

**PROTOTIPO BASADO EN INTERNET DE LAS COSAS PARA EL MONITOREO
AMBIENTAL COMO CONTRIBUCIÓN A LA ORIENTACIÓN DE
BUCARAMANGA (COLOMBIA) HACIA SMART CITY**

JUAN DIEGO VELASCO ORTIZ
MARIO ANDRES PINZON TORRES

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA – UNAB
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA DE SISTEMAS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN PENSAMIENTO SISTÉMICO
BUCARAMANGA, OCTUBRE 27 DE 2018

**PROTOTIPO BASADO EN INTERNET DE LAS COSAS PARA EL MONITOREO
AMBIENTAL COMO CONTRIBUCIÓN A LA ORIENTACIÓN DE
BUCARAMANGA (COLOMBIA) HACIA SMART CITY**

JUAN DIEGO VELASCO ORTIZ
MARIO ANDRES PINZON TORRES

Documento de Trabajo para Optar al Título de Ingeniero de Sistemas

Director:

José Daniel Cabrera Cruz

Co-Director:

Johan Smith Rueda Rueda

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA – UNAB
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA DE SISTEMAS
BUCARAMANGA

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	6
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3. OBJETIVOS	9
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	9
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	9
4. MARCO REFERENCIAL	10
4.1 MARCO CONCEPTUAL.....	10
4.2 MARCO TEÓRICO	11
4.3 MARCO LEGAL	20
5. ESTADO DEL ARTE	22
6. RESULTADOS OBTENIDOS	28
6.1 RESULTADO OBTENIDO 1	28
6.2 RESULTADO OBTENIDO 2	36
6.3 RESULTADO OBTENIDO 3.....	42
6.4 RESULTADO OBTENIDO 4.....	54
7. DISCUSIÓN	65
8. CONCLUSIONES.....	66
9. TRABAJO FUTURO	67
10. REFERENCIAS.....	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción modelo de referencia	12
Tabla 2. Bases de datos consultadas y documentos seleccionados.....	22
Tabla 3. Resumen estado del arte	26

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de referencia IoT	12
Figura 2. Cantidad de dispositivos por persona	13
Figura 3. Fuentes de contaminación atmosférica	17
Figura 4. Países más expuestos a muertes por contaminación del aire	18
Figura 5. Material particulado PM2.5 en el mundo	18
Figura 6. Microcontrolador MCU	28
Figura 7. Placas de desarrollo	29
Figura 8. Sensores MQ	30
Figura 9. Tecnologías IoT	33
Figura 10. Protocolos IoT	34
Figura 11. Plataformas IoT	35
Figura 12. Emisión de contaminantes por vehículos	37
Figura 13. Anomalías de temperatura	38
Figura 14. Anomalías de temperatura	39
Figura 15. Reducción PM10 día sin carro	41
Figura 16. Modelos de Arduino	43
Figura 17. Esquema NodeMCU	44
Figura 18. Pines NodeMCU	45
Figura 19. Pines Digitales y Analógicos NodeMCU	46
Figura 20. MQ135	47
Figura 21. Red WiFi	49
Figura 22. MQTT Pub-Sub	50
Figura 23. Conexión MQTT	51
Figura 24. Publish MQTT	51
Figura 25. Subscribe MQTT	51
Figura 26. Estructura de mensaje MQTT	52
Figura 27. CloudMQTT	53
Figura 28. Conexión arduino - MQ135	54
Figura 29. Conexión NodeMCU - MQ135	55
Figura 30. Creación Instancia CloudMQTT	56
Figura 31. Instancia CloudMQTT	57
Figura 32. Usuario CloudMQTT	57
Figura 33. Salida MQ135	58
Figura 34. Salida MQ135 en CloudMQTT	59
Figura 35. Interfaz inicial App	60
Figura 36. Interfaz Gráfica de datos de MQ135	61
Figura 37: Interfaz Reportar	62
Figura 38. Datos en firebase	63
Figura 39. Arquitectura	64

1. INTRODUCCION

Internet de las Cosas es una tendencia tecnológica que se está volviendo parte de la vida cotidiana de las personas. Hace algunos años, el término era poco conocido. Sin embargo, hoy en día, las personas del común hacen uso del término, ligado al concepto de *Smart Cities*, y la forma en que se pueden ofrecer soluciones tecnológicas que permitan mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. Uno de los campos de mayor interés es el medio ambiente, este, puede ser monitoreado a través de dispositivos físicos que envían información relevante en tiempo real. Esta información posteriormente es analizada y permite la toma de decisiones más pertinentes. Muchos países miden la calidad del aire a través de estaciones de monitoreo ubicadas en lugares estratégicos, pero estas estaciones requieren una inversión considerable para su implementación. Es aquí donde *IoT* toma fuerza y permite recolectar numerosos datos de manera sencilla y de bajo costo para identificar problemas y plantear soluciones futuras. (Kim, Jeong, Hwang, & Kang, 2017; Parmar, Lakhani, & Chattopadhyay, 2017; Velásquez, Vásquez, Correa, & Rivera, 2017)

La contaminación ambiental es uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la humanidad, siendo el CO₂ el gas que más afecta la atmósfera. Una de las principales fuentes de emisión de este gas son los vehículos que utilizan combustibles fósiles para el funcionamiento de su motor, además de emitir otros gases contaminantes. Pero estos gases no solo afectan a la atmósfera, la salud de las personas también se ven perjudicada por estas emisiones, según la OMS cerca de 4.2 millones de personas mueren cada año debido a la contaminación atmosférica. Esta cifra es alarmante y confirma que el deterioro de la calidad del aire constituye un alto riesgo para el medio ambiente y la salud. (WHO, 2018)

En Colombia, se cuenta con estaciones para la medición de calidad del aire. En 2017, existían 26 sistemas de vigilancia de calidad del aire SVCA, con un total de 202 estaciones distribuidas por todo el territorio nacional, con respecto al año 2016 hubo un incremento del 25% de estaciones. Pero estos sistemas de vigilancia no son suficientes, y su cobertura es limitada. Por lo que existen municipios que no cuentan con un sistema para el monitoreo de calidad del aire. Incluso, ciudades como Tunja, Neiva, Bucaramanga y Barranquilla, no cuentan con inventarios de emisiones. Esto hace que el análisis de información sea aún más complicado. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

En este documento se presenta un prototipo que incorpora *IoT* con el fin de monitorear los niveles de contaminación a los que están expuestos algunos sectores de Bucaramanga y de esta manera, poder alertar a la comunidad y a las entidades correspondientes para que se tomen medidas pertinentes.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación atmosférica es un problema a nivel mundial debido al aumento de emisiones de fuentes móviles y fijas en todo el mundo. Se estima que el 91% de la población mundial respira aire contaminado, y que 4.2 millones de personas mueren cada año a causa de enfermedades respiratorias. (WHO, 2018)

En Colombia existen sistemas de vigilancia para la calidad del aire, sin embargo, estos no son suficientes para abarcar todo el territorio nacional, 46 municipios con más de 50.000 habitantes no cuentan con SVCA. Además, para definir estrategias de control de la calidad del aire, son necesarios un conjunto de instrumentos como los SVCA y los inventarios de emisiones. En estos últimos, municipios como Neiva, San Andrés, Bucaramanga, Tunja, Barranquilla y Bucaramanga, no cuentan con inventarios de emisión actualizados con técnicas adecuadas para el análisis de tendencias. Esto limita el conocimiento de la calidad del aire en estas zonas. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

En el sector salud, se encontró que el material particulado PM2.5 es el que más afecta a las personas, pero el monitoreo de este material no es suficiente. En 2017 la mitad de las estaciones que midieron material particulado, no superaron el 75% de los días necesarios de medición para obtener la cantidad de datos necesarios. Esta situación se presenta por fallas en los sistemas de medición. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

Bucaramanga, está entre los municipios que no cuenta con inventarios de emisión, por lo que no se puede hacer un correcto diagnóstico de la calidad del aire. Sin embargo, un estudio realizado por la AMB junto a la UPB, determinó que el 90% de la contaminación proviene del parque automotor, principalmente material particulado PM10 Y PM2.5. En 2016, la CDMB indicó que se excedieron los límites permitidos de material particulado PM10 en Cabecera, Real de Minas y Floridablanca. (AMB, 2018; OSPS, 2016)

Según la líder del nodo nororiental de salud ambiental, Laura Andrea Rodríguez, *“ante estos niveles de contaminación del aire se deben llevar a cabo acciones oportunas de comunicación y de mitigación de riesgo asociado a la salud, considerando que al excederse los niveles de contaminación de aire se puede ver afectada la salud humana, especialmente en poblaciones susceptibles como niños, adultos mayores y aquellas personas con enfermedades crónicas cardiovasculares o respiratorias”*. (OSPS, 2016)

Por lo expuesto anteriormente, es necesario recolectar datos de contaminación del aire en determinados lugares de la ciudad para su posterior análisis. La solución

tecnológica planteada en este documento permite la toma de datos para ayudar a las entidades encargadas a tomar las decisiones más pertinentes. Además, esta solución tecnológica es un aporte para la orientación de Bucaramanga hacia una *Smart city*.

La pregunta que surge a raíz de esta problemática es la siguiente: ¿De qué manera se puede aplicar Internet de las Cosas al problema de contaminación atmosférica en Bucaramanga.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un prototipo *IoT* a problemas de contaminación atmosférica en el municipio de Bucaramanga (Colombia) y como una contribución a la constitución de una *Smart City*.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Describir usos, métodos y tecnologías relacionadas con *IoT* para afrontar problemas de contaminación atmosférica a partir de una revisión de la literatura científica y en la *web* en Colombia y el mundo.
- Realizar una síntesis que describa los problemas de contaminación atmosférica en el área metropolitana de Bucaramanga.
- Evaluar las aplicaciones descritas de *IoT* a la contaminación atmosférica, teniendo en cuenta su pertinencia para la solución de problemas del área metropolitana de Bucaramanga.
- Desarrollar un prototipo funcional que implemente una de las aplicaciones de *IoT* evaluadas, teniendo en cuenta su pertinencia y contribución hacia la constitución del municipio de Bucaramanga como *Smart City*.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se definen de manera general las palabras de mayor relevancia en la orientación del proyecto, dando claridad del problema a atacar, como atacarlo y en qué escenario desarrollarlo. En este orden de ideas se encontró: La contaminación del aire como problemática ambiental y de salud, internet de las cosas como tendencia tecnológica en la solución de problemas y mejora de la calidad de vida, y *Smart Cities* como escenario de aplicación. A continuación son definidas las palabras anteriormente mencionadas.

IoT (Internet of Things):

“Desde la perspectiva de la normalización técnica, IoT puede concebirse como una infraestructura global de la sociedad de la información, que permite ofrecer servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales) gracias a la interoperatividad de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) presentes y futuras. Aprovechando las capacidades de identificación, adquisición de datos, procesamiento y comunicación, IoT utiliza plenamente las "objetos" para ofrecer servicios a todos los tipos de aplicaciones, garantizando a su vez el cumplimiento de los requisitos de seguridad y privacidad.” (ITU, 2012)

Smart City:

“Una ciudad inteligente es un sistema de integración de infraestructura tecnológica que se basa en el procesamiento avanzado de datos con los objetivos de hacer que la gobernanza de la ciudad sea más eficiente, los ciudadanos más felices, las empresas más prósperas y el medio ambiente más sostenible.” (Yin et al., 2015)

Contaminación del aire:

“La contaminación del aire es la concentración de sustancias que en estado sólido, líquido o gaseoso son causantes de efectos adversos en el ambiente y la salud. Los contaminantes en el aire se presentan en forma de partículas y gases, y son emitidos como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas. Las condiciones meteorológicas y topográficas de determinadas zonas inciden en la mezcla y el transporte de los contaminantes en el aire.” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

4.2 MARCO TEÓRICO

A continuación se describen de manera detallada las palabras definidas en la sección (4.1).

Internet de las cosas

Para entender mejor lo que internet de las cosas significa tanto en el aspecto técnico como de revolución de internet, a continuación se presentan dos definiciones importantes. La de la ITU y la de Cisco.

Según la ITU, en el aspecto técnico, *IoT* cuenta con ciertas características y requerimientos de alto nivel. Estas características son: (ITU, 2012)

- Interconectividad
- Servicios relacionados con objetos
- Heterogeneidad
- Cambios dinámicos
- Escala enorme

Estas características muestran el alcance que puede tener *IoT*, es decir, su capacidad para que todo esté conectado con la infraestructura mundial, su facilidad para interactuar con otros dispositivos a través de diferentes redes, el constante cambio de estado de los dispositivos, y el gran porcentaje requerido para la comunicación de dispositivos. En cuanto a los requerimientos de alto nivel, encuentran: (ITU, 2012)

- Conectividad basada en la identificación
- Compatibilidad
- Redes automáticas
- Configuración automática de servicios
- Capacidades basadas en la ubicación
- Seguridad
- Protección de la privacidad
- Autoconfiguración (*plug and play*)
- Capacidad de administración

Los requerimientos presentados anteriormente, son significativamente importantes para el desarrollo de *IoT*, los dispositivos deben ser confiables en cuanto a

seguridad y manejo de la de información, deben ser rápidos y capaces de mostrar la ubicación de la información que se está recolectando. (ITU, 2012)
 En cuanto a la arquitectura de *IoT*, a continuación se presenta el modelo de referencia. En él se aprecian 4 capas (ver Figura 1).

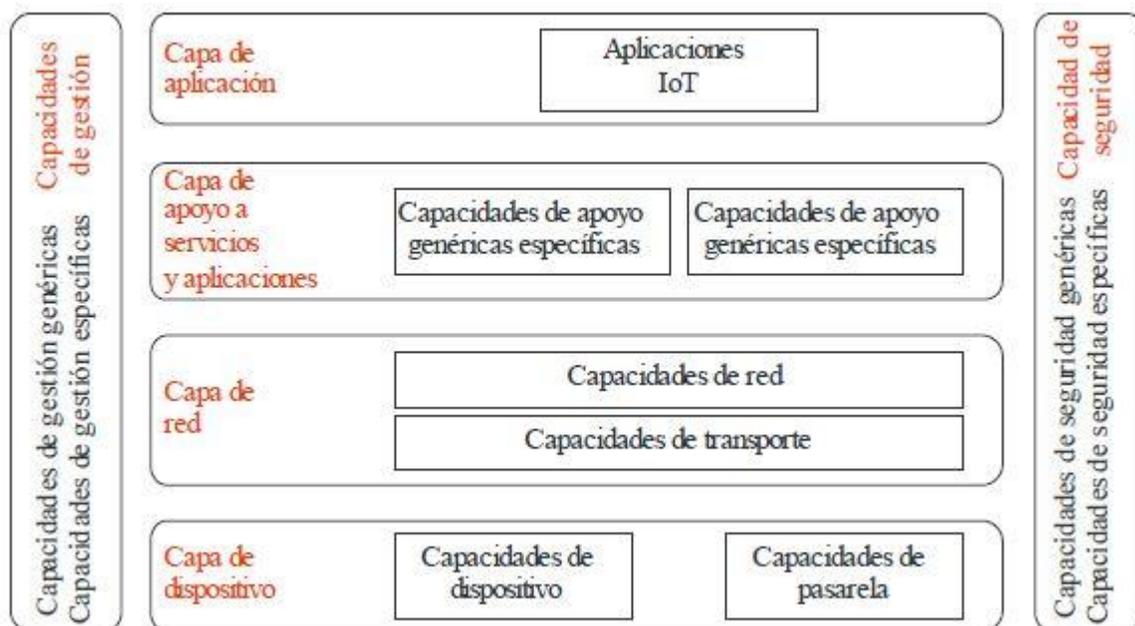


Figura 1. Modelo de referencia IoT

Fuente: Tomado de (ITU, 2012)

Tabla 1. Descripción modelo de referencia

Nombre de capa	Especificación
Capa de aplicación	Conformada por las aplicaciones <i>IoT</i> .
Capa de apoyo a servicios y aplicaciones	Conformada por las capacidades de soporte genéricas y las capacidades de soporte específicas.
Capa de red	Conformada por las capacidades de red y las capacidades de transporte.
Capa de dispositivo	Conformada por las capacidades del dispositivo y las capacidades de pasarela

Fuente: Basado en (ITU, 2012)

Como se mencionó anteriormente, *IoT* también representa revolución de internet. Según el IBSG de Cisco, *IoT* es el momento en que habrá más objetos que personas conectadas a internet. Se estima que en el año 2003 el número de personas que habitaban el planeta era de 6300 millones y para ese mismo año, había 500 millones

de dispositivos conectados a internet. Estos datos arrojan una media de 0.08 dispositivos por personas. Pero los tiempos han cambiado, y el crecimiento exponencial de la tecnología hizo que aumentara la cantidad de *Smartphones* y *tablets* en el mundo, provocando que la cantidad de dispositivos conectados aumentara a 12.500 millones en el año 2010 y la cantidad de personas alcanzo la cifra de 6.800 millones. Esto deja como resultado 1.84 dispositivos conectados por persona, y la cantidad de dispositivos no deja de crecer. Se estima que para el año 2020 habrá 50000 millones de dispositivos conectados. (Dave Evans, 2011)

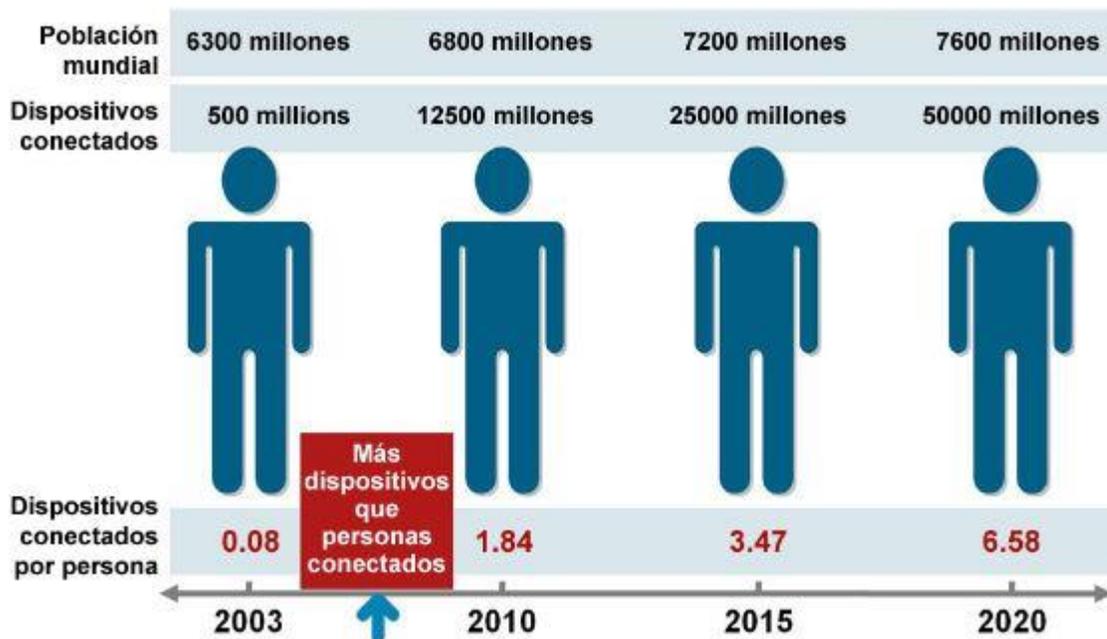


Figura 2. Cantidad de dispositivos por persona

Fuente: Tomado de (Dave Evans, 2011)

Ahora bien, para poder entender lo importante de esta revolución, es necesario conocer las diferencias entre Internet y la *Web*. El primero hace referencia a la capa física conformada por *Routers* y otros dispositivos; su función es llevar información de un lugar a otro, y la *Web*, es una capa de aplicación que funciona en la parte superior de internet. Su función es presentar una interfaz que muestre la información que se envía a través de internet. (Dave Evans, 2011)

Por otra parte, la web, ha sufrido varias transformaciones que han llevado a su evolución, pero internet, aunque ha sufrido algunos cambios, no ha evolucionado. Es aquí donde *IoT* aparece y se presenta como la primera revolución de internet; haciendo que se convierta en algo sensorial (temperatura, humedad, polvo... etc.) (Dave Evans, 2011)

Además, se debe tener en cuenta que internet se está expandiendo por terrenos que no habían sido explorados, en el campo por ejemplo, se pueden instalar sensores para controlar la humedad del suelo, llevar un monitoreo de la salud de los animales o conocer el estado de una planta. En la salud, también ha hecho aportes importantes, como el hecho de poder detectar enfermedades con sensores o poder llevar un control de los signos vitales, entre otros. En otras palabras, el único límite para recoger datos de un objeto es que ese objeto exista. (Dave Evans, 2011)

Sin embargo, en la implementación de *IoT* aparecen algunas barreras que pueden retrasar su desarrollo, las más relevantes son: la implementación de *IPv6*, falta de estándares y la energía para el funcionamiento de los sensores. En cuanto a *IP*, el mundo se ha quedado sin direcciones *IP* debido al alto número de dispositivos conectados a internet. Esto supone un problema para los millones de sensores que necesitaran de una dirección *IP*. Por otra parte, falta mucho en cuanto a estándares de seguridad y privacidad para que los datos estén protegidos, y por último, el tema de las baterías para alimentar los sensores es un factor importante a tener en cuenta. Los sensores al cumplir una función de recolección de datos, tendrán que estar en funcionamiento las 24 horas del día; esto supone un problema ya que no es viable cambiar las baterías de millones de sensores. Por lo que los sensores deben ser autosuficientes y en este sentido, deberán ser capaces de funcionar con energía tomada de fuentes como el sol o el aire. (Dave Evans, 2011)

Cabe resaltar, que aunque existan dificultades para que *IoT* se desarrolle con rapidez, estas no son impedimento, puesto que las ventajas que trae esta revolución de internet son numerosas por lo que solo es cuestión de tiempo para que las barreras se empiecen a superar y den paso a *IoT* en toda su plenitud. (Dave Evans, 2011)

Smart city

Una ciudad inteligente es la que utiliza las diferentes herramientas tecnológicas con el fin de mejorar la calidad de vida de las personas, se encarga de recoger los diferentes datos que proporcionen los sensores que están distribuidos en la ciudad para analizarlos e informar a la persona o entidad encargada, ayudando a la toma de decisiones de problemáticas o situaciones específicas. La información recolectada y analizada tiene mucho valor para las personas de la ciudad. En este sentido la vida de los ciudadanos mejorara, puesto que conocerán datos en tiempo real que les permitirá optimizar tiempo y recursos, como es el caso del tráfico y la salud. Las agencias de la ciudad también se verán beneficiadas con esta información, podrán mejorar los servicios ofrecidos y recibir retroalimentación constante por parte de la ciudadanía. (CISCO, 2018)

Algunos sectores que una ciudad inteligente puede gestionar son:

Ambiente: Controlar la contaminación del medio ambiente es algo que debería preocupar a todo el planeta, los índices de contaminación cada vez son más elevados, y esto indica que se deben tomar acciones al respecto. Es por esto que desde *IoT* se proponen algunas soluciones para controlar la contaminación. Los más mencionados son: calidad del aire, gestión de residuos y administración del agua. Como se puede observar, las soluciones son propuestas para sectores específicos de contaminación. En el caso del aire, el aumento de vehículos e industrias ha causado un deterioro en la calidad del mismo, razón por la cual es importante empezar a monitorear estas emisiones y empezar a controlarlas. En cuanto a residuos, los seres humanos cada vez generan más basura, y muchas veces, esta basura no recibe el tratamiento adecuado y genera contaminación en espacios públicos; *IoT* propone contenedores inteligentes que sean capaces de informar cuando el nivel llenado este por completarse. Y en lo que se refiere a contaminación del agua, se propone monitoreo constante de contaminantes para que el agua que llegue a los hogares sea de buena calidad. (CISCO, 2018)

La iluminación también se está mejorando, con el fin de ayudar al medio ambiente, se está mejorando utilizando tecnología *LED* para reducir el consumo energético, además se trabaja también, en fuentes de alimentación utilizando otras fuentes de energía como la solar y la eólica. (CISCO, 2018)

Transporte y movilidad urbana: un problema que se afronta en la actualidad es el tráfico de vehículos, con *IoT* se busca reducir la congestión vehicular con el fin de mejorar la movilidad y disminuir la contaminación en determinados sectores. Con esto se quiere también, indicar a los habitantes sobre las rutas que más se acomoden a su destino; optimizando tiempo y logrando fluidez en la movilidad. (CISCO, 2018)

Salud: Este sector es uno de los más beneficiados con *IoT*. Se ha logrado diseñar sensores para monitorear la salud de las personas y a través del análisis de los datos poder tomar acciones pertinentes con respecto al paciente. Ahora las personas podrán ser monitoreadas sin tener que visitar obligatoriamente una clínica y las condiciones de habitaciones y equipos de salud también podrán ser monitoreados para garantizar una excelente atención. (Microsoft, 2018)

Otros sectores que se pueden gestionar son: estacionamiento, *Wifi* público y seguridad. La respuesta a emergencias se pueden optimizar a través de sensores que informen sobre una determinada situación y el crimen se puede combatir con el análisis de cámaras de seguridad. Por estas cosas los ciudadanos estarán más seguros y al existir gran cantidad de sensores, *Wifi* se volverá público y las personas estarán conectadas. (CISCO, 2018)

Contaminación del aire

Para hablar de contaminación del aire, se deben definir cuáles son sus principales contaminantes y como se clasifican.

En lo que se refiere a material particulado, se encuentra: polvo, cenizas y humo. Estas partículas se clasifican dependiendo de su tamaño, pueden ser partículas con diámetro menor a 10 micras (PM10), o partículas con diámetro inferior a 2.5 micras (PM2.5). Esta clasificación establece el riesgo que puede generar en la salud de las personas. Pero el ser humano también contamina, y esta contaminación se clasifica en fuentes móviles y fuentes fijas. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

Dentro de las fuentes móviles se encuentran todos los medios de transporte que usan combustibles fósiles y liberan contaminantes. (Carros, aviones, trenes... etc.). Y las fuentes fijas son industrias que liberan gases contaminantes a través de chimeneas. Para los casos anteriormente nombrados, existen normas y niveles permitidos de emisión de contaminantes, así como acciones legales contra personas jurídicas o naturales que incumplan con estas leyes. (Ver sección 4.3).(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

En Colombia, según el sistema de vigilancia de la calidad de aire (SVCA), el mayor problema de contaminación está relacionado con material particulado. Y este material es producido principalmente por fuentes móviles. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

“Por su parte, los inventarios de emisiones de los grandes centros urbanos como Bogotá y Medellín muestran que en 2012 las emisiones de PM2.5 provenían en un 78% de las fuentes móviles y en un 22% de las fuentes fijas en Bogotá. En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en 2013, el 82% de las emisiones correspondía al sector transporte y el 18% al sector industrial.” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

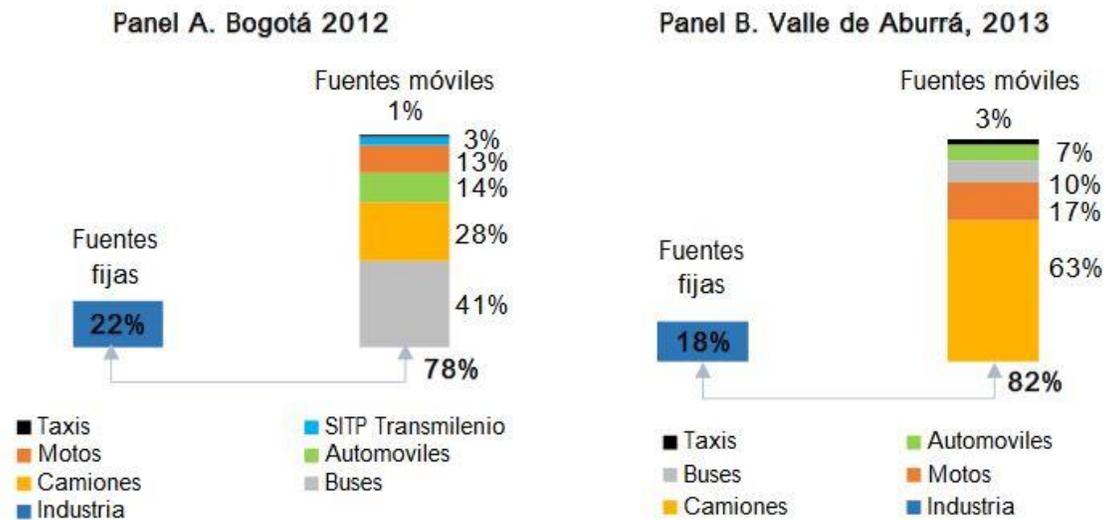


Figura 3. Fuentes de contaminación atmosférica

Fuente: Tomado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

En lo que a salud se refiere, la contaminación del aire provoca la muerte de 4.2 millones de personas al año, debido a enfermedades respiratorias. Y las personas más afectadas son las de países con menos ingresos de dinero, aunque en general todos los países se ven afectados por esta problemática. Se estima que el 91% de la población, respira aire contaminado. (WHO, 2018)

Los porcentajes de las muertes y enfermedades causadas por la contaminación del aire a nivel mundial son: (WHO, 2018)

- 29% de muertes y enfermedades a causa de cáncer de pulmón.
- 17% de muertes y enfermedades por infección respiratoria aguda.
- 24% de muertes por derrame cerebral.
- 25% de muertes y enfermedades por cardiopatía isquémica.
- 43% de muertes y enfermedades por enfermedad pulmonar crónica.

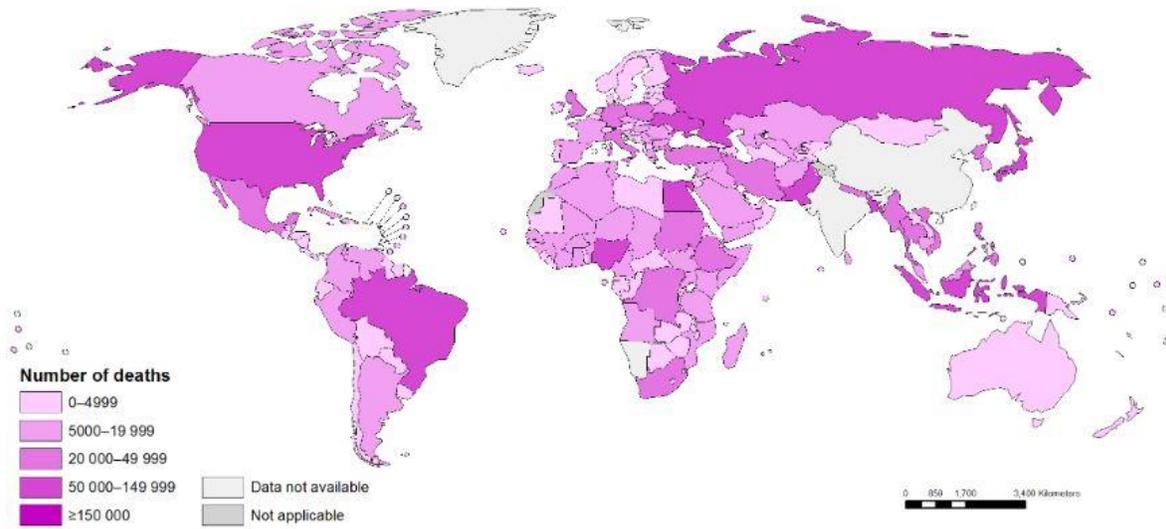


Figura 4. Países más expuestos a muertes por contaminación del aire

Fuente: Tomado de (WHO, 2018)

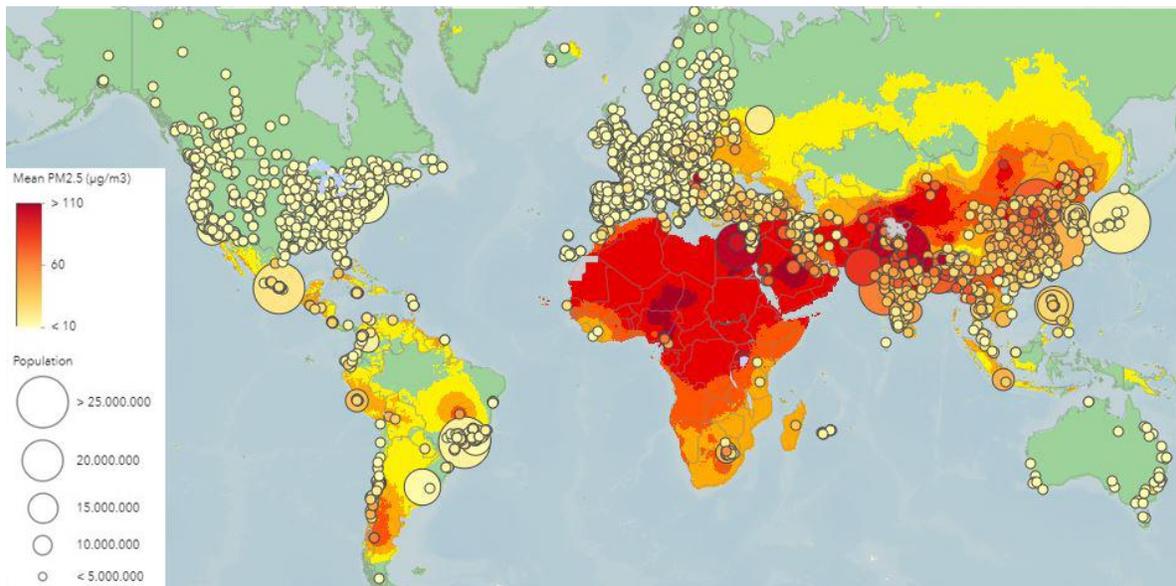


Figura 5. Material particulado PM2.5 en el mundo

Fuente: Tomado de (WHO, 2018)

En Bucaramanga, el observatorio de salud pública de Santander (OSPS), presentó una investigación donde se evidenció que los niveles de material particulado PM10, aumentaron considerablemente debido al alto número de fuentes móviles en la ciudad y su área metropolitana. (OSPS, 2016)

“De acuerdo con la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) a finales del mes de marzo los niveles de material particulado PM10 en las estaciones de monitoreo de Cabecera y Real de Minas en Bucaramanga y en Floridablanca excedieron la norma nacional de calidad de aire para PM10 en un promedio de 24 horas, siendo de más de 100 µg/m3.” (OSPS, 2016)

Por otra parte, la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), presentó un inventario de emisiones atmosféricas donde se determinó que el 90% de contaminación proviene del parque automotor. Siendo esta, material particulado PM2.5. (AMB, 2018)

4.3 MARCO LEGAL

A continuación son mencionadas algunas normas nacionales e internacionales relacionadas con el tema de estudio. En ellas se detallan el manejo de contaminantes, niveles permitidos de contaminación y acciones legales para la protección del medio ambiente.

Nacional

Decreto único reglamentario 1076 de 2015: Este decreto tiene como finalidad compilar todos los decretos vigentes y expedidos a la fecha en materia ambiental; y aplicados al territorio nacional. En él no se añaden, quitan o modifican decretos, solo se compilan. Cuenta con 84 decretos y cerca de 1650 artículos. En cuanto a protección y control de la calidad del aire se presentan algunos decretos entre los cuales resalta el mencionado a continuación: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

Decreto 948 de 1995: Este decreto contiene el reglamento de protección y calidad del aire establecido para la república de Colombia. Estas normas tienen como referencia el ministerio del medio ambiente y se adoptan para la protección atmosférica. Se definen acciones y mecanismos para preservar la calidad del aire y evitar el deterioro del medio ambiente. (Ministerio del Medio Ambiente, 1995)

A demás, el ministerio de ambiente como entidad encargada de definir políticas y promover la conservación del medio ambiente establece las siguientes resoluciones:

Resolución 601 de 2006: "Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia". (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006)

Resolución 650 de 2010: "Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire". (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

Resolución 910:DE 2008 "Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de inmisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disponibles" (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008)

Internacional

En 2005 la OMS definió unas guías de calidad del aire donde se ofrece orientación para disminuir la contaminación del aire y se definen límites de contaminación para algunos de los principales contaminantes del aire. Material particulado, ozono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. (WHO, 2005)

5. ESTADO DEL ARTE

REVISIÓN DE LA LITERATURA

La literatura seleccionada fue consultada de las siguientes bases de datos IEEE Xplore y ACM. Con las siguientes palabras clave. *Smart cities, air quality, IoT, pollution, CO2*. Algunas combinaciones utilizadas fueron: “*IoT*” y “*Pollution*”, “*IoT*” y “*Air quality*”, “*IoT*” y “*CO2*”. Entre otras con esas características. Todas relacionadas con el monitoreo de gases y con un rango de búsqueda entre 2014 y 2018. La primera selección se hizo a partir de la lectura rápida de título, resumen y palabras claves.

Tabla 2. Bases de datos consultadas y documentos seleccionados.

Base de datos	Documentos recuperados	Documentos seleccionados	Porcentaje
IEEE Xplore	134	16	12,68%
ACM	20	3	15%

A continuación son presentados los estudios primarios hallados en la literatura y que son fundamentales para resolver nuestro problema de investigación. En ellos se encuentran técnicas, métodos y usos que se pueden articular a nuestra investigación.

Kim, Jeong, Hwang & Kang (2017) desarrollaron un dispositivo *IoT* para el monitoreo atmosférico que utiliza la red móvil *LTE* para aprovechar su gran cobertura. El sistema propuesto es de bajo costo y se desarrolló como un prototipo que mide: polvos finos y ozono. Esta información es enviada a la red *LTE* junto con su ubicación y posteriormente es analizada en el servidor. Entre los resultados se encuentra que los datos recogidos son similares a los del Sistema Nacional de Información de Monitoreo de la Calidad Ambiental. Aunque no se pueden comparar del todo porque la ubicación del prototipo con los de la estación no son los mismos. (Kim et al., 2017)

Velásquez, Vásquez, Correa & Rivera (2017) construyeron una red de monitoreo de bajo costo que mide el monóxido de carbono, temperatura, humedad, ruido y radiación UV. Esto con el fin de aumentar la representatividad del monitoreo existente. Se instalaron varios nodos en la ciudad con un servidor central donde se almacena la información. La información se muestra en un sitio *web* en tiempo real;

los resultados que se obtuvieron fueron 8640 registros cada 10 segundos, además se determinó que tanto los nodos como la plataforma permiten añadir otros sensores. Y al ser escalable es una herramienta que puede servir a los ciudadanos y contribuir a mejorar las políticas públicas del medio ambiente. (Velásquez et al., 2017)

Alshamsi, Anwar, Almulla, Aldohoori, Hamad & Awad (2017) desarrollaron todo un sistema *IoT* que monitorea la contaminación del aire en tiempo real y en lugares específicos. Esta información se envía a una entidad interesada para informar sobre cualquier violación. Además en caso de que el límite de contaminación exceda el umbral permitido, se activara una alarma para informar a la ciudadanía. Este sistema se probó en un cuarto bajo diferentes condiciones ambientales para probar la resistencia de los sensores y su efectividad. Los resultados arrojados fueron buenos y con un gran porcentaje de fiabilidad. Por lo que se puede afirmar que es una solución viable para implementar en una ciudad. (Alshamsi et al., 2017)

Patil (2017) propuso un dispositivo *IoT* para monitorear la contaminación producida por vehículos que utilicen combustibles fósiles, además de monitorear el ruido producido por los mismos. De esta manera se pretende alertar al departamento de tráfico y a las entidades correspondientes para que estas tomen las medidas necesarias. El dispositivo debe ser instalado en cada vehículo y se encenderá con el mismo, hará envíos a la entidad de tráfico y de ambiente cada 20 minutos. Las pruebas que se realizaron fueron exitosas, mostrando que se puede implementar a gran escala sin ningún problema. (Patil, 2017)

Parmar, Lakhani, & Chattopadhyay (2017) desarrollaron un dispositivo *IoT* para monitorear los principales contaminantes del aire, se enfoca principalmente en dos gases. CO₂ y NH₃. Los datos podrán ser vistos a través de un sitio web en tiempo real. Como resultados se obtuvieron un sistema eficiente, de bajo costo y de tamaño pequeño por lo que puede ser portátil. Además de respuesta rápida, bajo mantenimiento y continuas mediciones. También, su arquitectura permite agregar otros componentes de hardware, en caso de necesitar otros sensores. (Parmar et al., 2017)

Manna, Bhunia & Mukherjee (2014) proponen el uso de lectores *RFID* ubicados en cada lado de la carretera y a una distancia corta entre ellos para detectar la emisión de gases de los vehículos. Estos vehículos llevarán una etiqueta que será leída por los lectores, a su vez con la etiqueta *RFID* el automóvil llevará el arduino y los sensores de gas. De esta manera cuando el vehículo pase por los lectores estos tomarán los datos y los enviara a un servidor para ser analizados. Los resultados

que se muestran son prometedores, y la implementación del dispositivo es de bajo costo. (Manna, Bhunia, & Mukherjee, 2014)

Liu, Li, Jiang, Qi, Xiang & Xu (2015) desarrollaron un dispositivo *IoT* para medir la calidad del aire a través de bicicletas, las bicicletas son utilizadas en algunos países como transporte público por lo que se pueden equipar con un dispositivo que mide la calidad del aire en las carreteras. Estos datos se almacenan en una memoria SD para ser enviados posteriormente al centro de datos a través de *Bluetooth*. Los resultados obtenidos mostraron como la contaminación es mucho mayor en zonas con demasiado tráfico a diferencia de una zona con poco tráfico. Este dispositivo es un diseño innovador, de bajo costo y que se puede adecuar a un sistema de transporte público. (Liu et al., 2015)

Rushikesh & Sivappagari (2015) desarrollaron un dispositivo para medir la contaminación del aire producida por vehículos. El sistema consta de un lector *RFID* acompañado de un micro controlador y sensores de gas. Este sistema se ubica en cualquier carretera y tomara los datos de cualquier vehículo que tenga una etiqueta *RFID*. Como resultados se muestra la identificación del vehículo en una pantalla *LCD* y en el servidor se detallan los niveles de gas recogidos. Si el vehículo sobrepasa el umbral permitido se enviara una notificación al dueño y a la entidad encargada para que se tomen las medidas pertinentes. (Rushikesh & Sivappagari, 2015)

Shah & Mishra (2016) desarrollaron un sistema de nodos para medir calidad de aire, humedad y temperatura. El sistema consta de dos sensores, uno trasmisor y otro receptor. El trasmisor se encarga de tomar los datos ambientales y transmitirlos inalámbricamente al receptor, este a su vez almacena los datos en un pc para enviarlos a una base de datos posteriormente y ser analizados. Se hicieron pruebas en la ciudad de Gandhinagar y se determinó que el dispositivo tiene una efectividad del 65%. También, se desarrolló una aplicación para ver los datos en dispositivos con sistema operativo Android. (Shah & Mishra, 2016)

Tapashetti, Vegiraju & Ogunfunmi (2016) desarrollaron un prototipo *IoT* para monitorear CO y HCHO, los datos medidos se envían a internet a través de una red celular *GSM* y se notifica a cualquier dispositivo inalámbrico cuando el umbral de contaminación de estos gases sea sobrepasado. El prototipo se probó en Santa Clara, California y entre los resultados se evidencia un aumento de contaminación en la tarde a comparación de la mañana; también, se determinó que la cantidad de personas influye en los niveles monitoreados. El prototipo es de bajo costo, puede recoger datos cada segundo y es escalable. (Tapashetti, Vegiraju, & Ogunfunmi, 2016)

Desai & Alex (2017) Proponen un prototipo capaz de monitorear dióxido de carbono y monóxido de carbono junto a su ubicación por medio de *GPS*. Los datos obtenidos serán enviados a la nube donde se utilizara un servicio de aprendizaje de Microsoft (Azure Machine) para predecir niveles de contaminación futuros basándose en datos anteriores. También, se pretende integrar este trabajo a las aplicaciones móviles para visualizar la información de una manera más cómoda. (Desai & Alex, 2017)

Saha, Auddy, Chatterjee, Pal, Pandey, Singh, Singh, Sharan, Banerjee, Ghosh & Maity (2017) proponen un dispositivo *IoT* para monitorear diferentes tipos de contaminación ambiental. Se propone utilizar sensores para medir calidad del agua, aire, radiación ultravioleta y contaminación acústica. Cuando estos datos sean recogidos, serán enviados a la nube para ser analizados y tomar las acciones necesarias. Esta propuesta presenta un desafío en su implementación debido a la cantidad de sensores, pero se espera que sea eficiente al momento de generar un informe detallado de la contaminación ambiental. (H. N. Saha et al., 2017)

Kiruthika & Umamakeswari (2017) desarrollaron un prototipo para monitorear niveles de contaminación atmosférica y predecir niveles futuros. Lo datos se almacenaran en una base de datos *MySQL* que puede ser consultada en cualquier momento. Se instalaron varios dispositivos y mostraron resultados confiables que se compararon para determinar zonas más expuestas a contaminación e informar a los usuarios sobrepasos en los niveles permitidos. De esta manera se planea mantener los niveles de contaminación al mínimo. El prototipo tiene ventajas como su rentabilidad, escalabilidad y flexibilidad por lo que puede ser instalado en cualquier área. (Kiruthika & Umamakeswari, 2017)

Saha, Shinde & Thadeshwar (2017) Proponen un despliegue de sensores en los buses de transporte público para monitorear la contaminación del aire, los datos recogidos se enviaran al nodo más cercano y a la nube, donde podrán ser utilizados. Este despliegue puede ser un gran aporte a la construcción de ciudades inteligentes, ya que permite abarcar una ciudad casi en su totalidad y este es un factor fundamental para la toma de datos puesto que la contaminación es diferente en cada sector. (D. Saha, Shinde, & Thadeshwar, 2017)

Fuertes, Carrera, Villacís, Toulkeridis, Galárraga, Torres, & Aules (2015) desarrollaron un sistema de monitoreo inalámbrico para contaminantes del aire como densidad de polvo, monóxido de carbono y dióxido de carbono. Se utilizó *Scrum* como metodología para la construcción del dispositivo. El sistema se probó en la ciudad de Quito, Ecuador con una medición de datos cada 15 segundos. Los resultados arrojados tienen una efectividad del 95%, lo que los hace comparables con los valores establecidos por la OMS. (Fuertes et al., 2015)

Puranik, Mohan & Chandrasekaran (2015) presentaron un *framework* para monitorear niveles de contaminación por parte de industrias e informar a las autoridades cuando el umbral de contaminación sea superado, se utiliza la tecnología *WSN* para la transmisión rápida y efectiva de datos y una etiqueta *RFID* para detectar una fábrica específica desde cualquier lugar. Los sensores se ubican dentro y fuera de una fábrica, cuando se sobrepasa el umbral permitido se envía una alerta al servidor y este reconoce la fábrica a través de la etiqueta *RFID*. Esta información se envía a las autoridades para que tomen las medidas pertinentes. (Puranik, Mohan, & Chandrasekaran, 2015)

Tabla 3. Resumen estado del arte

Titulo	Año	País	Tecnologías/ Protocolos	Base de Datos	Citaciones
Development of an IoT-based Atmospheric Environment Monitoring System	2017	South Korea	<i>IoT, LTE, TCP</i>	IEEE	1
A low-cost IoT based Environmental Monitoring System. A citizen approach to pollution awareness	2017	Chile	<i>IoT, WSN</i>	IEEE	2
Monitoring Pollution: Applying IoT to Create a Smart Environment	2017	United Arab Emirates	<i>IoT, Zigbee, WSN</i>	IEEE	0
Smart IoT Based System For Vehicle Noise And Pollution Monitoring	2017	India	<i>IoT, WSN, Bluetooth, RFID</i>	IEEE	0
An IoT Based Low Cost Air Pollution Monitoring System	2017	India	<i>IoT, WSN, TCP</i>	IEEE	0
Vehicular Pollution Monitoring Using IoT	2014	India	<i>IoT, RFID, GPRS, GPS</i>	IEEE	19
A Bicycle-borne Sensor for Monitoring Air Pollution near Roadways	2015	Taiwán	<i>IoT, GPS, Bluetooth</i>	IEEE	6
Development of IoT based Vehicular Pollution	2015	India	<i>IoT, WSN, RFID</i>	IEEE	16

Título	Año	País	Tecnologías/ Protocolos	Base de Datos	Citaciones
Monitoring System					
IoT enabled Environmental Monitoring System for Smart Cities	2016	India	<i>IoT, WSN</i>	IEEE	23
IoT-Enabled Air Quality Monitoring Device A Low Cost Smart Health Solution	2016	EE.UU	<i>IoT, WSN</i>	IEEE	5
IoT based air pollution monitoring and predictor system on Beagle Bone Black	2017	India	<i>IoT, GPS</i>	IEEE	4
Pollution Control using Internet of Things (IoT)	2017	Tailandia	<i>IoT, WSN, GPS, Bluetooth</i>	IEEE	4
Low Cost Pollution Control and Air Quality Monitoring System using Raspberry Pi for Internet of Things	2017	India	<i>IoT, WSN,</i>	IEEE	0
IoT based Air Quality Monitoring System using Wireless Sensors deployed in Public Bus Services	2017	Reino Unido	<i>IoT, WSN</i>	ACM	1
Distributed System as Internet of Things for a new low-cost, Air Pollution Wireless Monitoring on Real Time	2015	China	<i>IoT, WSN</i>	ACM	15
Smart and Secure Monitoring of Industrial Environments using IoT	2015	India	<i>IoT, WSN, RFID</i>	ACM	0

6. RESULTADOS OBTENIDOS

6.1 RESULTADO OBTENIDO 1

Para afrontar problemas de contaminación atmosférica a nivel global usando IoT, se aplican una serie de tecnologías, protocolos, plataformas y dispositivos que se describen a continuación:

Dispositivos (Hardware)

Las aplicaciones *IoT* requieren de un microcontrolador (*MCU*), junto con los sensores necesarios. Los *MCU* son el cerebro de la aplicación y los sensores los encargados de tomar los datos que se van a analizar.

Micronrolador MCU:

“Es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador y que contiene todos los componentes fundamentales de un ordenador, aunque de limitadas prestaciones y que se suele destinar a gobernar una sola tarea. En su memoria sólo reside un programa que controla en funcionamiento de una tarea determinada, sus líneas de entrada/salida se conectan a los sensores y actuadores del dispositivo a controlar y, debido a su pequeño tamaño, suele ir integrado en el propio” (EcuRed, 2012)



Figura 6. Microcontrolador MCU

Fuente: Tomado de (DZone, 2018)

Los *MCU* están acompañados por placas de desarrollo, estas placas son útiles en la fabricación de sistemas embebidos. Las placas menos costosas y más utilizadas en mundo son: (ARROW, 2018)

Arduino:

“Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fácil de usar. Las placas Arduino pueden leer entradas de un sensor y convertirla en una salida. Para hacerlo, utiliza el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el software Arduino (IDE), basado en el procesamiento.” (ARDUINO, 2019)

Raspberry pi:

“La Raspberry Pi es una computadora de bajo costo, del tamaño de una tarjeta de crédito, que se conecta a un monitor de computadora o televisor, y usa un teclado y mouse estándar. Es un pequeño dispositivo capaz que permite a personas de todas las edades explorar la informática y aprender a programar en lenguajes como Scratch y Python. Es capaz de hacer todo lo que se espera que haga una computadora de escritorio, desde navegar por Internet y reproducir videos de alta definición hasta hacer hojas de cálculo, procesamiento de textos y juegos.” (RaspberryPi, 2019)



Figura 7. Placas de desarrollo

Fuente: Tomado de (DZone, 2018)

Sensores:

“Un sensor es un dispositivo que detecta y responde a algún tipo de entrada del entorno físico. La entrada específica puede ser luz, calor, movimiento, humedad, presión o cualquiera de una gran cantidad de otros fenómenos ambientales. La salida es generalmente una señal que se convierte en una pantalla legible por humanos en la ubicación del sensor o se transmite electrónicamente a través de una red para su lectura o procesamiento posterior.” (WhatIs, 2012)

Para monitorear la calidad del aire, existen determinados sensores de gas, que detectan determinados gases en el aire, así como partículas de polvo. Los sensores de gas más comunes en el mercado son los de la familia MQ, Y para polvo un sensor óptico que es usado en sistemas de purificación de aire.

Los sensores MQ están definidos por modelos.

- MQ-2 sensible al Metano, Butano y humo.
- MQ-3 sensible al alcohol y Etanol.
- MQ-4 sensible al Metano.
- MQ-5 sensible al gas Natural.
- MQ-6 sensible al gas Butano.
- MQ-7 sensible al Monóxido de Carbono.
- MQ-8 sensible al gas Hidrógeno
- MQ-9 sensible al Monóxido de Carbono y gases inflamables.
- MQ-135 calidad del aire, sensible al Benceno, alcohol y humo.

(ELECTRONICA SL, 2019)

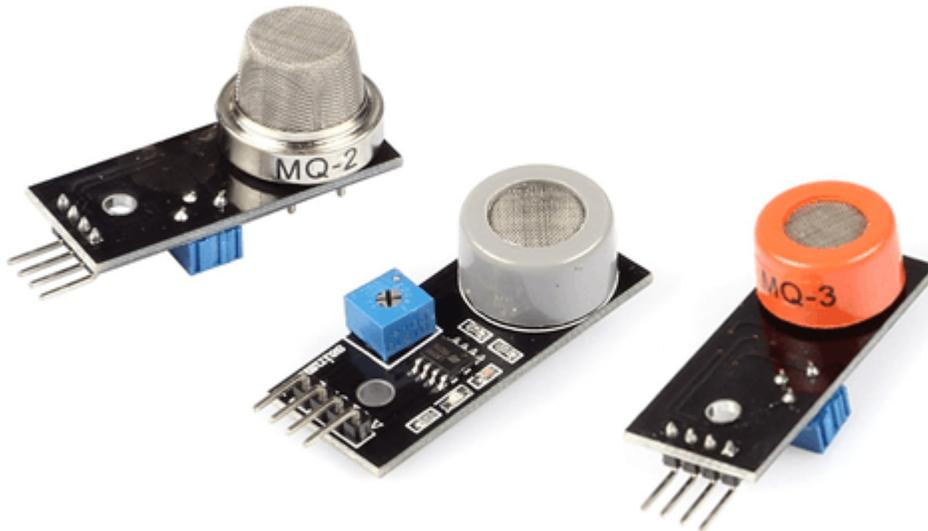


Figura 8. Sensores MQ

Fuente: Tomado de (Llamas, 2019b)

Conectividad

El *hardware* debe tener la capacidad para conectarse a internet o a una red. Para esto, existen tecnologías que permiten dicha conectividad, como lo son:

WiFi

“El término "Wi-Fi" se refiere a un protocolo de comunicación inalámbrica cuyo estándar técnico ha sido estandarizado por el grupo IEEE 802.11. Opera con ondas de radio en una banda de frecuencia de 2.4 o 5 GHz, puede conectar computadoras y equipos móviles en una red inalámbrica de banda ancha. Las velocidades de conexión varían según el estándar 802.11 utilizado.” (FUTURATECH, 2017)

Bluetooth

“Esta tecnología inalámbrica permite la comunicación entre dispositivos compatibles con Bluetooth. Se utiliza para conexiones de corto alcance entre computadoras de escritorio y portátiles, PDA (como el Palm Pilot o Handspring Visor), cámaras digitales, escáneres, teléfonos celulares e impresoras.” (TechTerms, 2019)

WSN

“Una red de sensores inalámbricos se puede definir como una red de dispositivos que puede comunicar la información recopilada desde un campo monitoreado a través de enlaces inalámbricos. Los datos se envían a través de múltiples nodos, y con una puerta de enlace, los datos se conectan a otras redes como Ethernet inalámbrica.” (EL-PRO-CUS, 2018)

Zigbee

“ZigBee es una especificación de red de malla para redes inalámbricas de área local (WLAN) de baja potencia que cubren un área grande. Ha sido diseñado para proporcionar un alto rendimiento de datos en aplicaciones en las que el ciclo de trabajo es bajo y el bajo consumo de energía es una consideración importante. (Muchos de los dispositivos que utilizan ZigBee funcionan con baterías). Debido a que ZigBee es a menudo utilizado en la automatización industrial y en la operación de plantas físicas, a menudo se asocia con la comunicación de máquina a máquina (M2M) y el Internet de las Cosas (IoT)” (SearchDataCenter, 2014)

Sigfox

“Tecnología inalámbrica de amplio rango es, viene con un rango entre Wi-Fi y celular. Sigfox utiliza la banda ISM gratuita para transmitir datos en un espectro muy estrecho. Sigfox está diseñado para manejar bajas velocidades de transferencia de datos de 10 a 1,000 bps usando una tecnología de banda ultra estrecha (UNB).

Sigfox supera el problema del Wi-Fi y el celular en muchas aplicaciones que tienen un rango de Wi-Fi corto, donde el costo del celular es alto y consume más energía.” (Medium, 2018)

NFC

“Near Field Communication (NFC) es un estándar de conectividad inalámbrica de corto alcance (Ecma-340, ISO / IEC 18092) que utiliza la inducción de campo magnético para permitir la comunicación entre dispositivos cuando se tocan entre sí, o se colocan a pocos centímetros entre sí. Desarrollado conjuntamente por Philips y Sony, el estándar especifica una forma para que los dispositivos establezcan una red de igual a igual (P2P) para intercambiar datos. Después de configurar la red P2P, se puede utilizar otra tecnología de comunicación inalámbrica, como Bluetooth o Wi-Fi, para una comunicación de mayor alcance o para transferir grandes cantidades de datos.” (SearchMobileComputing, 2007b)

RFID

“Radio-frequency identification (RFID) utiliza campos electromagnéticos. RFID no es nuevo, ya que se ha utilizado en casi todas las industrias para identificar y rastrear las etiquetas adheridas a objetos automáticamente. Las etiquetas almacenan información electrónicamente. Hay dos tipos de etiquetas RFID, activas y pasivas. Las etiquetas pasivas recogen energía de las ondas de radio del lector RFID, mientras que las etiquetas activas tienen su fuente de energía, como una batería, y pueden operar a cientos de metros de distancia del lector RFID. La tecnología RFID se puede utilizar en la IoT para identificar objetos y vincularlos a Internet.” (Medium, 2018)

GPRS

“General Packet Radio Services (GPRS) es un servicio de comunicación inalámbrica basado en paquetes que promete velocidades de datos de 56 a 114 Kbps y conexión continua a Internet para usuarios de teléfonos móviles y computadoras. Las tasas de datos más altas permiten a los usuarios participar en videoconferencias e interactuar con sitios web multimedia y aplicaciones similares utilizando dispositivos móviles de mano, así como computadoras portátiles. GPRS se basa en la comunicación Global System for Mobile (GSM) y complementa los servicios existentes, como las conexiones de teléfonos celulares con conmutación de circuitos y el Servicio de mensajes cortos (SMS).” (SearchMobileComputing, 2007a)



Figura 9. Tecnologías IoT

Fuente: Tomado de (Medium, 2018)

Protocolos de comunicación:

La comunicación entre dos o más entidades de un sistema, se debe realizar a través de protocolos de comunicación. Que consisten en una serie de reglas para definir una sintaxis y sincronización de comunicación para transmitir datos. En el caso de IoT, los protocolos más conocidos se describen a continuación:

MQTT

(*MQ Telemetry Transport*) es un protocolo PubSub de *Message Service* que actúa sobre TCP. Es ligero y sencillo de implementar. Además, es apropiado para dispositivos de baja potencia como los utilizados en IoT. (MQTT, 2012)

AMQP

(*Advanced Message Queuing Protocol*) es un protocolo PubSub de *Message Queue*. Está diseñado para asegurar la confiabilidad e interoperabilidad. Su función está pensada para aplicaciones “grandes”, con mayor rendimiento. No resulta tan adecuado para aplicaciones de IoT con dispositivos de bajos recursos.(AMQP, 2014)

WAMP

(*Web Application Messaging Protocol*) es un protocolo abierto que se ejecuta sobre *WebSockets*, ofrece PubSub y rRPC.(wamp-proto, 2012)

CoAP

(*Constrained Application Protocol*) es un protocolo pensado especialmente para dispositivos de IoT de baja potencia. Emplea el modelo *REST* de HTTP con

cabeceras reducidas, añadiendo soporte UDP, *multicast*, y mecanismos de seguridad adicionales.(CoAP, 2014)

STOMP

(Streaming Text Oriented Messaging Protocol, es un protocolo sencillo que emplea HTTP y mensajes de texto para buscar el máximo de interoperabilidad. Se diseñó para ser un protocolo simple y ligero, además ofrece bindings para un amplio rango de lenguajes. (Stomp, 2012)

XMPP

(Extensible Messaging and Presence Protocol) es un protocolo abierto basado en XML diseñado para aplicaciones de mensajería instantánea. (XMPP, 2013)

Protocol	Transport	Messaging	2G,3G,4G (1000's)	LowPower and Lossy (1000's)	Compute Resources	Security	Success Stories	Arch
CoAP	UDP	Rqst/Rspnse	Excellent	E xcellent	10Ks/RAM Flash	Medium - Optional	Utility feld area ntwnks	Tree
Continua HDP	UDP	Pub/Subsrb Rqst/Rspnse	Fair	Fair	10Ks/RAM Flash	None	Medical	Star
DDS	UDP	Pub/Subsrb Rqst/Rspnse	Fair	Poor	100Ks/RAM Flash +++	High-Optional	Military	Bus
DPWS	TCP		Good	Fair	100Ks/RAM Flash ++	High-Optional	Web Servers	Client Server
HTTP/REST	TCP	Rqst/Rspnse	Excellent	Fair	10Ks/RAM Flash	Low-Optional	Smart Energy Phase 2	Client Server
MQTT	TCP	Pub/Subsrb Rqst/Rspnse	Excellent	Good	10Ks/RAM Flash	Medium - Optional	IoT Msnging	Tree
SNMP	UDP	Rqst/Response	Excellent	Fair	10Ks/RAM Flash	High-Optional	Network Monitoring	Client-Server
UPnP		Pub/Subsrb Rqst/Rspnse	Excellent	Good	10Ks/RAM Flash	None	Consumer	P2P Client Server
XMPP	TCP	Pub/Subsrb Rqst/Rspnse	Excellent	Fair	10Ks/RAM Flash	High-Mandatory	Rmt Mgmt White Gds	Client Server
ZeroMQ	UDP	Pub/Subsrb Rqst/Rspnse	Fair	Fair	10Ks/RAM Flash	High-Optional	CERN	P2P

Figura 10. Protocolos IoT

Fuente: Tomado de (Aprendiendo Arduino, 2018)

Plataformas IoT:

Una vez definidos hardware, *Software*, conectividad y protocolos. Se necesita una plataforma para recoger los datos en tiempo real, almacenarlos o tratarlos.

Algunas de las plataformas IoT son:

- XMPRO
- AMAZON AWS
- THETHINGS.IO
- CLOUDMQTT
- MS AZURE
- AIR VENTAGE
- INTEL IoT
- CUMULOCITY
- AMPLIA IoT

(Aprendiendo Arduino, 2018)



Figura 11. Plataformas IoT

Fuente: Tomado de (Aprendiendo Arduino, 2018)

Hay que destacar que cada solución es distinta, y las herramientas, tecnologías, protocolos, plataformas y conectividad varían según las necesidades. Pero también cabe resaltar que algunas son más populares que otras y son mayormente utilizadas. En el caso de estudio de la contaminación atmosférica se pueden encontrar algunos tipos de sensores y placas de desarrollo que se podrían adaptar al desarrollo del prototipo planteado en esta investigación, como algunos que no se podrían implementar. Así que se debe tener claro el caso de uso que se necesita satisfacer.

6.2 RESULTADO OBTENIDO 2

Actualmente la contaminación atmosférica es uno de los mayores problemas que afecta la población mundial. Según la OMS, Colombia es el segundo país de Latinoamérica con más contaminación del aire, con un promedio de 19.000 muertes anuales en todo el territorio para el año 2018. (LaFM, 2018)

Bucaramanga y su área metropolitana también sufre las consecuencias de la contaminación atmosféricas, y las consecuencias afectan principalmente a sus habitantes.

Causas y consecuencias de la contaminación de aire en Bucaramanga y su área metropolitana.

1. Según un estudio realizado en el año 2018 por el Doctor Kento Taro Magara docente de la Universidad Pontificia Bolivariana - UPB y Área Metropolitana de Bucaramanga, uno de los principales causantes de la contaminación del aire son los vehículos de carga, camiones, volquetas y tractocamiones, junto con las motocicletas y automóviles, siendo responsables del 90% de dicha contaminación. Esto se debe a que el 10% de los camiones y el 20% de las volquetas tienen más de 30 años de antigüedad. Si bien estos vehículos representaban el 4% del parque automotor emiten el 64% del material particulado fino (PM2.5), el 62% del monóxido de carbono (CO), el 58% de los óxidos de nitrógeno (NOX) y el 51% de los compuestos orgánicos volátiles (VOC); por otra parte las motocicletas generan el 18% del PM2.5 y los automóviles solo el 8%, no obstante, estos últimos son responsables del 47% de los óxidos de azufre (SOX). Cabe resaltar que según el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) EL 60% de estos vehículos de carga no cuentan con la revisión técnico mecánica al día. (Vanguardia, 2018b)

Categoría vehicular	ton/año				
	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM2,5
Autos particulares	21.355	834	58	495	17
Autos comerciales	422	139	9	26	7
Buses	1.738	809	3	138	26
Camiones	4.715	1.485	6	276	134
Motos 2T	592	1	0	271	7
Motos 4T	3.560	152	25	739	49
Tractocamiones	98	162	1	20	5
Volquetas	577	313	1	47	41
Total	33.056	3.895	103	2.012	285

Figura 12. Emisión de contaminantes por vehículos

Fuente: Tomado de (AMB, 2016)

2. Según la AMB otra de las causas de la contaminación atmosférica son las variaciones en las condiciones meteorológicas como, por ejemplo, cambios de temperatura, humedad y cambios normales de los regímenes del viento.

Los cambios climáticos se han convertido en una amenaza potencial para el ambiente mundial, algunos de estos agentes responsables de este cambio son por una parte los aumentos de las concentraciones de gases de efecto invernadero - GEI y de aerosoles (partículas o gotas microscópicas suspendidas en el aire) y por otras variaciones en la actividad solar, además de los gases derivados de la actividad humana.

No obstante, en la ciudad de Bucaramanga como en la gran mayoría de ciudades del territorio colombiano se ha generado cambios climáticos en los últimos años, los cuales tienen graves consecuencias en la calidad del aire y por ende en la salud de sus habitantes. (Vanguardia, 2019b)

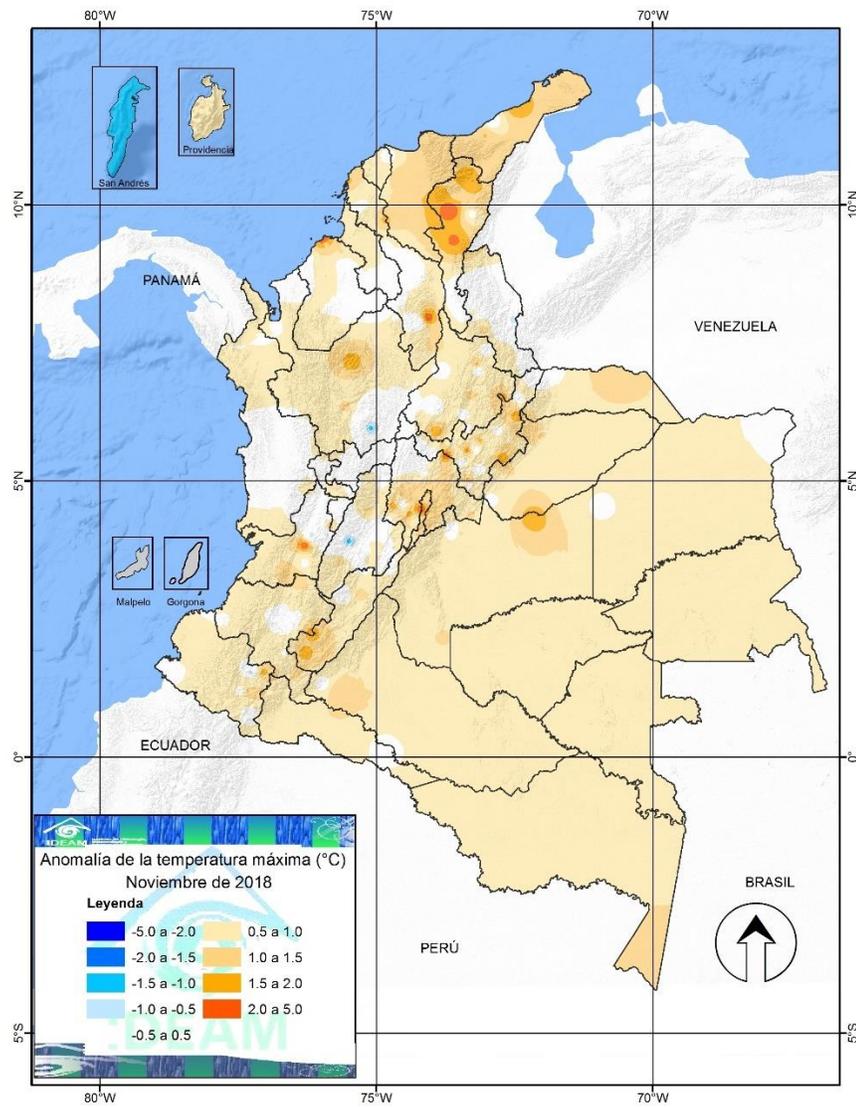


Figura 13. Anomalías de temperatura

Fuente: Tomado de (Ideam, 2019)

La gráfica anterior evidencia que en el departamento de Santander durante el mes de noviembre del año 2018 se presentaron anomalías en la temperatura máxima, en donde la gran parte del territorio departamental aumentó de 1.0°C a 1.5°C.

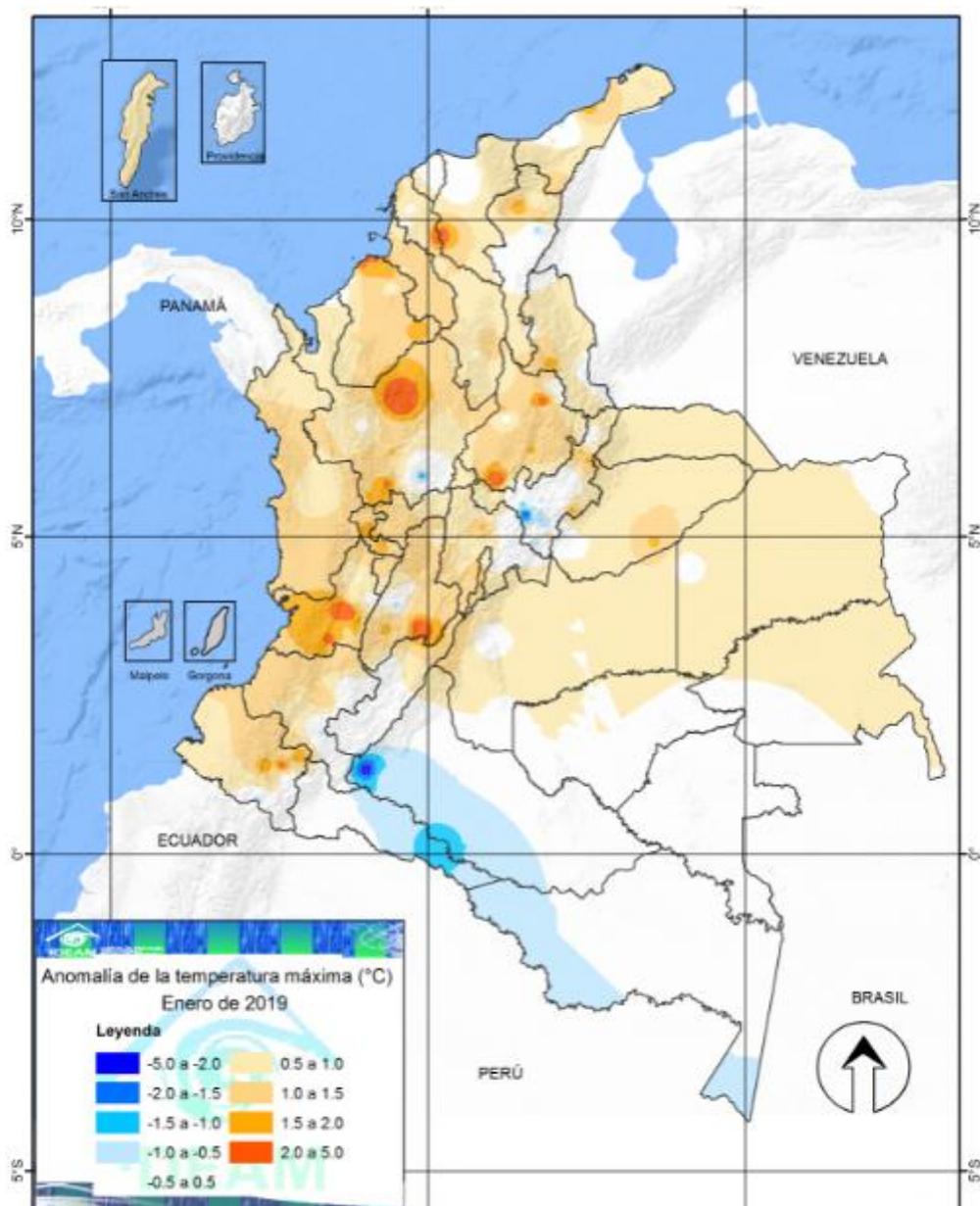


Figura 14. Anomalías de temperatura

Fuente: Tomado de (Ideam, 2019)

La Figura anterior evidencia que en el departamento de Santander durante el año 2019 se presentaron anomalías en la temperatura máxima, en donde la gran parte del territorio departamental aumentó de 1.0°C a 1.5°C, por otra parte, en ciertos sectores presentó aumentos de 1.5°C a 2.0°C y de 2.0°C a 5.0°C.

3. Hace más de seis años, los bumangueses presentan quejas por los olores que se respiran en el área metropolitana, esta es una de las principales causas de la contaminación del aire que presenta esta ciudad.

Según información de ciudadanos, áreas como la zona industrial de chimitá, planta de compostaje en Floridablanca y Girón, la Ptar, el carrasco y sectores del Norte de la ciudad en donde se sitúan los mataderos clandestinos son los principales causantes de los malos olores.

Según las declaraciones de Ostín Sandoval, líder comunal de la ciudadela Nuevo Girón, Sector VI, la Ptar funciona a medias ya que los motores no funcionan de la manera adecuada, por ende, salen malos olores que afectan al medio ambiente y a sus habitantes. (Vanguardia, 2019a)

Por otra parte, Ruth Islena Ardila Jaimes, subgerente de tratamiento integral de aguas y residuos de la Ptar Rio Frio asegura que los olores que se presentan en este sector no son característicos del tratamiento de aguas residuales sino de los procesos de compostaje en algún predio cercano. (Vanguardia, 2019a)

Otros de los causantes de los malos olores en el área metropolitana de Bucaramanga es el relleno sanitario llamado “El Carrasco”. En el 2018 se ocasionó un deslizamiento de una de sus celdas, lo cual afecto el medio ambiente en gran medida ya que se generó el rompimiento del sistema de drenaje de gases y lixiviados, lo cual provocó una liberación de gas sulfhídrico; este gas es un componente que produce un olor fétido característico de las basuras. El medico epidemiólogo, Enrique Mazzenet explicó que este componente en las basuras en grandes cantidades puede ser tóxico para las personas, lo cual puede generar complicaciones en la salud de forma indirecta. Unas de las enfermedades que puede producir este componente es el estrés, pérdida del apetito, dificultad para conciliar el sueño, entre otros. (Vanguardia, 2018a)

4. Los incendios forestales son otros de los causantes de la contaminación del aire, ya que el humo de las quemas o incendios están compuestos por una mezcla de gases tales como el bióxido de azufre, monóxido de carbono, anhídrido carbónico, metano, alquitrán, carbón, vapor de agua y cenizas, los cuales son gases que disminuyen la calidad del aire y la atmosfera (baja troposfera).

Según la Dirección de Gestión del Riesgo de Santander el 88% del territorio santandereano se encuentra en alerta por riesgos de incendios, siendo Piedecuesta el municipio más afectado con 50 hectáreas consumidas a partir de diciembre de 2018. En esta fecha de celebraciones el principal causante de estos incendios ha sido el mal uso de la pólvora, aunque no se queda atrás las quemas de basuras, fogatas, el efecto lupa que generan los vidrios y los pirómanos; entre otros factores según el IDEAM estos incendios se deben a las altas temperaturas que se presentan en el departamento de Santander. (Vanguardia, 2019)

Lo anteriormente mencionado, ha provocado la toma de acciones con el fin de contrarrestar la contaminación atmosférica en Bucaramanga y su área metropolitana.

“El día sin carro”, fue desarrollado por el observatorio metropolitano a partir de información suministrada por la Subdirección Ambiental del Área Metropolitana de Bucaramanga, con el fin de observar si por medio de esta medida el PM10 generaba algún cambio, y los datos obtenidos fueron los siguientes:

REDUCCIÓN PM10 DÍA NORMAL / DÍA SIN CARRO		
NOMBRE DE LA ESTACION	MUNICIPIO	REDUCCION PM10 DIA NORMAL / DIA SIN CARRO ***
Club del Comercio	Bucaramanga	0,37
Puerta del Sol	Bucaramanga	0,33
Florida	Florida	0,37
Giron	Giron	0,25
Piedecuesta	Piedecuesta	0,40

Figura 15. Reducción PM10 día sin carro

Fuente: tomado de (Observatorio Metropolitano, 2018)

Por otra parte, la AMB lucha contra la contaminación del aire a través del “Plan Forestal Metropolitano” La dirección de tránsito de Bucaramanga busca intensificar los operativos de la revisión técnico-mecánica con el fin de mitigar la contaminación del aire producida por los gases vehiculares. Y sobre todo, generar conciencia en sus habitantes para evitar que el daño ambiental siga creciendo. (Vanguardia, 2019)

6.3 RESULTADO OBTENIDO 3

La selección de los dispositivos, tecnologías y protocolos a usar se debe realizar teniendo en cuenta las limitaciones de infraestructura, y en el caso de la presente investigación, un factor determinante es el dinero; el prototipo debe ser de bajo costo y funcionar en tiempo real. Teniendo en cuenta lo presentado en el resultado obtenido 1, la primer acción es determinar el *MCU* y por consiguiente la placa de desarrollo. Para esta selección se debe tener presente:

Compatibilidad: ¿Es el *MCU* compatible con los sensores que se van a utilizar?

Arquitectura: ¿Es la arquitectura lo suficientemente sofisticada como para manejar la complejidad del programa?

Memoria: ¿El *MCU* viene con suficiente memoria (*RAM* y *Flash*) para el programa?

Disponibilidad: ¿El *MCU* es fácil de obtener y en la cantidad necesaria?

Poder: ¿Cuánta potencia necesitará el *MCU*? ¿Tendrá que estar conectado o puede usar baterías?

Costo: ¿Cuánto cuesta cada unidad?

Kit de desarrollo: ¿hay un *kit* de desarrollo disponible?

Soporte de desarrollo: ¿Hay buena documentación disponible para el *MCU*? ¿Cómo es la comunidad que rodea este tablero?

(DZone, 2018)

Estos factores son cruciales para la elección del *MCU* y placa de desarrollo. Teniendo en cuenta lo anterior Arduino es una de las placas de desarrollo que mejor se adaptan a las necesidades, el *MCU* dependerá del modelo de la placa de desarrollo.

La principal diferencia entre Arduino Y Raspberry Pi, está determinada porque el primero es un microcontrolador y Raspberry un miniordenador. Es decir, Arduino es ideal para todo tipo de proyectos no tan complejos. Siendo más rápido y fácil de usar con sensores.

	Arduino Uno	Raspberry Pi Model B
Price	\$30	\$35
Size	7.6 x 1.9 x 6.4 cm	8.6cm x 5.4cm x 1.7cm
Memory	0.002MB	512MB
Clock Speed	16 MHz	700 MHz
On Board Network	None	10/100 wired Ethernet RJ45
Multitasking	No	Yes
Input voltage	7 to 12 V	5 V
Flash	32KB	SD Card (2 to 16G)
USB	One, input only	Two, peripherals OK
Operating System	None	Linux distributions
Integrated Development Environment	Arduino	Scratch, IDLE, anything with Linux support

Existe un problema con arduino, los módulos para enviar datos (*WiFi*, *Bluetooth*; *GPRS*, etc.) no vienen integrados a la placa. A excepción de algunos modelos que son más costosos. (Diosdado, 2016)

Modelo	Microcontrolador	Voltaje de entrada	Voltaje del sistema	Frecuencia de Reloj	Digital I/O	Entradas Analógicas	PWM	UART	Memoria Flash	Interfaz de Programación
Arduino Due	AT91SAM3X8E	5-12V	3.3V	84MHz	54	12	12	4	512Kb	Nativa USB
Arduino Leonardo	ATmega32U4	7-12V	5V	16MHz	20	12	7	1	32Kb	Nativa USB
Arduino Uno - R3	ATmega328	7-12V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	USB via ATmega16U2
Arduino Pro 3.3V/8MHz	ATmega328	3.35 -12V	3.3V	8MHz	14	6	6	1	32Kb	Cabecera compatible con FTDI
Arduino Pro 5V/16MHz	ATmega328	5 - 12V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	Cabecera compatible con FTDI
Ethernet	ATmega328	7-12V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	Cabecera compatible con FTDI
Arduino Mega 2560 R3	ATmega2560	7-12V	5V	16MHz	54	16	14	4	256Kb	USB via ATmega16U2
Arduino Mini 05	ATmega328	7-9V	5V	16MHz	14	6	8	1	32Kb	Cabecera Serial
Arduino Pro Mini 3.3V/8MHz	ATmega328	3.35 -12V	3.3V	8MHz	14	6	6	1	32Kb	Cabecera compatible con FTDI
Arduino Pro Mini 5V/16MHz	ATmega328	5 - 12V	5V	16MHz	14	6	6	1	32Kb	Cabecera compatible con FTDI
Arduino Fio	ATmega328P	3.35 -12V	3.3V	8MHz	14	8	6	1	32Kb	Cabecera compatible con FTDI o Inalámbrica via XBee ¹

Figura 16. Modelos de Arduino

Fuente: Tomado de (Diosdado, 2016)

El módulo Esp8266, un módulo *WiFi* que funciona con arduino, sirvió como base para desarrollar una placa de desarrollo de código abierto llamada NodeMCU, una placa fácil de programar y que funciona con el entorno de arduino, además está pensada para proyectos *IoT*, es de bajo costo y cuenta con buena documentación. Estas especificaciones la convierten en una placa apropiada para una solución *IoT*. (Programarfacil, 2017)

NodeMCU:

Es una placa de desarrollo totalmente abierta a nivel de *software* y *hardware*. En esta placa todo esta facilitado para la programación de un *MCU*. NodeMCU no es un microcontrolador, es un kit de desarrollo que tiene un chip integrado y dentro un *MCU*. El chip es el Esp8266 y dentro se encuentra Tensilica L106, este es el *MCU*. La principal ventaja es que el módulo *WiFi* ya viene integrado. (Programarfacil, 2017)

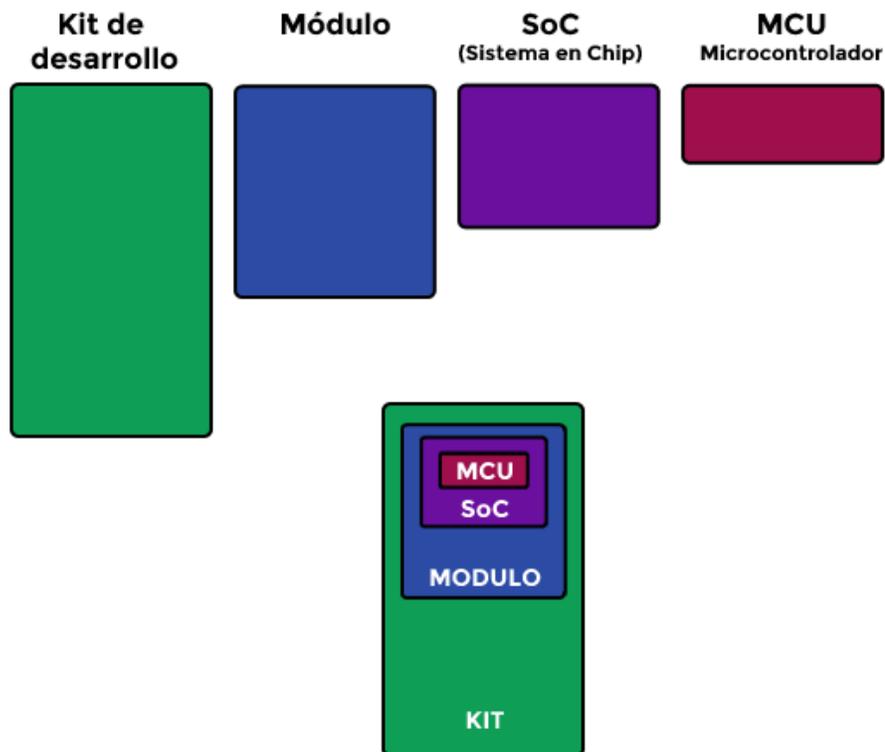


Figura 17. Esquema NodeMCU

Fuente: Tomado de (Programarfacil, 2017)

La versión más reciente de esta placa, es la V3 y cuenta con las siguientes características:

- Conversor Serie-USB para poder programar y alimentar a través del USB
- Fácil acceso a los pines
- Pines de alimentación para sensores y componentes
- *LEDs* para indicar estado
- Botón de *reset*

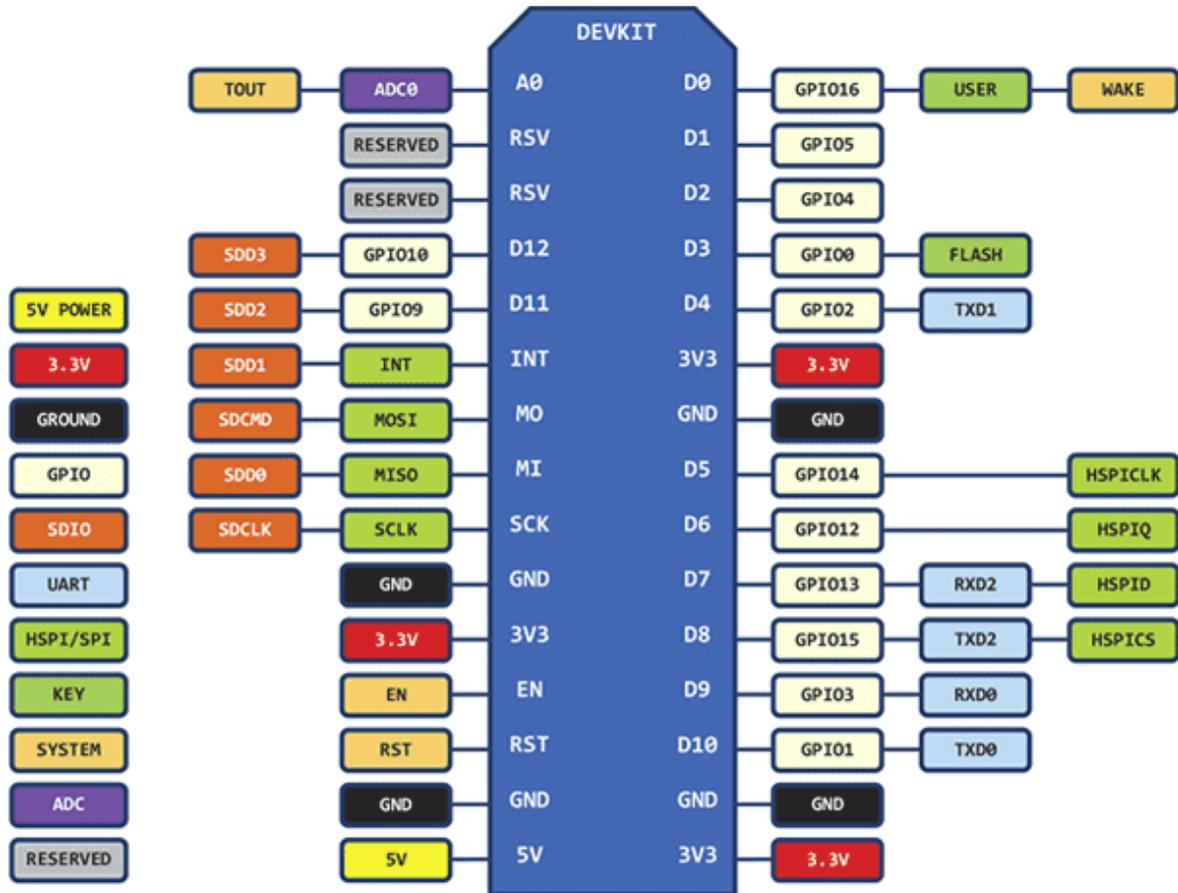


Figura 18. Pines NodeMCU

Fuente: tomado de (Programarfacil, 2017)

Los pines principales son:

- 13 pines digitales numerados del D0 al D12
- 1 pin analógico numerado A0
- 3 pines de 3,3V

- 1 pin de 5V (versión V3 2 pines 5V)
- 4 pines de tierra GND (versión V3 5 pines GND)

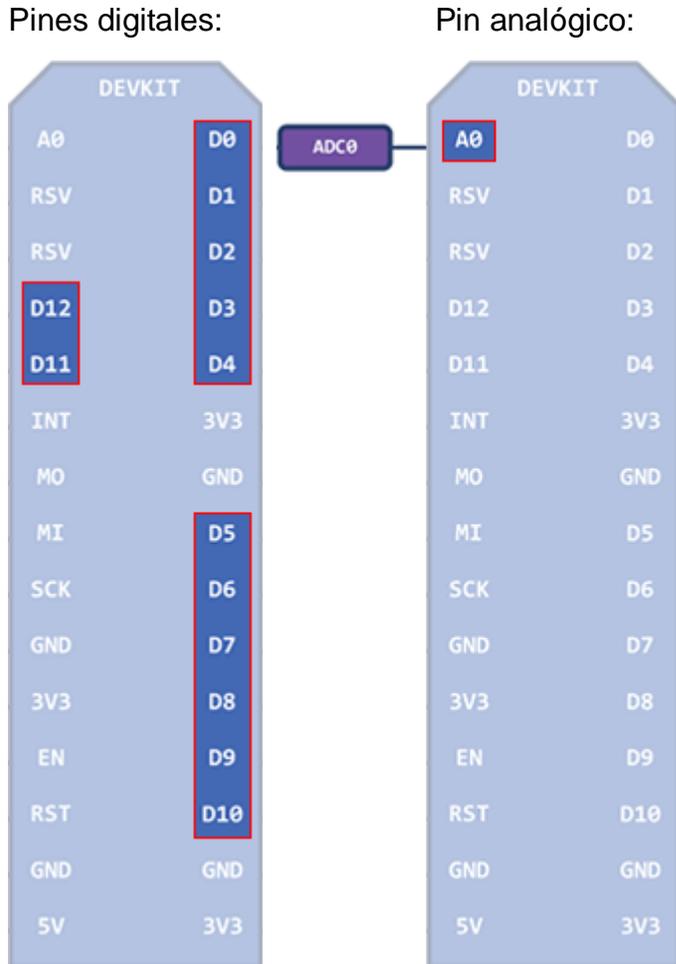


Figura 19. Pines Digitales y Analógicos NodeMCU

Fuente: Tomado de (Programarfacil, 2017)

El voltaje de operación de NodeMCU es de 3,3V, en principio no se podría alimentar ningún componente que necesitara 5V. Sin embargo, cuando se alimenta a través del puerto USB con 5V, internamente el voltaje es regulado. Esto se debe tener en cuenta si hay sensores que se alimentan con 5V.

Las especificaciones mencionadas hacen del NodeMCU la placa adecuada para la solución tecnológica planteada. (Programarfacil, 2017)

Sensor:

MQ

Los sensores de gas de la familia MQ, son sensores utilizados para la detección de determinados gases. Para el caso de estudio planteado, todos los sensores de la serie MQ funcionarían, ya que detectan gases presentes en el ambiente. El MQ135 se utiliza en sistemas de control de calidad del aire. Son adecuados para la detección de NH₃, NO_x, alcohol, benceno, humo, CO₂, etc. (Naylamp Mechatronics, 2016)

Debido a estas especificaciones, el MQ135 es el mejor con el que se puede trabajar en este caso.



Figura 20. MQ135

Fuente: Tomado de (Naylamp Mechatronics, 2016)

Este sensor es electroquímico, internamente posee un calentador encargado de aumentar la temperatura y así determinar el gas al que está expuesto. Tiene 4 pines, voltaje, tierra, salida digital y salida analógica. (Naylamp Mechatronics, 2016)

Conectividad:

La placa de desarrollo NodeMcu, tiene integrado el chip Esp8266. Por este motivo utilizaremos *WiFi* para la conexión a internet.

WiFi

Tecnología de telecomunicaciones que permite la interconexión de dispositivos físicos y electrónicos. Permitiendo el intercambio de datos entre dispositivos, o simplemente la conexión a un punto de red para el acceso a internet.

Esta tecnología surgió debido a la necesidad de estandarización y compatibilidad entre los modelos inalámbricos de los distintos dispositivos. WiFi emplea las ondas de radio como vehículo para transmisión de datos. Está diseñada para distancias cortas, más o menos 100 metros de distancia; dependiendo del nivel de ruido en el entorno. Al ser una tecnología inalámbrica no se requiere cableado u otros dispositivos; basta con que cada ordenador o dispositivo cuenta con una antena receptora y conozca la contraseña de la red de ser necesario. (Concepto, 2018)

Tipos de *WiFi*

Se ordenan con base a los estándares que emplean, y se clasifican en dos categorías:

Banda de 2.4 GHz: Estándares IEEE 802.11b, IEEE 802.11g e IEEE 802.11n, de manejo internacional con velocidades de 11 Mbit/s, 54 Mbit/s y 300 Mbit/s respectivamente. En esta banda hay mucha interferencia ya que es la misma usada por *Bluetooth* y otros sistemas inalámbricos.

Banda de 5GHz: Estándar IEEE 802.11ac, maneja un canal nuevo por lo que no hay interferencia. Pero cuenta con un 10% menos de alcance.

(Concepto, 2018)

Funcionamiento:

Los datos de una conexión *Ethernet* son descifrados por un *Modem* que envía los datos decodificados a un enrutador inalámbrico o *Router* y este se encarga de transmitir las ondas de radio alrededor de su entorno. Una vez que las señales de radio son transmitidas, los dispositivos interpretan estas señales y las convierten en información. (Concepto, 2018)

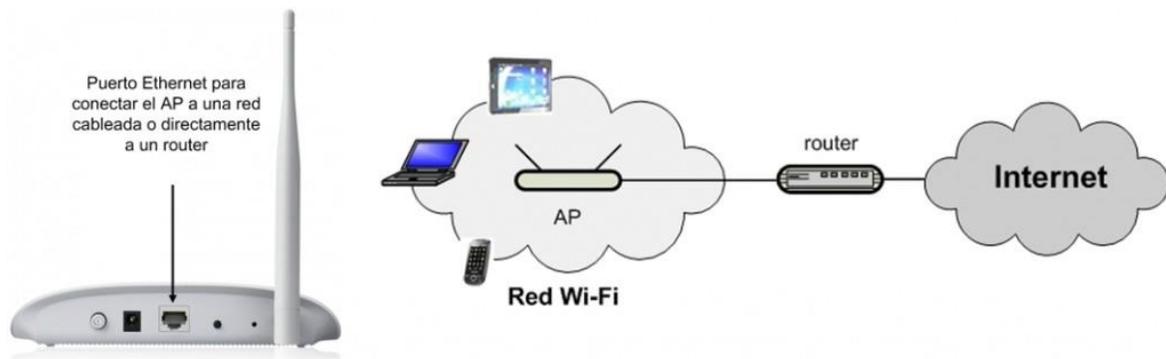


Figura 21. Red WiFi

Fuente: Tomado de (Redes Telematicas, 2014)

Protocolo de comunicación:

El protocolo MQTT se ha convertido en una de las bases de *IoT* debido a su sencillez y velocidad. Ambos importantes debido a que los dispositivos *IoT* carecen de potencia y ancho de banda. Al ser el protocolo más usado y con bastante documentación. Este será el encargado de la comunicación del prototipo. (Llamas, 2019a)

MQTT:

Es un protocolo *Machine to Machine* (M2M) basado en TCP/IP para la comunicación. Funciona como un servicio de mensajería *Push* con patrón Publicador/Suscriptor (Pub-Sub). En esta infraestructura los clientes se conectan a un servidor central (*Broker*).

Pub-Sub

Patrón de mensajería, donde un agente (*Subscriber*) informa al *Broker* que quiere recibir un mensaje. Otro agente (*Publisher*) puede publicar mensajes. El *Broker* envía el mensaje a todos los *Subscriber*.

Para filtrar los mensajes que son enviados a cada cliente, los mensajes están ordenados en *Topics*. Es decir, un cliente puede publicar un mensaje y todos los que estén suscritos a ese *Topic* lo recibirán. (Llamas, 2019a)

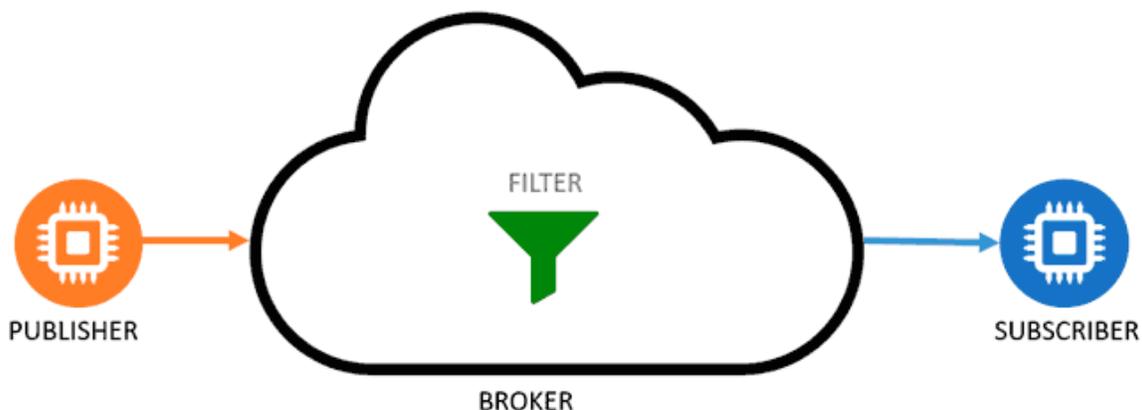


Figura 22. MQTT Pub-Sub

Fuente: Tomado de (Llamas, 2019a)

Un cliente que se quiera conectar con el *Broker*, debe enviar un mensaje *Connect* que contiene información del usuario (Nombre, Contraseña, etc.), el *Broker* responde con un mensaje *Connack* que contiene el resultado de la petición. (Llamas, 2019a)

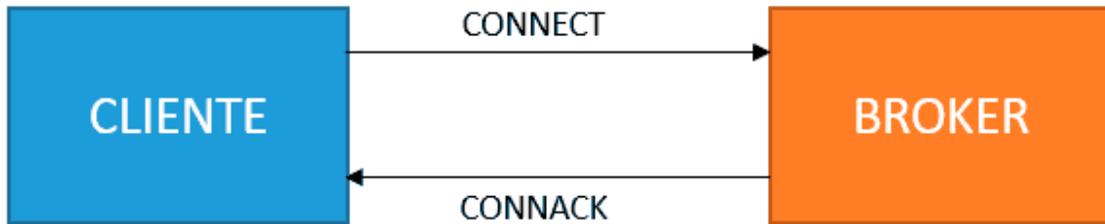


Figura 23. Conexión MQTT

Fuente: Tomado de (Llamas, 2019a)

Para enviar mensajes, el cliente emplea mensajes *Publish*.



Figura 24. Publish MQTT

Fuente: Tomado de (Llamas, 2019a)

Para suscribirse se emplean mensajes *Subscribe*. Que el *Broker* responde con *Suback* o *Unsuback*.

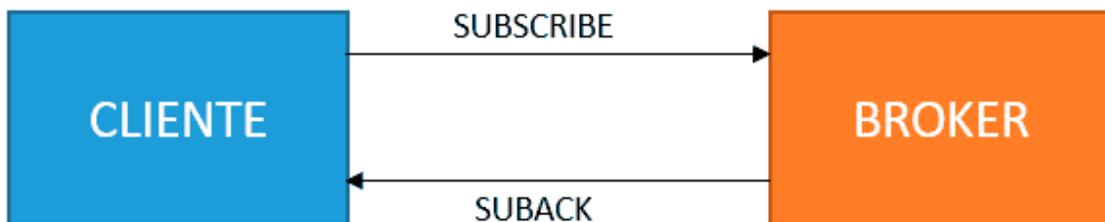


Figura 25. Subscribe MQTT

Fuente: Tomado de (Llamas, 2019a)

Estructura de mensaje:

Cada mensaje, consta de 3 partes:

Cabecera fija: Ocupa 2 a 5 bytes, obligatorio. Consta de un código de control, que identifica el tipo de mensaje enviado, y de la longitud del mensaje.

Cabecera variable: Opcional, contiene información adicional.

Contenido (payload): Es el contenido real del mensaje. Puede tener un máximo de 256 Mb aunque en implementaciones reales el máximo es de 2 a 4 kB.

(Llamas, 2019a)

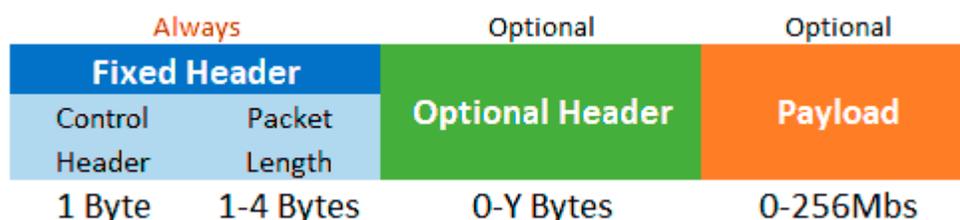


Figura 26. Estructura de mensaje MQTT

Fuente: tomado de: (Llamas, 2019a)

Seguridad en MQTT:

MQTT dispone de autenticación por usuario y contraseña o por certificado y transporte *SSL/TLS*. Anqué los dispositivos IoT son escasos en capacidad por lo que *SSL/TLS* representaría una carga importante. En la mayoría de los casos, la autenticación consiste en un usuario y contraseña enviados como texto plano. (Llamas, 2019a)

Ventajas:

- Sencillez y ligereza
- Menor consumo de energía
- Ancho de banda mínimo
- calidad de servicio

(Llamas, 2019a)

Plataforma

Una de las plataformas que permiten el envío de datos utilizando el protocolo MQTT es la plataforma *CloudMQTT*. Además presenta la ventaja de tener una versión gratuita que se ajusta a los requerimientos del caso de estudio. Por este motivo se presenta como la principal candidata para el desarrollo. (CloudMQTT, 2019)

CloudMQTT:

Agente de mensajes alojado para IoT, utiliza MQTT como protocolo, M2M, utiliza tecnología *Websocket*, manejo de datos en tiempo real. (CloudMQTT, 2019)

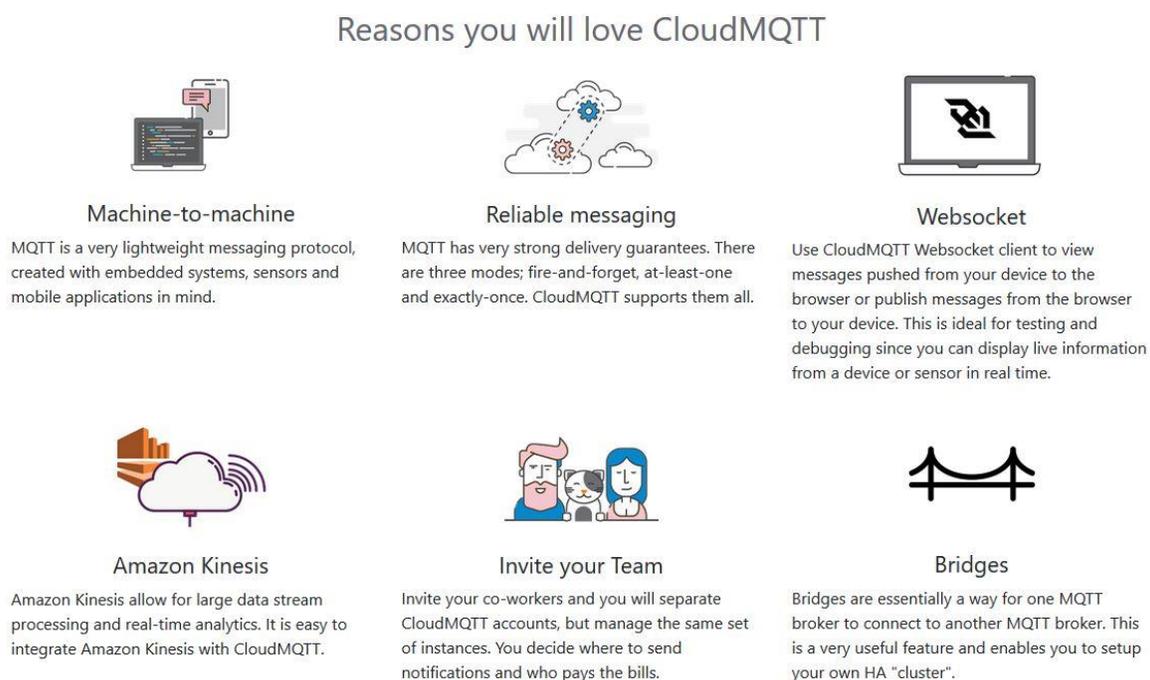


Figura 27. CloudMQTT

Fuente: tomado de (CloudMQTT, 2019)

Los dispositivos, tecnología, protocolo y plataforma presentados anteriormente se pueden adaptar fácilmente en un prototipo para monitorear la calidad del aire en Bucaramanga. Los dispositivos son de bajo costo y el software gratuito. Básicamente el mayor requerimiento es una red *WiFi*, porque los desafíos que se presentan van ligados a los de IoT y sus limitantes. Ver MARCO TEORICO.

6.4 RESULTADO OBTENIDO 4

El prototipo que se desarrolló, está basado en los dispositivos, tecnología, protocolo y plataforma presentados en el resultado número 3.

Los materiales usados son:

- NodeMCU
- Sensor de gas MQ135
- Cables Jumper (Hembra – Hembra)

Conexión NodeMCU – MQ135

El sensor MQ135 tiene 4 pines, de los cuales se utilizan tres para conectar al NodeMCU.

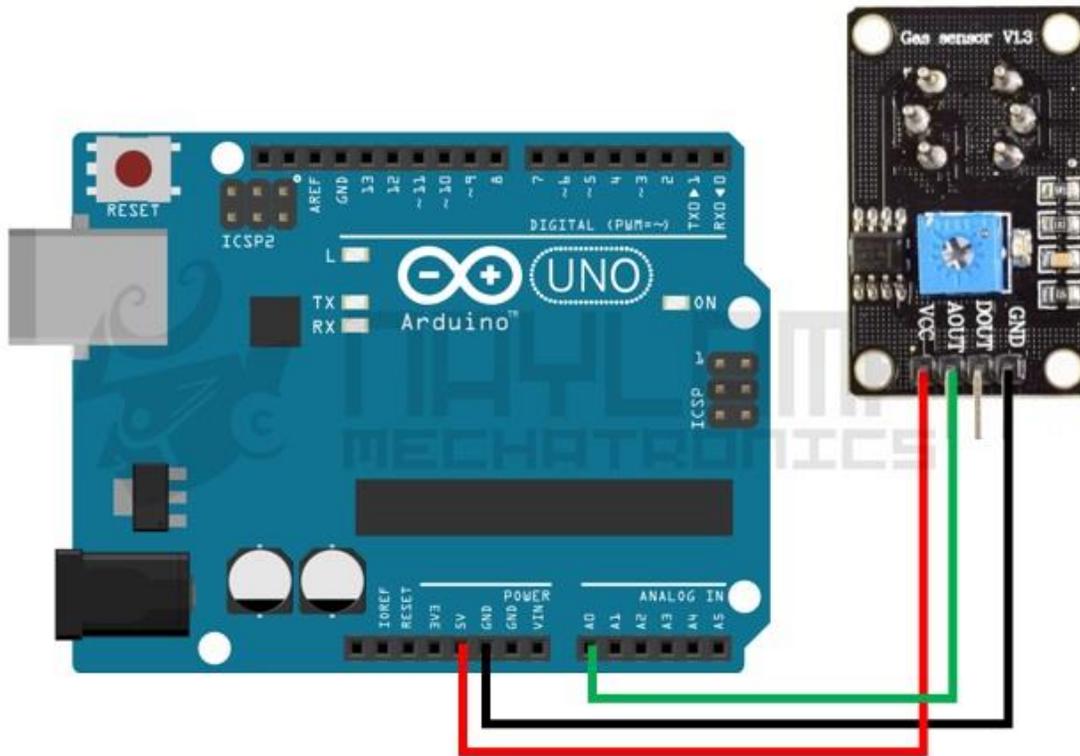


Figura 28. Conexión arduino - MQ135

Fuente: Tomado de (Naylamp Mechatronics, 2016)

En la gráfica anterior se muestra la conexión del MQ135 a un arduino uno, la conexión al NodeMCU se hace de la misma manera.

Pin de voltaje VV NodeMCU – Pin VCC MQ135

Pin a tierra GND NodeMCU – Pin GND MQ135

Pin analógico 0 A0 NodeMCU – Pin AOUT MQ135

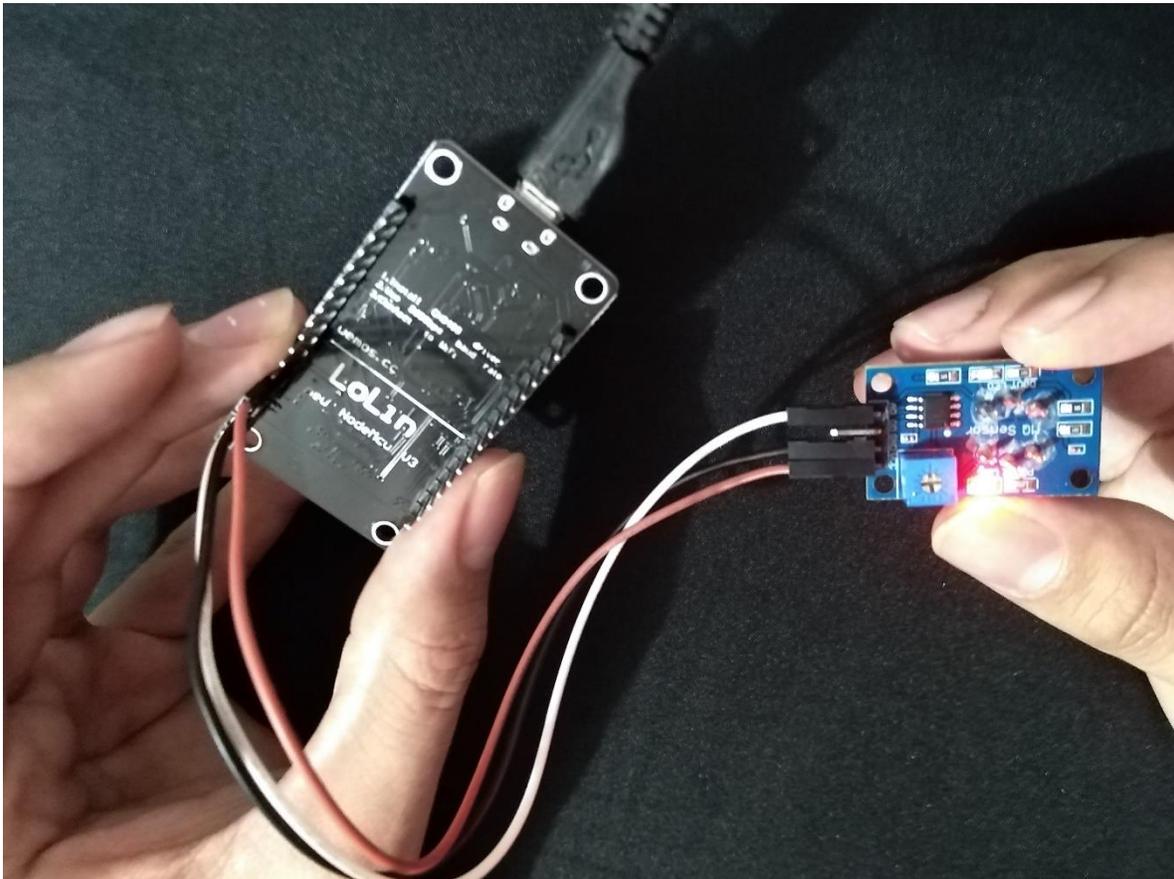


Figura 29. Conexión NodeMCU - MQ135

Fuente: Elaboración propia

Toma de datos del MQ135

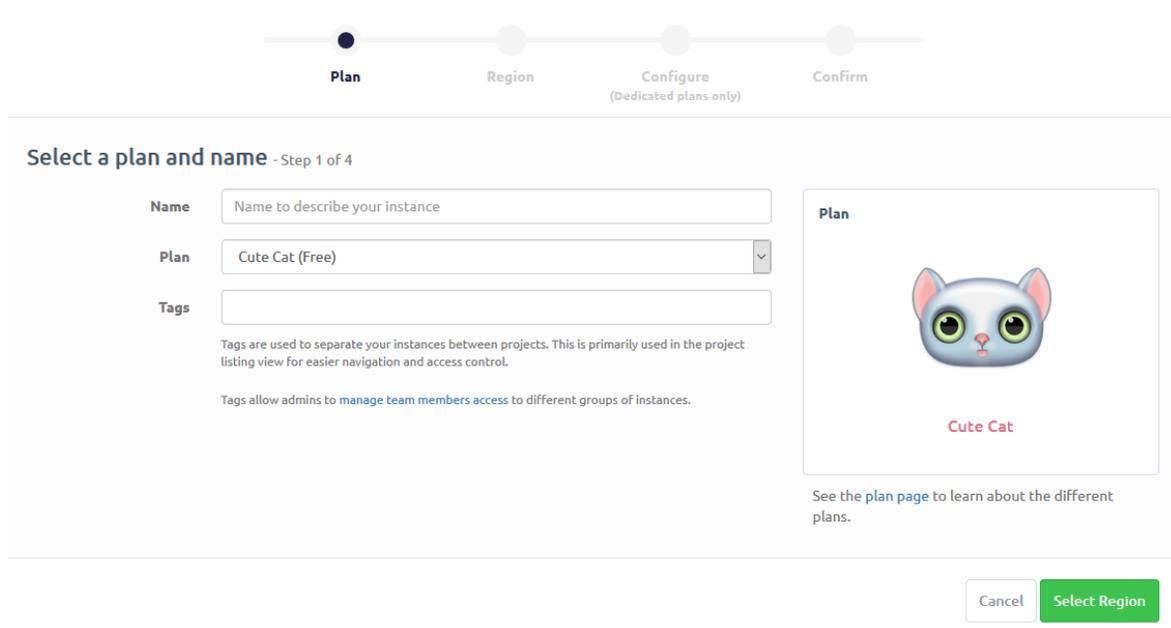
Una vez la conexión de los dispositivos está hecha, el siguiente paso es leer la salida analógica, para esto se crea un *Sketch* en el IDE de Arduino. Lo único que se debe hacer es asignar el pin A0 a una variable e imprimirla.

```
void setup() {  
  Serial.begin(115200);  
}  
  
void loop() {  
  int gas = analogRead(A0);  
  Serial.println(gas);  
  delay(5000);  
}
```

(Naylamp Mechatronics, 2016)

Crear cuenta en la plataforma *CloudMQTT*

Para la creación de la cuenta, solo es necesario ingresar con el correo electrónico. Una vez hecho esto, el siguiente paso es crear una instancia.



The screenshot shows the 'Plan' step of a four-step process. The progress bar indicates the current step is 'Plan', followed by 'Region', 'Configure (Dedicated plans only)', and 'Confirm'. The main form is titled 'Select a plan and name - Step 1 of 4'. It contains three input fields: 'Name' with the placeholder 'Name to describe your instance', 'Plan' with a dropdown menu showing 'Cute Cat (Free)', and 'Tags' with a text input field. Below the 'Tags' field, there is explanatory text: 'Tags are used to separate your instances between projects. This is primarily used in the project listing view for easier navigation and access control. Tags allow admins to manage team members access to different groups of instances.' To the right of the form, there is a preview box for the 'Cute Cat' plan, featuring a blue cat icon and the text 'Cute Cat'. Below the preview, there is a link: 'See the plan page to learn about the different plans.' At the bottom right of the form, there are two buttons: 'Cancel' and 'Select Region'.

Figura 30. Creación Instancia CloudMQTT

Fuente: Tomado de (CloudMQTT, 2019)

Al momento de crear la instancia, se debe elegir el plan gratuito (*Cute Cat free*), y seleccionar el servidor. Una vez creada la instancia se asigna información de la misma, como servidor, usuario, puerto, etc.

Instance info

The screenshot shows the instance configuration and the active plan. On the left, the instance details are listed:

- Server:** m24.cloudmqtt.com
- User:** elftxcyq (with a Restart button)
- Password:** pvrhac... (with a refresh icon)
- Port:** 14088
- SSL Port:** 24088
- Websockets Port (TLS only):** 34088
- Connection limit:** 5

On the right, the **Active Plan** is shown as **Cute Cat**, featuring a cat emoji and an **Upgrade Instance** button.

Figura 31. Instancia CloudMQTT

Fuente: Tomado de (CloudMQTT, 2019)

El siguiente paso es crear un usuario con las reglas de lectura y escritura seleccionadas y con el nombre de *Topic*. En este caso, se llama “placa1” y el *Topic* “aire”

ACLs

Note:

- There are two types of ACL rules, topic and pattern. Topic ACLs is applied to a given user. Pattern ACLs is applied to all users.
- Use # for multi level wildcard acl.
- Use + for single level wildcard acl.
- Creating and deleting users and ACLs are asynchronous tasks and may take up to a minute. Poll list APIs to see when ready.

For API docs look at [HTTP API](#)

Type	Pattern	Read/Write	
topic	placa1 - aire	true/true	Delete

Pattern Topic Read Access? Write Access?

Figura 32. Usuario CloudMQTT

Fuente: tomado de (CloudMQTT, 2019)

Para publicar información se debe publicar al *Topic* “aire” y suscribirse al mismo. Para recibir la información, se debe suscribir al mismo *Topic*.

Una vez hecho esto, el sketch creado se debe modificar para que los datos de la salida del MQ135 se publiquen en la plataforma. Para ello se debe conectar a una red *WiFi* asignando el nombre y contraseña. Además de suministrar los datos de la instancia creada en *CloudMQTT*.

Hecho esto, cada 5 segundos *CloudMQTT* recibirá datos del sensor.

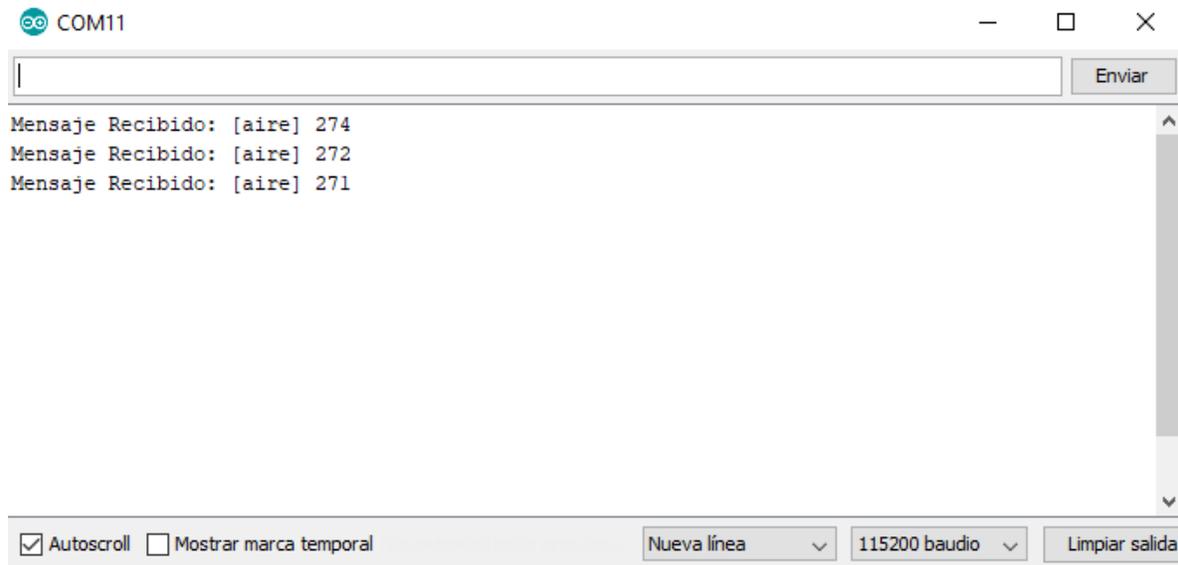


Figura 33. Salida MQ135

Fuente: Elaboración propia

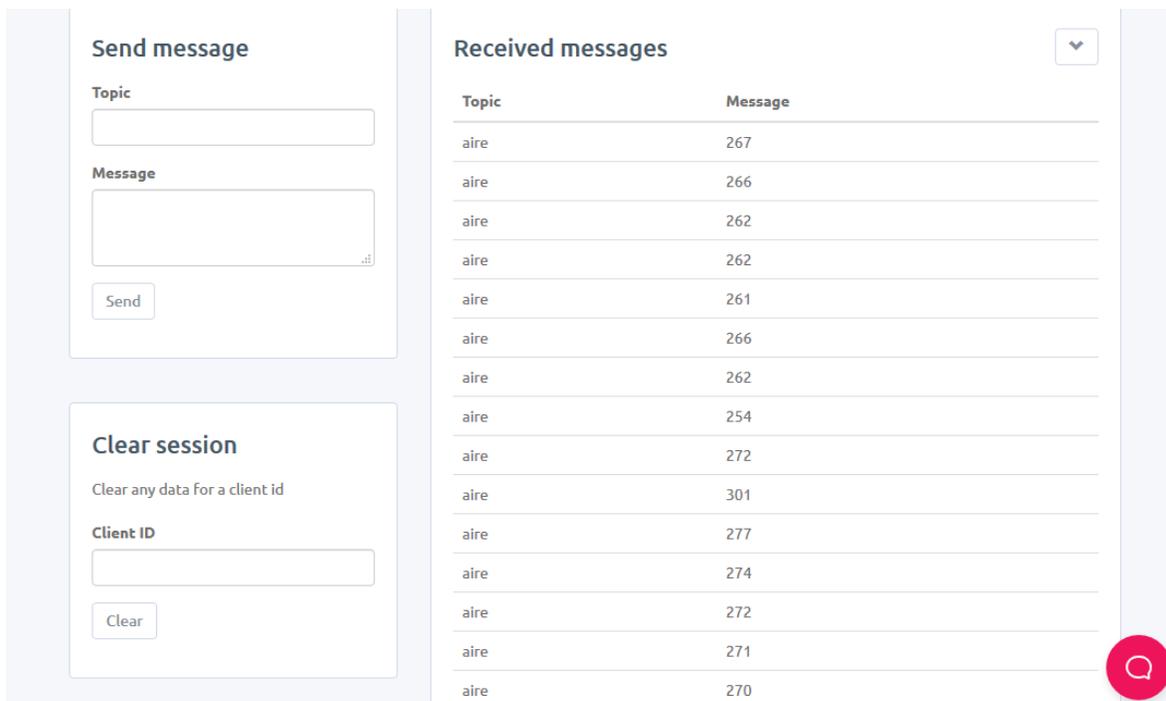


Figura 34. Salida MQ135 en CloudMQTT

Fuente: Tomado de (CloudMQTT, 2019)

Los datos se observan en tiempo real, para mejorar la visualización se creó una aplicación en Android Studio. Esta aplicación se diseñó como una herramienta para observar en tiempo real los datos de contaminación del aire y reportar alguna alteración del medio ambiente.

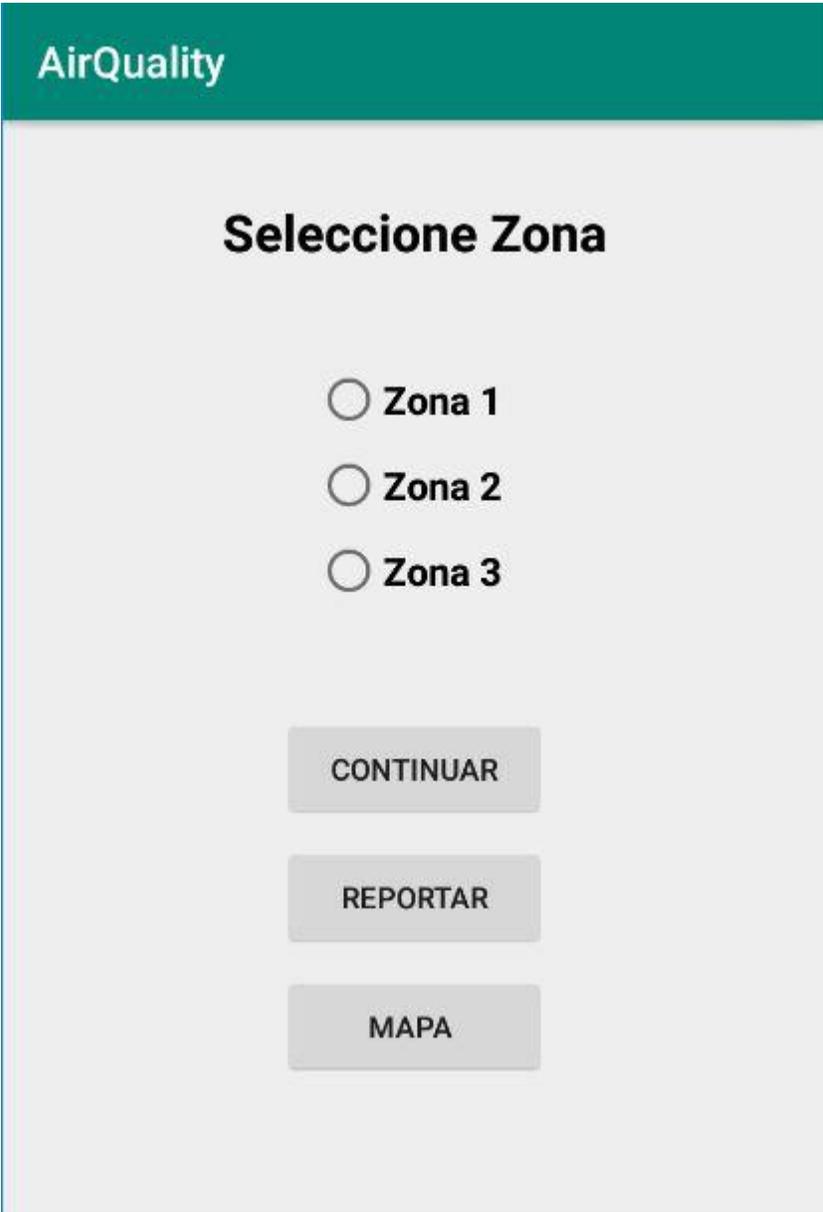


Figura 35. Interfaz inicial App

Fuente: Elaboración propia

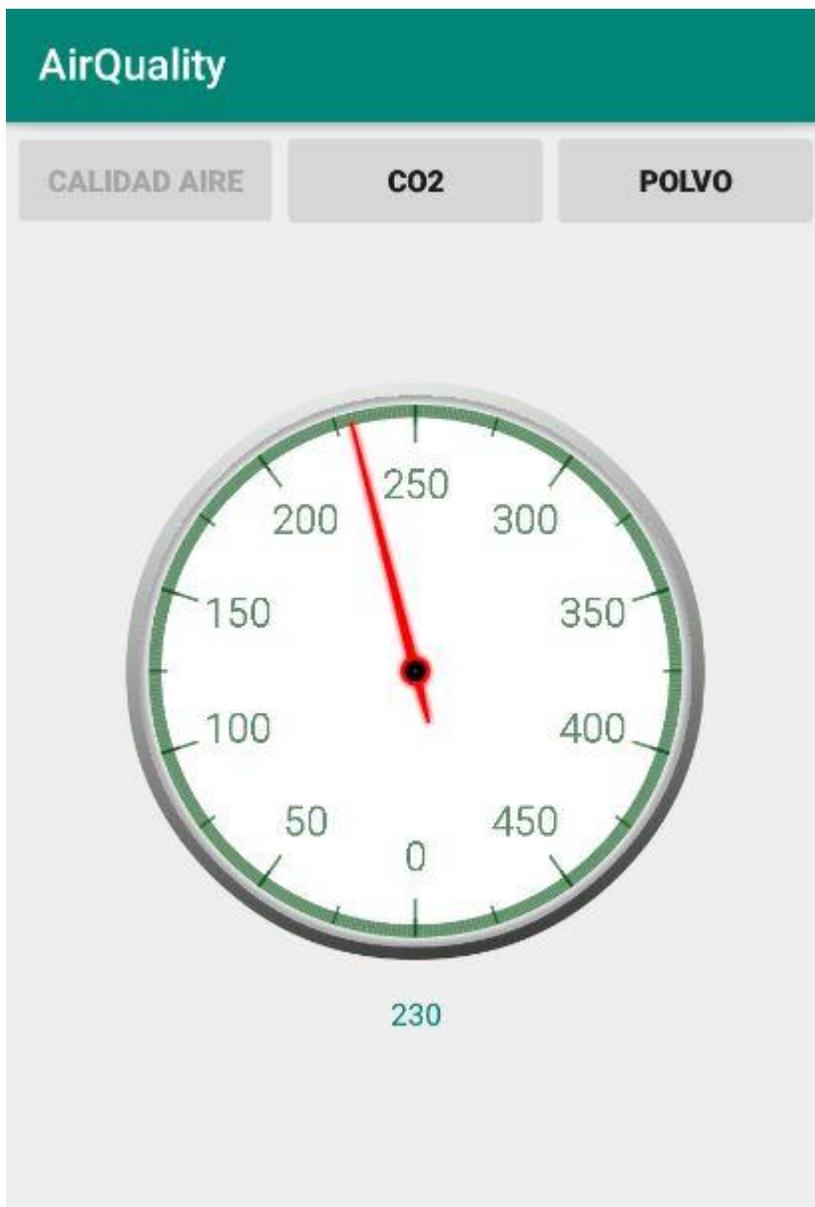


Figura 36. Interfaz Gráfica de datos de MQ135

Fuente: Elaboración propia



Figura 37: Interfaz Reportar

Fuente: Elaboración propia

Además, se incorporó una base de datos creada en *Firebase* para almacenar los datos. Esto con el fin de mantener un registro ya que *CloudMQTT* no los almacena. La base de datos integrada funciona en tiempo real también.

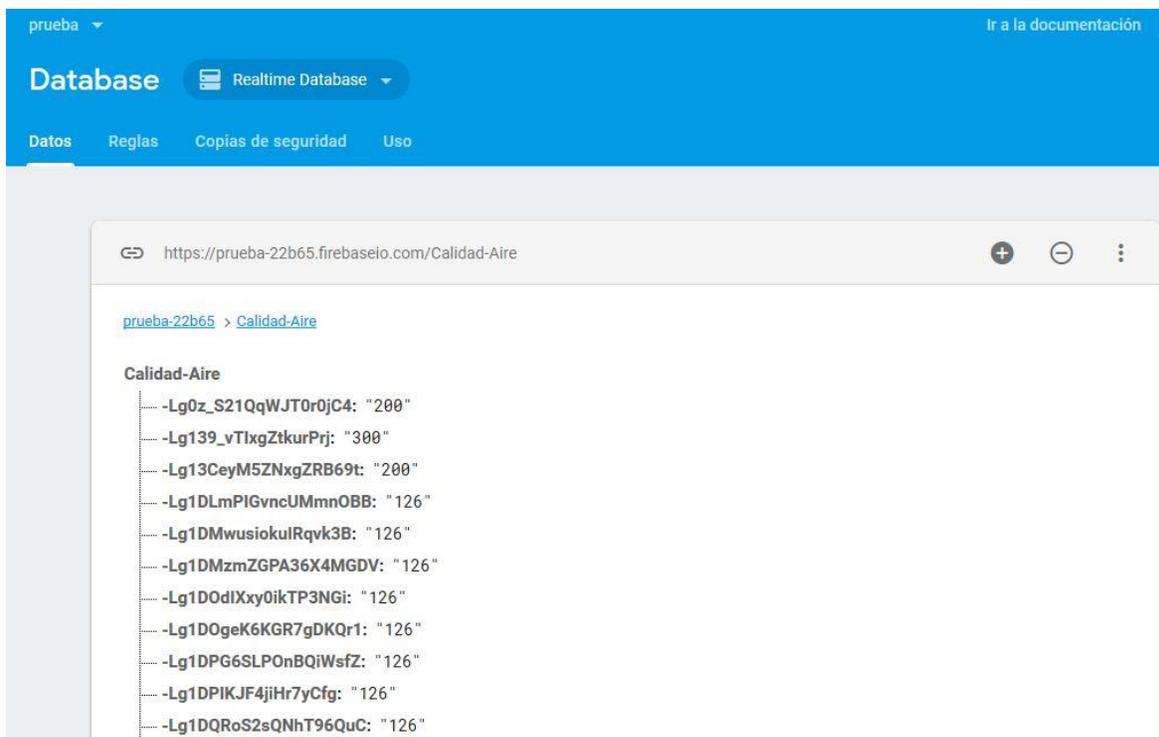


Figura 38. Datos en firebase

Fuente: Tomado de (Firebase, 2019)

La arquitectura del prototipo se presenta en la siguiente figura, en esta se evidencia los componentes y la transmisión de los datos.

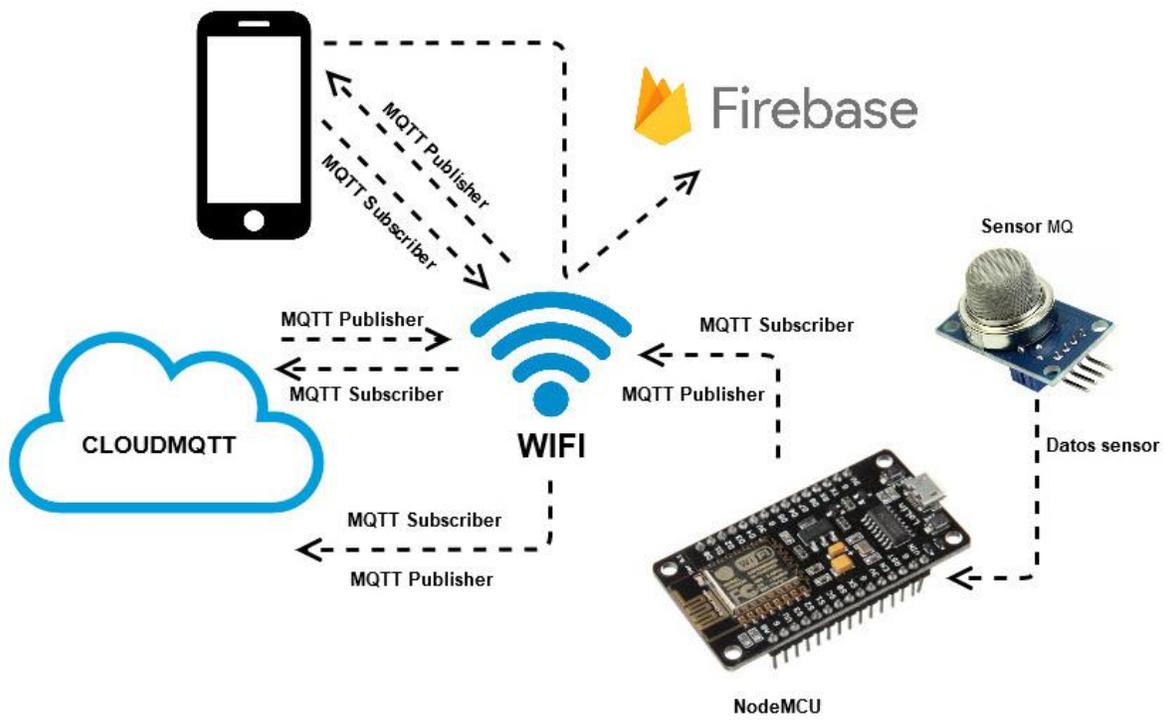


Figura 39. Arquitectura

Fuente: elaboración propia

7. DISCUSIÓN

El prototipo construido funciona perfectamente, aunque algunos contratiempos no permitieron la realización de pruebas en exteriores como calles transitadas por vehículos. Los resultados arrojados en interiores permiten deducir que la calidad del aire es buena. Teniendo un promedio de 200 PPM, siendo el promedio mundial de CO₂ de casi 500 PPM. Aunque estos datos requieren una revisión más detallada puesto que al realizar la prueba con el mismo sensor, en el mismo lugar pero con Arduino uno en lugar de NodeMCU; se obtuvieron datos muy diferentes. Siendo el promedio 30 PPM. Una conclusión que se puede tener, es que el voltaje distinto de las dos placas pudo causar la diferencia. Teniendo en cuenta que Arduino opera con 5V y NodeMCU con 3.3V, esto nos indica que se debe realizar un estudio más detallado de la significancia de estos datos para obtener resultados mucho más precisos. En cuanto al envío de datos, se evidencia una excelente velocidad de transmisión, pero cabe mencionar que la plataforma seleccionada presenta inconvenientes al momento de recibir los datos cuando no está abierta. Es decir, cada vez que se quieran ver los datos a través de la aplicación desarrollada, la plataforma debe estar abierta. De lo contrario, no se conectará.

El funcionamiento del prototipo se ve limitado por las mismas barreras de *IoT*, como la falta de auto sostenibilidad por parte de los sensores y por el consumo energético, pero a diferencia de otros dispositivos para monitorear la calidad del aire como las estaciones existentes en diferentes ciudades del país, el consumo energético es considerablemente bajo.

Por otra parte, se puede evidenciar que las tecnologías y protocolos seleccionados y aplicados a esta investigación fueron acertados, arrojando velocidades de transmisión de datos muy buenas y que se pueden aplicar en cualquier entorno con disponibilidad de una red *WiFi*. También, hay que resaltar que la solución propuesta de prototipo es de muy bajo costo y que con los ajustes adecuados es una gran propuesta para contribuir en cierta medida al desarrollo de una ciudad inteligente haciendo uso de *IoT*.

8. CONCLUSIONES

El objetivo de la investigación se cumplió exitosamente, se ha desarrollado un prototipo que monitorea la calidad del aire, que incorpora IoT, de bajo costo, y que funciona en tiempo real. Los datos obtenidos requieren de una evaluación más profunda para determinar el grado de efectividad de los mismos. Se requieren algunas acciones para mejorar el funcionamiento del prototipo para lograr implementarlo. El diseño es ligero, sencillo y escalable. Siendo una opción rentable para la contribución del desarrollo de una ciudad inteligente.

La contaminación actual, es un problema que afecta a toda la población mundial, incluida Bucaramanga y su área metropolitana, es por esto que se deben tomar acciones con el fin de evitar daños irreparables. *IoT* se presenta como una alternativa para monitorear el medio ambiente a un bajo costo. Y el prototipo presentado puede ayudar a monitorear niveles de contaminación de aire de manera muy efectiva. Teniendo claro que es solo un prototipo y que necesita ajustarse para ser más eficiente.

Algunas limitaciones encontradas son la alimentación de la placa de desarrollo y los sensores, aunque esta se puede superar faltamente con un adaptador de corriente, siendo mucho más rentable que una estación de monitoreo. Ya que se necesitan únicamente 5 voltios para su funcionamiento. Sería como tener conectado un cargador de celular. Esto quiere decir que es de un consumo energético muy bajo. Por otra parte, la plataforma seleccionada presenta algunos problemas al momento de recibir los datos, debe estar siempre abierta para que funcione, pero en general todas las partes cumplen su función. Aunque se puede mejorar mucho más.

Para finalizar, se ha demostrado en la presente investigación que es posible crear un dispositivo *IoT* capaz de recoger datos del medio ambiente para su posterior análisis con el fin de tomar correcciones adecuadas sobre las problemáticas actuales. La contaminación del aire es una de ellas, por lo que se debe empezar a atender y monitorear de manera constante.

9. TRABAJO FUTURO

El prototipo desarrollado presenta algunos problemas que son necesarios corregir. Los datos obtenidos necesitan una profundización en cuanto a su eficacia y parecido con la realidad, una vez corregido, las pruebas en exteriores son muy importantes para valorar el rendimiento del dispositivo. Probar su resistencia a determinadas condiciones climáticas y a un funcionamiento constante.

Además, la calidad del aire no solamente se mide por los gases presentes. También existe material particulado como polvo, por lo que es necesario agregar otros sensores, como por ejemplo un sensor de polvo.

Otra medida necesaria es probar con otra plataforma *IoT* que permita el envío de datos en tiempo real sin la necesidad de estar abierta como sucede con *CloudMQTT*, también, que esta plataforma implemente de ser posible una base de datos para almacenar los datos apenas lleguen a ella.

10. REFERENCIAS

- Alshamsi, A., Anwar, Y., Almulla, M., Aldohoori, M., Hamad, N., & Awad, M. (2017). Monitoring Pollution: Applying IoT to Create a Smart Environment. In *2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*. Ras Al Khaimah: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee-org.aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8251998>
- AMB. (2016). El AMB realiza monitoreo diario de la tendencia de la calidad del aire en Bucaramanga, Floridablanca. Retrieved May 20, 2019, from <https://www.amb.gov.co/el-amb-realiza-monitoreo-diario-de-la-tendencia-de-la-calidad-del-aire-en-bucaramanga-floridablanca-y-giron/>
- AMB. (2018). Avances en Inventario a Emisiones Atmosféricas. Retrieved October 20, 2018, from http://www.amb.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=1040:avances-en-inventario-a-emisiones-atmosfericas&catid=83&Itemid=435&lang=en
- Aprendiendo Arduino. (2018). Tecnologías IoT. Retrieved April 14, 2019, from <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2018/11/11/tecnologias-iot/>
- ARDUINO. (2019). What is Arduino? Retrieved April 11, 2019, from <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- ARROW. (2018). Presentamos las mejores diez placas de desarrollo de 2018. Retrieved April 11, 2019, from <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/videos/the-top-10-development-platforms-dev-kits-2018>
- CISCO. (2018). What Is a Smart City? Retrieved October 19, 2018, from <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/industries/smart-connected-communities/what-is-a-smart-city.html>
- CloudMQTT. (2019). CloudMQTT. Retrieved May 5, 2019, from <https://www.cloudmqtt.com/>
- Concepto. (2018). ¿Qué es el Wifi? Retrieved May 2, 2019, from <https://concepto.de/wifi/>
- Dave Evans. (2011). *Internet of Things La próxima evolución de Internet lo está cambiando todo*. San José. Retrieved from https://www.cisco.com/c/dam/global/es_es/assets/executives/pdf/Internet_of_Things_IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
- Desai, N. S., & Alex, J. S. R. (2017). IoT based air pollution monitoring and predictor system on Beagle Bone Black. In *2017 International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2)*. Chennai: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee-org.aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8067962>
- Diosdado, R. (2016). Conociendo arduino (Introducción). Retrieved April 15, 2019, from <https://www.zonamaker.com/arduino/intro-arduino/conociendo-arduino-introduccion>
- DZone. (2018). How to Choose a Microcontroller for IoT. Retrieved April 11, 2019,

- from <https://dzone.com/articles/how-to-choose-a-microcontroller-for-iot>
- EcuRed. (2012). Microcontrolador. Retrieved April 11, 2019, from <https://www.ecured.cu/Microcontrolador>
- EL-PRO-CUS. (2018). Wireless Sensor Networks and their Applications. Retrieved April 13, 2019, from <https://www.elprocus.com/introduction-to-wireless-sensor-networks-types-and-applications/>
- ELECTRONICA SL. (2019). Sensores para la detección de gases MQ. Retrieved April 11, 2011, from <https://www.e-ika.com/set-de-sensores-mq-para-la-deteccion-de-gases>
- Fuertes, W., Carrera, D., Villacís, C., Toulkeridis, T., Galárraga, F., Torres, E., & Aules, H. (2015). Distributed System as Internet of Things for a new low-cost, Air Pollution Wireless Monitoring on Real Time. In *DS-RT 2015 Proceedings of the 19th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications*. Chengdu: ACM. Retrieved from http://delivery.acm.org.aure.unab.edu.co/10.1145/3030000/3023081/p58-Fuertes.pdf?ip=200.69.124.15&id=3023081&acc=ACTIVE-SERVICE&key=4D9619BEF5D5941F.D0AFA4C1BA803950.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&__acm__=1539580046_a14a01a8590a3a11140235d44bde6d0d
- FUTURATECH. (2017). Wi-Fi. Retrieved April 13, 2019, from <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/internet-wi-fi-1648/>
- Ideam. (2019). Mapas anomalías de temperatura máxima. Retrieved May 20, 2019, from <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/1499>
- ITU. (2012). *Recomendación Y.2060*. Ginebra. Retrieved from <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-l/es>
- Kim, S. H., Jeong, J. M., Hwang, M. T., & Kang, C. S. (2017). Development of an IoT-based atmospheric environment monitoring system. In *2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. Jeju: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee-org.aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8190799>
- Kiruthika, R., & Umamakeswari, A. (2017). Low cost pollution control and air quality monitoring system using Raspberry Pi for Internet of Things. In *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*. Chennai: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee-org.aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8389867>
- LaFM. (2018). Colombia, segundo país de Latinoamérica con más contaminación del aire. Retrieved May 7, 2019, from <https://www.lafm.com.co/medio-ambiente/colombia-segundo-pais-de-latinoamerica-con-mas-contaminacion-del-aire>
- Liu, X., Li, B., Jiang, A., Qi, S., Xiang, C., & Xu, N. (2015). A Bicycle-borne Sensor for Monitoring Air Pollution near Roadways. In *2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan*. Taipei: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee-org.aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7216835>
- Llamas, L. (2019a). ¿Qué es MQTT? Su importancia como protocolo IoT.

- Retrieved May 5, 2019, from <https://www.luisllamas.es/que-es-mqtt-su-importancia-como-protocolo-iot/>
- Llamas, L. (2019b). Protocolos de comunicación para IoT. Retrieved April 14, 2019, from <https://www.luisllamas.es/protocolos-de-comunicacion-para-iot/>
- Manna, S., Bhunia, S. S., & Mukherjee, N. (2014). Vehicular Pollution Monitoring Using IoT. In *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014)*. Jaipur: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee.org.aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6909157>
- Medium. (2018). Wireless Protocols for Internet of Things. Retrieved April 13, 2019, from <https://medium.com/blueeast/wireless-protocols-for-internet-of-things-7ed0bd860c66>
- Microsoft. (2018). IoT para los servicios de salud. Retrieved October 20, 2018, from <https://www.microsoft.com/es-mx/internet-of-things/healthcare>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). *RESOLUCIÓN NÚMERO (601) "Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia."* Bogotá. Retrieved from [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/59-Resolución 601 de 2006 - calidad del aire.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/59-Resolución%20601%20de%202006%20-%20calidad%20del%20aire.pdf)
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). *RESOLUCIÓN NÚMERO 910 "Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones."* Bogotá. Retrieved from [http://www.bogotaturismo.gov.co/sites/intranet.bogotaturismo.gov.co/files/RESOLUCIÓN 910 DE 2008.pdf](http://www.bogotaturismo.gov.co/sites/intranet.bogotaturismo.gov.co/files/RESOLUCIÓN%20910%20DE%202008.pdf)
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *RESOLUCIÓN NÚMERO 650 "Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire."* Bogotá. Retrieved from [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/fb-Resolucion 650 de 2010 - Adopción protocolo calidad del aire.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/fb-Resolucion%20650%20de%202010%20-%20Adopci3n%20protocolo%20calidad%20del%20aire.pdf)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *DECRETO NÚMERO 1076 DE 2015 "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector ambiente y Desarrollo Sostenible."* Bogotá. Retrieved from <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/wp-content/uploads/2013/08/Decreto-Unico-Reglamentario-Sector-Ambiental-1076-Mayo-2015.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Documento CONPES POLÍTICA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE.* Bogotá. Retrieved from [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/conpes/14-Conpes 3943 Política para el mejoramiento de la calidad del aire.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/conpes/14-Conpes%203943%20Politica%20para%20el%20mejoramiento%20de%20la%20calidad%20del%20aire.pdf)
- Ministerio del Medio Ambiente. (1995). *DECRETO 948 DE 1995 "Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la*

- Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prev.* Bogotá. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/54-dec_0948_1995.pdf
- Naylamp Mechatronics. (2016). Tutorial sensores de gas MQ2, MQ3, MQ7 y MQ135. Retrieved November 5, 2018, from https://naylampmechatronics.com/blog/42_Tutorial-sensores-de-gas-MQ2-MQ3-MQ7-y-MQ13.html
- Observatorio Metropolitano. (2018). Reducción Pm10 Día Normal / Día Sin Carro. Retrieved May 20, 2019, from <http://www.observatoriomropolitano.com.co:8080/indicadores.aspx?idIndicador=420&CatComponente=Ambiental>
- OSPS. (2016). Contaminación atmosférica y sus efectos en la salud en Bucaramanga. Retrieved October 20, 2018, from <http://web.observatorio.co/niveles-de-contaminacion-en-bucaramanga/>
- Parmar, G., Lakhani, S., & Chattopadhyay, M. K. (2017). An IoT Based Low Cost Air Pollution Monitoring System. In *2017 International Conference on Recent Innovations in Signal processing and Embedded Systems (RISE)*. Bhopal: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee-org.aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8378212>
- Patil, P. (2017). Smart IoT Based System For Vehicle Noise And Pollution Monitoring. In *2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)*. Tirunelveli: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee-org.aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8300941>
- Programarfacil. (2017). NodeMCU tutorial paso a paso desde cero. Retrieved April 15, 2019, from <https://programarfacil.com/podcast/nodemcu-tutorial-paso-a-paso/>
- Puranik, S., Mohan, J., & Chandrasekaran, K. (2015). Smart and Secure Monitoring of Industrial Environments using IoT. In *WCI '15 Proceedings of the Third International Symposium on Women in Computing and Informatics*. Kochi: ACM. Retrieved from http://delivery.acm.org.aure.unab.edu.co/10.1145/2800000/2791553/p644-puranik.pdf?ip=200.69.124.15&id=2791553&acc=ACTIVE-SERVICE&key=4D9619BEF5D5941F.D0AFA4C1BA803950.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&__acm__=1539580340_2abbcc7c2ef30a840dccb e369a1cc818
- RaspberryPi. (2019). What is a Raspberry Pi? Retrieved April 11, 2019, from <https://www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi/>
- Redes Telematicas. (2014). Modos de funcionamiento de las redes Wi-Fi.
- Rushikesh, R., & Sivappagari, C. M. R. (2015). Development of IoT based Vehicular Pollution Monitoring System. In *2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*. Noida: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee-org.aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7380568>
- Saha, D., Shinde, M., & Thadeshwar, S. (2017). IoT based Air Quality Monitoring System using Wireless Sensors deployed in Public Bus Services. In *ICC '17*

- Proceedings of the Second International Conference on Internet of things, Data and Cloud Computing*. Cambridge: ACM. Retrieved from http://delivery.acm.org.aure.unab.edu.co/10.1145/3030000/3025135/a87-debanshee.pdf?ip=200.69.124.15&id=3025135&acc=ACTIVE SERVICE&key=4D9619BEF5D5941F.D0AFA4C1BA803950.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&__acm__=1539579788_678344197cb77f389f3ea b0e65cde91c
- Saha, H. N., Auddy, S., Chatterjee, A., Pal, S., Pandey, S., Singh, R., ... Maity, A. (2017). Pollution Control using Internet of Things (IoT). In *2017 8th Annual Industrial Automation and Electromechanical Engineering Conference (IEMECON)*. Bangkok: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee.org.aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8079563>
- SearchDataCenter. (2014). ZigBee. Retrieved April 13, 2019, from <https://searchdatacenter.techtarget.com/es/definicion/ZigBee>
- SearchMobileComputing. (2007a). GPRS (General Packet Radio Services). Retrieved April 13, 2019, from <https://searchmobilecomputing.techtarget.com/definicion/GPRS>
- SearchMobileComputing. (2007b). Near Field Communication (NFC). Retrieved April 13, 2019, from <https://searchmobilecomputing.techtarget.com/definicion/Near-Field-Communication>
- Shah, J., & Mishra, B. (2016). IoT enabled Environmental Monitoring System for Smart Cities. In *2016 International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA)*. Pune: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee.org.aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7562757>
- Tapashetti, A., Vegiraju, D., & Ogunfunmi, T. (2016). IoT-Enabled Air Quality Monitoring Device A Low Cost Smart Health Solution. In *2016 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*. Seattle: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee.org.aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7857352>
- TechTerms. (2019). Bluetooth. Retrieved April 13, 2019, from <https://techterms.com/definicion/bluetooth>
- Vanguardia. (2018a). El Carrasco colapsa y tiene a Bucaramanga y el área en emergencia. Retrieved May 20, 2019, from <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/el-carrasco-colapsa-y-tiene-a-bucaramanga-y-el-area-en-emergencia-DBVL446720>
- Vanguardia. (2018b). Parque automotor genera el 90% de contaminación del aire en Bucaramanga. Retrieved May 20, 2019, from <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/parque-automotor-genera-el-90-de-contaminacion-del-aire-en-bucaramanga-HEVL431413>
- Vanguardia. (2019). Desborde de aguas negras en Ptar de Nuevo Girón alarma a la comunidad. Retrieved May 20, 2019, from <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/giron/desborde-de-aguas-negras-en-ptar-de-nuevo-giron-alarma-a-la-comunidad-CCVL454556>

- Vanguardia. (2019). En alerta roja 74 municipios por incendios en Santander. Retrieved May 20, 2019, from <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/en-alerta-roja-74-municipios-por-incendios-en-santander-BCVL454261>
- Vanguardia. (2019). Preocupa el deterioro de la calidad del aire en Bucaramanga y el área. Retrieved May 20, 2019, from <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/preocupa-el-deterioro-de-la-calidad-del-aire-en-bucaramanga-y-el-area-XL629505>
- Velásquez, P., Vásquez, L., Correa, C., & Rivera, D. (2017). A low-cost IoT based Environmental Monitoring System. A citizen approach to pollution awareness. In *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. Pucon: IEEE. Retrieved from <https://ieeexplore-ieee.org/aure.unab.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8229599>
- WhatIs. (2012). Sensor. Retrieved April 11, 2019, from <https://whatis.techtarget.com/definition/sensor>
- WHO. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Retrieved from http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=7FAF7EEF5EA00EAA2A847E140732E99C?sequence=1
- WHO. (2018). Air pollution. Retrieved October 20, 2018, from <https://www.who.int/airpollution/en/>
- Yin, C., Xiong, Z., Chen, H., Wang, J., Cooper, D., & David, B. (2015). *A literature survey on smart cities*. Beijing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11432-015-5397-4>