AVG	POCO SALUDABLE PARA LOS SENSIBLES	101	150	35.5	55.4
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24-HR BLK AVG	INSALUBRE	151	200	55.5	150.4
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24-HR BLK AVG	MUY INSALUBRE	201	300	150.5	250.4
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24-HR BLK AVG	PELIGROSO	301	400	250.5	350.4
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24-HR BLK AVG	PELIGROSO	401	500	350.5	500.4
Aceptable PM _{2.5} y masa de especiación	24-HR BLK AVG	PELIGROSO	501	999	500.5	99999.9

Fuente: (EPA, 2018)

Tabla 19. (Continuación) Puntos de quiebre para cálculo del AQI para PM _{2.5} .						
Parámetro	Descripción de la duración	Categoría AQI	AQI LO	AQI HI	BP LO	BP HI
PM _{2.5} -Condiciones locales	24 HORAS	BUENO	0	50	0	12
PM _{2.5} -Condiciones locales	24 HORAS	MODERADO	51	100	12.1	35.4
PM _{2.5} -Condiciones locales	24 HORAS	POCO SALUDABLE PARA LOS SENSIBLES	101	150	35.5	55.4
PM _{2.5} -Condiciones locales	24 HORAS	INSALUBRE	151	200	55.5	150.4
PM _{2.5} -Condiciones locales	24 HORAS	MUY INSALUBRE	201	300	150.5	250.4
PM _{2.5} -Condiciones locales	24 HORAS	PELIGROSO	301	400	250.5	350.4
PM _{2.5} -Condiciones locales	24 HORAS	PELIGROSO	401	500	350.5	500.4
PM _{2.5} -Condiciones locales	24 HORAS	PELIGROSO	501	999	500.5	99999.9
PM _{2.5} -Condiciones locales	24-HR BLK AVG	BUENO	0	50	0	12
PM _{2.5} -Condiciones locales	24-HR BLK AVG	MODERADO	51	100	12.1	35.4
PM _{2.5} -Condiciones locales	24-HR BLK AVG	POCO SALUDABLE PARA LOS SENSIBLES	101	150	35.5	55.4
PM _{2.5} -Condiciones locales	24-HR BLK AVG	INSALUBRE	151	200	55.5	150.4
PM _{2.5} -Condiciones locales	24-HR BLK AVG	MUY INSALUBRE	201	300	150.5	250.4
PM _{2.5} -Condiciones locales	24-HR BLK AVG	PELIGROSO	301	400	250.5	350.4
PM _{2.5} -Condiciones locales	24-HR BLK AVG	PELIGROSO	401	500	350.5	500.4
PM _{2.5} -Condiciones locales	24-HR BLK AVG	PELIGROSO	501	999	500.5	99999.9

Fuente: (EPA, 2018)

Tabla 20. Puntos de quiebre para cálculo del AQI para Ozono (O ₃).						
Parámetro	Descripción de la duración	Categoría AQI	AQI LO	AQI HI	BP LO	BP HI
Ozono	1 HORA	NINGUNO	-1	-1	0	0.124
Ozono	1 HORA	POCO SALUDABLE PARA LOS SENSIBLES	101	150	0.125	0.164
Ozono	1 HORA	INSALUBRE	151	200	0.165	0.204
Ozono	1 HORA	MUY INSALUBRE	201	300	0.205	0.404
Ozono	1 HORA	PELIGROSO	301	400	0.405	0.504
Ozono	1 HORA	PELIGROSO	401	500	0.505	0.604
Ozono	1 HORA	PELIGROSO	501	999	0.605	99999
Ozono	8-HR Promedio móvil hora inicial	NINGUNO	-1	-1	0.505	99999
Ozono	8-HR Promedio móvil hora inicial	BUENO	0	50	0	0.054
Ozono	8-HR Promedio móvil hora inicial	MODERADO	51	100	0.055	0.07
Ozono	8-HR Promedio móvil hora inicial	POCO SALUDABLE PARA LOS SENSIBLES	101	150	0.071	0.085
Ozono	8-HR Promedio móvil hora inicial	INSALUBRE	151	200	0.086	0.105
Ozono	8-HR Promedio móvil hora inicial	MUY INSALUBRE	201	300	0.106	0.2

Fuente: (EPA, 2018)

Tabla 21. Puntos de quiebre para cálculo del AQI para Dióxido de azufre (SO ₂)						
Parámetro	Descripción de la duración	Categoría AQI	AQI LO	AQI HI	BP LO	BP HI
Dióxido de azufre	1 HORA	BUENO	0	50	0	35
Dióxido de azufre	1 HORA	MODERADO	51	100	36	75
Dióxido de azufre	1 HORA	POCO SALUDABLE PARA LOS SENSIBLES	101	150	76	185
Dióxido de azufre	1 HORA	PELIGROSO	151	200	186	304
Dióxido de azufre	1 HORA	PELIGROSO	200	200	305	99999
Dióxido de azufre	24-HR BLK AVG	NINGUNO	-1	-1	0	304
Dióxido de azufre	24-HR BLK AVG	MUY INSALUBRE	201	300	305	604
Dióxido de azufre	24-HR BLK AVG	PELIGROSO	301	400	605	804
Dióxido de azufre	24-HR BLK AVG	PELIGROSO	401	500	805	1004
Dióxido de azufre	24-HR BLK AVG	PELIGROSO	501	999	1005	99999

Fuente: (EPA, 2018)

Tabla 22. Puntos de quiebre para cálculo del AQI para Dióxido de Nitrógeno (NO ₂).						
Parámetro	Descripción de la duración	Categoría AQI	AQI LO	AQI HI	BP LO	BP HI
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 HORA	BUENO	0	50	0	53
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 HORA	MODERADO	51	100	54	100
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 HORA	POCO SALUDABLE PARA LOS SENSIBLES	101	150	101	360
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 HORA	INSALUBRE	151	200	361	649
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 HORA	MUY INSALUBRE	201	300	650	1249
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 HORA	PELIGROSO	301	400	1250	1649
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 HORA	PELIGROSO	401	500	1650	2049
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	1 HORA	PELIGROSO	501	999	2050	99999

Fuente: (EPA, 2018)

Tabla 23. Puntos de quiebre para cálculo del AQI para Monóxido de Carbono (CO).						
Parámetro	Descripción de la duración	Categoría AQI	AQI LO	AQI HI	BP LO	BP HI
Monóxido de Carbono	8-HR Promedio móvil final horas	BUENO	0	50	0	4.4
Monóxido de Carbono	8-HR Promedio móvil final horas	MODERADO	51	100	4.5	9.4
Monóxido de Carbono	8-HR Promedio móvil final horas	POCO SALUDABLE PARA LOS SENSIBLES	101	150	9.5	12.4
Monóxido de Carbono	8-HR Promedio móvil final horas	INSALUBRE	151	200	12.5	15.4
Monóxido de Carbono	8-HR Promedio móvil final horas	MUY INSALUBRE	201	300	15.5	30.4
Monóxido de Carbono	8-HR Promedio móvil final horas	PELIGROSO	301	400	30.5	40.4
Monóxido de Carbono	8-HR Promedio móvil final horas	PELIGROSO	401	500	40.5	50.4
Monóxido de Carbono	8-HR Promedio móvil final horas	PELIGROSO	501	999	50.5	99999

Fuente: (EPA, 2018)

3.3.2. Pollution Standard Index (PSI)

El PSI está basado en 6 contaminantes criterio, PM₁₀, PM_{2.5}, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y Ozono. Su cálculo está definido por

una función lineal segmentada que consiste en coordenadas discretas (es decir “puntos de quiebre”) unidos por segmentos de línea recta.

(Wayne, Ott & William, & Hunt, 2012)

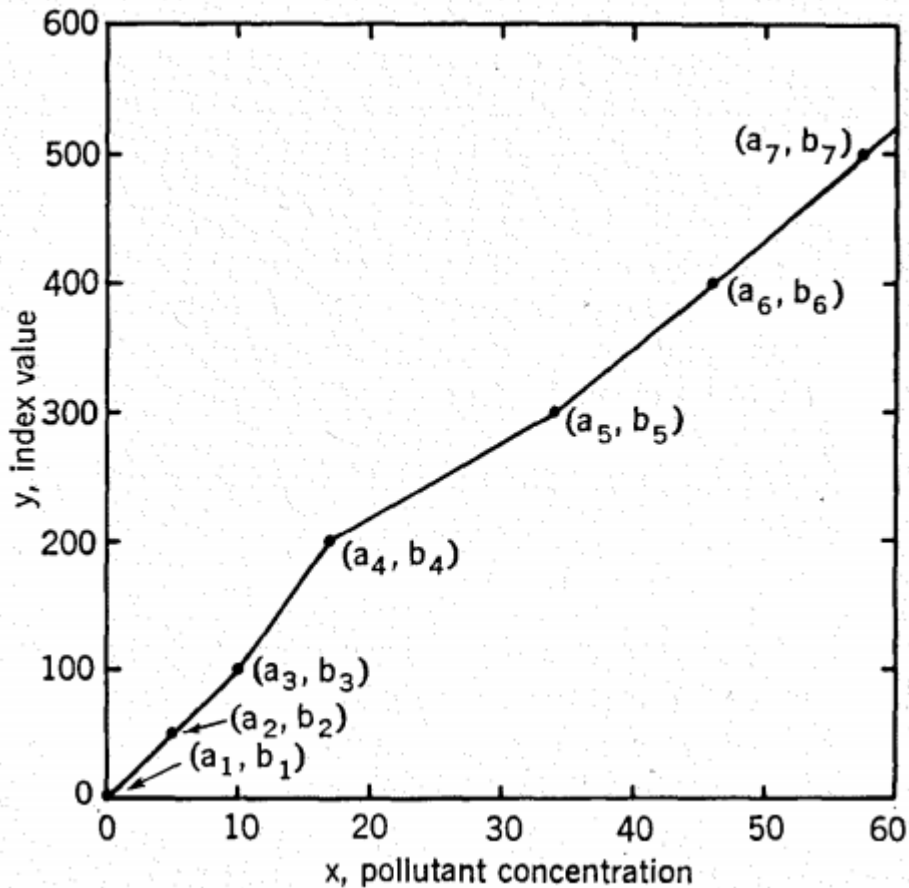


Figura 11. Grafica descriptiva del PSI (Correa, 2011).

La siguiente ecuación se puede usar para representar la función lineal segmentada.

Para el primer segmento

$$y = \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1}(x - a_1) + b_1$$

Para $a_1 < x \leq a_2$

Para cualquier segmento

$$y = \frac{b_{i+1} - b_i}{a_{i+1} - a_i} (x - a_i) + b_i$$

Para $a_i < x \leq a_{i+1}$, donde $i = 1, 2, \dots, 6$. (Wayne, Ott & William, & Hunt, 2012)

El cálculo del AQI es el mismo que el del PSI y esta descrito en la descripción de los índices.

3.3.3. Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).

El IMECA se identificará por medio de un color y un calificativo de acuerdo con el grado de riesgo que represente para la salud humana. En la siguiente escala de números y colores, entre el 0 y 50, el color verde, corresponderá a la condición recomendable de calidad del aire para que cualquier persona pueda realizar todo tipo de actividades al aire libre; entre el 51 y el 100, la asignación del color amarillo indicará que las condiciones de calidad del aire con relación a las concentraciones de los contaminantes criterio, aún son adecuadas para que la población realice actividades al aire libre. Conforme se incremente la magnitud de las concentraciones de estos contaminantes se asignará un número mayor y colores que señalan un aumento del riesgo. En orden creciente los colores son naranja, rojo y morado, este último asociado con los eventos de mayor riesgo (NADF, 2006).

Cuadro 2. Escala de colores (NADF, 2006).				
Verde	Amarillo	Naranja	Rojo	Morado

La asignación del número y el color a la concentración del contaminante atmosférico criterio que se encuentre en mayor concentración y que sea registrada en cualquiera de las estaciones de monitoreo, se realiza conforme los siguientes intervalos. Los dos primeros intervalos se definieron a partir de la mitad del valor que tiene el límite que especifica la NOM de cada contaminante (15, 19, 20, 21, 22), de esta forma se intenta prevenir ante los riesgos que causa la exposición continua a concentraciones

de contaminantes consideradas como bajas (Tabla 24). En los tres intervalos superiores de O₃, NO₂, SO₂ y CO, se consideran los valores actuales que integran sus algoritmos. Para las PM₁₀ los intervalos se definieron conforme al valor del límite que señala la NOM y para las PM_{2.5} se considera la forma de cálculo que sigue el Air Quality Index (AQI) de los Estados Unidos de América. En ambos tipos de partículas la definición de intervalos contempla que hay una mayor probabilidad de riesgo conforme se incrementa su concentración, esto a pesar de la falta de evidencia acerca de umbrales a partir de los cuales se incrementa el riesgo (NADF, 2006).

Tabla 24. Intervalos de concentración para asignación de colores.

IMECA	O ₃ [ppm] (15)	NO ₂ [ppm] (20)	SO ₂ [ppm] (19)	CO[ppm] (21)	PM ₁₀ [μ/m ³] (22)	PM _{2.5} [μ/m ³] (22,23)
0-50	0.000-0.055	0.000-0.105	0.000-0.065	0.00-5.50	0-60	0-15.4
51-100	0.056-0.110	0.106-0.210	0.066-0.130	5.51-11.00	61-120	15.5-40.4
101-150	0.111-0.165	0.211-0.315	0.131-0.195	11.01-16.50	121-220	40.5-65.4
151-200	0.166-0.220	0.316-0.420	0.196-0.260	16.51-22.00	221-320	65.5-150.4
>200	>0.220	>0.420	>260	>22.00	>320	>150.4

Fuente: (NADF, 2006)

La asignación de un color para el contaminante atmosférico criterio de mayor magnitud y un calificativo comprensible es un mecanismo que facilitará a la población comprender el estado de la calidad del aire de la zona donde reside o realiza sus actividades. Los calificativos de la calidad del aire son: buena, regular, mala, muy mala y extremadamente mala, y se refieren a la importancia del riesgo que implica la concentración de un contaminante atmosférico criterio. El uso del calificativo mala o muy mala, implica que la población debe estar atenta a los niveles de concentración del contaminante atmosférico criterio y su evolución en el tiempo, así como a los mensajes de prevención. En el cuadro 3 se indican los colores de calidad del aire y el calificativo correspondiente. En el cuadro 4 se muestran los riesgos y acciones asociados que indican los colores en cada caso.

Cuadro 3. Calificación asociada al color de la calidad del aire (NADF, 2006).	
Color	Calificativo de la calidad del aire
	Buena
	Regular
	Mala
	Muy Mala
	Extremadamente Mala

Cuadro 4. Mensajes de riesgos a la salud y acciones asociados al color de la calidad del aire (NADF, 2006).	
	La calidad del aire es:
Bueno	Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre
Regular	Se pueden llevar a cabo actividades al aire libre Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades
Mala	Causante de efectos adversos a la salud en la población, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como asma. Evite las actividades al aire libre, este atento a la información de calidad del aire “Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardiacos”
Muy Mala	Causante de mayores efectos adversos a la salud en la población en general, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma Evite salir de casa y mantenga las ventanas cerradas, esté atento a la información de la calidad del aire “Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardiacos ”
Extremadamente Mala	Causante de efectos adversos a la salud de la población en general Se pueden presentar complicaciones graves en los niños y adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma Proteja su salud, evite salir de casa y mantenga las ventanas cerradas, esté atento a la información de la calidad del aire “Acuda al médico si presenta síntomas respiratorios o cardiacos” “No use el automóvil”

La información del IMECA (color, calificativo, mensajes de riesgo y acciones sugeridas) con fines preventivos, para notificar con anticipación una posible emergencia ambiental o la calidad del aire del día siguiente, requerirá el uso de herramientas de pronóstico (modelos empíricos, modelos estadísticos, modelos fotoquímicas, entre otros). Esto permitirá informar que la calidad del aire será “amarilla / regular”, “naranja / mala” o “roja / muy mala” con anticipación (NADF, 2006).

En las Tablas 25 a la 30 se presentan las ecuaciones para el cálculo del IMECA para los contaminantes criterio, Ozono (Tabla 25), Dióxido de Azufre (Tabla 27), Dióxido de Nitrógeno (Tabla 26), Monóxido de Carbono (Tabla 28), PM_{10} (Tabla 29) y $PM_{2.5}$ (Tabla 30).

Ecuaciones para el cálculo del IMECA (I) de A a partir de las concentraciones (C) de cada contaminante criterio

Tabla 25. Ecuaciones para el cálculo del IMECA para ozono (O₃).

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones [ppm]	Ecuaciones de transformación	Ecuación simplificada
0-50	0.000-0.055	$I[O_3] = C[O_3] * \frac{50}{0.055}$	$I[O_3] = C[O_3] * \frac{100}{0.11}$
51-100	0.056-0.110	$I[O_3] = 50 - 0.055 * \frac{50}{0.055} + C[O_3] * \frac{50}{0.055}$ $I[O_3] = C[O_3] * \frac{50}{0.055}$	
101-150	0.111-0.165	$I[O_3] = 100 - 0.11 * \frac{50}{0.055} + C[O_3] * \frac{50}{0.055}$ $I[O_3] = C[O_3] * \frac{50}{0.055}$	
151-200	0.166-0.220	$I[O_3] = 150 - 0.165 * \frac{50}{0.055} + C[O_3] * \frac{50}{0.055}$ $I[O_3] = C[O_3] * \frac{50}{0.055}$	
>200	>0.220	$I[O_3] = C[O_3] * 200/0.22$	

Fuente: (NADF, 2006)

Tabla 26. Ecuaciones para el cálculo del IMECA para dióxido de Nitrógeno (NO₂).

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones [ppm]	Ecuaciones de transformación	Ecuación simplificada
0-50	0.000-0.105	$I[NO_2] = C[NO_2] * \frac{50}{0.105}$	$I[NO_2] = C[NO_2] * \frac{100}{0.21}$
51-100	0.106-0.210	$I[NO_2] = 50 - 0.105 * \frac{50}{0.105} + C[NO_2] * \frac{50}{0.105}$ $I[NO_2] = C[NO_2] * \frac{50}{0.105}$	
101-150	0.211-0.315	$I[NO_2] = 100 - 0.21 * \frac{50}{0.105} + C[NO_2] * \frac{50}{0.105}$ $I[NO_2] = C[NO_2] * \frac{50}{0.105}$	
151-200	0.316-0.420	$I[NO_2] = 100 - 0.315 * \frac{50}{0.105} + C[NO_2] * \frac{50}{0.105}$ $I[NO_2] = C[NO_2] * \frac{50}{0.105}$	
>200	>0.420	$I[NO_2] = C[NO_2] * \frac{200}{0.42}$	

Fuente: (NADF, 2006)

Tabla 27. Ecuaciones para el cálculo del IMECA para dióxido de azufre (SO ₂).			
Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones [ppm]	Ecuaciones de transformación	Ecuación simplificada
0-50	0.000-0.065	$I[SO_2] = C[SO_2] * \frac{50}{0.065}$	$I[SO_2] = C[SO_2] * \frac{100}{0.13}$
51-100	0.066-0.130	$I[SO_2] = 50 - 0.065 * \frac{50}{0.065} + C[SO_2] * \frac{50}{0.065}$ $I[SO_2] = C[SO_2] * \frac{50}{0.065}$	
101-150	0.131-0.195	$I[SO_2] = 100 - 0.13 * \frac{50}{0.065} + C[SO_2] * \frac{50}{0.065}$ $I[SO_2] = C[SO_2] * \frac{50}{0.065}$	
151-200	0.196-0.260	$I[SO_2] = 150 - 0.195 * \frac{50}{0.065} + C[SO_2] * \frac{50}{0.065}$ $I[SO_2] = C[SO_2] * \frac{50}{0.065}$	
>200	>0.260	$I[SO_2] = C[SO_2] * \frac{200}{0.26}$	

Fuente: (NADF, 2006)

Tabla 28. Ecuaciones para el cálculo del IMECA para monóxido de Carbono (CO).			
Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones [ppm]	Ecuaciones de transformación	Ecuación simplificada
0-50	0.00-5.50	$I[CO] = C[CO] * \frac{50}{5.5}$	$I[CO] = C[CO] * \frac{100}{11}$
51-100	5.51-11.00	$I[CO] = 50 - 5.5 * \frac{50}{5.5} + C[CO] * \frac{50}{5.5}$ $I[CO] = C[CO] * \frac{50}{5.5}$	
101-150	11.01-16.50	$I[CO] = 100 - 11 * \frac{50}{5.5} + C[CO] * \frac{50}{5.5}$ $I[CO] = C[CO] * \frac{50}{5.5}$	
151-200	16.51-22.00	$I[CO] = 150 - 16.5 * \frac{50}{5.5} + C[CO] * \frac{50}{5.5}$ $I[CO] = C[CO] * \frac{50}{5.5}$	
>200	>22.00	$I[CO] = C[CO] * \frac{200}{22}$	

Fuente: (NADF, 2006)

Tabla 29. Ecuaciones para el cálculo del IMECA para partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀).

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Ecuaciones de transformación	Ecuación simplificada
0-50	0-60	$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * \frac{50}{60}$	$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * \frac{5}{6}$
51-100	61-120	$I[PM_{10}] = 50 - 60 * \frac{50}{60} + C[PM_{10}] * \frac{50}{60}$ $I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * \frac{50}{60}$	
101-150	121-220	$I[PM_{10}] = 100 - 120 * \frac{50}{100} + C[PM_{10}] * \frac{50}{100}$ $I[PM_{10}] = 40 + C[PM_{10}] * \frac{50}{100}$	$I[PM_{10}] = 40 + C[PM_{10}] * 0.5$
151-200	221-320	$I[PM_{10}] = 150 - 220 * \frac{50}{100} + C[PM_{10}] * \frac{50}{100}$ $I[PM_{10}] = 40 + C[PM_{10}] * \frac{50}{100}$	
>200	>320	$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * \frac{200}{320}$	$I[PM_{10}] = C[PM_{10}] * \frac{5}{8}$

Fuente: (NADF, 2006)

Tabla 30. Ecuaciones para el cálculo del IMECA para partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}).

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentraciones [µg/m ³]	Ecuaciones de transformación	Ecuación simplificada
0-50	0-15.4	$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * \frac{50}{15.4}$	$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * \frac{50}{15.4}$
51-100	15.5-40.4	$I[PM_{2.5}] = 51 - 15.5 * \frac{49}{24.9} + C[PM_{2.5}] * \frac{49}{24.9}$ $I[PM_{2.5}] = 20.50 + C[PM_{2.5}] * \frac{49}{24.9}$	$I[PM_{2.5}] = 20.50 + C[PM_{2.5}] * \frac{49}{24.9}$
101-150	40.5-65.4	$*I[PM_{2.5}] = 101 - 40.5 * \frac{49}{24.9} + C[PM_{2.5}] * \frac{49}{24.9}$ $I[PM_{2.5}] = 21.30 + C[PM_{2.5}] * \frac{49}{24.9}$	$I[PM_{2.5}] = 21.30 + C[PM_{2.5}] * \frac{49}{24.9}$
151-200	65.5-150.4	$I[PM_{2.5}] = 151 - 65.5 * \frac{49}{84.9} + C[PM_{2.5}] * \frac{49}{84.9}$ $I[PM_{2.5}] = 113.20 + C[PM_{2.5}] * \frac{49}{84.9}$	$I[PM_{2.5}] = 113.20 + C[PM_{2.5}] * \frac{49}{84.9}$
>200	>150.4	$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * \frac{201}{150.5}$	$I[PM_{2.5}] = C[PM_{2.5}] * \frac{201}{150.5}$
<p>* Se realizó una modificación a la formula, se modificó el primer factor de $\frac{19}{24.9}$ a $\frac{49}{24.9}$. con el fin de que el resultado obtenido mediante las tres fórmulas fuese el mismo.</p>			

Fuente: (NADF, 2006)

3.3.4. Efectos sobre la salud

“La población en riesgo es la parte de la población que está expuesta a crecientes concentraciones de contaminación. Cada población tiene grupos sensibles o sub poblaciones, los cuales tienen un mayor riesgo de desarrollar efectos en la salud después de estar expuestos a la contaminación. Los grupos sensibles incluyen individuos afectados por enfermedades concurrentes u otras limitaciones fisiológicas, y aquellos con características específicas, que los hacen más vulnerables a los contaminantes del aire. Otros grupos pueden ser considerados de alto riesgo debido a la exposición prolongada (trabajadores al aire libre, atletas, niños). Los grupos sensibles en una población pueden variar en cada país debido a diferencias en cuidados médicos, estatus nutricional, estilo de vida y/o factores genéticos prevalentes o enfermedades debilitantes prevalentes” (Schwela, 2006). El Cuadro 5 presenta de manera resumida los efectos de cada contaminante criterio sobre la salud humana.

Cuadro 5. Efectos a la salud por exposición a contaminantes criterio.	
Contaminante	Efecto a la salud
Ozono	Irritación ocular y en las vías respiratorias
Monóxido de carbono	Formación de carboxihemoglobina ocasionando apnea
Plomo	Acumulación crónica en sistema hematopoyético y alteraciones en el desarrollo del sistema nervioso central
Partículas suspendidas	Irritación en los tejidos respiratorios, fibrosis, asma
Bióxido de azufre	Irritante (garganta y bronquios), broncoconstricción, alteraciones en la función pulmonar
Bióxido de nitrógeno	Disminución en la capacidad de difusión pulmonar

Debido a que los índices de la calidad del aire están definidos en base a los efectos de los contaminantes criterio sobre la salud como ya se ha reiterado en repetidas ocasiones, es necesario definir como se presentan estos contaminantes y sus

efectos sobre la salud de la población de forma más detallada que como se muestra en el Cuadro 5.

Ozono (O₃)

“El ozono es el principal oxidante fotoquímico presente en la atmósfera, además del nitrato de peroxiacetilo, los alquil nitratos y otros compuestos más. En la naturaleza el ozono forma parte integrante de la composición química de la estratosfera, cumpliendo con la importante función de proteger a la superficie de la tierra de los rayos ultravioleta provenientes de la radiación solar. Sin embargo, la presencia del ozono en la capa baja de la atmósfera (llamada troposfera), donde se desarrolla la vida de la mayoría de los organismos se debe a la transformación que sufren los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno por medio de reacciones fotoquímicas” (INECC, 2018).

“A pesar de que el O₃ es un contaminante muy inestable, que se destruye con la misma facilidad con la que se forma, por breve que sea su permanencia, se ha demostrado que es un agente irritante para el sistema respiratorio, que produce tos, flema, dolor al respirar e inflamación en el tejido pulmonar, reduciendo la capacidad de respuesta del mismo a agentes extraños. Además, reduce la capacidad respiratoria, disminuye también la capacidad mucociliar, lo que debilita las defensas naturales del aparato respiratorio. Por otra parte, se ha demostrado que las enfermedades respiratorias son más frecuentes en niños expuestos al ozono. Asimismo, se ha observado que durante episodios de contingencia ambiental con altas concentraciones de ozono, existe un incremento notable en el ausentismo escolar en niños a nivel preescolar y primaria” (INECC, 2018).

“Gong considera que en personas saludables el ozono también causa problemas, pues hace que la respiración sea más difícil durante el trabajo y el ejercicio y causa irritación respiratoria general. Además, puede marcar con una cicatriz los pulmones y causarles daño permanente. Se piensa que los síntomas de irritación tienden a desaparecer cuando se presentan exposiciones repetitivas al ozono. Sin embargo, esta “atenuación de la respuesta” no es algo positivo, ya que el hecho de que no haya reacciones obvias a la exposición, no significa que el cuerpo se ha adaptado

al mismo. Existen evidencias que muestran que la lesión pulmonar continúa aún durante la atenuación” (INECC, 2018).

“Un problema importante en la contaminación por ozono es el hecho de que los pulmones no terminan su desarrollo sino hasta que el individuo ha cumplido 18 años. Por consiguiente, los pulmones aún no desarrollados sufren un daño temprano que puede aumentar el riesgo de contraer una enfermedad respiratoria en la vida adulta” (INECC, 2018).

Partículas (PST, PM₁₀ y PM_{2.5})

“Algunas de las acciones que dan origen a la contaminación por partículas son la destrucción de la vegetación, que a su vez causa la erosión del suelo; los incendios; algunos procesos industriales que generan gran cantidad de polvos; y actividades humanas que requieren la quema de combustibles como carbón, leña y derivados del petróleo. La inadecuada disposición de la basura y el fecalismo al aire libre también son emisores importantes de microorganismos, quistes, esporas, polen, etc., que pueden estar adheridos al polvo. Tomando en cuenta lo anterior, es necesario atacar estos problemas directamente para disminuir la contaminación por partículas suspendidas” (INECC, 2018).

“Dependiendo de su tamaño, las partículas pueden flotar o sedimentar. Las partículas que se mantienen flotando se conocen como partículas suspendidas totales o PST. Las partículas cuyo diámetro es menor o igual a 10 µm se conocen como partículas de fracción inhalable o PM₁₀, las cuales pueden estar formadas por aerosoles, polvos, metales, productos de combustión, o bien microorganismos como protozoarios, bacterias, virus, hongos y polen que pueden causar diferentes tipos de enfermedades. Cuando las partículas son inhaladas no siempre son expulsadas por los sistemas de defensa del organismo, causando problemas en el sistema respiratorio” (INECC, 2018).

“La contaminación por partículas puede causar, a corto y a largo plazo, disminución de la función pulmonar, lo cual contribuye a la presencia de enfermedades crónicas respiratorias y a la muerte prematura” (INECC, 2018).

“La exposición a PM₁₀ ha generado una gran preocupación en los últimos años, ya que con mayor frecuencia aparecen estudios que demuestran una asociación significativa entre la concentración ambiental de partículas de la fracción respirable y la mortalidad y morbilidad de la población. En forma consistente a través de muchos estudios se ha encontrado un 3% de incremento en la mortalidad normal diaria por cada 10 µg/m³ en PM₁₀ a partir del valor de la norma. Siendo la asociación más significativa con cánceres cardiopulmonares y de pulmón. Es de especial preocupación el hecho de que parece no existir una concentración mínima en la cual ya no se detecten impactos en la salud” (INECC, 2018).

“Las asociaciones entre mortalidad y contaminación tienden a ser más fuertes cuando el parámetro a comparar son las partículas PM_{2.5}, también llamadas partículas finas o partículas de la fracción respirable. Estas partículas tienen una mayor penetración en el sistema respiratorio y por lo tanto son más dañinas a la salud. Por su tamaño (situación en el rango de longitud de onda de la luz) interfieren con la dispersión de la luz contribuyendo a la disminución de la visibilidad. Un 40% de estas partículas son retenidas en los bronquios y en los alvéolos, causando síntomas respiratorios agudos, incluyendo cuadros severos de dolor y accesos de tos. Las partículas fracción PM_{2.5} pueden ser emitidas directamente a la atmósfera o bien formarse en ésta como producto de reacciones fotoquímicas y procesos físicos” (INECC, 2018).

Monóxido de carbono (CO)

“El monóxido de carbono es un gas sin color, sin sabor y sin olor, químicamente inerte en condiciones normales que, en bajas concentraciones, no produce ningún daño; sin embargo, en concentraciones superiores a la norma establecida para este contaminante, puede afectar seriamente el metabolismo respiratorio dada la alta afinidad de la hemoglobina por éste compuesto” (INECC, 2018).

“Las emisiones de CO en un área cerrada pueden causar la muerte por insuficiencia cardíaca o sofocación, ya que la absorción de CO se incrementa con la concentración en el ambiente, con el aumento del tiempo de exposición y con el incremento de la actividad física. La exposición a bajos niveles de CO, también

puede causar daño a la salud cuando las personas están bajo medicación, consumen bebidas alcohólicas o se encuentran en lugares altos” (INECC, 2018).

“Se han realizado estudios que muestran que las concentraciones encontradas en microambientes como en las banquetas de calles de tráfico intenso, o en el interior de vehículos son mucho mayores que las concentraciones detectadas en las estaciones fijas de análisis continuo. Esto significa que, a pesar de que no se exceda la norma a nivel de la estación, puede haber un número considerable de personas que se vean expuestas a niveles peligrosos de este contaminante tal como se comprobó en dos estudios intensos realizados por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos, en las ciudades de Denver y Washington, D.C.” (INECC, 2018).

Óxidos de azufre (SO_x)

“El bióxido de azufre (SO₂) es un gas incoloro, no flamable y no explosivo, con un olor sofocante y es altamente soluble en el agua. Puede permanecer en la atmósfera entre 2 y 4 días. Durante este tiempo puede ser transportado a miles de kilómetros y formar ácido sulfúrico, el cual se precipita en forma de lluvia ácida en alguna otra región lejos de su origen” (INECC, 2018).

“El ácido sulfúrico, el bióxido de azufre y las sales de sulfato son irritantes de las membranas mucosas del tracto respiratorio. Incluso llegan a ocasionar enfermedades crónicas del sistema respiratorio como bronquitis y enfisema pulmonar” (INECC, 2018).

“En una atmósfera con partículas suspendidas el efecto dañino de los óxidos de azufre se incrementa, ya que el bióxido y el ácido sulfúrico paralizan los cilios del tracto respiratorio, las partículas de polvo penetran en los pulmones arrastrando también los compuestos azufrados, originando entonces graves daños, e incluso la muerte. Se ha comprobado que el componente ácido de las partículas estuvo implicado en la mortalidad de los episodios registrados en Londres en los años 40 y 50” (INECC, 2018).

“En las plantas, el SO_2 ocasiona daños irreversibles en los tejidos, sobre todo en días soleados. Por otro lado, el ácido sulfúrico ataca los materiales de construcción como el mármol, la cantera, la cal y el mortero. Muchos de los monumentos, edificios, esculturas e iglesias se han deteriorado por esta causa. El ácido sulfúrico también daña las telas como el algodón, el lino, el rayón y el nylon. Las bibliotecas también tienen problemas a causa de este compuesto ya que las hojas de los libros se tornan amarillas, por la misma causa los artículos de piel se resecan y los metales se corroen” (INECC, 2018).

“La contaminación del aire tiene efectos globales y regionales, es decir, no se restringe únicamente a las grandes ciudades. La lluvia ácida es un ejemplo y se origina cuando las emisiones de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno reaccionan con el vapor de agua y con ayuda de la luz solar se convierten en ácido sulfúrico y ácido nítrico. Estos compuestos se depositan en la superficie de la tierra como aerosoles y partículas (deposición seca) o como lluvia, granizo y rocío (deposición húmeda). Los contaminantes pueden emitirse en un punto y permanecer ahí por días, hasta que el viento los arrastra grandes distancias y caen en áreas que pueden ser impactadas de acuerdo al grado de sensibilidad del ecosistema” (INECC, 2018).

Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

“El nitrógeno forma siete diferentes óxidos, de los cuales sólo el óxido nítrico (NO) y el bióxido de nitrógeno (NO_2) se presentan como contaminantes importantes del aire. Los NO_x que se forman durante la combustión, son el producto de la oxidación de nitrógeno atmosférico, o bien de la oxidación del nitrógeno orgánico del combustible. En el primer caso, la producción de NO_x se favorece a medida que aumenta la temperatura y, resultado de esta dependencia, la producción de NO y NO_2 es función también de la relación aire/combustible en la mezcla. El bióxido puede formar ácido nítrico y ácido nitroso en presencia de agua. Ambos pueden precipitarse junto con la lluvia o combinarse con el amoníaco de la atmósfera para formar nitrato de amonio” (INECC, 2018).

“El óxido nítrico al igual que el monóxido de carbono, puede combinarse con la hemoglobina de la sangre reduciendo su capacidad de transporte de oxígeno” (INECC, 2018).

“El bióxido de nitrógeno irrita los alvéolos pulmonares. Estudios de salud ocupacional muestran que este gas puede ser fatal en concentraciones elevadas. En contraste con el ozono, el NO₂ puede ser más abundante en interiores que en el exterior, esto se debe a que una fuente de este contaminante son las estufas de gas L.P. y los quemadores o calderas industriales que utilizan el mismo combustible” (INECC, 2018).

3.3.5. Programa para el cálculo de índices

Se desarrolló una programación en Microsoft Excel para el cálculo de los índices AQI e IMECA, utilizando las formulas mencionadas en la sección 3.3. como producto de este trabajo, será anexado en CD.

3.4. Obtención y procesamiento de datos

Conforme a los procedimientos establecidos mediante la NOM-156-SEMARNAT - 2012 se describirá el proceso aplicable a esta tecnología para el protocolo de manejo de datos.

Obtención de datos.

La operación realizada en el centro de control será recolectar los datos de forma continua.

Los datos generados por las estaciones de monitoreo serán recolectados automáticamente y enviados vía red inalámbrica al centro de control.

Diariamente se realizará un promedio por hora, en horarios establecidos, de preferencia en horas pico, en los que se encuentran más ciudadanos al aire libre.

Diariamente se realizará el promedio diario del día anterior para mantener una bitácora ya sea digital o física que permita un registro histórico para futuras referencias.

Para verificar la validez de los datos, se realizarán la limpieza y verificación de datos para graficar la variación de la concentración del contaminante medido.

Diariamente se revisarán los datos colectados de forma continua, para comprobar el cumplimiento de los niveles fijados por la normatividad vigente (normas oficiales mexicanas de salud ambiental) para evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos en la salud humana y el ambiente. en el caso de que se rebasen estos niveles y una vez verificada la información se reportara a la autoridad competente para alertar a la población sobre los niveles de contaminación presente.

- Objetivos de la gestión del aseguramiento y control de calidad.
 - Asegurar la confiabilidad de los datos.
 - Establecer la trazabilidad de la medición.
 - Establecer el rastro de los datos y registros que se generan.
 - Establecer la comparabilidad y compatibilidad de los datos.
 - Establecer la representatividad de los datos.

Una vez definidos los objetivos del sistema de monitoreo de calidad del aire, lo siguiente es establecer procedimientos que aseguren la calidad de los datos obtenidos, esto se hace mediante la definición de los objetivos antes descritos.

Manejo de datos.

Los parámetros principales a considerar para el paso de datos crudos a datos validados son la trazabilidad y la compleción de los datos.

Se realizará un manejo de datos y se generarán periódicamente reportes de la calidad del aire, según los objetivos del propio sistema de monitoreo. El manejo de datos consiste en tres partes: Limpieza, verificación y validación.

Limpieza de datos (Revisión de datos crudos).

La limpieza se desarrollará en base a las siguientes acciones:

- **Definición y asignación de banderas.** Definición de banderas acordes con el sistema de adquisición de datos. Identificación de todos los datos con banderas, asignando principalmente aquellas que corresponden a datos fuera de rango de operación, e igualando a cero los negativos que están dentro del límite de tolerancia establecido por el Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire.
- **Almacenamiento de datos.** Se conservarán todos los datos crudos y validados, es decir, no se borrará ningún dato. Los datos dudosos, identificados con las banderas correspondientes, serán verificados posteriormente por el personal responsable quien además de verificarlos los usará para inspeccionar el funcionamiento de los equipos.
- **Bases de datos.** Los datos adquiridos por los instrumentos de medición, así como las banderas asignadas a los datos, se integrarán en una base de datos, la cual estará homologada a la Base de Datos Nacional.

Verificación de datos.

Las acciones necesarias para la verificación de los datos se presentan a continuación:

- Se confirmará, o modificará en su caso, la asignación de las banderas que se realizó en la etapa de limpieza, añadiendo las banderas necesarias que identifiquen datos dudosos. La verificación incluirá lo siguiente:
- Revisión de los registros y/o de las bitácoras de operación.
- Elaboración de estadística descriptiva y gráficas para identificar la estructura, el patrón de los datos y anomalías potenciales.
- Verificar relaciones entre contaminantes y con parámetros meteorológicos.

Validación de datos:

Para finalizar el último paso del manejo de datos se deben realizar las siguientes acciones:

- Se seleccionará el procedimiento más apropiado, para resumir y analizar los datos, basado en el programa de aseguramiento de calidad de los datos, los

objetivos de la calidad de los datos, el diseño del monitoreo y la observancia de los datos preliminares.

- **Análisis de datos.** Se realizará un análisis de datos en función de criterios establecidos -precisión, sesgo, representatividad y completión-, para obtener la información que conformará los reportes de la calidad del aire de la localidad.
- Se asegurará que la completión de datos, tanto de parámetros meteorológicos como de contaminantes, cumpla con un mínimo de 75% de datos, para generar los indicadores de estado y tendencias de calidad del aire.
- Se determinará, a través de indicadores de calidad del aire, el cumplimiento de los límites establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas emitidas por la Secretaría de Salud.

En el caso del monitoreo automático, los datos crudos de calidad del aire se enviarán mediante transmisión electrónica continua vía Internet, y la información validada se enviará cada seis meses como plazo máximo, mediante transmisión electrónica. Con objeto de que sean integrados al Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, SINAICA, los gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios remitirán a la Secretaría, a través de la DGCENICA.

3.4.1. Calibración

Los sensores se pueden dividir conforme a las necesidades de calibración, conforme a la primera búsqueda realizada se concluyó que había disponibles en el mercado diversos sensores con calibración de fábrica garantizada desde 5 meses hasta un año en condiciones típicas de operación. Sin embargo, la ciudad en la que se plantea el uso de la unidad de monitoreo con sensores de bajo costo es la ciudad de Hermosillo, Sonora, México; la cual es conocida por su clima extremo. Lo que nos hace proponer la necesidad de constante calibración en periodos de 2 a 3 meses, el periodo exacto de tiempo será adaptado conforme a la ciudad de la que se trate, debido a que el desgaste tanto de la carcasa como de los sensores de la unidad de monitoreo será diferente dependiendo de la condición climática de cada ciudad.

Los sensores considerados presentan rangos de operación en condiciones de humedad relativa y temperatura aceptables para el propósito de monitoreo ambiental y predicción meteorológica. Por otro lado, la precisión y la sensibilidad de casi todos los sensores se ven directamente afectadas por el cambio de temperatura. Lo que presenta la necesidad de más de un criterio para el descarte y manejo de los datos obtenidos.

La calibración propia de los sensores de presión, temperatura y humedad relativa proviene directamente de fábrica. Por otro lado, los sensores de Ozono presentan curvas de calibración.

Los sensores de partículas suspendidas por su parte necesitan un protocolo de calibración más complejo, tomando una señal base de estaciones de monitoreo ya calibradas (de alto volumen).

El método de validación por excelencia manejado en las normas oficiales mexicanas es la calibración estandarizada de los dispositivos, para el caso de los sensores de bajo costo, la EPA propone mediante diversos talleres enfocados en promover el desarrollo y uso de los sensores de bajo costo, las opciones de calibración que son las siguientes:

1.- Calibración con uso de una señal base (inalámbrica).

Esta técnica utiliza las plataformas de monitoreo ya existentes (por tanto, calibradas) como valor de referencia en tiempo real. Obteniendo la telemetría y transmitiéndola al área circundante a los sensores basados en conexiones inalámbricas como un valor de referencia.

Los operadores de las estaciones de monitoreo tienen que estar de acuerdo en compartir los datos obtenidos. Son necesarios sensores que puedan recibir la señal y procesarla automáticamente para “auto calibrarse” (Williams, Watkins, & Long, 2014).

Adicionalmente se plantea la opción de incluir dentro de la misma estructura del sensor de bajo costo un sensor ya calibrado que funcione como señal base. El cuadro 6 presenta la descripción de esta primera opción de calibración.

Cuadro 6.Descripción de la opción 1 de calibración.

Función de calibración	Señal inalámbrica	Características negativas	La estación de monitoreo tendría que proveer señal y los sensores tendrían que tener recursos para recibir y usar esta señal.
Panel de clasificación (preferible como mejor opción)	Bajo, pero ha mostrado ser factible	Intangibles (incluyendo comparación de costos)	Requiere necesariamente infraestructura para obtener y transmitir la señal de calibración. Es la opción más costosa
Características positivas	La calibración puede ser realizada al ir y tomar los datos de avance a las estaciones de monitorio de aire regulatoria.	Potencial de avance	Infraestructura dudosa puede ser desarrollada debido a restricciones económicas.

2.-Calibración de sensores de bajo costo directa

La calibración directa se considera siempre el estándar dorado si de calibración de equipos se trata (Williams, Watkins, & Long, 2014).

Esta opción se puede realizar de dos formas, las cuales se abordarán como opción 2a y 2b, descritas a continuación.

2a.- Desafiando la entrada o el contacto superficial del sensor de un gas de concentración conocida (Williams, Watkins, & Long, 2014).

Esta opción se basa en contar con un gas de concentración conocida que se hace pasar por el sensor para comprobar si la respuesta obtenida es la ya conocida.

Tiene la ventaja de que ya hay en el mercado botellas de gas de calibración y son relativamente baratas, por lo que ya existe un mercado.

2b.- Teniendo alguna respuesta definida, activando un circuito que establecería alguna salida predeterminada y haría, sucesivamente, establecer la concentración de la lectura de salida del dispositivo (Williams, Watkins, & Long, 2014).

Esta opción se basa en el principio de que se establece un medio electrónico o electromecánico desafiando al sensor para un efecto conocido de salida resultante del sensor, que permite reescalar a un valor preestablecido. Para esto se tiene que conocer la respuesta teórica supuesta basada en las especificaciones del fabricante. En el Cuadro 7 se presenta una descripción resumida de esta segunda opción.

Cuadro 7. Descripción de la opción 2 de calibración.

Función de calibración	Calibración directa en el sensor	Características negativas	Económicamente menos razonable. no profesionales probablemente no calificados para realizar procedimientos de calibración
Panel de clasificación (preferible como mejor opción)	El mayor para aquellos involucrados en monitoreo regulatorio.	Intangibles (incluyendo comparación de costos)	Desarrolladores de sensores están limitando el acceso del usuario para la calibración de algoritmos por razones prácticas. Relativamente barato para funcionar después de la compra de los artículos originales (\$)
Características positivas	Asegura el mayor nivel de confianza en calidad de datos. Representa el tradicional estándar dorado en la práctica	Potencial de avance	Sin ímpetu por los desarrolladores por proveer kits de calibración. Sensores considerados desechables

3.- Uso de información encontrada más reconocida (Método de Referencia Federal/Método de Equivalencia Federal o grado de investigación) de monitores a respuesta normalizada (Williams, Watkins, & Long, 2014).

Esta opción propone medios para convertir datos en bruto (no calibrados) dentro de una calidad más aceptable. Esto se hace mediante la información histórica de los sistemas de calidad de aire federal y estatal, que se obtendría para luego usarse para generar un modelo para normalizar las salidas de los sensores de bajo. Es decir, se corrigen los datos obtenidos de los sensores bajo costo mediante un ajuste, usando un modelo de comportamiento histórico de la zona (Williams, Watkins, & Long, 2014). En el Cuadro 8 se presenta la descripción del tercer y último método de calibración.

Cuadro 8. Descripción de la opción 3 de calibración.

Función de calibración	Normalización de datos secundarios	Características negativas	Los no profesionales no pueden saber dónde obtener datos verificados o como normalizar datos usando funciones matemáticas.
Panel de clasificación (preferible como mejor opción)	Alto, considerado el más práctico como ya es utilizado extensamente por los profesionales	Intangibles (incluyendo comparación de costos)	Una aplicación podría ser desarrollada para asistir a nuevos usuarios en la normalización de datos, pero no existe actualmente. Gasto moderado para funcionar. (\$\$\$)
Características positivas	Comúnmente realizado entre profesionales del medio ambiente. Permite “control de cordura” de calidad de datos.	Potencial de avance	Probablemente. Solamente son necesarios recursos moderados para una aplicación de normalización de datos disponible públicamente.

3.4.2. Características deseadas de los datos obtenidos

La calidad de los datos es fundamental para su posterior uso como datos históricos que permitan ser utilizados como referencia para futuros Sistemas de Medición de

Calidad del Aire, es por esto que las características principales (SEMARNAT-156, 2012) con las que los datos deben contar con:

- Confiabilidad.
- Trazabilidad de medición.
- Comparabilidad y compatibilidad.
- Representatividad.

3.4.3. Descarte de datos

Para el descarte de datos se requiere información histórica de la zona, información meteorológica y de datos sobre contaminantes de al menos 5 años atrás. Los datos meteorológicos pueden ser tomados de organismos nacionales como la CONAGUA y el Centro de Ciencias de la Atmosfera perteneciente a la UNAM. Esta información permitirá el establecimiento de banderas para eventos ecológicos que afecten directamente la calidad del aire a corto y largo plazo.

Las banderas sugeridas por el INE para la limpieza de los datos de monitoreo automático se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Banderas usadas en la limpieza de datos (INE(5), 2018).

Bandera	Significado del dato
VA	Válido
IC	Inválido por calibración
IR	Inválido por rango de operación
VZ	Válido igualado a cero o al límite de detección
ND	No disponible
IF	Inválido por falta de Equipo de Monitoreo

- VA (Dato válido). Aquel dato que se considera correcto o verdadero pero que está sujeto a revisión en la etapa de verificación de datos (INE(5), 2018).
- IC (Dato inválido por calibración). En esta categoría serán incluidos los datos que provengan de las actividades de calibración de los equipos de medición (INE(5), 2018).

- IR (Dato inválido por rango de operación). En esta categoría se incluyen valores fuera de los límites superior e inferior fijados en el equipo de medición. Para el caso de los contaminantes, el límite superior se fija de acuerdo a las condiciones de la localidad y podrá diferir en aquellas localidades que se encuentren en zonas críticas de calidad del aire, con alta densidad industrial, en donde los niveles medidos pudieran ser mayores que los límites superiores recomendados en este documento (INE(5), 2018).
- VZ (Dato válido igualado al límite de detección o a cero). Esta bandera se aplica a datos con valores negativos los que, excepto en el caso de las mediciones de temperatura, deberán ser igualados a cero o al límite de detección correspondiente para poderlos incluir en la base de datos revisada.
- IF (Dato inválido por falla en equipo). Esta bandera debe asignarse a aquellos datos de los que exista evidencia en bitácora o en listas de verificación de alarmas en equipos, es decir, aquellos cuyos parámetros de operación (temperaturas, flujos, presiones, voltajes) se encuentran fuera de los valores normales de operación.
- ND (Dato que no está disponible). Se aplica a cualquier dato ausente ya sea por fallas en la transmisión-recepción o por cortes de energía. A este dato se le asigna en la base de datos un número que le dé carácter de nulidad, por ejemplo 9999 (Web 4).

4. SELECCIÓN DE LOS SENSORES DE BAJO COSTO DE ACUERDO A LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE LA NORMATIVIDAD VIGENTE.

A continuación, se presentan las Tablas 31-33 con las opciones de sensores para cada variable meteorológica a considerar, comparando su rango de medición y en algunos casos su precisión.

Sensores Meteorológicos.

- Temperatura (T).

Modelo	Rango de medición	Precisión
MCP9808	de -40°C a 125°C	±0,5° C
MCP9902	de -40°C a 105°C	±2 °C
LM35	de -55°C a 150°C	±0,5° C
TMP36	de -40°C a 150°C	±2 °C
TC74	de -40°C a 125°C	± 2° C de 25° C a 85° C y ± 3° C de 0° C a 125° C
DHT11	de 0 °C a 50 °C	±2 °C
DHT22	de -40°C a 80°C	±0,5° C
SHT15	de -40°C a 123.8°C	±0,3 ° C
MLX90614ESF	de -40°C a 85°C	±0,2 ° C

- Presión (P).

Tabla 32. Presión			
Modelo	Rango de medición	Precisión	
BMP180 (T)	300-1100 hPa	Min -4.0 hPa	Max +2.0 hPa
BMP085 (T)	300-1100 hPa	±2.0 hPa, max	
BMP280 (T)	300-1100 hPa	±1.0 hPa	
CS100	500 a 110 hPa (mBar)	+20°C	±0.5 hPa
		0° to 40°C	±1.0 hPa
		-20° to +50°C	±1.5 hPa
		-40° to +60°C	±2.0 hPa
CS106	500 a 110 hPa (mBar)	+20°C	±0.3 hPa
		0° to 40°C	±0.6 hPa
		-20° to +45°C;	±1.0 hPa
		-40° to +60°C	±1.5 hPa
BP20	15 kPa a 115 kPa	±1.5 kPa max	

- Humedad relativa (H.R.).

Tabla 33. Humedad Relativa					
Modelo	Rango de medición (H.R.)		Rango de medición (T)	Precisión	
Si7021-A20	0%-100 %		de -40°C a 125°C	H.R. ±2%	Max ±3 %
				T ±0.3°C	Max ±0.4°C
RHT03	0%-100 %		de -40°C a 80°C	H.R. ±2%	max ±5%
				T ±0.5°C	
DHT11	0°C	30%-90%	de 0°C a 50°C	25°C	H.R. ±4%
	25°C	20%-90%		0°C-50°C	H.R. ±5%
	50°C	20%-80%		T	± 1°C a ± 2°C
DHT22	0%-100 %		de -40°C a 80°C	H.R. ±2%	max ±5%
				T ±0.5°C	

Sensores de calidad del aire.

En las Tablas 34-38 se presentan las opciones según las características de cada SBC para las variables de la calidad del aire.

- PM₁₀ y PM_{2.5}.

Tabla 34. PM10 y PM2.5.		
Modelo	Rango de medición	Sensibilidad
HK-A5	0~999 µg/m ³	-
SM-PWM-01C	0.01-3000 µg/m ³	0.3-1 mSeg/ µg

- Ozono (O₃).

Tabla 35. Ozono			
Modelo	Rango de medición	Precisión	Resolución
DGS-O3 968-042	0-5 ppm	15%	20 ppb
3SP_O3_5 P Package 110-407	0-20 ppm	-	20 ppb

- Dióxido de Azufre (SO₂).

Tabla 36. Dióxido de Azufre			
Modelo	Rango de medición	Precisión	Resolución
DGS-SO2968-038	0-20 ppm	15%	50 ppb
3SP_SO2_20PPackage110-601	0-20 ppm	±3%	<20 ppb

- Dióxido de Nitrógeno (NO₂).

Tabla 37. Dióxido de Nitrógeno.			
Modelo	Rango de medición	Precisión	Resolución
DGS-NO2 968-043	0-5 ppm	15%	20 ppb
NO2-A1	0-20 ppm	-	50 ppb

- Monóxido de Carbono (CO).

Tabla 38. Monóxido de Carbono		
Modelo	Rango de medición	Resolución
3SP_CO_1000 Package 110-109	0-1000 ppm	<100 ppb
3SP_CO_1000 Package 110-102	0-1000 ppm	<100 ppb

4.1. Listado completo de sensores que conforman la unidad integral de monitoreo. Listado de tipos de sensores en la unidad de monitoreo compacta/movil en su primera etapa:

1. Sensor para PM₁₀, PM_{2.5} y PM_{1.0}.
2. Sensor para Ozono (O₃).
3. Sensor para Dióxido de Nitrógeno (NO₂).
4. Sensor para Dióxido de Azufre (SO₂).
5. Sensor para Monóxido de Carbono (CO).
6. Sensor para temperatura, humedad relativa y presión barométrica.
7. Módulo de comunicación GPS/GPRS/Bluetooth.
8. Batería.

En un principio no se plantea el uso de memoria de almacenamiento dentro de la estación de monitoreo pese a ser un requisito según lo establecido en los manuales del Instituto Nacional de Ecología (INE). Esto debido a que aún no se cuenta de forma estandarizada con el área que cubren los sensores, el arreglo de estos dentro de la unidad y la programación necesaria para la comunicación que se requiere para la operación de estos de forma continua y expuesta al ambiente.

4.2. Propuesta de integración de una unidad compacta de monitoreo.

Se plantea el uso de una unidad compacta de monitoreo prototipo con la geometría mostrada en la figura 12. Se pueden observar los diferentes perfiles y los componentes de esta.

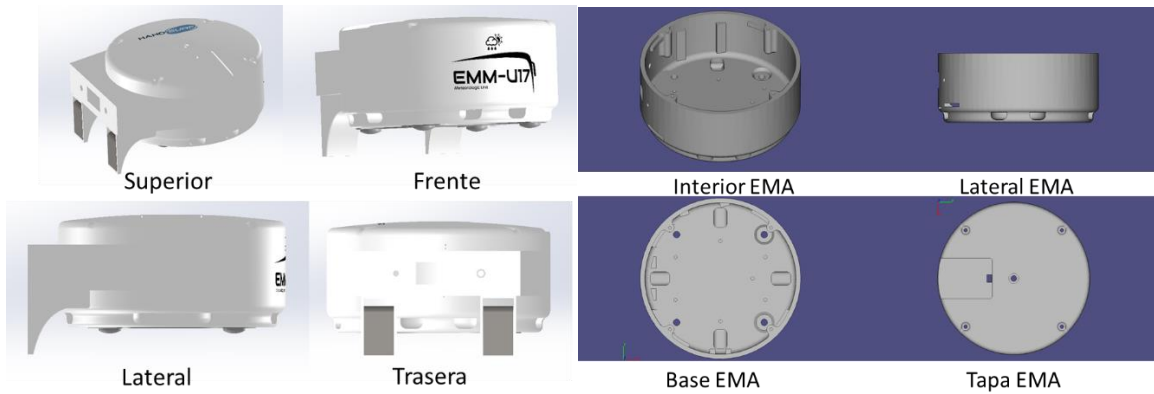


Figura 12. Carcasa de la unidad de monitoreo compacta con SBC.

Diseño Cortesía de PROTOCOOL INTERNACIONAL S.A. DE C.V.

En la Tabla 39 se muestra el modelo de los sensores seleccionados para la unidad compacta de monitoreo con SBC, el rango de medición y las opciones de calibración que pueden aplicarse dependiendo de la variable que el sensor registre.

Tabla 39. Sensores seleccionados con rango y método de calibración

Sensor	Modelo	Rango de medición	calibración	Métodos
PM ₁₀ PM _{2.5} PM _{1.0}	HK-A5	0~999 µg/m ³	Método 1 y 2a.	Método 1. Señal base. Método 2a. Directa.
Ozono	DGS-O3 968-042	0-5 ppm	Método 1 y 2a.	Método 1. Señal base. Método 2a. Directa.
Dióxido de azufre	3SP_SO2_20 P Package110- 601	0-20 ppm	Método 1 y 2a.	Método 1. Señal base. Método 2a. Directa.
Dióxido de Nitrógeno	DGS-NO2 968-043	0-5 ppm	Método 1 y 2a.	Método 1. Señal base. Método 2a. Directa.
Monóxido de Carbono	3SP_CO_100 0 Package 110-102	0-1000 ppm	Método 1 y 2a.	Método 1. Señal base. Método 2a. Directa.
Temperatura		.-45 a 85°C	Método 1.	Método 1. Señal base.
Presión	BME280 12C/SPI	300-1100 hPa	Método 1.	Método 1. Señal base.
Humedad Relativa (H.R.)		0-100%	Método 1 y 3.	Método 1. Señal base. Método 3. Modelo analítico

5. PROPUESTA DE UNA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE CON SBC.

Hermosillo

Hermosillo es la cabecera del municipio del mismo nombre, capital del estado de Sonora, ubicada entre las coordenadas geográficas 29° 00' y 29° 10' de latitud norte y entre los 111° 05' y 110° 55' de longitud oeste. Hermosillo tiene una extensión territorial aproximada de 14,880.2 km² (CCA , 2014) y una población de aproximadamente 884, 273 habitantes (INEGI, 2018).

Hermosillo está ubicado en la porción centro-oeste del estado de Sonora, en la planicie costera, región noroeste de México, y representa 8.7 por ciento de la superficie del estado de Sonora. Hermosillo colinda al noroeste con el municipio de Pitiquito; al noroeste con los municipios de Carbó y San Miguel de Horcasitas; al este con los de Ures y Mazatán, y al sureste con los de La Colorada y Guaymas. La franja costera del municipio de Hermosillo colinda con el golfo de California al oeste. El centro de población comprende —dentro de sus límites—, además de la ciudad de Hermosillo, otras localidades pertenecientes al mismo municipio, entre las que destacan La Victoria, el Tazajal, San Pedro, el Saucito, la Mesa del Seri y Las Placitas (CCA , 2014).



Figura 13. Localización del municipio de Hermosillo en el estado de Sonora, México.

Clima en Hermosillo

Hermosillo corresponde a un tipo de clima muy seco, con lluvias escasas en verano e invierno. La sequía es de moderada a muy alta, al oeste del municipio, y alta en el resto de la superficie municipal. La presencia de heladas abarca los meses de diciembre a febrero, y se presenta de uno a ocho días en promedio mensual. Estos valores reflejan una incidencia de escasa a moderada (CCA , 2014).

En Hermosillo pueden presentarse inundaciones de tipo fluvial y pluvial cuyo origen son las precipitaciones que ocurren con niveles de importancia que determinan los mecanismos productores, como lluvias torrenciales y ciclones. Estos mecanismos se presentan en diferentes épocas del año y en variadas proporciones, principalmente durante los meses de mayor precipitación (julio-septiembre), con mayor probabilidad de incidencia en el mes de julio (CCA , 2014).

La temperatura anual promedio en Hermosillo es de 25 °C, con oscilaciones de 16 °C aproximadamente. Entre los meses de abril y septiembre se presentan las temperaturas más altas, que llegan a alcanzar en las horas pico registros de 40 °C a 47 °C. Los meses fríos corresponden al periodo de noviembre a febrero, y alcanzan temperaturas mínimas de -1 °C a 4 °C (CCA , 2014).



Figura 14. Casco urbano del municipio de Hermosillo, vista satelital (GOOGLE, 2018).

La temporada de lluvia se presenta en promedio 40 días al año, principalmente durante el verano.¹⁸³ Las precipitaciones pluviales más elevadas se registran en los meses de julio, agosto y septiembre —que coincide con la temporada de huracanes—, y van desde los 85 hasta los 115 mm mensuales en promedio, con extremos de 65 mm mensuales en el año más seco hasta 220 mm mensuales en el más lluvioso. La humedad relativa promedio anual es de 53 por ciento. En los meses de marzo a junio y octubre la presencia de lluvias es mínima, con humedad relativa de 30 por ciento. Eventualmente se presentan precipitaciones de noviembre a febrero, producto de las llamadas “equipatas” de invierno (CCA , 2014).

Con una frecuencia promedio anual del 11%, los vientos dominantes provienen del sureste, mostrando una intensidad de 1 a 2 m/s, aunque los vientos más intensos provienen del noroeste con una frecuencia menor de 1% y una intensidad de 3 a 4 m/s. En esta zona la “condición de calma” es dominante, registrándose un promedio anual de 78%, con promedios de 91, 81, 48 y 75 por ciento de días de calma para los meses enero, abril, julio y octubre, respectivamente. Los vientos dominantes se dirigen, por la mañana, en sentido suroeste-noreste, y en sentido contrario por la

tarde. Los vientos más fuertes se presentan en las temporadas de julio, agosto y septiembre, con variaciones de 60 a 80 km/h, que eventualmente presentan vientos huracanados con ráfagas de hasta 120 km/h, principalmente al registrarse huracanes o tormentas tropicales en las costas del golfo de California (CCA , 2014).

Las figuras 14 y 15 muestran mapas de la ciudad de Hermosillo, la primera desde una vista satelital mientras que la segunda es una representación del casco urbano en forma de plano con las vialidades de la ciudad.



Figura 15. Plano del casco urbano del municipio de Hermosillo, Sonora, México (Google, 2018).

Dado que aún no se cuenta con un área de cobertura determinada para el alcance de cada SBC, no es posible utilizar las mismas técnicas para determinar el número de estaciones que se aplican para las estaciones de monitoreo actuales (INE(3), 2018). Por lo cual se proponen 20 puntos para monitoreo mediante las estaciones de monitoreo compactas propuestas. Con el fin de generar datos de línea que permitan el establecimiento formal de un Sistema de Monitoreo de calidad del aire se propone colocar 12 estaciones en las orillas de la ciudad, 6 entre las orillas y el centro y finalmente 2 en el centro de la ciudad de Hermosillo.

En la siguiente figura se muestran los lugares propuestos para las estaciones de monitoreo.



- Ubicación de estación de monitoreo.

Figura 16. Mapa de estaciones de monitoreo compactas con sensores de bajo costo.

5.1. Análisis de costos.

Tabla 40. Costo de SBC seleccionados.

Sensor	Modelo	Precio
PM ₁₀		
PM _{2.5}	HK-A5	US-\$70.00
PM _{1.0}		
Ozono	DGS-O3 968-042	US-\$75.00
Dióxido de azufre	3SP_SO2_20P Package110-601	US-\$7.30
Dióxido de Nitrógeno	DGS-NO2 968-043	US-\$20.00
Monóxido de Carbono	3SP_CO_1000 Package 110-102	US-\$20.00
Temperatura		
Presión	BME280 12C/SPI	US-\$19.95
Humedad Relativa (H.R.)		
Módulo de comunicación GPS/GPRS/Bluetooth.	SIM808	US-\$32.00
TOTAL =		US-\$244.25

En la Tabla 40 se muestra el precio de los sensores seleccionados para la unidad compacta de monitoreo de calidad del aire. Al costo de la unidad compacta faltaría agregar el costo de la carcasa, la batería y el soporte para colocarlo, pero fuera de estos costos y los de envío al momento de la compra de los sensores, los gastos de operación son prácticamente nulos. Al igual que con los muestreadores y monitores actuales es necesario un centro de recolección de datos que controle la operación de las estaciones, sin embargo, el costo por la operación de este no varía mucho para efectos financieros excepto en la necesidad de suministros necesarios para la operación de las estaciones actuales.

En lo que a la calibración se refiere se puede integrar un kit de calibración que mantenga una serie de sensores calibrados mediante certificación ya sea externa o de un laboratorio montado especialmente para la operación de dichas estaciones. Se podrá monitorear la correcta operación de los sensores mediante la constante comparación con la estación más cercana y se estructurarán bitácoras de mantenimiento al igual que procedimientos estándar para calibración y

mantenimiento. El costo del kit de calibración sería similar o ligeramente superior al planteado por estación.

El costo de un muestreador para partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ se encuentra entre US-\$7,200.00 y US-\$7,800.00 (Spanish.alibaba, 2018), además debe considerarse el gasto generado por los filtros para su operación y el precio de un kit de calibración, así como el servicio de calibración para dicho kit. Este sería el costo solo por el valor de dos de los 6 contaminante criterio que cubre la estación de monitoreo compacta propuesta.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Es necesario actualizar la normatividad en temas de calidad del aire, principalmente en la parte técnica, para adecuarla a las tecnologías actuales, tales como los sensores de bajo costo y la comunicación en tiempo real de las estaciones de monitoreo.
- Cada día la generación de información se acelera, por lo que la obtención de datos en tiempo real accesible para todos debe volverse una realidad tal como se menciona por la EPA “big data, big dreams”.
- La calidad de vida no debe limitarse al confort dentro de los edificios y la necesidad de controlar la calidad del aire comienza con una evaluación de este.
- La tecnología de SBC tiene limitaciones, pero marca un punto de inicio para el cambio en términos conciencia ambiental al ofrecer información en tiempo real, lo que la vuelve tangible y real para todos.
- Es evidente que la ciudad de Hermosillo carece de un monitoreo de calidad del aire constante y no se cuenta con información válida por norma que sustente que se cuenta con promedios históricos de ninguno de los contaminantes criterios, aun cuando se cuenta con algunos datos por parte del Instituto Municipal de Ecología.

6.2. Recomendaciones

- El desarrollo de protocolos estándar para la operación y mantenimiento de este tipo de estaciones es un reto a desarrollar.
- Utilizando los principios conocidos, es posible explorar la fabricación de sensores con características específicas para el monitoreo de calidad del aire. Como rangos de temperatura de operación más amplios para ciudades con climas extremos.

- Los esfuerzos realizados por las universidades en temas de calidad del aire son evidentes, pero se requiere que se involucren más tanto el estado como la industria para lograr un frente común y avanzar contra las predicciones de la ONU para el 2030.
- La necesidad de un grupo interdisciplinario en temas como estos es evidente, por lo que considero que debemos comenzar a involucrar a los demás profesionistas en temas como este para beneficio de la humanidad.

7. BIBLIOGRAFIA

Bibliografía

- Alphasense. (11 de Noviembre de 2018). *Directindustry*. Obtenido de Directindustry: <http://www.directindustry.es/prod/alphasense/product-16860-38596.html>
- Barajas Olvera, M. E. (2007). *El Impacto de los polvos sobre el rendimiento escolar de una población infantil del norte de la ciudad de Hermosillo*. Hermosillo: UNISON.
- Bjhike. (11 de Noviembre de 2018). *Zeanoit*. Obtenido de Zeanoit: <https://www.zeanoit.jp/pdf/3f-SEN0177.pdf>
- CCA . (2014). *Contaminación Ambiental en Hermosillo II: expediente de hechos relativo a la petición SEM-05-003*. Montreal: Comisión para la Cooperación Ambiental.
- COFEPRIS-025. (2014). *NOM-025-SSA1-2014*. Ciudad de México: DOF (Diario Oficial de la Federación).
- Correa, A. (2011). Los Índices de Calidad del Aire: Alcances y Límites . *Conciencia Tecnológica* , 74-76.
- De Nevers, N. (1998). *Ingeniería de control de la contaminación del aire* . McGRAW-HILL.
- EPA. (26 de junio de 2018). *AirNow*. Obtenido de AirNow: https://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi_sp
- EPA. (8 de Noviembre de 2018). *AQI Breakpoints*. Obtenido de AQI Breakpoints: https://aqs.epa.gov/aqsweb/documents/codetables/aqi_breakpoints.html
- Escalona, L., Manganiello, L., López, M., & Vega, C. (2012). Los sensores químicos y su utilidad en el control de gases contaminantes. *Revista Ingeniería UC* , 74-88.

GOOGLE. (13 de Noviembre de 2018). *Earth.google*. Obtenido de Earth.google:
https://earth.google.com/web/@29.08215501,-110.98898687,202.51350271a,40624.74680333d,35y,0h,0t,0r/data=Ck8aTRJFCiUweDg2Y2U4NDY4N2FkZmFIZTU6MHhiMzNkNTM5NWU5ODg3ZmY5GWstJ_ytEj1AIZVnucctvVvAKgplZXJtb3NpbGxvGAlgASgC

Google. (13 de Noviembre de 2018). *Google.Maps*. Obtenido de Google.Maps:
<https://www.google.com.mx/maps/place/Hermosillo,+Son./@29.076495,-110.9826831,11.75z/data=!4m5!3m4!1s0x86ce84687adfaee5:0xb33d5395e9887ff9!8m2!3d29.0729673!4d-110.9559192?hl=es>

ICON. (11 de Noviembre de 2018). *gasdetectorshop.com*. Obtenido de gasdetectorshop.com: <https://www.gasdetectorshop.com/C03-0973-100-RAE-Sulfur-dioxide-SO2-Sensor-p/c03-0973-100.htm>

INE(1). (25 de Junio de 2018). *SINAICA.INECC-Manual 1*. Obtenido de SINAICA.INECC-Manual 1. : <http://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

INE(3). (25 de Junio de 2018). *SINAICA.INECC-Manual 3. Redes, Estacquipos de Medición de la Calidad del Aire*. . Obtenido de SINAICA.INECC-Manual 3. Redes, Estacquipos de Medición de la Calidad del Aire. : <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/3-%20-%20Redes,%20Estaciones%20y%20Equipos%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

INE(5). (25 de Junio de 2018). *SINAICA.INECC-Manual 5. Protocolo de Manejo de datos de la calidad del aire*. Obtenido de SINAICA.INECC-Manual 5. Protocolo de Manejo de datos de la calidad del aire: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/5-%20-%20Protocolo%20de%20Manejo%20de%20Datos%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

- INECC. (2 de octubre de 2018). *inecc.gob.mx*. Obtenido de *inecc.gob.mx*:
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/236/anexos.html>
- INECC-SEMARNAT. (2016). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2015, México*. Ciudad de México: INECC.
- INEGI. (13 de noviembre de 2018). *Cuentame.inegi.org.mx*. Obtenido de *Cuentame.inegi.org.mx*:
<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/son/poblacion/>
- Jiao, W., Hagler, G., & Williams, R. (2015). *Community Air Sensor Network (CARSENSE) Project: Lower cost, Continuous Ambient Monitoring Methods*. Atlanta, Georgia USA: EPA.
- Luna, A., Talavera, Á., & Cano, L. (2017). Uso de sensores electroquímicos de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en el distrito de San Isidro - Lima - Perú. *Centro de Investigación Universidad del Pacífico (CIUP)*, 1-17.
- NADF. (26 de junio de 2006). *NADF-009-AIRE-2006*. Ciudad de México : GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL. Obtenido de *aire.cdmx.gob.mx*:
<http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NADF-009-AIRE-2006.pdf>
- Pérez Maquieira, F. (2018). *Integración y Test de Módulos de Medición de Partículas PM2.5 y PM10 para la valoración de la calidad del aire* . Madrid : Universidad Politécnica de Madrid .
- Schwela, D. (2006). *Modulo 5a: Gestion de calidad de aire*. Eschborn, Alemania: OMS.
- SEDEMA. (26 de junio de 2018). *aire.cdmx.gob.mx*. Obtenido de *aire.cdmx.gob.mx*:
<http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=%27&dc=Yw=>
=

SEMARNAT-034. (1993). *NOM-034-SEMARNAT-1993*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación (DOF).

SEMARNAT-035. (2003). *NOM-035-SEMARNAT-1993*. Ciudad de México: DOF (Diario Oficial de la Federeación).

SEMARNAT-036. (1993). *NOM-036-SEMARNAT-1993*. Ciudad de México: Diario Ofical de la Federación (DOF).

SEMARNAT-037. (1993). *NOM-037-SEMARNAT-1993*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación (DOF).

SEMARNAT-038. (1993). *NOM-038-SEMARNAT-1993*. Ciudad de México } : Diario Oficial de la Federación (DOF).

SEMARNAT-156. (2012). *NOM-156-SEMARNAT-2012*. Ciudad de México : Diario Oficial de la Federación (DOF).

SHARP. (11 de noviembre de 2018). *Media.digikey.com*. Obtenido de Media.digikey.com:
<https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Sharp%20PDFs/GP2Y1010AU0F.pdf>

SIMAT. (6 de Febrero de 2018). *Aire de la Ciudad de México*. Obtenido de Aire de la Ciudad de México:
www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/simat-cartel-linea-tiempo.pdf

Spanish.alibaba. (11 de Noviembre de 2018). *Spanish.alibaba.com*. Obtenido de Spanish.alibaba.com: <https://spanish.alibaba.com/g/high-volume-air-sampler.html>

SPEC . (11 de Noviembre de 2018). *SPEC-SENSORS 3SP_CO_1000 Package 110-109*. Obtenido de SPEC-SENSORS 3SP_CO_1000 Package 110-109:
http://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/04/3SP_CO_1000-C-Package-110-109.pdf

- SPEC. (11 de Noviembre de 2018). *SPEC-SENSORS 3SP_SO2_20 P Package110-601*. Obtenido de SPEC-SENSORS 3SP_SO2_20 P Package110-601: <https://www.spec-sensors.com/product/so2-sulfur-dioxide-sensor-20-ppm-pinned-package/>
- SPEC. (11 de Noviembre de 2018). *SPEC-SENSORS 3SP_CO_1000 Package 110-102*. Obtenido de SPEC-SENSORS 3SP_CO_1000 Package 110-102: http://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/04/3SP_CO_1000-P-Package-110-102.pdf
- SPEC. (11 de Noviembre de 2018). *SPEC-SENSORS 3SP_O3_20*. Obtenido de SPEC-SENSORS 3SP_O3_20: https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/02/3SP_O3_20-P-Package-110-406.pdf
- SPEC. (11 de noviembre de 2018). *SPEC-SENSORS DGS-03*. Obtenido de SPEC-SENSORS DGS-03: https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2017/01/DGS-03-968-042_9-6-17.pdf
- SPEC. (11 de Noviembre de 2018). *SPEC-SENSORS DGS-NO2*. Obtenido de SPEC-SENSORS DGS-NO2: https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2017/01/DGS-NO2-968-043_9-6-17.pdf
- SPEC. (11 de Noviembre de 2018). *SPEC-SENSORS DGS-SO2 968-038*. Obtenido de SPEC-SENSORS DGS-SO2 968-038: <https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2017/01/DGS-SO2-968-038.pdf>
- SSA1-020. (2014). *NOM-020-SSA1-2014*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación (DOF).
- SSA1-021. (1994). *NOM-021-SSA1-1993*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación (DOF).
- SSA1-022. (2010). *NOM-022-SSA1-2010*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación (DOF).
- SSA1-023. (1994). *NOM-023-SSA1-1993*. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.

TELAIRE. (11 de Noviembre de 2018). *Smart Dust Sensor SW-PWM-01C*.

Obtenido de Smart Dust Sensor SW-PWM-01C:

file:///C:/Users/ke_cu/AppData/Local/Packages/Microsoft.MicrosoftEdge_8wekyb3d8bbwe/TempState/Downloads/AAS-930-185B-Telaire-SMART-Dust-Sensor-090517-web%20(1).pdf

Wang, Y., n Li, J., Jing, H., Zhang, Q., Jiang, J., & Biswas, P. (2015). Laboratory Evaluation and Calibration of Three Low-Cost Particle Sensors for Particulate Matter Measurement. *Aerosol Science and Technology*, 1062-1077.

Wayne, R., Ott & William, F., & Hunt, J. (13 de marzo de 2012). *tandfonline*.

Obtenido de tandfonline:

<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00022470.1976.10470358>

Williams, R., Watkins, T., & Long, R. (2014). Findings from The 2013 EPA: Air Sensors Whorkshop. *Air & Waste Management Association*, 5-24.

Winsen. (11 de Noviembre de 2018). *Alibaba*. Obtenido de Alibaba:

<https://spanish.alibaba.com/product-detail/gas-sensor-for-arduino-gas-sensor-module-of-co-o2-nh3-h2s-no2-so2-cl2-o3-60416554716.html>

8. ANEXOS

8.1. Definiciones básicas

- **Aire:** Es el fluido que forma la atmósfera de la Tierra. Éste es una mezcla gaseosa, que se compone principalmente de 21 partes de oxígeno y 78 partes de nitrógeno. El resto lo componen vapor de agua, gases nobles y bióxido de carbono (INE(1), 2018).
- **Aire ambiente:**
 - La mezcla de elementos y compuestos gaseosos, líquidos y sólidos, orgánicos e inorgánicos, presentes en la atmósfera. (SSA1-020, 2014)
 - Atmósfera en espacio abierto (SSA1-021, 1994).
 - Porción de la atmósfera a la que la población está expuesta, externa a las construcciones (SSA1-022, 2010).
 - La porción de la atmósfera externa a las construcciones que no está influenciada directamente por fuentes específicas de emisión, y que es representativa de una comunidad (COFEPRIS-025, 2014).
- **Bandera:** Es un código alfa-numérico que sirve para identificar eventos extraordinarios ajenos a la medición y los datos confiables que pueden ser utilizados para análisis posteriores (SEMARNAT-156, 2012).
- **Bióxido de nitrógeno:** Gas cuya molécula compuesta por dos átomos de oxígeno y uno de nitrógeno, se forma en la atmósfera a partir del óxido de nitrógeno emitido por los procesos de combustión industrial y vehicular, a altas temperaturas y la acción de la radiación solar (SEMARNAT-037, 1993).
- **Calibración:** Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de las magnitudes indicadas por un instrumento de medición o un sistema de medición, o los valores representados por una medida materializada o un material de referencia, y los valores correspondientes de la magnitud realizada por los patrones (SEMARNAT-156, 2012).
- **Calidad del aire:**

- Características del aire ambiente con relación al tipo de sustancias, la concentración de las mismas y período en que se presentan en un lugar y tiempo determinado (NADF, 2006).
- Estado de la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos en un periodo de tiempo y lugar determinados, cuyos niveles máximos de concentración se establecen en las normas oficiales mexicanas y que son catalogados por un índice estadístico atendiendo sus efectos en la salud humana (SEMARNAT-156, 2012).
- **Comunicación de riesgo:** Proceso de interacción e intercambio de información (datos, opiniones y sensaciones) entre individuos, grupos o instituciones sobre amenazas para la salud, la seguridad o el ambiente con el propósito de que la comunidad conozca los riesgos a los que está expuesta y participe en su mitigación. Idealmente este proceso es interactivo y permanente (NADF, 2006).
- **Concentración de contaminantes:** Cantidad de contaminante contenida en un determinado volumen. Esta puede ser medida en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cmol/mol (porcentaje), $\mu\text{mol}/\text{mol}$ (partes por millón), y nmol/mol (partes por mil millones) de acuerdo a la norma NMX-Z-055-IMNC-2009 (SEMARNAT-156, 2012).
- **Conciencia ambiental:** Es la formación de conocimientos, la interiorización de valores y la participación en la prevención y solución de problemas ambientales (NADF, 2006).
- **Contaminante del aire:** Compuesto o compuestos que alteran nocivamente la concentración normal del aire ambiente y calidad del aire como el estado de la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos en un periodo de tiempo y lugar determinados (INE(1), 2018).
- **Contaminante atmosférico:**
 - Sustancia en el aire ambiente que, en alta concentración, puede dañar al hombre, animales, vegetales o materiales de forma aguda o crónica. Estos contaminantes se encuentran en forma de partículas sólidas y líquidas, gases o combinados. Generalmente se clasifican en los

compuestos emitidos directamente por la fuente o contaminantes primarios y los compuestos producidos en el aire por la interacción de dos o más contaminantes primarios o por la reacción con los compuestos naturales encontrados en la atmósfera (SSA1-022, 2010).

- Toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse y actuar en la atmósfera altera o modifica su composición y condición natural (NADF, 2006).
- **Contaminantes naturales:** Pueden ser emitidos de manera natural, mediante los procesos de erosión del suelo, descomposición de materia orgánica, incendios forestales, y procesos volcánicos, entre otros (INE(1), 2018).
- **Contaminantes antropogénicos:** Los contaminantes emitidos por causa de las actividades del hombre y en su mayoría son resultado de la quema de combustibles fósiles (INE(1), 2018).
- **Contaminantes primarios:** Son los contaminantes emitidos de manera directa, ya sea de una fuente natural o antropogénica (por ejemplo, el monóxido de carbono y el dióxido de nitrógeno) (INE(1), 2018).
- **Contaminantes secundarios:** Son los contaminantes que son resultado de las reacciones químicas entre contaminantes primarios y otros componentes del aire (por ejemplo, el ozono, que se forma de la reacción entre el dióxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles) (INE(1), 2018).
- **Contaminantes criterio:**
 - Son contaminantes que, por sus efectos en la salud de la población, han sido normados y se han establecido límites máximos de concentración en el aire ambiente. Los contaminantes criterio incluyen: el ozono (O_3), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el plomo (Pb), las partículas suspendidas totales (PST), y las partículas suspendidas menores a 10 y a 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$) (INE(1), 2018).
 - (O_3 , CO, SO_2 , NO_2 , Pb, PST, PM_{10} y $PM_{2.5}$). Aquellos contaminantes normados a los que se les han establecido un límite máximo de

concentración en el aire ambiente, con la finalidad de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población. Estos son: el ozono, el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno, el plomo, las partículas suspendidas totales, y las partículas suspendidas menores a 10 y a 2.5 micrómetros (SEMARNAT-156, 2012).

- **Contaminante atmosférico criterio:** Término adoptado de la definición que hace la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) para describir a los contaminantes atmosféricos que afectan el bienestar y la salud humana, y que cuentan con criterios para establecer o revisar límites máximos permisibles. Los contaminantes considerados son: ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), plomo (Pb) y partículas suspendidas (NADF, 2006).
- **Control de exposición:** Medidas adoptadas para mantener la exposición por debajo de un límite máximo. El proceso incluye el establecimiento del límite, basándose en la evaluación de riesgo y en el conocimiento de las relaciones entre la emisión y la exposición humana (SSA1-022, 2010).
- **Datos crudos:** Datos que se generan en las redes de monitoreo de la calidad del aire y muestreo de contaminantes atmosféricos, que no han pasado por las etapas de limpieza, verificación y validación (SEMARNAT-156, 2012).
- **Emisión:** Sustancia en cualquier estado físico liberada de forma directa o indirecta al aire, agua, suelo y subsuelo (SSA1-022, 2010).
- **Equipo de calibración:** El dispositivo o conjunto de dispositivos que permiten establecer el patrón de referencia contra el que se compara la operación del equipo de medición (SEMARNAT-034, 1993).
- **Equipo de medición:** El conjunto de dispositivos instrumentales necesarios para medir la concentración de un contaminante (SEMARNAT-034, 1993).
- **Estación de monitoreo:**
 - El conjunto de elementos técnicos diseñados para medir la concentración de contaminantes en el aire en forma simultánea, con

el fin de evaluar la calidad del aire en una área determinada (SEMARNAT-034, 1993).

- Uno o más instrumentos diseñados para medir, de forma continua, la concentración de contaminantes en aire ambiente, con el fin de evaluar la calidad del aire en un área determinada. Una estación de monitoreo es utilizada para indicar en tiempo real cuál es la calidad del aire de la zona en donde está localizada la estación. Cabe mencionar que las estaciones de monitoreo pueden ser fijas, semifijas y móviles (SEMARNAT-156, 2012).
- **Estación de muestreo:** Uno o más instrumentos diseñados para recolectar muestras de aire ambiente con el fin de evaluar la calidad del aire en un área determinada (SEMARNAT-156, 2012).
- **Exposición:**
 - Procesos por los cuales una sustancia con propiedades tóxicas se introduce o es absorbida por un organismo por cualquier vía (SSA1-022, 2010).
 - al contacto de una persona o una comunidad con uno o varios factores (contaminantes del aire en nuestro caso) en un tiempo y un espacio determinados, ésta se produce en un contínuum formado por el ambiente doméstico, el escolar, el laboral y los espacios exteriores (COFEPRIS-025, 2014).
 - Contacto de un ser humano con un agente químico, físico o biológico. Puede incluir la intensidad, frecuencia y duración del contacto, así como la vía de entrada y la dosis (NADF, 2006).
- **Exposición aguda:** Causa efectos a la salud a corto o largo plazo, comúnmente un efecto agudo ocurre durante un tiempo corto (hasta un año) luego de la exposición. Ocurre a lo largo de un tiempo corto, por lo general minutos u horas (SSA1-022, 2010).
- **Exposición crónica:** Que ocurre por un periodo de tiempo largo (más de 1 año) (SSA1-022, 2010).

- **Gestión ambiental:** Conjunto de políticas públicas mediante las cuales una entidad pública propone alternativas de solución a los problemas ambientales (NADF, 2006).
- **Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA):** Escala adimensional que sirve para calificar la calidad del aire con respecto a los contaminantes atmosféricos considerados criterio (NADF, 2006).
- **Método de referencia:**
 - El procedimiento de análisis y medición descrito en una norma oficial mexicana, que debe aplicarse para determinar la concentración de un contaminante en el aire ambiente y que sirve también, en su caso, para contrastar el método equivalente, cuando éste se haya establecido por la Secretaría (SEMARNAT-034, 1993).
 - El procedimiento de análisis y medición descrito en una norma oficial mexicana que debe aplicarse para determinar la concentración de un contaminante en el aire ambiente (NADF, 2006).
 - Procedimiento analítico, de calibración y/o medición de total confiabilidad por sus fundamentos. Sirve para comparar y, en su caso, aceptar otros métodos que también den resultados aceptables y que por lo tanto se consideren equivalentes (SEMARNAT-156, 2012).
- **Método equivalente:** El procedimiento de análisis y medición para determinar la concentración de un contaminante en el aire ambiente, señalado como tal en una norma oficial mexicana por producir resultados similares a los que se obtienen con el método de referencia, susceptible de aplicarse en sustitución de éste (SEMARNAT-034, 1993).
- **Monitoreo atmosférico:** Conjunto de metodologías diseñadas para muestrear, analizar y procesar en forma continua y sistemática las concentraciones de sustancias o de contaminantes presentes en el aire (SEMARNAT-156, 2012).
- **Ozono:** Molécula compuesta por 3 átomos de oxígeno (SSA1-020, 2014).
- **Partes por millón (ppm):**

- La expresión de la concentración en unidades de volumen del gas contaminante relacionado con el volumen de aire ambiente. Para el ozono su equivalente en unidades de peso por volumen es igual a $1,960 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a 25°C de temperatura y con una atmósfera de presión (SSA1-020, 2014).
- $1 \text{ ppm} = 1145 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (SSA1-021, 1994).
- ($1 \text{ ppm} = 2620 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a condiciones de referencia $298.16 \text{ }^\circ\text{K}$ de temperatura y 101.3 kPa (kilopascal) de presión (SSA1-022, 2010).
- ($1 \text{ ppm} = 1880 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (SSA1-023, 1994).
- Es la relación de un volumen de un contaminante en un millón de volúmenes de aire (NADF, 2006).
- **Partículas PM_{10} :** Las partículas con un diámetro aerodinámico igual o menor a 10 micrómetros (COFEPRIS-025, 2014).
- **Partículas $\text{PM}_{2.5}$:** Las partículas con un diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 micrómetros (COFEPRIS-025, 2014).
- **Peligro a la salud pública:** Condición de exposición a sustancias peligrosas en la que se pueden presentar efectos dañinos en la salud de la comunidad (NADF, 2006).
- **Población expuesta al riesgo:** Parte de la población que es susceptible a una enfermedad, definida por factores ambientales o demográficos (SSA1-022, 2010).
- **Población susceptible:** Grupo social con mayor probabilidad de padecer una enfermedad o morir, debido a que es especialmente “vulnerable” como resultado de la interacción de características biológicas, genéticas, ambientales, psicológicas, sociales, económicas, entre otras (NADF, 2006).
- **Riesgo:** Es la probabilidad de la ocurrencia de un efecto adverso ante la exposición a un agente biológico, químico o físico u otra amenaza (NADF, 2006).
- **Sistema de monitoreo:** El conjunto de estaciones de monitoreo (SEMARNAT-034, 1993).

- **Sitio de monitoreo:** Lugar determinado para medir continuamente las concentraciones ambientales de O₃ con el objetivo de determinar la exposición de la población a este contaminante (SSA1-020, 2014).
- **Validación de datos:** Se concibe como un proceso para determinar la calidad analítica de un conjunto de datos de acuerdo con las necesidades particulares del Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire y de su plan de aseguramiento de calidad (SEMARNAT-156, 2012).
- **Valor límite:** Nivel fijado con base en conocimientos científicos con el fin de evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos para la salud humana, en un periodo determinado y que no debe excederse (SSA1-020, 2014).
- **Verificación de datos:** Segundo paso del manejo de datos. Es la revisión a detalle de datos, la cual se lleva a cabo mediante procedimientos estadísticos para identificar aquellos datos que podrían no corresponder a mediciones reales de calidad del aire (SEMARNAT-156, 2012).

8.2. Instituciones involucradas en calidad del aire en México.

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).
- Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental del Instituto Nacional de Ecología (DGCENICA).
- Secretaría de Salud (SSA).
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Instituto Nacional de Ecología (INE).
- Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA).
- Centro de Ciencias de la Atmosfera (UNAM).
 - Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA).
 - Red Mexicana de Aero-biología (REMA).
 - Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS).
 - Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU).
- Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico (PNMA).

- Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA).
- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LEGEEPA).
- Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (CEDES).

8.3. Contaminantes criterio

- Dióxido de azufre (SO₂): se produce por la combustión de combustibles fósiles que contienen azufre, como el carbón y el petróleo, y varios procesos industriales, como la fundición de metales, la producción de ácido sulfúrico y la conversión de pulpa en papel. De acuerdo con la EPA, el 85 por ciento del SO₂ es emitido por la quema de combustibles, mientras que Canadá estima que las actividades industriales son responsables del 65 por ciento de las emisiones de dióxido de azufre. Otra fuente en la que el SO₂ se origina es la oxidación del ácido sulfhídrico (H₂S), el cual es emitido de manera natural por la actividad volcánica. En los últimos años ha disminuido la emisión del SO₂ gracias a las medidas tendentes a eliminar el contenido de azufre en los combustibles. Las emisiones de SO₂ en las instalaciones generadoras de electricidad que usan combustibles de baja calidad afectan a las comunidades que se encuentran en las inmediaciones. A pesar de los esfuerzos por reducirlas, las emisiones de SO₂ siguen siendo significativas a escala mundial y es un contaminante primario importante, junto con el monóxido de carbono. El dióxido de azufre se asocia con afectaciones de las mucosas conjuntival y respiratoria, y produce irritación e inflamación agudas o crónicas; suele asociarse también con las partículas suspendidas y dar lugar riesgos mayores, puesto que su acción es sinérgica (CCA , 2014).
- Óxido nítrico (NO) y dióxido de Nitrógeno (NO₂): son parte de los óxidos de nitrógeno NO_x. El NO₂ es un gas de color marrón claro producido directa o indirectamente por la quema de combustibles a altas temperaturas, como en los automóviles y plantas termoeléctricas. En el proceso de combustión, el nitrógeno en el combustible y el aire se oxidan para formar principalmente óxido nítrico y, en menor proporción, dióxido de nitrógeno. El NO emitido se convierte en NO₂ mediante reacciones fotoquímicas condicionadas por la luz

solar, y es éste el que predomina en la atmósfera. El NO_2 se combina con compuestos orgánicos volátiles en presencia de la luz solar para formar ozono. También se combina con agua para formar ácido nítrico y nitratos. Esto contribuye a la formación de lluvia ácida y al aumento de los niveles de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ (es decir, de material particulado de $10\ \mu\text{m}$ y $2.5\ \mu\text{m}$). Los NO_x tienen una vida corta y se oxidan rápidamente a NO_3 en forma de aerosol o a HNO_3 (ácido nítrico). Los NO_x tienen papel protagónico en la formación del esmog fotoquímico, del nitrato peroxiacetilo (PAN) e influyen en la formación del ozono tanto troposférico como estratosférico. La acumulación de NO_2 en el cuerpo humano constituye un riesgo para las vías respiratorias ya que se ha comprobado que inicia, reactiva y puede alterar la capacidad de respuesta de las células en el proceso inflamatorio, y está asociado a los casos de bronquitis crónica. Además de los efectos nocivos que la contaminación ambiental causa en la salud humana, también se ven severamente afectados por la lluvia ácida la flora, fauna, suelos, lagos y corrientes de agua (CCA , 2014).

- Material particulado (PM): “forma una mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire, que pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición”. El tamaño del PM varía, pues es de 0.005 hasta 100 micrómetros de diámetro aerodinámico, en otras palabras, desde unos cuantos átomos hasta el grosor de un cabello humano. El tamaño de las partículas suspendidas es determinante para que éstas puedan penetrar al interior de los pulmones, lo cual puede tener efectos perjudiciales en la salud de los humanos (CCA , 2014).
- Plomo (Pb): su principal fuente de emisión es la gasolina empleada por los automóviles y, dado que ésta no se consume del todo en el proceso de combustión, este contaminante es emitido en forma de material particulado. En México, la sustitución de gasolinas con plomo por gasolinas sin plomo en los últimos dos decenios hizo posible la eliminación de dicha fuente. El plomo es un contaminante tóxico para los humanos y, debido a sus características, puede acumularse en varios órganos del cuerpo y dañar el sistema nervioso

central. Los niños con altos niveles de plomo en la sangre presentan desórdenes de comportamiento y desarrollo mental restringido. Toda vez que en México las gasolinas dejaron de contener plomo, no existe una norma que regule la medición de las concentraciones de plomo por emisiones a la atmósfera por vehículos automotores. Actualmente, la medición y regulación del plomo se efectúa de acuerdo con fuentes emisoras y actividades específicas (CCA , 2014).

- Ozono (O₃): es un contaminante secundario que se forma mediante la reacción química del dióxido de nitrógeno (NO₂) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de la luz solar y que puede ocasionar inflamación pulmonar, depresión del sistema inmunológico frente a infecciones pulmonares, cambios agudos en la función, estructura y metabolismo pulmonar y efectos sistémicos en órganos blandos como el hígado (CCA , 2014).