



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: “SISTEMA DE MONITOREO IOT DE CALIDAD DE AIRE
USANDO UNA RED DE SENSORES FIJOS Y LORAWAN EN EL CAMPUS
SANGOLQUÍ DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS –
ESPE”**

AUTOR: ESCOBAR DUQUE, JONATHAN STEVE

DIRECTOR: ING. TRIVIÑO CEPEDA, ROBERTO DANIEL

SANGOLQUÍ

2020



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación "*SISTEMA DE MONITOREO IOT DE CALIDAD DE AIRE USANDO UNA RED DE SENSORES FIJOS Y LORAWAN EN EL CAMPUS SANGOLQUÍ DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE*" fue realizado por el señor *Escobar Duque, Jonathan Steve*, el mismo que ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17 de enero de 2020

Ing. Triviño Cepeda, Roberto Daniel
DIRECTOR
C.C.: 1712197522



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Escobar Duque, Jonathan Steve*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "*Sistema de monitoreo IoT de calidad de aire usando una red de sensores fijos y LoRaWAN en el campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE*" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 17 de enero de 2020


.....
Escobar Duque, Jonathan Steve
C.C.: 1716911225



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, Escobar Duque, Jonathan Steve autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “Sistema de monitoreo IoT de calidad de aire usando una red de sensores fijos y LoRaWAN en el campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 17 de enero de 2020



.....
Escobar Duque, Jonathan Steve
C.C.: 1716911225

DEDICATORIA

A mis padres, que en todos mis años de estudio me han apoyado con un amor incondicional, sacrificio y trabajo. Ha sido siempre un orgullo ser su hijo.

A mis hermanos, que por estar siempre presentes brindándome su apoyo absoluto, me han guiado hacia la realización de mis objetivos personales, académicos y profesionales con honestidad y ética.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la vida y ser mi mejor maestro.

Gracias a la Santa Virgen María por interceder por mí aun cuando no lo merecía.

Finalmente agradezco a mis padres y hermanos por haberme dado el ejemplo de una vida honesta y trabajadora.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Gestión de la calidad del aire en el mundo.....	3
1.1.2. Gestión de la calidad del aire en el Ecuador.	5
1.2. Justificación e Importancia.....	10
1.3. Alcance del Proyecto.....	13
1.4. Objetivos.....	14
1.4.1. Objetivo General	14
1.4.2. Objetivos Específicos	15
1.5. Descripción General del Proyecto	15
CAPÍTULO II	
ESTADO DEL ARTE	
2.1. Introducción.	17
2.2. Contaminación	17
2.2.1. Concepto 17	
2.2.2. Contaminación del aire.....	19
a. Clasificación de los contaminantes.....	19
b. Efectos en la salud.....	20
c. Niveles de contaminantes aéreos permitidos en Ecuador.....	26
d. Correcciones de la medición de acuerdo con la localidad.....	27
e. Planes de alerta, alarma y emergencia de la calidad del aire en Ecuador.....	27
f. Formas de medición	28
g. Estudios sobre la calidad de aire.	29

2.2.3. Contaminación del agua	31
a. Efectos en la salud	32
2.2.4. Contaminación del suelo	32
a. Efectos en la salud	32
2.2.5. Contaminación acústica.....	33
a. Efectos en la salud	33
2.2.6. Contaminación lumínica	35
a. Efectos en la salud	35
2.3. Sensores.....	36
2.3.1. Tipos de sensores	36
2.3.2. Sensores químicos	38
a. Clasificación de sensores químicos	38
2.3.3. Características	40
a. Resolución	41
b. Sensibilidad	41
c. Exactitud.....	41
d. Precisión.....	41
2.4. Red de sensores inalámbricos.....	41
2.4.1. Características	42
2.4.2. Topologías.....	43
2.4.3. Protocolos de comunicación inalámbrica para WSN	44
2.5. Internet de las cosas (IoT)	45
2.5.1. Elementos.....	45
2.5.2. Estándar	46
a. Arquitectura.....	46
2.6. LoRa.....	49
2.7. LoRaWAN	50
2.7.1. Arquitectura.....	51
2.7.2. Factor de dispersión	51
2.7.3. Clases LoRaWAN.....	52
2.7.4. Seguridad.....	52
2.7.5. Paquete.....	57
2.7.6. Comunicación.....	58

CAPÍTULO III

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

3.1. Introducción	60
3.2. Distribución de la red de sensores.....	61
3.3. Diseño de Hardware	63
3.3.1. Requerimientos de Hardware	63
3.3.2. Caracterización de los sensores.....	67
a. Sensor de contaminantes	67
b. Sensor de temperatura.....	74
3.3.3. Selección de la placa de desarrollo y módulo LoRa	76

3.3.4. Selección del módulo GSM/GPRS	78
3.3.5. Selección de la fuente de energía.....	79
3.3.6. Estructura del hardware.....	79
a. Bloque de sensado y procesamiento.....	80
b. Bloque de transmisión - recepción	82
c. Bloque de alimentación	82
3.4. Diseño de Software	83
3.4.1. Requerimientos de software	83
a. Requerimientos funcionales (RF) del software	84
b. Requerimientos no funcionales (RNF) del software	85
3.4.2. Estructura del software.....	86
3.4.3. Diseño del programa en Arduino	87
a. Diseño del programa en Arduino del nodo.....	87
b. Diseño e implementación de la aplicación web	89
3.5. Implementación.....	96
3.5.1. Circuito implementado de los nodos	96
3.5.2. Diseño de la carcasa	96
3.5.3. Dispositivo implementado.....	99
3.6. Protocolos de prueba	101
3.6.1. Prueba N°1: calibración del sensor MiCS 4514.....	101
3.6.2. Prueba N°2: sensor de temperatura LM35	103
3.6.3. Prueba N°3: obtención del SF de la red LoRa	105
3.6.4. Prueba N°4: Conectividad de red.....	106
3.6.5. Prueba N°5: envío de los datos a la base de datos.	107
3.6.6. Prueba N°6: Prueba de funcionalidad y confiabilidad del sitio Web.....	108
3.6.7. Prueba N°7: Funcionalidad de toda la red.....	109

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Sistema de monitoreo	111
4.2. Análisis de información de variables sensadas.	111
4.2.1. Calibración usando pruebas 1 y 2.....	111
a. Salida RED de CO.....	111
b. Salida NOX de NO2.....	115
c. Sensores de temperatura LM35	117
4.3. Determinación del SF para la red LoRa	118
4.3.1. SF nodo S-1.....	119
4.3.2. SF nodo S-3.....	120
4.3.3. SF nodo S-4.....	121
4.3.4. SF nodo S-5.....	123
4.3.5. SF nodo S-6.....	124
4.3.6. Tiempo en aire.....	126
4.3.7. Comprobación de la comunicación con el software Radio Mobile.....	129
4.4. Pruebas del módulo GSM	130

4.5. Envío de información a la base de datos.....	132
4.6. Usabilidad del sitio web.....	133
4.7. Resultados del sistema de monitoreo.....	137
4.7.1. Datos de temperatura.....	138
4.7.2. Datos de CO.....	143
4.7.3. Datos de NO2.....	148

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.....	152
5.2. Recomendaciones.....	154
REFERENCIAS.....	156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Análisis legal de la gestión de la calidad del aire en el Ecuador.</i>	3
Tabla 2	<i>Disponibilidad de analizadores de gases y partículas en las estaciones RAUTO</i>	6
Tabla 3	<i>Efectos adversos de los contaminantes aéreos sobre el sistema respiratorio.</i>	23
Tabla 4	<i>Sistemas afectados por contaminación</i>	24
Tabla 5	<i>Concentraciones máximas permitidas según la Autoridad Ambiental Nacional.</i>	26
Tabla 6	<i>Concentraciones de contaminantes que definen niveles alerta, alarma y emergencia.</i>	28
Tabla 7	<i>Formas de medir los contaminantes</i>	29
Tabla 8	<i>Clasificación sensores funcionamiento</i>	36
Tabla 9	<i>Clasificación sensores señal</i>	37
Tabla 10	<i>Clasificación sensores naturaleza</i>	37
Tabla 11	<i>Clasificación sensores fabricación</i>	37
Tabla 12	<i>Aplicación - tipo de sensor</i>	37
Tabla 13	<i>Características WSN</i>	43
Tabla 14	<i>Elementos IoT</i>	46
Tabla 15	<i>Dominio de sensado y control</i>	47
Tabla 16	<i>Funciones de dominio cruzado</i>	48
Tabla 17	<i>SF vs sensibilidad</i>	52
Tabla 18	<i>Clases nodos finales</i>	52
Tabla 19	<i>Áreas de posible concentración de contaminantes</i>	61
Tabla 20	<i>Ubicación de los nodos</i>	64
Tabla 21	<i>Requerimiento de los sensores de contaminantes</i>	65
Tabla 22	<i>Requerimientos sensor de temperatura</i>	65
Tabla 23	<i>Requerimientos placa de desarrollo integrado con módulo LoRa</i>	65
Tabla 24	<i>Requerimientos módulo GSM/GPRS</i>	66
Tabla 25	<i>Requerimientos fuente de alimentación</i>	67
Tabla 26	<i>Pines MiCS 4514</i>	68
Tabla 27	<i>Características MiCS 4514</i>	69
Tabla 28	<i>Valores de RLOAD del MiCS</i>	73
Tabla 29	<i>Comparación Sensores</i>	74
Tabla 30	<i>Pines LM35</i>	75
Tabla 31	<i>Características del sensor LM35</i>	75
Tabla 32	<i>Comparación placas desarrollo LoRa</i>	76
Tabla 33	<i>Características placa de desarrollo</i>	77
Tabla 34	<i>Comparación módulos GSM</i>	78
Tabla 35	<i>Características módulo GSM/GPRS</i>	79
Tabla 36	<i>Características fuente de tensión</i>	79
Tabla 37	<i>RF nodos</i>	84
Tabla 38	<i>RF de la aplicación web</i>	84
Tabla 39	<i>RF de la base de datos</i>	85
Tabla 40	<i>RNF nodos</i>	85
Tabla 41	<i>RF de la base de datos</i>	85
Tabla 42	<i>Tipos de variables tabla datos</i>	93

Tabla 43	<i>Tipos de variables tabla token</i>	94
Tabla 44	<i>Tipos de variables tabla usuarios</i>	94
Tabla 45	<i>Tabla para el Ro de CO (NO2)</i>	103
Tabla 46	<i>Calibración temperatura</i>	104
Tabla 47	<i>Prueba conexión LoRa</i>	105
Tabla 48	<i>Pruebas de latencia operadoras</i>	107
Tabla 49	<i>Ro salida RED</i>	112
Tabla 50	<i>Correlación de Pearson</i>	113
Tabla 51	<i>Correlación nodos 1,2 y 3 para CO</i>	114
Tabla 52	<i>Correlación nodos 4, 5 y 6 para CO</i>	114
Tabla 53	<i>Ro de salida NOX</i>	115
Tabla 54	<i>Correlación nodos 1, 2 y 3 para NO2</i>	116
Tabla 55	<i>Correlación nodos 4, 5 y 6 para NO2</i>	116
Tabla 56	<i>Promedio sensores temperatura</i>	117
Tabla 57	<i>Promedio sensores de temperatura calibrados</i>	118
Tabla 58	<i>Prueba SF nodo 1</i>	119
Tabla 59	<i>Prueba SF nodo 3</i>	121
Tabla 60	<i>Pruebas SF nodo 4</i>	122
Tabla 61	<i>Pruebas SF nodo 5</i>	123
Tabla 62	<i>Pruebas SF nodo 6</i>	125
Tabla 63	<i>Resumen SF nodos LoRa</i>	125
Tabla 64	<i>Parámetros Radio Mobile</i>	129
Tabla 65	<i>Potencia recepción nodos</i>	130
Tabla 66	<i>Promedio ping</i>	131
Tabla 67	<i>Matriz correlación temperatura</i>	141
Tabla 68	<i>Resumen temperatura</i>	142
Tabla 69	<i>Matriz de correlación CO</i>	146
Tabla 70	<i>Matriz coeficientes de correlación NO2</i>	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa WAQI, 2019.	4
Figura 2.	Estaciones RAUTO,	6
Figura 3.	Localización de las estaciones de la Red de Monitoreo	8
Figura 4.	Red de sensores inalámbricos	42
Figura 5.	Topologías más comunes para WSN	43
Figura 6.	Protocolo de las WSN	45
Figura 7.	Arquitectura de referencia para IoT	46
Figura 8.	Capas LoRaWAN.	50
Figura 9.	Arquitectura LoRaWAN	51
Figura 10.	Encriptación LoRaWAN	55
Figura 11.	Bloque AES	55
Figura 12.	Bloque operaciones y rondas AES	56
Figura 13.	Mensaje LoRaWAN	57
Figura 14.	Mensaje MAC	58
Figura 15.	Comunicación upstream LoRaWAN	59
Figura 16.	Comunicación downstream.	59
Figura 17.	Esquema general proyecto	60
Figura 18.	Puntos de posible concentración de contaminantes	62
Figura 19.	Puntos nodos sensores	63
Figura 20.	Bloques hardware	64
Figura 21.	Comparación sensores	68
Figura 22.	MiCS 4514	68
Figura 23.	Rs/Ro vs Concentración RED	69
Figura 24.	Rs/Ro vs concentración NOX	70
Figura 25.	Regresión CO	71
Figura 26.	Regresión NO2	72
Figura 27.	Circuito de suministro MiCS 4514	73
Figura 28.	LM35	74
Figura 29.	Prueba LM35	76
Figura 30.	Pinout placa desarrollo	77
Figura 31.	Pinout módulo GSM/GPRS	78
Figura 32.	Pinout hardware	80
Figura 33.	Conexiones nodos	83
Figura 34.	Bloques del software	86
Figura 35.	Diagrama de flujo nodo	88
Figura 36.	Diagrama de flujo gateway	88
Figura 37.	Diagrama de tecnologías	89
Figura 38.	Storyboard aplicación web	91
Figura 39.	Estructura BD	93
Figura 40.	DER de la base de datos	94
Figura 41.	Diagrama de secuencia insert data	95
Figura 42.	Diagrama base de datos petición	95
Figura 43.	Circuito implementado	96

Figura 44.	Carcasa Nodo.....	97
Figura 45.	Carcasa gateway	98
Figura 46.	Construcción nodo.....	99
Figura 47.	Nodo construido.....	99
Figura 48.	Gateway construido	100
Figura 49.	Ubicación nodos	100
Figura 50.	Diagrama de conexión prueba MiCS.....	103
Figura 51.	Diagrama prueba sensor temperatura	104
Figura 52.	Diagrama pruebas SF.....	106
Figura 53.	Diagrama prueba módulo GSM / GPRS.....	107
Figura 54.	Diagrama pruebas envío de datos	108
Figura 55.	Diagrama prueba red.....	109
Figura 56.	Funcionalidad de la red.....	110
Figura 57.	Diagrama general de red del sistema	111
Figura 58.	Verificación nodos 1-3 para CO	113
Figura 59.	Verificación nodos 4-6 para CO	114
Figura 60.	Verificación nodos 1-3 para NO2.....	115
Figura 61.	Verificación nodos 4-6 para NO2.....	116
Figura 62.	Sensores de temperatura calibrados.....	117
Figura 63.	Pruebas de SF y tiempo en aire.....	118
Figura 64.	Referencia posición nodo S-1	119
Figura 65.	SF nodo S-1.	120
Figura 66.	Referencia posición nodo S-3.....	120
Figura 67.	SF nodo S-3.	121
Figura 68.	Referencia posición nodo S-4.....	122
Figura 69.	SF nodo S-4.	122
Figura 70.	Referencia posición nodo S-5.....	123
Figura 71.	SF nodo S-5.	124
Figura 72.	Referencia posición nodo S-6.....	124
Figura 73.	SF nodo S-6.	125
Figura 74.	SF vs tiempo en aire prueba.....	127
Figura 75.	SF vs duración de símbolo.....	128
Figura 76.	Chips comunicación LoRa.....	128
Figura 77.	Enlace LoRa en Radio Mobile.....	129
Figura 78.	Nodos Radio Mobile.....	130
Figura 79.	Latencia según operadora	131
Figura 80.	Prueba envío a la base de datos	132
Figura 81.	Creación usuario	133
Figura 82.	Usuario regular en base de datos	134
Figura 83.	Página de inicio usuario premium	134
Figura 84.	Comprobación aplicación web usuario premium	135
Figura 85.	Descarga Excel usuario premium	136
Figura 86.	Reporte Excel nodo 1.....	136
Figura 87.	Limitaciones usuario regular	136
Figura 88.	Datos de la aplicación web	137

Figura 89.	Temperatura nodo S-1 vs municipio.....	138
Figura 90.	Temperatura nodo S-2 vs municipio.....	139
Figura 91.	Temperatura nodo S-3 vs municipio.....	139
Figura 92.	Temperatura nodo S-4 vs municipio.....	140
Figura 93.	Temperatura nodo S-5 vs municipio.....	140
Figura 94.	Temperatura nodo S-6 vs municipio.....	140
Figura 95.	Gráfico dispersión temperatura.....	141
Figura 96.	Resumen temperatura	143
Figura 97.	Temperatura promedio por horas - ESPE.....	143
Figura 98.	Concentración CO	144
Figura 99.	Datos CO apilados	144
Figura 100.	Dispersión CO Cicté y Gateway.....	146
Figura 101.	Dispersión CO Par-Res y Lab-Mec	146
Figura 102.	Resumen concentración CO	147
Figura 103.	Concentración NO2 nodos.....	148
Figura 104.	Datos NO2 apilados	149
Figura 105.	Dispersión CO Cicté y Lab-Ele	150
Figura 106.	Dispersión CO Par-Res y Gateway.....	150
Figura 107.	Resumen concentraciones NO2	151

RESUMEN

La contaminación del aire es un problema ambiental mundial ya que afecta gravemente a la salud y al bienestar de una población. En áreas urbanas, este problema se debe, entre otras causas, al uso de vehículos antiguos, a la baja calidad de combustibles fósiles y a una inspección deficiente. Esta última se origina porque el monitoreo de la calidad del aire suele ser costoso y, por consiguiente, escaso. Por lo tanto, actualmente se busca opciones de bajo costo, que tengan alta eficiencia energética y que no necesiten una gran infraestructura para funcionar. Consiguientemente, este proyecto de investigación propone el diseño e implementación de un sistema de monitoreo ambiental que analiza 2 de los 5 elementos usados para indicar la calidad del aire, además usa Internet de las Cosas, sensores de bajo costo y redes WAN de bajo consumo energético para la transmisión de datos. La red de sensores usada consta de 6 estaciones distribuidas en el campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Cada estación monitorea temperatura, CO y NO₂ y envía estos datos a un nodo central a través de LoRaWAN para su posterior almacenamiento en una base de datos en la nube que permite mostrar la información mediante una aplicación web. Entre los resultados se destaca la identificación de zonas de mayor concentración de CO y NO₂ en el campus, así como la variación de temperatura de las zonas estudiadas.

PALABRAS CLAVE:

- **LORAWAN**
- **RED DE SENSORES**
- **IOT**
- **CALIDAD DEL AIRE**
- **CONTAMINANTES AÉREOS**

ABSTRACT

Air pollution is a global environmental problem since it seriously affects the health and the well-being of a population. In urban areas, this problem is due, among other causes, to the use of old vehicles, the low quality of fossil fuels and a poor inspection because air quality monitoring is usually expensive and scarce. Therefore, we are currently looking for low-cost options with high energy efficiency and do not need a large infrastructure. Consequently, this research project proposes the design and implementation of an environmental monitoring system that senses 2 of 5 elements used to indicate the air quality, in addition use Internet of Things, low cost sensors and low power WAN networks for data transmission. The wireless sensor network used consists of 6 stations distributed on the Sangolquí campus of the Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Each station senses temperature, CO and NO₂ and sends this data to a central node through LoRaWAN for later storage in a cloud database that allows the information to be displayed through a web application. Some results shown the identification of areas with the highest concentration of CO and NO₂ on the campus, as well as the temperature variation of the studied areas.

KEYWORDS:

- **LORAWAN**
- **WIRELESS SENSOR NETWORK**
- **IOT**
- **AIR QUALITY**
- **AIR POLLUTANTS**

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La contaminación del aire es una importante preocupación ambiental en muchas áreas del mundo con impactos significativos en la salud y en la economía de la sociedad, siendo la responsable de más de 4.2 millones de muertes prematuras al año. (OMS, 2016). De hecho, en el apartado de notas descriptivas de la calidad del aire y salud en la página web de la Organización Mundial de la Salud, OMS (2019), se afirma que “mediante la disminución de los niveles de contaminación del aire los países se puede reducir la carga de morbilidad derivada de accidentes cerebrovasculares, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas y agudas, entre ellas el asma”, y que “cuanto más bajos sean los niveles de contaminación del aire mejor será la salud cardiovascular y respiratoria de la población, tanto a largo como a corto plazo”. Además, en este mismo apartado se asevera que “el 91% de la población vivía en lugares donde no se respetaban las directrices de la OMS sobre la calidad del aire.” (OMS, 2018) Por lo tanto, esta organización, en su resumen de evaluación de los riesgos llamado “Guías de calidad de aire” (GCA) recopila la información y estudios realizados para contrarrestar esta problemática. Las GCA has tenido varias actualizaciones, de hecho, con nuevos estudios realizados y con una mejor comprensión sobre las mezclas de gases tóxicos, se ha verificado que, por ejemplo, el dióxido de nitrógeno (NO₂) coexiste con varios otros contaminantes que son más difíciles de detectar. Por lo tanto, revelar este gas y evitarlo acarrearía más beneficios que los previstos ya que se estaría evadiendo varios otros contaminantes. (OMS, 2005). Por otro lado, nuevas investigaciones también acarrear noticias negativas. En la GCA, la OMS (2005) indica que en países en desarrollo se tiene concentraciones

de Ozono (O₃) y material particulado (PM) que ya significan un riesgo para la salud. Sin embargo, este problema no es solamente característico de los países de desarrollados, sino también de países de tercer mundo ya que la baja calidad de aire en áreas urbanas se debe, entre otras causas, al crecimiento de la población, el tráfico vehicular, la mala infraestructura vial, la baja calidad del combustible, vehículos antiguos y un monitoreo e inspección inadecuados. (Gurjar, Bulet, Lawrence, & Lelieved, 2015).

En Ecuador también existe normas y estudios para evitar este problema. El organismo más importante que dicta las directrices sobre la calidad de aire en el país es el Ministerio del Ambiente mediante el Plan Nacional de Calidad del Aire que surge por la necesidad de cumplir con las recomendaciones internacionales emitidas por la OMS y como deber con la Constitución del Ecuador que establece que el estado otorga el derecho a los ciudadanos a vivir en un medio ambiente sano. Este plan consta de 3 (tres) programas que se detallan a continuación (MAE, 2010):

1. Programa 1: Control y vigilancia de la calidad del aire
2. Programa 2: Mejoramiento de la calidad del aire y prevención de su deterioro
3. Programa 3: Medidas a ser aplicadas durante los estados de alerta.

El Ministerio del Ambiente realizó una recopilación de estudios sobre la calidad de aire. En 2000 se determinó que los niños que estudiaban en un sector urbano indicaron “un promedio de carboxihemoglobina (COHB) superior a los valores aceptados como normales (COHB 5%), (...) teniendo un riesgo cuatro veces mayor de presentar infecciones respiratorias agudas altas (IRAA) que los niños de sectores urbanos periféricos (COHB 2,5%) y rurales (COHB 0,7%)” (MAE, 2010).

En Cuenca, un estudio sobre la contaminación en el centro histórico demostró que la concentración de compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de azufre (SO₂) sobrepasaban la norma ecuatoriana de calidad de aire en todos los puntos medidos. Puntualmente, en el caso de la refinería de Esmeraldas, son alrededor de 22 barrios afectados por la contaminación de gases. También se puede verificar afectaciones por la termoeléctrica de la misma provincia. Asimismo, las fumigaciones de las plantaciones, principalmente de banano, son las que más afectan a la zona rural ecuatoriana. (MAE, 2010)

Por lo tanto, el Ministerio de Ambiente cumple su deber al rigirse por el marco normativo que regulan la gestión de la calidad del aire. Estos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Análisis legal de la gestión de la calidad del aire en el Ecuador.

Constitución:	Constitución de la República del Ecuador
Tratados internacionales:	convenio de viene para la protección de la capa de ozono, protocolo de Kyoto, etc.
Leyes:	ley orgánica de salud, ley orgánica de régimen municipal, ley de minería, ley de hidrocarburos, etc
Reglamentos y otras normas secundarias:	texto unificado de legislación ambiental secundaria, reglamento para la prevención y control de la contaminación ambiental
Reglamentos técnicos ecuatorianos:	reglamento técnico RTE INEN 03, INEN 017.
Ordenanzas:	Distrito metropolitano de Quito – ordenanza 213

Fuente: (MAE, Plan nacional de la calidad de aire, 2010)

1.1.1. Gestión de la calidad del aire en el mundo.

Existen varios sistemas para unificar el monitoreo de la calidad de aire en el mundo. Uno de estos proyectos se llama “World Air Quality Index” o por sus siglas (WAQI) que inició en 2007. En este proyecto se obtienen los datos de varias estaciones de monitoreo de gases ambientales y partículas finas en todo el planeta y se la muestran en una aplicación web. Existen más de 12 000 estaciones en más de 100 ciudades. En esta plataforma se calcula el índice de calidad de aire (ICA)

basándose en mediciones de material particulado de menos de $2.5\mu m$ y $10\mu m$ notados como $PM_{2.5}$ y PM_{10} respectivamente, ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO). Todas estas mediciones se basan en lecturas de una hora. (WAQI, 2019)

Este proyecto también vende estaciones que van desde los USD 100 hasta los USD 1000. A esto se le debe sumar el envío que está alrededor de USD 50 a Ecuador y los impuestos de ley. Cabe recalcar que estas estaciones solo miden material particulado. Si se desea colocar sensores de los demás gases el precio aumentaría. La diferencia de precios se basa en la conectividad que tienen las estaciones para enviar la información (WiFi, GSM, GPRS, Serial), sensores redundantes, baterías, paneles solares, almacenamiento físico y en la nube, etc.

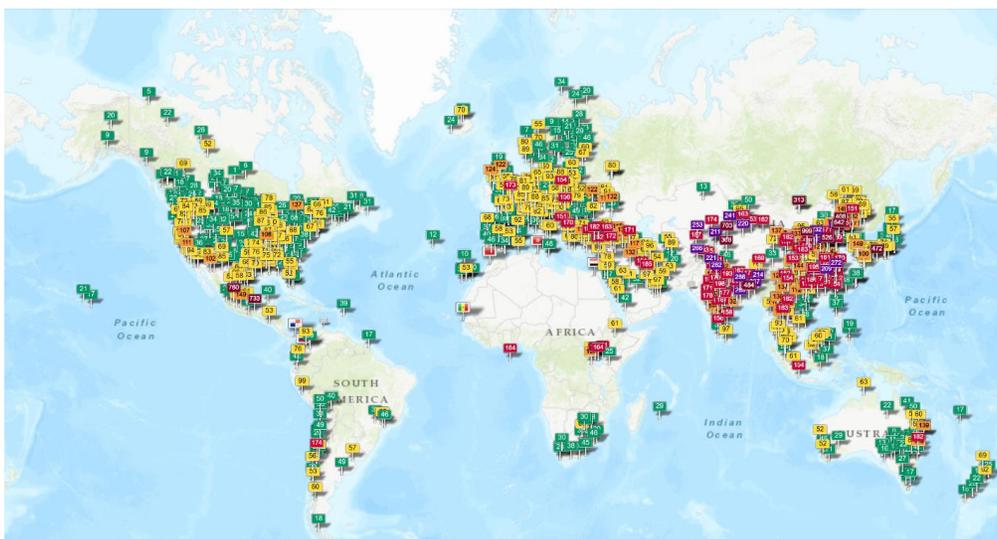


Figura 1. Mapa WAQI, 2019.

Fuente: (WAQI, 2019)

En la Figura 1 se muestra las estaciones de monitoreo de todo el mundo que están asociados a esta plataforma donde claramente se verifica que en los países en vías de desarrollo no se tiene

las suficientes estaciones para este propósito. Este proyecto es uno de los pocos proyectos globales, sin embargo, la mayoría de los gobiernos tienen algún sistema parecido propio. Por ejemplo, Europa tiene un portal web de la Agencia Europea del Medio Ambiente y cada país tiene una página web donde muestra solo de su territorio. Asimismo pasa con Estados Unidos, donde en la página web de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) por sus siglas en inglés se puede verificar en el apartado “AirNow” la calidad de aire de todo el país y la mayoría de estados tiene su propio sitio web para verificar la contaminación de su gobernación. El país con mayor número de sistemas de calidad de aire es China donde existen proyectos tanto de su gobierno como privados. Estos proyectos son, entre otros, “Índice de salud de la calidad de aire en Hong Kong”, “Centro de Monitoreo Ambiental de Shanghai”, en la página web del Instituto de Asuntos Públicos y Ambientales, etc. En Ecuador también se tiene proyectos para controlar este problema.

1.1.2. Gestión de la calidad del aire en el Ecuador.

La siguiente información se tomó del Plan Nacional de Calidad de Aire elaborado por el Ministerio del Ambiente. (MAE, Plan nacional de la calidad de aire, 2010)

Gestión en Quito

A pesar de que ha sido deficiente el monitoreo e inspección de la calidad de aire, desde 1999 ya se habían encontrado en Quito concentraciones de material particulado y monóxido de carbono (CO) superiores a la norma. Como resultado, se creó en 2004 la Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito (COPRPAIRE) que opera la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico (REMMAQ) y el Índice Quiteño de Calidad del Aire (IQCA) que se basa en material particulado fino menor a $2.5\mu m$ ($PM_{2.5}$), óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO),

dióxido de azufre (SO₂) y ozono (O₃). La red de la REMMAQ está compuesta por una red automática (RAUTO) con 8 (ocho) estaciones fijas que están en cada administración zonal del distrito y una adicional en la Secretaría de Ambiente en la Jipijapa. Esta información se envía a un centro de gestión para procesarlos y se visualizan en la página web de la Secretaría del Ambiente. En la Tabla 2 se muestra el nombre de las estaciones y los contaminantes que miden.

Tabla 2

Disponibilidad de analizadores de gases y partículas en las estaciones RAUTO

Estación	Nomenclatura	Contaminantes					
		CO	NO ₂	O ₃	SO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀
Carapungo	Car	X	X	X	X	X	X
Cotocollao	Cot	X	X	X	X	X	
Belisario	Bel	X	X	X	X	X	
Centro	Cen	X	X	X	X	X	
El Camal	Cam	X	X	X	X	X	
Guamaní	Gua	X	X	X			X
Los Chillos	Chi		X	X	X		
Tumbaco	Tum			X	X		X
San Antonio de Pichincha	Sap						X

Fuente: (Secretaría De Ambiente, 2018)

Las estaciones del RAUTO se encuentran localizadas como se muestra en la Figura 2.

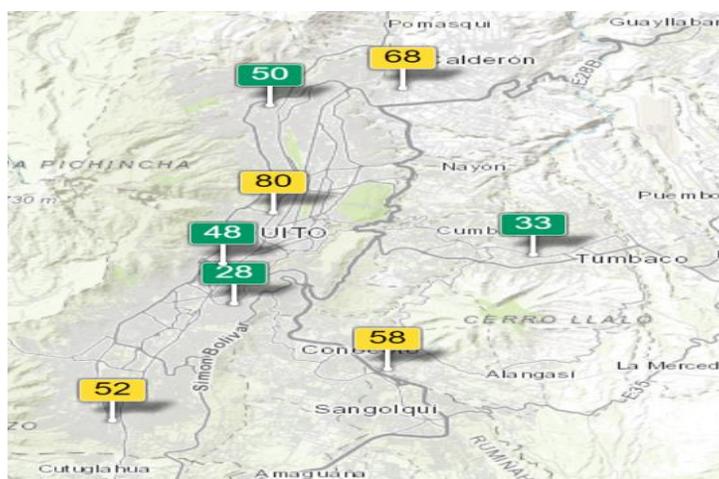


Figura 2. Estaciones RAUTO,

Fuente: (WAQI, 2019)

Además de la red automática, existe la red de monitoreo pasivo (REMPA) que opera desde 2005. Se encuentra en 43 (cuarenta y tres) puntos en el distrito metropolitano de Quito (DMQ) y miden

- NO₂: exposición de 30 días por mes
- O₃: exposición de 15 días, 2 veces al mes
- SO₂: exposición de 30 días por mes
- Benceno-tolueno y xileno (BTX): exposición de 30 días al mes.

Otra red se llama red de depósito (REDEP) conformada por 37 (treinta y siete) puntos de monitoreo que registran polvo atmosférico y, por último, se tiene a la red activa de material particulado (RAPAR) que opera desde mayo de 2003 y monitorea las partículas PM₁₀ durante 24 horas, cada seis días.

Con los datos de todas estas redes, se presenta cada año un informe presentado por la Secretaría de Ambiente de la Alcaldía de la ciudad. El último informe presenta que, tomando los datos de la REMMAQ del año 2017, el material particulado sigue superando los límites de la Norma Ecuatoriana de Calidad de Aire con un máximo de $21.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 6% que el año anterior. En Carapungo y San Antonio de Pichincha se encuentran los mayores valores de PM₁₀, mientras que todo el distrito se encuentra expuesta a valores más alto que la norma de PM_{2.5}. Con respecto al Ozono, se incumple la Norma en los Chillos, Cotocollao, Tumbaco, Guamaní, El Camal, Carapungo y el Centro histórico alcanzando valores de hasta $123 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el NO₂ no se supera el valor límite por promedio en una hora. Sin embargo, con respecto al promedio anual, en sectores con alto tráfico se supera la norma en lugares como La Marín, la Basílica, puente del guambra, San

Blas, Guajaló y Cumbayá. Para el caso de CO y SO₂ no existe superaciones de la norma en ninguna estación. (SecretaríaDeAmbiente, 2018)

Gestión en Guayaquil

En la ciudad no hay una red de monitoreo permanente. Sin embargo, con datos recientes del municipio se verifica que ha existido aumento en concentraciones de CO y SO₂.

Gestión en Cuenca

En Cuenca, en 1999, la Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable y Alcantarillado (ETAPA) fue la encargada del monitoreo de CO y NO_x. Luego, desde 2003 a 2005 se monitoreó las emisiones de vehículos con el apoyo de la Universidad de Cuenca. Posteriormente en 2006, el monitoreo de la calidad de aire en Cuenca estuvo a cargo de la Corporación para el Mejoramiento de Aire de Cuenca (CUENCAIRE). Este monitoreo muestra que en el centro histórico los niveles de $PM_{2.5}$ superan la norma nacional. Actualmente se cuenta con 20 estaciones de monitoreo ubicadas como se muestra en la Figura 3 y miden concentraciones de material particulado fino menor a $2.5\mu m$ y $10\mu m$ ($PM_{2.5}$ y PM_{10} respectivamente), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y ozono (O₃).

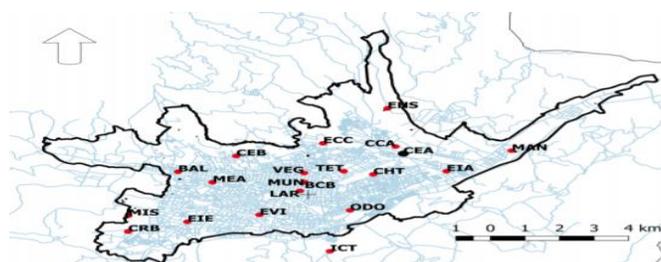


Figura 3. Localización de las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Cuenca
Fuente: (EMOV, 2019)

En este informe se muestra que en algunos casos se superó la norma con respecto a las partículas sedimentarias (PS). Las concentraciones de PM10 se superaron con respecto a la norma de calidad de aire de Cuenca, pero no a la de la OMS. Las concentraciones de PM2.5, CO, SO2, NOx y O3 no superan la norma nacional ni internacional.

Como se puede identificar, no existe monitoreo en otras ciudades que no sean Quito, Guayaquil o Cuenca. Y esto es razonable ya que, en países en vías de desarrollo, los mapas detallados de calidad de aire son escasos porque la red de monitoreo tradicional altamente precisa es muy costosa. De esta manera, el bajo número de estaciones de monitoreo resultantes generalmente no es capaz de capturar adecuadamente todo el espacio de un área determinada. (Schneider, Castell, Vogt, Dauge, & Lahoz, 2017). Sin embargo, se ha verificado que cuando se coloca instrumentos de monitoreo como una red y no como un sensor individual, pueden proporcionar información adicional sin precedentes sobre los patrones y las fuentes de contaminación del aire. (Popoola, et al., 2018)

En un proyecto realizado por Popoola, et al., (2018), se usa una red de sensores de bajo costo para monitorear las concentraciones de NO2, NO, CO y CO2 en el aeropuerto de Heathrow en Londres y cada nodo envía información mediante el Servicio General de Paquetes Vía Radio o (GPRS) por sus siglas en inglés a un servidor para su procesamiento. En este estudio se pudo distinguir entre la contaminación local y no local en el aeropuerto, demostrando que estos sistemas de bajo costo pueden ser aplicados a ciudades completas.

Asimismo, en un artículo publicado por Nagendra, et al., (2019), se realiza un sistema de monitoreo personal de calidad de aire en tiempo real usando sensores de bajo costo de CO, NO2, O3 y PM que envían su información mediante GPRS. Estas mediciones se realizaron cuando se

estaba viajando en bus y caminando varias veces al día. Se verificó que en la ciudad de Chennai, en India, se tiene baja concentración de contaminantes en la playa. Además, el PM2.5 fue alto en horas pico de tráfico llegando a $30.7 \mu g/m^3$. El NO2 no varió mucho.

Estos proyectos han realizado su comunicación mediante GPRS, sin embargo, en el artículo de Patel, et al., (2017) la información de los sensores de bajo costo se envían mediante WiFi.

En un estudio realizado por Lara, et al., (2019) se implementó un sistema de monitoreo de calidad de aire en el campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE para verificar la el incremento de CO2 que producen los reductores de velocidad en las vías internas del campus. Estos sensores forman una red conectados mediante ZigBee.

1.2. Justificación e Importancia

El aire limpio se considera un requisito básico para la salud y el bienestar humano y es uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible considerado por las Naciones Unidas. (UN, s.f.). La baja calidad del aire afecta gravemente a la salud de las personas (Ren, et al., 2017). Según el programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente, la contaminación del aire exterior es responsable de aproximadamente un millón de muertes prematuras cada año. (UNEP, 2010). Este problema no es solamente característico de los países de primer mundo, sino también de países en desarrollo ya que la baja calidad de aire en áreas urbanas se debe, entre otras causas, al crecimiento de la población, el tráfico vehicular, la mala infraestructura vial, la baja calidad del combustible, vehículos antiguos, y una inspección y monitoreo inadecuados (Gurjar, Bulet, Lawrence, & Lelieved, 2015).

Sin embargo, en el Ecuador no se han llevado a cabo “estudios epidemiológicos relacionados con la contaminación del aire” (MAE, Plan nacional de la calidad de aire, 2010) No obstante, la Fundación Natura ha realizado algunos estudios muy puntuales donde se identifica la necesidad de un plan de acción para controlar la calidad de aire en algunas ciudades del país. Uno de estos estudios en el año 2 000 mostró que los niños que estudian en el sector urbano de la ciudad de Quito tienen mayor riesgo de obtener una enfermedad respiratoria ya que “presentaron un promedio de carboxihemoglobina superior a los valores aceptados como normales (COHB 5%), lo que confirma que están ubicados en una zona de alta contaminación y tienen un riesgo cuatro veces mayor de presentar infecciones respiratorias agudas altas (IRAA) que los niños de un sector urbano periférico (COHB 2,5%) y rural (COHB 0,7%), que tienen niveles más bajos de carboxihemoglobina” (MAE, Plan nacional de la calidad de aire, 2010).

Esto también ocasiona un gasto público. “Uno de los últimos estudios realizados por la Fundación Natura en el 2003 referente al impacto económico de la contaminación del aire en Quito determinó que el costo de la contaminación atmosférica con respecto a la salud para el período 1991- 2000 ascendió a más de 34 millones de USD, considerando el presupuesto codificado, las admisiones hospitalarias, los costos ambulatorios, el ausentismo y la estimación de los años de vida saludable perdidos” (MAE, Plan nacional de la calidad de aire, 2010). Otro estudio en la ciudad de Cuenca mostró que en el centro histórico los niveles de COV (compuestos orgánicos volátiles), NO y SO₂ sobrepasan los niveles establecidos por la Norma Ecuatoriana de Calidad de aire que se basa en límites máximos establecidos por la OMS. Dicha norma surge “bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental del Ecuador” y tiene como objetivo “preservar la salud de

las personas, la calidad del aire ambiente, el bienestar de los ecosistemas y del ambiente en general (...) La norma también provee los métodos y procedimientos destinados a la determinación de las concentraciones de contaminantes en el aire ambiente” (MAE, Plan nacional de la calidad de aire, 2010) y prevé 3 alertas según la concentración de varios contaminantes en el aire para “limitar o prohibir las operaciones y actividades en la zona afectada, a fin de preservar la salud de la población.” (MAE, Norma Ecuatoriana de Calidad de Aire, 2011).

Bajo este concepto, es de importancia desarrollar un sistema de monitoreo de calidad de aire de bajo costo, en especial en un lugar de gran concurrencia de personas como es el campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, para prever posibles enfermedades respiratorias en alumnos, profesores y demás personal de la institución. El control y monitoreo de la calidad del aire son necesarios para implementar estrategias de reducción y estimular la conciencia ambiental entre los ciudadanos. (Borrego, et al., 2016). Más aún, los mapas detallados de calidad de aire son escasos ya que la red de monitoreo tradicional altamente precisa es muy costosa. De esta manera, el bajo número de estaciones de monitoreo resultantes generalmente no es capaz de capturar adecuadamente todo el espacio de un área determinada. (Schneider, Castell, Vogt, Dauge, & Lahoz, 2017). Por lo tanto, como parte de iniciativa de Smart Cities, Smart campus y el uso de las tecnologías de la información y comunicación, estas estaciones, deben ser de bajo costo, tener una alta eficiencia energética y prescindir de una gran infraestructura. Esto significa que tanto la transmisión de datos como los dispositivos de medición deberían cumplir estas características. De esta manera, se podrá monitorear el campus y entregar información a través de una plataforma web con el fin de tomar decisiones e implementar estrategias de mejora.

1.3. Alcance del Proyecto

Se pretende desarrollar un sistema de monitoreo del Internet de las cosas (IoT) de calidad de aire que use una red de sensores de bajo costo colocados en estaciones fijas dentro del campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Estas estaciones, son de bajo costo, tienen una alta eficiencia energética y prescinden de una gran infraestructura. Esto significa que tanto la transmisión de datos como los dispositivos de medición deberían cumplir estas características. Consecuentemente, se usa LPWAN (redes WAN de bajo consumo) para la transmisión de datos. La tecnología LoRaWAN, “Red WAN de largo alcance” por sus siglas en inglés, es posiblemente la LPWAN más usada en los últimos años para satisfacer las soluciones de transmisión de información a largo alcance y de baja potencia para IoT. Además, es económica ya que no se necesita de una gran infraestructura para la red y usa bandas industriales, científicas y médicas (ICM). (Adelantado, et al., 2017).

Esta red sensa dos (2) de los gases más comunes que indican la calidad de aire. Adicionalmente, debido a la relación de las concentraciones de los contaminantes y a las variables climatológicas, se coloca un sensor de temperatura en cada estación para que, posteriormente, se pueda obtener las concentraciones de acuerdo con la norma.

La información tomada por los sensores de los gases y temperatura de cada estación se envían inalámbricamente usando (LoRaWAN) a un nodo central Gateway, para ser enviada a Internet usando GPRS o Wireless Fidelity (WiFi), si existe al alcance una red inalámbrica, que use el estándar 802.11 a/b/g/n con acceso a Internet. Se pretende que esta información llegue a una base de datos en la nube para calcular la concentración de los gases y mostrarla mediante un mapa de calor en una aplicación web.

El desarrollo de este trabajo se lo realizará por etapas. En la primera, llamada etapa de calibración se diseña e implementa un dispositivo para probar los sensores, teniendo como referencia una estación de monitoreo de la Universidad – ESPE que está colocado en la parte superior de la garita de la entrada principal. Este dispositivo con los sensores se coloca en la misma toma de aire de la estación de referencia, para comparar los datos entregados.

En la segunda etapa, llamada etapa de adquisición de datos, se diseña e implementa la red de sensores. Esta red consta de 6 (seis) estaciones que tienen un sensor para CO y NO₂, uno de temperatura y un dispositivo LoRaWAN para enviar la información. La estación conocida como “nodo central” o Gateway tiene un dispositivo LoRaWAN Gateway para recibir la información de las demás estaciones y enviarlas a Internet para su análisis.

En la tercera etapa, llamada etapa de procesamiento y visualización, se realiza el almacenamiento de la información en una base donde se guardan los datos recibidos por las estaciones y se realizarán los cálculos para dibujar el mapa de calor de la contaminación del aire en la aplicación WEB.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Diseñar e implementar un sistema de monitoreo IoT de calidad de aire usando una red de sensores de bajo costo y tecnología LoRaWAN para el campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar el estado del arte sobre la calidad de aire, sus sensores e IoT.
- Realizar la caracterización de los sensores a utilizar y obtener sus curvas de calibración
- Diseñar y construir las estaciones de monitoreo de calidad de aire.
- Diseñar e implementar el sistema de monitoreo de calidad de aire en el campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE usando una red de sensores y LoRaWAN
- Diseñar una aplicación web para mostrar las mediciones obtenidas por los sensores mediante gráficos y mapas de calor de contaminación del aire.
- Desarrollar el protocolo de prueba del sistema
- Análisis de los resultados obtenidos.

1.5. Descripción General del Proyecto

En la primera sección de este escrito se observa la introducción, justificación, alcance y los objetivos de este proyecto de investigación.

En la segunda sección se realiza un análisis del estado del arte sobre LoRaWAN, IoT, contaminación del aire, sensado de gases, sensores, servidor web, base de datos, etc.

En la tercera sección, se procede con el diseño del sistema de monitoreo. Para esto, se diseña la red, las estaciones, el nodo Gateway y se desarrolla la aplicación web para almacenar y mostrar los datos. Paralelamente, se realiza la caracterización de los sensores y su curva de calibración. Luego, se prueba la comunicación y el sensado de las estaciones y se realizan correcciones. Al finalizar, se monta todo el sistema en el campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerzas

Armadas – ESPE y se efectúan las pruebas finales. Finalmente se realiza un análisis de los resultados de las pruebas y los datos obtenidos.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DEL ARTE.

2.1. Introducción.

Se debe tener conciencia que, a pesar de ser un fenómeno que muchas veces pasa desapercibido, la contaminación del aire es un problema del cual hay que estar atentos y adelantarse a sus efectos negativos ya que, como afirma Querol, (2008), “los indicadores que mejor reflejan la calidad de vida de una sociedad son los medioambientales”. Es así que a lo largo del capítulo se presentan temas importantes para la realización de este proyecto de investigación enfocado en el monitoreo de la contaminación, dispositivos que sensan la calidad de aire, el Internet de las cosas (IoT) y la tecnología LoRaWAN. Estos temas son fundamentales para poder realizar un sistema de monitoreo de confiable que siga las normas internacionales y nacionales de calidad de aire.

2.2. Contaminación

2.2.1. Concepto

La contaminación se origina cuando se incorpora cualquier tipo de organismo, sustancia o energía en un medio, afectando las características de este y provocando que no sea seguro (de la Caridad, 2013). La contaminación cambia negativamente las propiedades del medio, que puede ser un ser vivo o un ecosistema, y disminuye su capacidad para degradarlas o, por último, asimilarla. La introducción de esta contaminante puede ser consecuencias de actividades humanas, también conocidas antropogénicas o de forma natural como erupciones volcánicas o polen en suspensión. Los contaminantes puede ser sustancias químicas, radiaciones como la luz visible o el calor, etc. (Delgadillo, et al., 2011)

Según la Agencia de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para los Refugiados, (UNHCR, 2018) se tiene varios tipos de contaminación, sin embargo, los que más se destacan son:

- Contaminación del aire.
- Contaminación del agua.
- Contaminación del suelo.
- Contaminación acústica.
- Contaminación lumínica.

Es por ello que mientras más personas vivan en un lugar, más probable es que exista cualquier de estos tipos de contaminaciones que generalmente se originan por “actividades industriales, mineras, agropecuarias, artesanales y domésticas” (Delgadillo, et al., 2011) y son un riesgo para los seres vivos.

El crecimiento económico y de la población humana, junto con la globalización, han originado que se evolucione como especie para tener vidas más sofisticadas y fáciles, sin embargo, esto conlleva riesgos ambientales (Temkin, Ávila, & Martínez, 2018). Por esta razón, es importante conocer dónde se origina la contaminación, sus peligros y cómo se puede disminuir el impacto negativo de dichos contaminantes para evitar daños en la salud o en la calidad de vida de las personas.

Para el desarrollo de este documento, se analizará la contaminación del aire ya que es el área de estudio de este proyecto, no obstante, a manera general, se colocará también información sobre los demás tipos de contaminación para que se tenga un panorama amplio de análisis sobre este tema.

2.2.2. Contaminación del aire

Como afirma Ballester, Tenías, & Pérez, (2017), la atmósfera, que es la parte del ambiente con la que el organismo humano está permanentemente en contacto, ha tenido una gran importancia a partir del siglo XX en los países que se fueron industrializando ya que se comenzó a asociar las muertes tempranas con la contaminación atmosférica. Un ejemplo muy claro fue la llamada *Gran Niebla* de Londres que ocurrió de la siguiente manera: en el mes de diciembre de 1952 la capital de Inglaterra estaba pasando una fuerte ola de frío que hizo que sus habitantes quemaran más carbón de lo habitual y, debido a los problemas económicos de la posguerra, el carbón que se usaba era de baja calidad. Como resultado, se originó una niebla muy negra que impedía el desarrollo normal de la ciudad. Inicialmente no se tomó como algo grave, no obstante, en las semanas siguientes alrededor de 12 000 personas murieron a causa de infecciones respiratorias, en su mayoría niños. Con este precedente, se comenzó a adoptar políticas de control de la contaminación en Europa. (Ballester, Tenías, & Pérez, 2017)

La contaminación, entonces, es la presencia en la atmósfera de elementos químicos o biológicos que alteran su composición, es decir, son partículas sólidas, líquidas o gases que podrían estar en el aire y que perjudican a los seres vivos, afectando su salud o bienestar (UNHCR, 2018).

a. Clasificación de los contaminantes

Según Oyarzún, (2010), los contaminantes se clasifican según.

Su estado físico:

- Gases.
 - o Monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos, ozono (O_3), etc.
- Partículas
 - o Polvo, aerosoles, etc.

Su fuente de emisión:

- Primarios: aquellos que están presentes tal y como fueron emitidos
- Secundarios: cuando se originan a partir de una reacción química del primario.

Su tamaño:

- Partículas suspendidas o respirables: son de diámetro menor o igual a $10 \mu m$ (PM_{10}) y pueden introducirse en las vías respiratorias
- Partículas finas: de diámetro menor o igual a $2.5 \mu m$ ($PM_{2.5}$) y alcanzan fácilmente los alvéolos y a otros organismos por circulación sanguínea.
- Partículas ultrafinas: de diámetro menor o igual a $0.1 \mu m$

Todos estos contaminantes tienen un efecto adverso sobre la salud, principalmente en niños y ancianos.

b. Efectos en la salud

Según Oyarzún, (2010), en su artículo llamado “Contaminación aérea y sus efectos en la salud”, los efectos que tiene la contaminación del aire en la salud han sido estudiados en modelos experimentales donde se han comparado varios segmentos de la población como personas sanas y

enfermas. De ahí se sabe que los efectos dependen de la duración de la exposición, la concentración del contaminante (dosis) y la susceptibilidad de la persona.

La dosis que se recibe depende de la ventilación minuto como se muestra en la Ecuación 1

$$De = Con \cdot t_{exp} \cdot V_{min} \quad EC (1)$$

Donde:

De : Dosis efectiva

Con : Concentración

t_{exp} : Tiempo de exposición

V_{min} : Ventilación minuto (volumen de gas inhalado por minuto)

Por otro lado, la cantidad de contaminante que recibe una persona se eleva en las siguientes situaciones:

- Aumento de temperatura y humedad
- Aumento de la altitud
- Aumento de la progesterona en el embarazo
- Estados febriles (fiebre)
- Ejercicio físico

Estas causas provocan que la frecuencia de respiración aumente, por ende, ingresa más contaminante a los pulmones afectando tanto al sistema respiratorio como a los otros sistemas y órganos del cuerpo. (Oyarzún, 2010)

Efectos de los contaminantes sobre el sistema respiratorio

Los efectos de los contaminantes sobre el sistema respiratorio afectan a toda la población que esté expuesta a estos, sin embargo, los niños son los más susceptibles a enfermarse por la calidad de aire. Por ejemplo, según Oyarzún, (2010), en Chile se ha demostrado que un aumento de la concentración de las partículas finas ($PM_{2.5}$) por encima de los $70\mu g/m^3$ aumenta las consultas por neumonía infantiles.

Además, en el público en general, se demostró que por cada $50\mu g/m^3$ de elevación de la concentración de partículas suspendidas (PM_{10}) en 24 horas, aumenta un 3% de la mortalidad y con una elevación de $10\mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ aumenta en un 5% obtener el síndrome bronquial obstructivo. (Oyarzún, 2010).

Se debe saber también que, según Téllez, Rodríguez, & Fajardo (2006), el monóxido de carbono (CO) “Es considerado uno de los mayores contaminantes de la atmósfera terrestre, y uno de los mayores problemas ambientales de América Latina”. Además, Omaye (2002) informa que en Estados Unidos alrededor de 40 000 personas necesitan atención médica debido a intoxicación por CO . También se debe aclarar que la asfixia por CO_2 no es muy frecuente, aunque una alta concentración en un espacio cerrado puede ser de alto riesgo. (Industrial Scientific Corp., 2018)

En la Tabla 3 se muestra los efectos adversos de los contaminantes aéreos sobre el sistema respiratorio.

Tabla 3*Efectos adversos de los contaminantes aéreos sobre el sistema respiratorio.*

Contaminante	Efecto a corto plazo	Efecto a largo plazo	Fuentes de emisión
Material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$	Aumento de morbilidad respiratoria, disminución en la función pulmonar, interferencia en mecanismos de defensa pulmonar: fagocitosis, etc	Menor desarrollo de la estructura y función del sistema respiratorio, mayor riesgo de cáncer en la edad adulta (HAPs)	Aerosoles, polvo, suspensión de suelos, construcción y demolición, brisa marina, ceniza de carbón.
Particulado $PM_{0.1}$	Mayor respuesta inflamatoria. (comparado con PM_{10} y $PM_{2.5}$), pasaje rápido a la circulación y a otros órganos, etc.		<i>Condensación de gases, combustión de alta temperatura</i>
Ozono (O_3)	Disminución de frecuencia respiratoria y disminución de CVF y VEFI Alveolitis neutrofílica, aumento de permeabilidad e hiperreactividad bronquial, alteración del epitelio alveolar, etc.	Daño de células epiteliales, “bronquiolización” alveolar Disminución del desarrollo de CVF y VEF1	Reacción de la luz solar con óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre.
Dióxido de azufre (SO_2)	Obstrucción bronquial, hipersecreción bronquial, etc.	Bronquitis crónica	Combustión de productos petrolíferos y carbón
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	Aumento de síntomas respiratorios y exacerbaciones de asma, aumenta la respuesta a la provocación con alérgenos, disminución de la actividad mucociliar, etc.	Posible decremento del desarrollo pulmonar	Vehículos motorizados, combustión de carbón, petróleo o gas natural, soldadura al arco, etc.
Monóxido de carbono (CO)	Disminución en la capacidad de ejercicio		Vehículos motorizados, combustión de carbón, petróleo o gas natural.
Plomo (Pb)	Alteración del epitelio bronquiolar (células de Clara)		

Fuente: (Oyarzún, 2010)

Efectos de los contaminantes sobre otros sistemas orgánicos.

A pesar de ser varios los efectos adversos que se tiene por la contaminación del aire, se ha puesto énfasis en los efectos cardiovasculares contraídas principalmente por la contaminación ambiental por PM_{10} y CO . Estas enfermedades suelen ser arritmias, insuficiencias coronarias, arterioesclerosis, etc.

Estos contaminantes pueden ser cancerígenos. Algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP 's) y los materiales particulados generados por la combustión incompleta de petróleo, gasolina, leña, carbón, etc., han sido catalogados como cancerígenos por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer. Estos HAP 's pueden reaccionar con el NO_2 generando sustancias altamente mutágenos. (Oyarzún, 2010).

Según Oyarzún, (2010), los sistemas con más afectaciones por la contaminación son los que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

Sistemas afectados por contaminación

Sistema	Contaminante
Cardiovascular	Material particulado: “Disminución de la variabilidad en la frecuencia cardíaca ante el estrés”
	Monóxido de carbono CO : “Interfiere el transporte de O_2 por la hemoglobina”
	Ozono O_3 : “Comunicación interventricular”
Unidad materno – Fetal	Monóxido de carbono CO y $P_{2.5}$: bajo peso y talla en el nacimiento
Sistema nervioso	Monóxido de carbono CO : “Cefalea, irritabilidad, disminución de percepción auditiva y visual. Compromiso progresivo y letal de conciencia en concentraciones altas”
	Plomo: “Hiperquinesia, trastornos del aprendizaje; encefalopatía; cólicos intestinales”
	Ozono O_3 : “Daño cerebeloso en células de Purkinje”
Renal	Cadmio y vanadio: “Toxicidad renal”
	Plomo: Tubulopatía
Hematopoyético	Plomo: Anemia
Óseo	Plomo: descalcificación

Contaminación en interiores

Los contaminantes atmosféricos pueden también afectar al aire intradomiciliario, sin embargo, no es la principal causa de contaminación y depende mucho del nivel socioeconómico de sus ocupantes. Las principales fuentes de contaminación son el tabaco, convivencia con animales, quema de combustibles, entre otros.

Este problema es más grave en personas que salen poco de sus casas como bebés o niños, ancianos, etc. Ya que no suele existir una adecuada ventilación en interiores.

Oyarzún, (2010) resume los efectos en la salud de algunos contaminantes intradomiciliarios:

- **Humo de tabaco:** siendo la principal causa de contaminación, en niños provoca infecciones respiratorias, reduce el crecimiento pulmonar y aumenta el riesgo de desarrollar otitis media y de muerte súbita. En los adultos, se aumenta el riesgo de cáncer pulmonar e isquemia coronaria.
- **Humo de combustión de leña:** puede pasar fácilmente a bronquiolos y alvéolos, yendo directamente a la sangre. Puede ser mutagénicos.
- **Dióxido de nitrógeno NO_2 :** en el domicilio, su principal fuente es la combustión de gas. Es adverso para la salud humana
- **Monóxido de carbono CO :** en interiores, sus fuentes son el humo de tabaco, gas, vecindades con garajes cerca y con alto flujo de vehículos. Puede causar muerte por hipoxia.
- **Dióxido de carbono CO_2 :** es producto del metabolismo animal. Otras fuentes en interiores son el gas y humo de tabaco. Causa hiperventilación, sudoración, aumento de temperatura y compromiso gradual de conciencia.

- **Contaminantes biológicos:** suelen microscópicos como virus, bacterias, hongos, etc. o insectos como pollas, pulgas, ácaros, etc. Afectan las vías respiratorias infectándolas.

Por lo tanto, este proyecto de investigación se enfoca en contaminantes extradomiciliarios ya que se va a medir en el exterior de las construcciones del campus Sangolquí de la Universidad. De esta manera, gases como el CO_2 quedan fuera del estudio ya que son originados principalmente por el metabolismo de seres vivos y está presente en su mayoría en interiores.

c. Niveles de contaminantes aéreos permitidos en Ecuador

En la Tabla 5, se muestra las concentraciones máximas permitidas en valores sujetos a las condiciones de referencia de 25°C y 760 mm Hg según el Ministerio de Ambiente del país. Este ente establece la frecuencia de revisión de los valores para que no sobrepasen los descritos a continuación.

Tabla 5

Concentraciones máximas permitidas según la Autoridad Ambiental Nacional.

Contaminante	Norma	Unidad	Periodo de evaluación
PM_{10}	50	$\mu g/m^3$	1 año
	100	$\mu g/m^3$	24 horas
$PM_{2.5}$	15	$\mu g/m^3$	1 año
	50	$\mu g/m^3$	24 horas
Dióxido de azufre SO_2	60	$\mu g/m^3$	1 año
	125	$\mu g/m^3$	24 horas
	500	$\mu g/m^3$	10 minutos
Monóxido de carbono CO	10 000	$\mu g/m^3$	8 horas no más de una vez al año
	30 000	$\mu g/m^3$	1 hora no más de una vez al año
Ozono O_3	100	$\mu g/m^3$	8 horas no más de una vez al año
Dióxido de nitrógeno NO_2	40	$\mu g/m^3$	1 año
	200	$\mu g/m^3$	1 hora

Fuente: (MAE, 2010)

d. Correcciones de la medición de acuerdo con la localidad

Según el MAE (2011), se debe corregir las concentraciones según las condiciones de la localidad donde se obtuvo dichas mediciones con la ecuación 2

$$C_c = C_o \frac{760[\text{mmHg}]}{P_{bl} [\text{mmHg}]} \frac{(273+t[^\circ\text{C}])(^\circ\text{K})}{298[^\circ\text{K}]} \quad EC (2)$$

Donde

- C_c : concentración corregida
- C_o : concentración observada
- P_{bl} : presión atmosférica local en milímetros de mercurio
- $t^\circ\text{C}$: temperatura local en grados centígrados

e. Planes de alerta, alarma y emergencia de la calidad del aire en Ecuador.

En el Ecuador existe un plan de alerta, alarma y emergencia ante situaciones críticas de contaminación del aire. De esta forma se podrá desde limitar hasta prohibir las actividades en el sector de la siguiente manera

- Nivel de alerta: se informa al público mediante medios de comunicación y se limita la circulación vehicular y fuentes fijas de combustión en la zona.
- Nivel de alarma: Se informa al público mediante medios de comunicación y se restringe o prohíbe la circulación vehicular y las fuentes fijas de combustión en la zona.
- Nivel de emergencia: Se informa al público mediante medios de comunicación y se prohíbe la circulación y estacionamiento de vehículos. También se prohíbe la operación de fuentes

fijas de combustión en la zona y se considera prohibir en toda la región bajo responsabilidad de la Autoridad Ambiental de Aplicación Responsable.

(MAE, 2011). En la Tabla 6 se muestra las concentraciones de contaminantes que definen estos niveles

Tabla 6

Concentraciones de contaminantes que definen niveles de alerta, alarma y emergencia.

Contaminante	Alerta en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Alarma en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Emergencia en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Periodo de tiempo
<i>PM</i>₁₀	250	400	500	24 horas
<i>PM</i>_{2.5}	150	250	350	24 horas
Dióxido de azufre <i>SO</i>₂	200	1000	1800	24 horas
Monóxido de carbono <i>CO</i>	15000	30000	40000	8 horas
Ozono <i>O</i>₃	200	400	600	8 horas
Dióxido de nitrógeno <i>NO</i>₂	1000	2000	3000	1 hora

Fuente: (MAE, 2011)

f. Formas de medición

Según Barrón (2010), una de las formas para detectar los problemas causado por la baja calidad del aire es la monitorización atmosférica. Esta consta de metodologías para muestrear, analizar y procesar en forma continua las concentraciones de sustancias o contaminantes del aire. Una estación de monitorización atmosférica consta de varios dispositivos destinados a la medición de concentraciones de varias sustancias y algunos parámetros meteorológicos como la temperatura. Estas estaciones se deben ubicar de acuerdo con criterios y objetivos de la monitorización y comúnmente se encuentran agrupados en redes con el propósito de cubrir grandes extensiones. Los datos recuperados por estas redes sirven para mostrar las características del entorno y así poder cumplir con los objetivos de la monitorización como:

- Estándares de calidad de aire: generar lineamientos para evitar la contaminación del aire
- Estudios epidemiológicos que relacionen la baja calidad del aire con la salud de las personas: con fines de investigación para tomar acciones de control
- Especificar tipos y fuentes emisoras de contaminantes: identificarlos para activar procedimientos de emergencia y evitar episodios contaminantes
- Tomar acciones de control, etc.

Formas de medir los contaminantes.

Según el MAE (2011) las mediciones deben ser lo más continuas posibles y se debe obtener promedios o máximos de las concentraciones según la naturaleza del contaminante para verificar si pueden llegar a ser peligrosos como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7

Formas de medir los contaminantes

Contaminante	Medición
Partículas sedimentarias	Máxima concentración de una muestra colectada durante 30 días de forma continua
PM10	Promedios aritméticos de todas las muestras en un año y en 24 horas
PM2.5	Promedios aritméticos de todas las muestras en un año y en 24 horas
SO2	Promedios aritméticos de todas las muestras en un año, en 24 horas y en 10 minutos
CO	Promedios aritméticos de todas las muestras en una hora y en ocho horas
O3	Promedios aritméticos de todas las muestras en ocho horas
NO2	Promedios aritméticos de todas las muestras en un año y el máximo en una hora

g. Estudios sobre la calidad de aire.

Según Terezinha & León, (2017), se han desarrollado innumerables estudios sobre la contaminación atmosférica y el impacto negativo sobre la salud humana y animal. Incluso, la

OMS, (2014) alertó que la contaminación del aire, que incluye sustancias como el PM, O₃, NO₂ y el SO₂ causan anualmente 3.7 millones de muertes prematuras en todo el mundo.

La contaminación del aire es la responsable del aumento de la mortalidad y morbilidad de enfermedades respiratorias y del corazón en las grandes ciudades (Pope & Dockery, 2016). También, Pereira, Alves, Pinto, & Montenegro, (2010) informan que la toxicidad de varios contaminantes ambientales son investigados por ser cancerígenos.

En otros estudios como el de Miraglia & Georges (2014), cuantificaron aproximadamente 20 000 muertes al año en 29 áreas urbanas de Brasil causadas por los contaminantes aéreos.

Por otro lado, Chen, et al., (2012) demostraron que los efectos agudos por contaminación aérea son, entre otros, hiperractividad bronquial, irritación de nariz y garganta, hospitalizaciones, alteraciones pulmonares, etc.

De igual manera Woodruff, Darrow, & Parker (2008) en un estudio desarrollado en Estados Unidos, demostraron que la contaminación del aire es un riesgo para la mortalidad postneonatal y que el O₃ está asociado con la muerte súbita.

En España y con una muestra de 2 000 participantes Aguilera et al. (2013) informó que niños cuyas madres estaban expuestas a contaminantes provenientes de vehículos como el NO₂ y el benceno durante el embarazo tenían más riesgo de padecer infecciones en las vías respiratorias y otitis. De igual manera, en otro estudio con niños recién nacidos, se encontró una disminución del peso al nacer si han estado expuestos a contaminación durante la gestación. (Pedersen, et al., 2013)

En Ecuador, según Peña (2018) este tema es uno de los menos estudiados. Por eso razón, se realizó un estudio de la contaminación atmosférica en Quito y Cuenca donde demostró que “los promedios de PM10 superan la guía de la Organización Mundial de la Salud. La exposición a PM10 en Cuenca incrementa el riesgo de mortalidad por cáncer de pulmón y enfermedades cardiopulmonares en 3 al 9%.” (Peña , 2018).

Sin embargo, Vallejo, González & Mena (2016) demuestran que a pesar de que la contaminación del aire es mayor en zonas urbanas, en ciudades intermedias como Pujilí, cerca de Quito, también hay una problemática. En su estudio informaron que en el sector de Bellavista, en Pujilí, existen niveles de material particulado sedimentario superiores a la norma de calidad de aire a nivel internacional.

Finalmente, en un estudio realizado por Reina, et al. (2018), se demostró que en las calles Espejo y Guayaquil, en el centro de la ciudad de Quito, existen picos alarmantes en la concentración del SO₂ y una alta concentración de CO al final de la calle Espejo.

A parte de la contaminación del aire existen otros tipos de contaminaciones que afectan la salud humana.

2.2.3. Contaminación del agua

La contaminación del agua responde a cambios físicos, químicos, biológicos, microbiológicos y radiológicos de los recursos hídricos. (OMS, 2016)

El peligro microbiano en el agua es la principal causa de contaminación y una gran preocupación en países desarrollados y en desarrollo. Por ende, uno de los mayores esfuerzos que se realiza es la mitigación de este peligro.

a. Efectos en la salud

Según Barceló & López (2012), los efectos de la contaminación química del agua son, entre otros:

1. Acción tóxica y cancerígena
2. Incidencia sobre la producción de alimentos
3. Limitación del uso del agua con fines recreativos
4. Reducción de las posibilidades de su uso industrial y agropecuario

2.2.4. Contaminación del suelo

El suelo es un recurso natural no renovable, esencial del ambiente donde se desarrolla la vida y que cambia con el tiempo. En este viven varios organismos y es un lugar de intercambio de energía y de materia orgánica (Zúñiga, 1999).

La contaminación del suelo se produce, principalmente, por productos químicos que se filtran por la tierra. De estos se destacan el petróleo o los metales pesados y los herbicidas (UNHCR, 2018).

a. Efectos en la salud

Las actividades humanas como la agricultura o la minería usan de forma más invasiva el suelo, cambiándolo de forma no natural y, obviamente, contaminándolo mediante el uso de fertilizantes, plaguicidas o directamente con metales pesados.

El uso inadecuado del suelo limita sus capacidades para almacenar nutrientes y puede pasar a ser tóxico para animales y seres humanos. Por lo tanto, degrada su posibilidad de ser usado para agricultura, ganadería u ocio. (Silva & Correa, 2009)

2.2.5. Contaminación acústica

El término “contaminación acústica” está acuñada desde la conferencia de la ONU sobre el medio ambiente humano en 1972. La contaminación acústica está asociada a una alta intensidad de ruido o un sonido indeseado en cierto lugar y que produce una sensación desagradable, originando daños en la salud de la población que esté expuesta a este (OMS, 1999).

Los niveles de ruido se miden en decibeles ponderados (*dBA*) donde se filtran ciertas frecuencias altas y bajas siendo más fiel a la percepción del ser humano. Según Guijarro, Terán, & Valdez (2015), estos niveles oscilan ente:

- *0dBA* : nivel mínimo auditivo
- *140 – 160dBA* : nivel máximo que tolera el humano

a. Efectos en la salud

Según García, García, & García (2010), “los efectos del ruido en la salud se pueden clasificar como daño auditivo, daño psicosocial y alteraciones en órganos distintos a la audición”

Daño auditivo

- Fatiga auditiva: es el descenso de la capacidad auditiva de forma temporal.
- Hipoacusia permanente: es el descenso de la capacidad auditiva de forma permanente por exposición por largos tiempos a un ruido

- Trauma acústico agudo: es el resultado de una exposición puntual a un ruido de elevada intensidad como una explosión. Puede ser irreversible

Alteraciones en órganos distintos a la audición

Se expone al ruido pueden llegar a afectarse sistemas y órganos diferentes a los de la audición.

Los problemas que se pueden tener pueden ser, según Guijarro, Terán, & Valdez (2015):

- Infertilidad
- Bajo peso al nacer
- Prematuridad
- Taquicardia
- Crisis hipertensivas
- Aumento del cortisol
- Aumento del ritmo respiratorio
- Estrés
- Perturbación del sueño

Efectos psicosociales

- Fatiga
- Estrés
- Irritabilidad
- Astenia
- Susceptibilidad
- Agresividad

- Trastornos de la personalidad y carácter

2.2.6. Contaminación lumínica

Desde 1879 se ha usado medios para iluminar las calles de las ciudad y ambientes interiores. La introducción del foco incandescente por parte de Edison fue un avance muy grande para la humanidad. De esta manera, se pudo tener una vida nocturna propia de la sociedad industrializada. Sin embargo, la iluminación artificial ha acarreado problemas desde su introducción. Estos problemas son, por ejemplo, que ya no se puedan ver las estrellas en el cielo o la gran vía láctea, o problemas más grandes como afectaciones a la salud de humanos, plantas y animales. Además, este requerimiento de energía produce que se usen recursos para mantenerla encendida. (Chepesiuk, 2019)

a. Efectos en la salud

Moreno & Moreno, (2016), afirma que los peligros para la salud pueden ser:

- Enfermedades cardiovasculares
- Síndrome metabólico
- Deterioro cognitivo
- Trastornos afectivos
- Envejecimiento acelerado
- Riesgo de cáncer de mama, próstata y colon

2.3. Sensores

Los sensores están presentes en casi la totalidad de las aplicaciones electrónicas que se tiene hoy en día, por lo tanto, cumplen un papel fundamental en el mundo de la electrónica. Como afirma Pallás (2003), estos dispositivos de medición son indispensables para la automatización de la industria, en robótica, ingeniería experimental, control ambiental, vehículos, agricultura, medicina, telecomunicaciones, cámaras fotográficas, etc.

Un sensor es un dispositivo electrónico capaz de detectar estímulos externos o magnitudes físicas y transformarlas en señales eléctricas para su procesamiento. Muchas veces, sensor y transductor son usados como sinónimos, sin embargo, el sustantivo “sensor” tiene un significado más amplio. Un sensor adquiere información de magnitudes que no serían detectadas solo por el ser humano, mientras que el transductor transforma la energía mecánica, eléctrica, etc. a una forma de energía diferente pero dependiente de la entrada. (Pallás, 2003)

2.3.1. Tipos de sensores

Según Serna, Ros, & Rico (2010), existe una gran variedad de sensores, por lo que es importante clasificarlos según su naturaleza o funcionamiento como se muestra en la Tabla 8, 9, 10 y 11

Tabla 8

Clasificación sensores funcionamiento

Según su funcionamiento	
Moduladores o activos	Se deben energizar para que puedan funcionar. La señal de salida procede de una fuente externa.
	Su sensibilidad se puede cambiar mediante la energía de alimentación.
Generadores o pasivos	No necesitan de alimentación externa, sino que las propias condiciones medioambientales hacen que funcione.
	La energía de salida proviene únicamente de la señal de entrada.

Tabla 9*Clasificación sensores señal*

Según la señal que otorga	
Analógico	Su salida de tensión, corriente o impedancia toma valores no discretos entre un valor máximo y uno mínimo. Su valor está en la magnitud de esta señal.
Digital	Su salida es una señal discreta Suelen tener mayor fidelidad y fiabilidad.

Tabla 10*Clasificación sensores naturaleza*

Según la naturaleza de su funcionamiento	
De posición, presencia, distancia	Cambian su valor de salida dependiendo del lugar que ocupa en relación a otro elemento que lo compone
Fotoeléctricos y fotoresistivos	Su salida cambia según la luz que incide en este.
Magnéticos	Aquellos que experimentan variaciones según el campo magnético en el que está inmerso
Temperatura	Su salida varía según la temperatura donde están.
Humedad	Experimenta variaciones en función del nivel de humedad que exista.
Presión	Miden la presión a la que son sometidos.
Movimiento	Varían según el movimiento que tienen
Caudal	Miden el volumen de cierto líquido que pasa por este.
Químicos	Experimentan variaciones según los agentes químicos externos como gases o líquidos.

Tabla 11*Clasificación sensores fabricación*

Según los elementos utilizados en su fabricación
Mecánicos
Resistivos
Capacitivos (capacitores)
Inductivos (bobinas)
Piezoeléctricos
Semiconductor

Teniendo en cuenta estos tipos de sensores, en la Tabla 12, se muestra los tipos de sensores que habitualmente se usan según la aplicación

Tabla 12*Aplicación - tipo de sensor*

Aplicación	Tipos de sensores
Gases y humos	Químicos
Iluminación	Fotoeléctricos o fotoresistivos
Temperatura	Semiconductores
Humedad	Resistivos, capacitivos

CONTINÚA 

Posición	Mecánicos, resistivos, magnéticos, acelerómetros
Presencia	Magnético, infrarrojo, ultrasónicos
Distancia	infrarrojo, ultrasónicos
Presión	Piezoeléctricos, resistivos

Fuente: (Serna, A., Ros, F., & Rico, J. 2010).

2.3.2. Sensores químicos

Ya que el objeto de estudio es la detección de gases, se profundiza en los sensores químicos que son usados para medir la concentración de sustancias químicas en líquido o en vapor. Estos sensores son una herramienta muy útil para el control y monitoreo de ciertas sustancias tóxicas, consideradas por Escalona, Manganiello, López, & Vega (2012) como “contaminantes de referencia entre los que se encuentran monóxido de carbono CO , dióxido de nitrógeno NO_2 , ozono O_3 y dióxido de azufre SO_2 , así como otros compuestos de impacto como CO_2 , compuestos orgánicos volátiles COV , hidrocarburos HC , etc.”

a. Clasificación de sensores químicos

Se clasifican según el transductor que lo conforman y puede ser piezoeléctricos, electroquímicos, ópticos. Según Escalona, Manganiello, López, & Vega, (2012), estos son:

Sensores piezoeléctricos

Estos tipos de sensores sirven para medir los cambios en la masa que son consecuencia de la interacción entre químicos y el sensor. Básicamente, se estructura es un piezoeléctrico que oscila y cuando detecta un cambio en la masa de la especie química, cambia también su frecuencia base.

Según su modo de vibración, existen

- Microbalanzas de cristal de cuarzo (QCM)

- Sensores de onda acústica superficial (SAW)

Suelen usarse en determinaciones de CO , CO_2 , SO_2 , NO , NO_2 y NH_3

Sensores electroquímicos

A su vez, se clasifican en:

- Potenciométricos
 - Consta de un electrodo indicador que tiene una relación con la concentración del químico en forma de vapor o químico y un electrodo de referencia. Los potenciométricos se clasifican en
 - Sensores basados en electrodos selectivos de iones (ISE)
 - Sensores basados en transistores de efecto de campo
 - Se centran en la medición de CO_2 , NO y NO_2
- Voltimétricos
 - Se aplica una tensión al sensor y se mide la corriente proporcional al elemento químico de interés.
 - Se usan generalmente en la detección de CO_2 , CO , SO_2 y NO_x
- Conductimétricos
 - En presencia del elemento químico de interés existe un cambio en la conductividad eléctrica de una de sus capas.
 - Se centran en la detección de COV

Sensores ópticos

Detectan el cambio de un haz de luz u otra onda electromagnética en presencia de ciertos elementos químicos. Estas ondas suelen ser infrarrojos o ultravioletas. Estas últimas trabajan por fotoionización.

Suelen usarse generalmente para *CO*, *CO₂*, *SO₂*, *NO*, *NO₂* y *COV*.

2.3.3. Características

Al momento de elegir un sensor se deben tener en cuenta varios aspectos para obtener el dispositivo adecuado según la aplicación que se desea. Serna, Ros, & Rico, (2010), muestran los aspectos que se deben tomar en cuenta al momento de elegir un sensor como son:

- Rapidez en la respuesta
- Situación donde van a ser utilizados
- Radios de acción
- Fiabilidad
- Tensión de alimentación
- Corriente de alimentación
- Márgenes en la temperatura y presión de funcionamiento
- Resistencia a agentes externos

Sin embargo, las características técnicas que van a determinar qué tipo de sensor se van a elegir son:

a. Resolución

Es definido como el mínimo incremento de la magnitud a ser medida que puede ser detectado por el sensor. Por ejemplo, en un sensor de temperatura se puede comprar uno de resolución de 0.5°C o de 0.1°C . El segundo tiene una resolución más alta y quiere decir que por cada variación de 0.1°C en la temperatura, la señal de salida cambiará. En el caso del primero, se debería esperar al medio grado centígrado para apreciar cambios en la salida. (USB, 2011)

b. Sensibilidad

Es la relación entre la respuesta del sensor y la magnitud que se está midiendo. Siguiendo con los sensores de temperatura, se puede diferenciar uno que tenga una sensibilidad de $10\text{mV} / 1^{\circ}\text{C}$ y otro de $50\text{mV} / 1^{\circ}\text{C}$. Esto quiere decir que este último es más sensible que el primero (Escalona, Manganiello, López, & Vega, 2012).

c. Exactitud

Qué tan próximo está al valor verdadero (Acosta, Suárez, & Suárez, 2016).

d. Precisión

Qué tanto fluctúa el valor al volver a medir. (USB, 2011)

2.4. Red de sensores inalámbricos

Una red de sensores inalámbricos (RSI) o Wireless Sensor Network (WSN) es un sistema que tiene elementos de medición distribuidos de forma estratégica y elementos de radio frecuencia

que se usan para transferir la información captada por sensores u otros elementos hacia el sistema de monitoreo (Archila & Santamaría, 2013).

Según Archila & Santamaría (2013), los elementos básicos en un WSN son los que se muestran en la Figura 4.

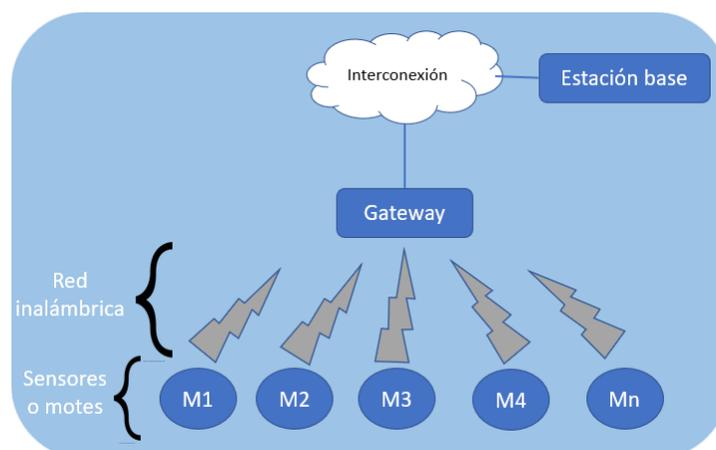


Figura 4. Red de sensores inalámbricos

- Sensores o *motés*: toman la información y la envían a la estación base.
- Red inalámbrica: la interconexión entre el sensor y el gateway
- Gateway: interconexión entre la WSN y una red TCP/IP
- Estación base: recolector de datos

2.4.1. Características

Según Gabarino (2011), las características de una WSN son, entre otras las que se muestran en la Tabla 13.

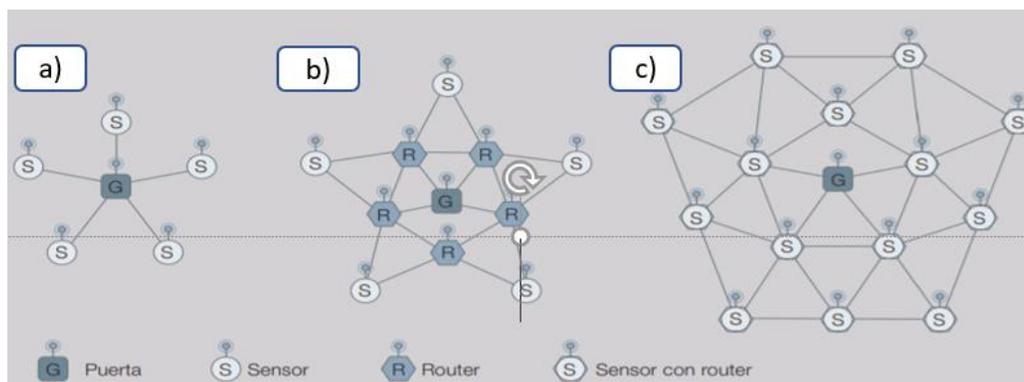
Tabla 13*Características WSN*

Característica	Definición
Bajo consumo de energía	Ya que generalmente se lo alimenta a los sensores con baterías
Bajo costo	Al ser redes de grandes sensores se debe reducir los costos de cada uno, como, por ejemplo, en la infraestructura
Funcionamiento desatendido	Se espera que funcione de manera autónoma sin mucha administración
Conectividad ad hoc	Generalmente son redes descentralizadas

2.4.2. Topologías

Una de las características de las WSN es que deben tener bajo consumo de energía y los nodos sensores deben ser lo más simples posible. Es por esto que generalmente se usa la topología en estrella donde los sensores solo se preocupan por enviar la información hacia el Gateway. Sin embargo, en algunas aplicaciones es necesario que los sensores también sirvan como enrutadores para que, suponiendo que un nodo fallara, la misma red podrá enviar la información por otra ruta. Esto hace que los nodos sensores sean más caros y complica el diseño de la red.

En la Figura 5, se muestra las tres (3) topologías más usadas para los WSN.

**Figura 5.** Topologías más comunes para WSN.

a) Estrella b) concentrador c) malla

Fuente: (Aakvaag & Frey, 2006)

Como se puede observar en la Figura 5 a), se tiene la topología en estrella que es la más común y fácil de diseñar. En la Figura 5 b), los sensores se interconectan con enrutadores facilitar el trabajo de la red, pero aumenta el costo de esta.

Por último, en la Figura 5 c), se tiene una topología en malla donde todos los nodos sensores deben saber por dónde enrutar la información. Esto hace que el costo de los sensores y de la red en general sea más alto.

No obstante, es más eficaz ya que si uno de los nodos sensores se daña, se podrá seguir enviando la información de los otros nodos.

2.4.3. Protocolos de comunicación inalámbrica para WSN

Se han usado protocolos específicos para cada aplicación como son los siguientes:

- IEE 802.15.4: Necesita poca potencia y tiene un bajo costo
- ZigBee: Diseñado desde 802.15.4 y tiene una pila de protocolo de red específicamente para WSN
- LoraWAN: Desarrollada específicamente para aplicaciones de baja potencia, usando bandas no licenciadas y de largo alcance

Sin embargo, a pesar de que varias organizaciones tienen su protocolo específico, en la siguiente imagen modificada de Sohraby, Minoli, & Znati (2007), se muestra un modelo genérico de protocolos para WSN.

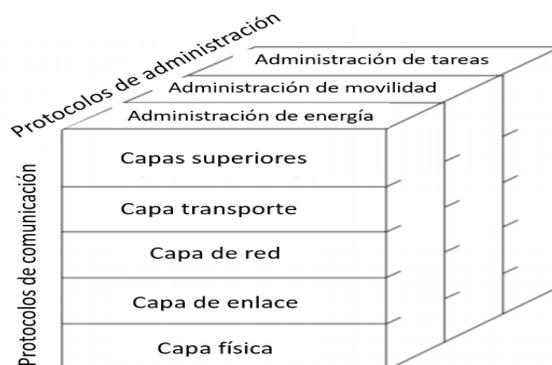


Figura 6. Protocolo de las WSN.
Fuente: (Sohraby, K., Minoli, D., & Znati, T. 2007).

2.5. Internet de las cosas (IoT)

El Internet de las cosas o por sus siglas en inglés de “Internet of Things” (IoT) es la intercomunicación de varios dispositivos a través del Internet. Estos dispositivos pueden ser sensores, actuadores o cualquier elemento que necesite enviar información del mundo físico a una plataforma virtual para su procesamiento o monitoreo. IoT es el siguiente paso de la interconexión de las personas mediante redes sociales, teléfonos inteligentes, computadoras a la conexión entre dispositivos o cosas. Esta tecnología es un gran paso para el aumento del análisis de la información obtenida en fábricas, bodegas e incluso para uso personal. (Bonilla, Tavizon, Morales, Guajardo, & Laines, 2016).

2.5.1. Elementos

Según Bonilla, Tavizon, Morales, Guajardo, & Laines (2016), los elementos que interactúan se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14
Elementos IoT

Hardware	Sensores, dispositivos de comunicación
Middleware	Permite el paso de la información y su análisis
Visualización	Donde se observan los datos

2.5.2. Estándar

El Internet de las cosas ha estado presente en muchas partes del mundo desde hace años, sin embargo, hasta el año 2018 no había un estándar para IoT. Es por esto que la Organización Internacional de Normalización (ISO) junto con la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) publicaron el 5 de noviembre de 2018 el primer estándar internacional que proporciona una arquitectura de referencia para IoT intentando garantizar la seguridad y confianza en la implementación de estos sistemas. El estándar se denomina o ISO/IEC 30141 Internet de las Cosas (IoT)- Arquitectura de Referencia normaliza el desarrollo de aplicaciones IoT. (UNE, 2018)

a. Arquitectura

El estándar ISO/IEC 30141 tiene una arquitectura de referencia para IoT que se muestra en la Figura 7.

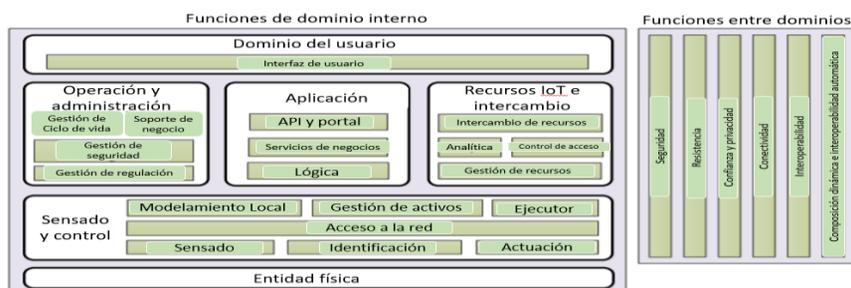


Figura 7. Arquitectura de referencia para IoT

Fuente: (ISO, 2018)

A continuación, se describe cada parte de la arquitectura según la ISO (2018).

Dominio de sensado y control

Se compone de un conjunto de componentes funcionales comunes cuya complejidad de implementación depende de la infraestructura de los sistemas IoT. Su estructura se detalla en la Tabla 15.

Tabla 15

Dominio de sensado y control

Sensado y control	
Sensado	Lee los datos se los sensores
Actuadores	Describe los datos y señales de control.
Ejecutor	Ejecuta la lógica que controla los estados, condiciones y el comportamiento del sistema y su entorno
Identificación	Permite que las entidades sean identificables y rastreables
Acceso a la red	Permite la conexión entre sensores, actuadores, controladores, puertas de enlace y otros sistemas e borde
Modelamiento local	Ayuda a comprender los estados, condiciones y comportamientos de los sistemas
Gestión de activos:	Permite la gestión de operaciones de los sistemas de control

Dominio de aplicación

Representa las funciones que implementan la lógica de la aplicación que realiza funcionalidades de negociación específicas para los proveedores sus servicios. (ISO, 2018)

Dominio de operación y administración

Es responsable de la gestión del ciclo de vida, el soporte de negocio, la gestión de seguridad y la gestión de la regulación.

La gestión del ciclo de vida proporciona varios tipos de componentes como: aprovisionamiento, implementación, monitoreo, mantenimiento, pronóstico, diagnóstico, optimización, facturación, entre otros. (ISO, 2018)

Dominio de recursos e intercambio

Conlleva la gestión de recursos, análisis, intercambio de recursos, control de acceso, etc. Las partes interesadas en este dominio deben proporcionar y recibir información sobre el sistema IoT, analizar y almacenar datos en la nube. (ISO, 2018)

Dominio de entidad física

Ha sentido y controlado objetos físicos que son objetos de funciones en otros dominios (ISO, 2018).

Funciones entre dominios

Se muestra en la Figura 7 las funciones de domino cruzado que son aquellas que existen en los otros seis dominios. Estas funciones incluyen: seguridad, resistencia, confianza y privacidad, conectividad, interoperabilidad automática, etc. Cada función puede incluir componentes funcionales en diferentes dominios como se muestra en la Tabla 16. (ISO, 2018)

Tabla 16.

Funciones de dominio cruzado

Función	Descripción
Privacidad	Se realiza a través de la protección de privacidad de datos en la detección y transmisión, API's, monitoreo, intercambio de recursos de información, etc.
Seguridad	Es la capacidad del sistema que garantiza la confidencialidad, integridad, autenticidad y confirmación de la información
Resistencia	Es un conjunto de la tolerancia a fallas

CONTINÚA 

Confianza y privacidad	Es distinguir diferentes niveles de confianza durante la transmisión para proteger la confidencialidad de los datos
Conectividad	Proporciona la capacidad de integración para los componentes de IoT
Interoperabilidad	Es la capacidad de intercambiar información de un sistema IoT con una interpretación común de la información
Composición dinámica e interoperabilidad automática	Proporciona un método flexible de composición de servicios para que los componentes de IoT puedan integrarse dinámicamente

2.6. LoRa

LoRa viene de las siglas de *Long Range* que significa “largo alcance” y es la capa física para enlaces inalámbricos de baja potencia y largo alcance (Pérez R. , 2017). Fue creada por Semtech y está basada en la técnica de espectro ensanchado Chrip Spread Spectrum (*CSS*) con modulación Frequency Shifting Keying (*FSK*) y corrección de errores Forward Error Correction (*FEC*). Por lo tanterior, LoRa aumenta la sensibilidad del receptor haciendo al sistema de comunicación altamente robusto al ruido. Esta tecnología puede demodular señales hasta $19.5dB$ por debajo del piso de ruido llegando así con un solo Gateway a cubrir cientos de kilómetros cuadrados (Moya, 2018).

Cambiando los factores de dispersión ortogonales (*SF*), el administrador puede variar la velocidad de datos desde $0.3kbps$ a $38.4kbps$ usando bandas ICM.

Las bandas que usa son

- En Europa
 - o Bandas ICM 863 a 870MHz usando 8 canales de ancho de banda de 300kHz
- En América del norte, centro y sur (Ecuador), Australia, Singapur, Israel.
 - o Bandas ICM 902 a 928MHz con 13 canales de 2.16MHz

2.7. LoRaWAN

Mientras que la tecnología LoRa solo ofrece la capa física para un enlace de datos, LoRaWAN otorga un protocolo de control de acceso al medio (MAC) de comunicación y toda la arquitectura de una red WAN de largo alcance conocida como *LPWAN*.

De esta forma, se acopla a las necesidades de esta red como: bajo uso de energía, capacidad, calidad de servicio (QoS), etc. Esto quiere decir que LoRaWAN está diseñada para WSN y aplicaciones máquina a máquina (M2M) que necesiten poco ancho de banda ya que su velocidad puede ser variada desde *0.3kbps* a *50kbps*, gestionando la velocidad de transmisión individualmente para cada nodo mediante un esquema adaptativo de velocidad (ADR).

De esta manera se logra que los nodos transmiten a cualquier velocidad posible y en cualquier canal disponible. (Pérez R. , 2017) (Moya, 2018).

Las capas que confirman LoRaWAN se pueden observar en la Figura 8.



Figura 8. Capas LoRaWAN.
Fuente: (Pérez, R. 2017)

2.7.1. Arquitectura

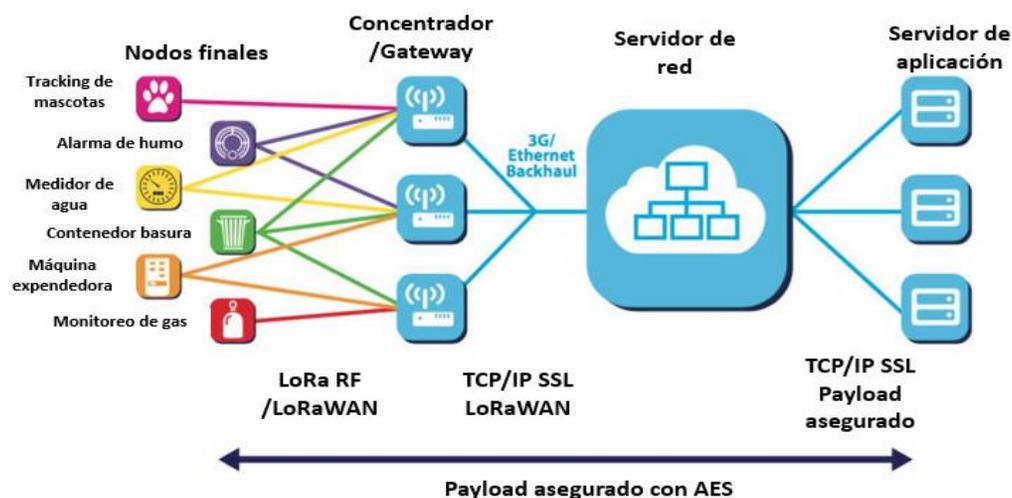


Figura 9. Arquitectura LoRaWAN

Fuente: (LoRa Alliance, 2018)

Generalmente LoRaWAN se diseña con una topología tipo estrella donde los nodos finales, también llamados *LoRa Things* se conectan a un Gateway para enviar su información.

Estas puertas de enlace pasan la información hacia un servidor de red mediante un *backhaul* y finalmente los datos llega a la aplicación (Moya, 2018). Visualmente se puede observar en la Figura 9

2.7.2. Factor de dispersión

El factor de dispersión (SF), es la relación entre la velocidad de transmisión de los símbolos y el ancho de banda de la señal. De esta manera, es posible aumentar la sensibilidad del receptor incrementando el tiempo en aire del paquete (Moya, 2018). Esta relación se muestra en la Tabla 17

Tabla 17*SF vs sensibilidad,*

SF	Tasa de bits	Sensibilidad
12	0.293kbps	-137dBm
11	0.537kbps	-134.5dBm
10	0.976kbps	-132dBm
9	1.757kbps	-129dBm
8	3.125kbps	-126dBm
7	5.468kbps	-123dBm

Fuente: (Semtech. 2015)

Como se puede observar en la Tabla 17, mientras más alto sea el SF de la comunicación, será menos vulnerable al ruido, pero decaerá su tasa de transmisión. Por lo tanto, los nodos que estén más cerca podrán cambiar a un SF más bajo para mejorar su velocidad de transmisión usando ADR como se mencionó anteriormente.

2.7.3. Clases LoRaWAN

LoRaWAN define tres (3) tipos de nodos finales según su eficiencia energética y las ventanas de recepción de mensajes, es decir, estos tres (3) tipos de nodos definen cómo estos acceden al medio para recibir un mensaje. Estos dispositivos se muestran en la Tabla 18. (TTN, 2019)

Tabla 18*Clases nodos finales*

Clase	Descripción
Clase A	Son bidireccionales. Después de transmitir un paquete, esperan un acuse de recibo ACK mediante 2 ventanas de recepción. Es decir, solo reciben mensajes luego del envío.

CONTINÚA 

Clase B	Tienen todas las características de la clase A, sin embargo, puede abrir ventanas de recepción en un tiempo determinado o programado. Para abrirla, el Gateway envía una trama beacon para saber cuándo está activo el otro dispositivo.
Clase C	Está escuchando todo el tiempo excepto cuando está transmitiendo, por lo tanto, consume más energía que las dos clases anteriores.

Fuente: (TTN, The things network, 2019)

2.7.4. Seguridad

LoRaWAN proporciona varias capas de cifrado que están basadas en el estándar IEE 802.15.4 pero teniendo una capa más de seguridad para la red que sirve para autentificarla y en la aplicación (Moya, 2018). La seguridad de LoRaWAN tiene como propiedades la autenticación mutua, protección de integridad y confidencialidad. La autenticación mutua se desarrolla entre un nodo final y la red LoRaWAN como parte del acceso a la red, lo que significa que solo dispositivos confiables se unirán a una determinada red. En el acceso al medio, los mensajes son autenticados desde su origen y posteriormente encriptados. (Reimondo, 2019).

a. Implementación de la seguridad

Según Reimondo (2019), LoRaWAN implementa los mecanismos mostrados anteriormente basándose en el algoritmo avanzado de encriptación (AES) y la combina con varios modelos de operación. Estos modelos de operación son: Activación “Over-The-Air” (OTAA) y la activación por personalización (ABP)

OTAA

Según Newie Ventures (2018), el dispositivo final es dotado con un identificador único global (DevEUI) otorgado por la Autoridad de Registro del instituto de ingenieros eléctricos y

electrónicos IEEE, un identificador de la aplicación (AppEUI), una clave de aplicación para el algoritmo avanzado de encriptación (AES) de 128 bits llamada AppKey que es usada para generar las claves de sesión de red NwkSKey y la clave de aplicación AppSKey, las dos AES de 128 bits. Así, el nodo final puede ser activado de esta manera:

1. El nodo final envía una petición de incorporación enviando la AppEUI, AppKey y un DevEUI preprogramado.
2. Cualquier Gateway que reciba esta información lo envía a la red.
3. El servidor de red recibe esta petición y consulta la aplicación asociada con ese AppEUI para validar la asociación. Si es aceptado, se envía una aceptación de la petición
4. La aceptación contiene un identificador de red (NetID), una dirección del dispositivo (DevAddr) y otras configuraciones
5. El dispositivo guarda el NetId, DevAddr y las demás configuraciones de la red y usa para generar el NwkSKey y la AppSKey. El dispositivo debe guardar estas claves para seguir comunicándose con el servidor.

ABP

Si un dispositivo usa ABP, este no necesita un DevEUI, AppEUI o la AppKey. En vez de eso, se requiere un NwkSKey y un AppSKey que están preprogramados en el dispositivo que está pre registrado en la red. Cuando el dispositivo necesita comunicarse, sola estas claves para enviar la información. De esta manera, tanto en ABP como en OTAA, la NwkSKey es usado por el servidor de red y el nodo final para calcular y verificar el código de integridad de mensaje (MIC) que es elaborado por el nodo final y para la descriptación y encriptación de la carga útil (Payload). Asimismo, la AppSKey es usada para la descriptación y encriptación punto a punto, es decir,

desde el dispositivo final hacia la aplicación como se muestra en la Figura 10 . Cabe recalcar que la encriptación se la realiza con el AES de 128 bits. (NewieVentures, 2018)

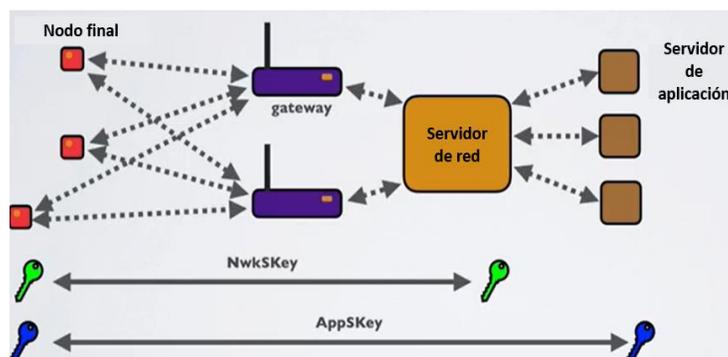


Figura 10. Encriptación LoRaWAN

Fuente: (Mobilefish, 2018)

b. AES

Según Pousa (2011), el algoritmo avanzado de encriptación (AES) fue desarrollado en Bélgica en 1997 y en 2002 se transformó en un estándar de encriptación. Usa cifrado por bloques que está estandarizado a 128 bits, por lo tanto, la información que se desea encriptar se divide en segmentos de 16 bytes formando una matriz 4x4 como se muestra en la Figura 11



Figura 11. Bloque AES

Fuente: (Pousa, 2011)

Claves

AES solo utiliza una clave de 128, 192 o 256 bits para descifrar y encriptar siguiendo estándares que tienen como nombre AES-128, AES-192 y AES-256 respectivamente.

Tomando como ejemplo AES-128, se inicia con una clave de 16 bytes, es decir, 128 bits en una matriz de 4x4. A partir de esto se generan 10 claves denominadas subclaves. (Pousa, 2011)

Encriptación y descifricación

Según Celi & Ponguillo (2017), para encriptar la información, el algoritmo aplica a cada estado varias operaciones que se llaman rondas y se clasifican en:

- Una ronda inicial
- Nueve rondas estándar
- Una ronda final

Y las operaciones que se realizan se llaman: AddRoundKey, MixColumns, ShiftRows y SubBytes en el orden que se muestra en la Figura 12

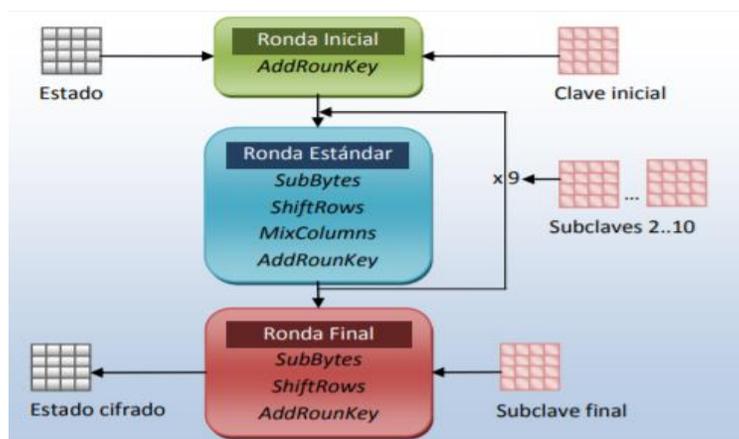


Figura 12. Bloque operaciones y rondas AES

Fuente: (Pousa, 2011)

Al desencriptar, se realizan las mismas operaciones en encriptación, pero de forma inversa.

2.7.5. Paquete

Las especificaciones de LoRaWAN definen un mensaje de capa física que consta de un preámbulo, una cabecera (PDRH), un control de redundancia cíclica de cabecera (PRDH_CRC), una carga útil física (PHYPayload) y una cola de detección de error (CRC). En la

Figura 13 se muestra la estructura del mensaje de capa física.

Se puede observar que el PHDR y el PHDR_CRC tienen en total 20 bits. Adicionalmente, existen 2 bytes para CRC, pero solamente en los enlaces de subida, los de bajada están optimizados para bajos tiempos de transmisión.

El número de símbolos se configuran en la transmisión (Casals, Mir, Vidal , & Carles, 2017).

Preámbulo (n símbolos)	PHDR (2 bytes)	PHDR_CRC (4 bits)	PHYPayload (variable)	CRC (2 bytes)
---------------------------	-------------------	----------------------	--------------------------	------------------

Figura 13. Mensaje LoRaWAN

Según Casals, Mir, Vidal , & Carles (2017), la carga útil de la capa física (PHYPayload) está constituido con un conjunto de tipos de mensajes MAC. Hay 3 (tres) tipos básicos de mensajes MAC que son definidos como:

1. Mensaje de integrarse
2. Mensaje de datos confirmados
3. Datos no confirmados

El formato de un mensaje MAC se muestra en la Figura 14 y comprende de:

- Encabezado MAC (MHDR) que indica el tipo de mensaje MAC
- Carga útil MAC (MAC payload) que puede transportar datos de la aplicación o un mensaje de unión
- El código de integridad de mensaje (MIC) que permite la verificación de la integridad del mensaje.

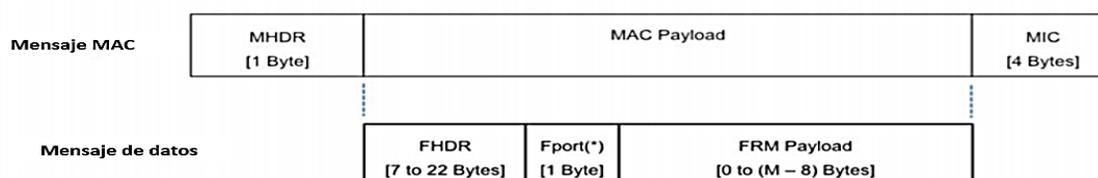


Figura 14. Mensaje MAC.

Fuente: (Casals, Mir, Vidal, & Carles, 2017)

Por otro lado, los mensajes de datos pueden llevar comandos MAC en la MAC payload, que pueden ser la cabecera de la trama (FHDR), y FPort. Los comandos MAC están destinados a configurar los parámetros de la capa de radio y MAC. Un subcampo importante en el FHDR es un bit que permite reconocer el último mensaje de datos confirmados recibido (Casals, Mir, Vidal, & Carles, 2017).

2.7.6. Comunicación

En la Figura 15 se puede observar la comunicación entre nodos de LoRaWAN en el enlace de subida. Si el nodo tiene habilitados N número de canales, podrá enviar N mensajes seguidos. Cuando este mensaje llega al Gateway, se convierte en UDP y se envía al servidor. También se

puede enviar mensajes con confirmación, haciendo que el Gateway envíe un ACK al nodo. Los paquetes PUSH_DATA llevan datos de los sensores al Gateway, un token y la MAC del Gateway.

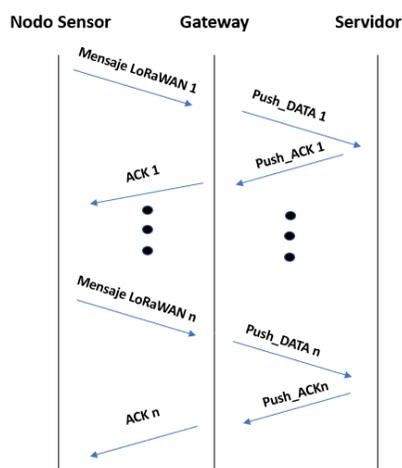


Figura 15. Comunicación upstream LoRaWAN.

Para el enlace de bajada, a pesar de ser diferente a lo que se tiene acostumbrado, el Gateway es el que empieza la comunicación mediante un PULL_DATA. Este paquete lo envía periódicamente para que cuando el servidor tenga datos, envíe un PULL_RESP como se muestra en la Figura 16.

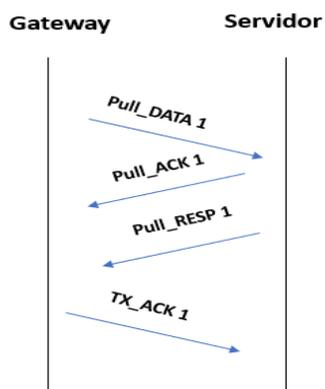


Figura 16. Comunicación downstream.

CAPÍTULO III

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

3.1. Introducción

Para iniciar con el diseño, es necesario tener en claro cómo debe estar distribuida la red de sensores, las distancias hacia el nodo central y el esquema general del proyecto poder obtener los requerimientos mínimos de hardware y software junto con sus requerimientos funcionales y no funcionales. El hardware son las estaciones de monitoreo que se dividen en cinco (5) nodos y un nodo central llamado gateway. El software comprende toda la programación de las estaciones, base de datos y servidor web.

Un esquema general se muestra en la Figura 17 donde se puede observar que cinco (5) nodos sensores se conectan mediante LoRaWAN al gateway para enviar la información a Internet mediante GPRS. El último sensor se encuentra en el mismo nodo del gateway así que su información la envía directamente a Internet para guardarlo en una base de datos y posteriormente mostrarla, mediante un servidor web, en la aplicación del usuario.

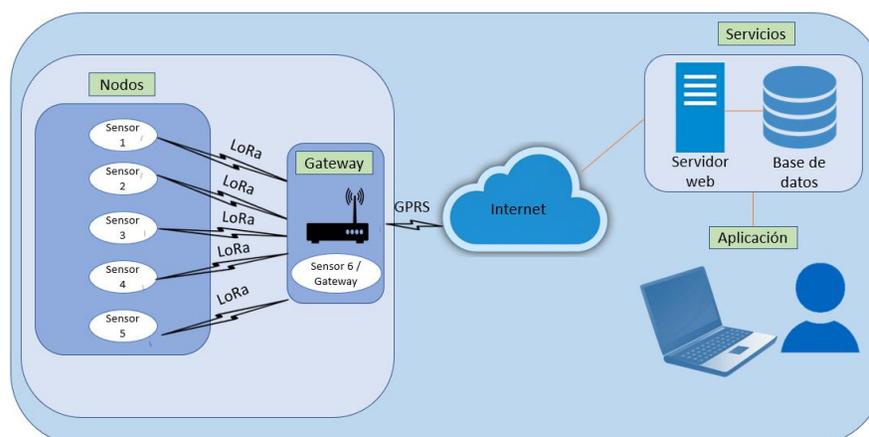


Figura 17. Esquema general proyecto

3.2. Distribución de la red de sensores

La red de sensores que forma parte del sistema de monitoreo se despliega en el campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

En el campus existen varios lugares donde hay gran afluencia de vehículos, los cuales son de importancia para el proyecto ya que el *CO* y *NO2* son producto principalmente de la mala combustión de materiales orgánicos. Estos lugares y su distribución sobre el campus se muestran en la Tabla 19 y Figura 18.

Tabla 19

Áreas de posible concentración de contaminantes

Número	Ubicación	Descripción
1	Entrada principal	Punto de ingreso de vehículos y peatones a la universidad. Está frente a la avenida principal
2	Parqueadero de visitas	Lugar donde se parquean los vehículos de personas que no necesariamente pertenecen a la universidad
3	Parqueadero de la biblioteca	Uno de los parqueaderos más grandes de la universidad con gran concentración de vehículos
4	parqueadero de la residencia universitaria	Lugar de parqueo de los vehículos de los residentes en la universidad
5	Instalaciones del centro de investigaciones científicas y tecnológicas del Ejército (CICTE)	Punto con ingreso y salida de diferentes tipos de vehículos.
6	Parqueaderos del bar de la universidad	Lugar de estacionamiento de docentes y funcionarios
7	Parqueaderos de los laboratorios de mecánica	Sitio de estacionamiento que está cerca de las máquinas de combustión de los laboratorios de mecánica
8	Parqueaderos de los laboratorios de electrónica	Lugar de parqueo para docentes y alumnos de electrónica y biotecnología.

Por lo tanto, se pretende colocar los nodos sensores cerca de las áreas descritas como se muestra en la Tabla 20 y en la Figura 19.



Figura 18. Puntos de posible concentración de contaminantes.

Fuente: (Google Maps, 2019)

Tabla 20

Ubicación de los nodos

Ubicación del nodo sensor	Identificador	Nombre	Distancia al gateway
Parqueaderos de los laboratorios de electrónica	S-1	Lab-Ele	197.50m
Edificio central	S-2	Gateway	0.0m
Entrada principal	S-3	Ent-Pri	367.36m
Parqueaderos de los laboratorios de mecánica	S-4	Lab-Mec	151.68m
Parqueaderos de la residencia universitaria	S-5	Par-Res	486.85m
CICTE	S-6	Cicte	612.40m

Para el desarrollo del proyecto y una vez identificado los puntos de monitoreo es importante describir los requerimientos de hardware y software.



Figura 19. Puntos nodos sensores
Fuente: (Google Maps, 2019)

3.3. Diseño de Hardware

3.3.1. Requerimientos de Hardware

El hardware está conformado por cuatro (4) bloques llamados: bloque de sensores, bloque de procesamiento y control, bloque de transmisión-recepción y bloque de alimentación como se muestra en la Figura 20. Cabe recalcar que solo el nodo gateway consta con el módulo GSM/GPRS adicional para la comunicación y envío de datos a Internet.

- Bloque de sensores: obtiene la información conseguida por los sensores de temperatura y gases hacia el bloque de procesamiento.

- Bloque de procesamiento y control: recibe la señal de los sensores del bloque de sensado y los convierte de analógico a digital, los procesa, crea la carga útil del mensaje LoRa (payload) y configura los parámetros para enviar el paquete.
- Bloque de transmisión – recepción: Envía los paquetes a través de LoRa mientras que el gateway recibe y reenvía mediante GPRS a la base de datos.
- Bloque de alimentación: proporciona de energía a los bloques para su funcionamiento

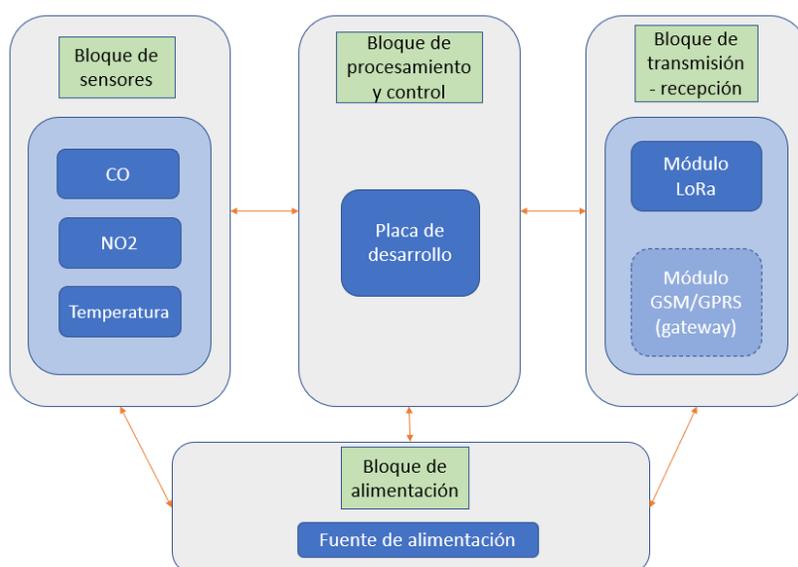


Figura 20. Bloques hardware

Cabe indicar que el módulo GSM/GPRS solo está presente en el nodo central (gateway). Estos bloques constan de hardware que debe tener ciertas características para lograr el funcionamiento que se desea según lo propuesto.

Los requerimientos para los sensores de los gases y temperatura del bloque de sensores se muestran en la Tabla 21 y 22.

Tabla 21*Requerimiento de los sensores de contaminantes*

Requerimiento	Característica
Tensión de alimentación	De 3.3V a 5V (DC)
Corriente de alimentación	Hasta a 100 mA
Acondicionamiento de señal	Circuito de suministro
Tipo de señal de entrada	Analógica
Tipo de señal de salida	Analógica
Gases detectables	CO y NO ₂
Rango de operación	CO: desde al menos 1ppm NO ₂ : desde al menos 1ppb
Peso	Menor a 30g
Dimensiones	Menor a 2x2x2 cm
Temperatura de operación	5 – 30°C
Humedad de operación	30 – 95%RH

Tabla 22*Requerimientos sensor de temperatura*

Requerimiento	Característica
Tensión de alimentación	De 3.3V a 5V (DC)
Corriente de alimentación	Hasta a 100 mA
Tipo de señal de entrada	Analógica
Tipo de señal de salida	Analógica
Rango de medición	0 – 30°C
Peso	Menor a 10g
Dimensiones	Menor a 6x6x6 mm
Sensibilidad	Al menos 10mV/°C

Para evitar problemas de compatibilidad entre la placa y el módulo se pretende usar una placa de desarrollo que tenga integrado un módulo LoRa. En la Tabla 23 se puede observar los requerimientos de esta placa de desarrollo.

Tabla 23*Requerimientos placa de desarrollo integrado con módulo LoRa*

Requerimiento	Característica
Tensión de alimentación	De 3.3V a 5V (DC)
Corriente de alimentación	Hasta a 450 mA
Velocidad de reloj	20Mhz

CONTINÚA 

Tamaño de memoria RAM	2 KB
Memoria flash	32KB
Interfaces de operación	UART, TWI, SPI.
Arquitectura	8 bits
Cantidad de pines de entrada	Al menos 11 digitales y 2 analógicos
Peso	Menor a 60g
Dimensiones	Menor a 6x3x0.5 cm
Radio LoRa	Transceptor
Banda de operación LoRa	915 Mhz
Sensibilidad LoRa	Al menos $-136dBm$
Potencia de transmisión LoRa	20dBm

Para aspectos de envío de datos hacia Internet se pretende usar un módulo con capacidad de usar el sistema global para las comunicaciones (GSM) y el servicio general de paquetes vía radio (GPRS) en lugar de usar una red WiFi ya que el sitio donde se ubica el nodo central no dispone de buena cobertura WiFi según lo indicado por Yáñez (2019), en su tesis sobre el Análisis de desempeño y cobertura de la nueva red inalámbrica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE - campus Sangolquí donde informa que la universidad presenta sitios sin cobertura y fallas de conexión causadas principalmente por las varias redes existentes que no son parte de la Unidad de Tecnologías de la Información y Comunicación de la ESPE. Los requerimientos del módulo se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24

Requerimientos módulo GSM/GPRS

Requerimiento	Característica
Tensión de alimentación	De 3.3V a 5V (DC)
Corriente de alimentación	Hasta a 500 mA
Bandas	850 / 1900 MHz
Sensibilidad	Al menos $-100dBm$
Peso	Menor a 50g
Dimensiones	Menor a 4x3x0,5 cm

Para finalizar, en la Tabla 25 se muestra los requerimientos de la fuente de alimentación.

Tabla 25*Requerimientos fuente de alimentación*

Requerimiento	Característica
Tensión de alimentación	120V (AC) – 60Hz
Corriente de alimentación	Hasta 200mA
Clavija	Tipo A o B
Tensión de salida	De 3.3V a 5V (DC)
Corriente de salida	Al menos 1.5A
Peso	Menor a 100g
Dimensiones	Menor a 5x3x4 cm

3.3.2. Caracterización de los sensores**a. Sensor de contaminantes**

Tomando en cuenta los requerimientos de la Tabla 21, se tiene varias opciones de sensores disponibles. Desde los más baratos como son los MQ-7 de CO y MQ-135 de NOX, hasta sensores profesionales de cientos de dólares como los de la marca RAE Systems. Del análisis entre las opciones se identificó que unos buenos sensores con relación a calidad-precio son los tipo TGS de la marca Figaro y los sensores de la marca MiCS, donde un mismo encapsulado mide tanto CO como NO2 entregando 2 salidas diferentes. En la Figura 21 se muestra una comparación entre estos sensores tomando en cuenta sus características como: rango de detección del gas, repetibilidad, calidad, etc, y el precio en el mercado.

Tomando en cuenta esta información, el sensor elegido es el MiCS 4514 el cual posee la capacidad de medir los 2 gases de interés y tiene un costo accesible cumpliendo los requerimientos del proyecto. Este sensor se muestra en la Figura 22 soldado en un circuito de suministro de la empresa CJMCU donde se observa que tiene 5 pines, que son de alimentación, precalentamiento y de la señal de salida según el contaminante como se muestra en la Tabla 26.

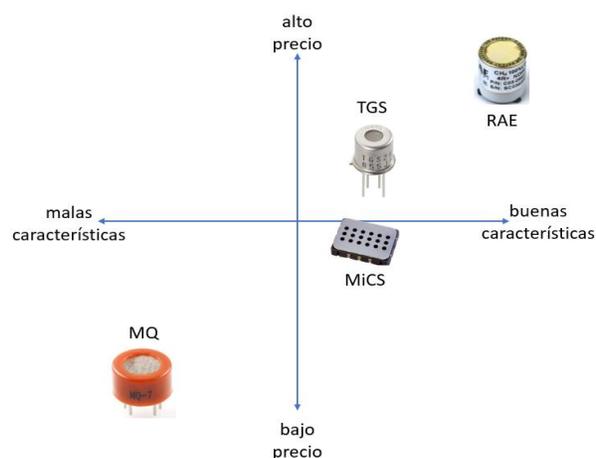


Figura 21. Comparación sensores



Figura 22. MiCS 4514

Fuente: (DHgate, 2019)

Tabla 26

Pines MiCS 4514

Número de pin	Nombre	Tipo	Descripción
1	VCC	Energía	Tensión de alimentación de 5V
2	GND	Energía	Tensión de referencia
3	RED	Salida analógica	Mide CO
4	NOX	Salida analógica	Mide NO2
5	PRE	Energía	Pre calentamiento

En la Tabla 27 se muestra las características del sensor junto con el cumplimiento de los requerimientos.

Tabla 27
Características MiCS 4514

Característica	Detalle	Requerimiento	Cumple con el requerimiento
Tensión de alimentación	5V (DC)	De 3.3V a 5V (DC)	Sí
Corriente de alimentación	De 6 a 10 mA	Hasta a 100 mA	Sí
Acondicionamiento de señal	Circuito de suministro	Circuito de suministro	Sí
Tipo de señal de salida	Analógica	Analógica	Sí
Gases detectables	CO y NO ₂	CO y NO ₂	Sí
Rango de operación	CO: de 1ppm a 1000ppm	CO: desde al menos 1ppm	Sí
	NO ₂ : de 1ppb a 100000ppm	NO ₂ : desde al menos 1ppb	Sí
Peso	22.68g	Menor a 30g	Sí
Dimensiones	Menor a 1x1.78x0.5 cm	Menor a 2x2x2 cm	Sí
Temperatura de operación	Desde -30 a 85°C	5 - 30°C	Sí
Humedad de operación	Desde 5 - 95%RH	30 - 95%RH	Sí

La Figura 23 muestra la curva de respuesta del sensor en la salida del pin RED donde se indica los diferentes tipos de contaminantes que se pueden medir como CO, etanol, hidrógeno, amonio, metano, propano e iso-butano; mientras que en la Figura 24, se muestra la respuesta del sensor en el pin NOX que mide monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) e hidrógeno.

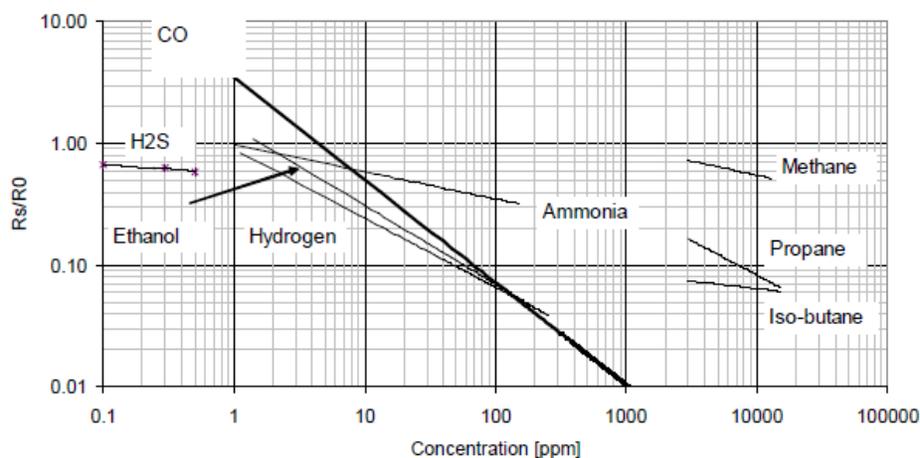


Figura 23. R_s/R_o vs Concentración RED

Fuente: (SGX, s.f.)

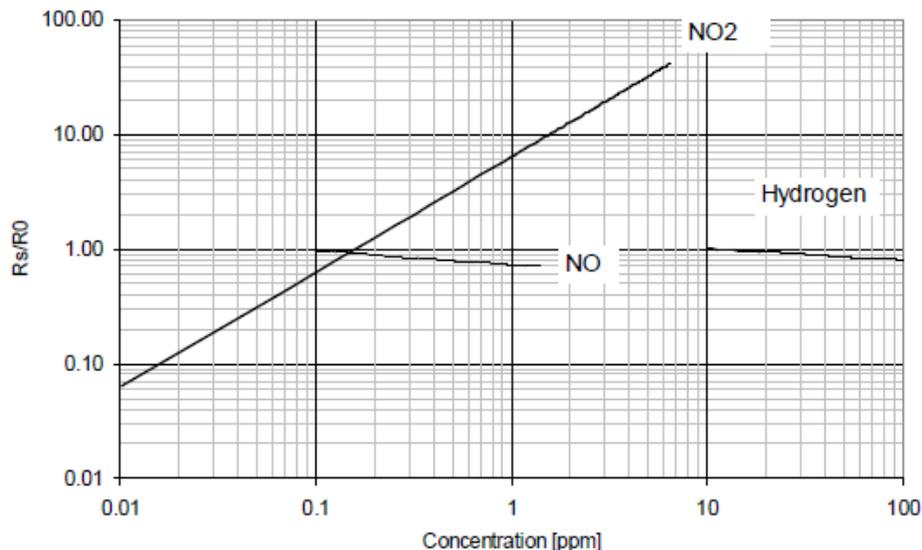


Figura 24. Rs/Ro vs concentración NOX

Fuente: (SGX, s.f.)

Es importante mencionar que la resistencia en aire (R_o) que se muestra en la Figura 23 y 24 es medida bajo condiciones ambientales controladas de aire sintético a $23 \pm 5^\circ C$ y $50 \pm 10\% RH$ y a $23 \pm 5^\circ C$ y menor a $5\% RH$ para la salida RED y NOX respectivamente.

El factor de sensibilidad en aire (R_s) es una resistencia que cambia según la concentración de los gases y está en cada una de las salidas RED y NOX.

Teniendo en cuenta la información anterior, se realiza una regresión de las curvas mostradas en la Figura 23 y 24 para obtener el valor de concentración en ppm de CO y NO2 detectados con la variación de R_s . La regresión que se muestra en la Figura 25 para los valores de CO se realiza tomando 10 puntos de la curva de la Figura 23 ya que así se logró acoplarse bien a la curva original.

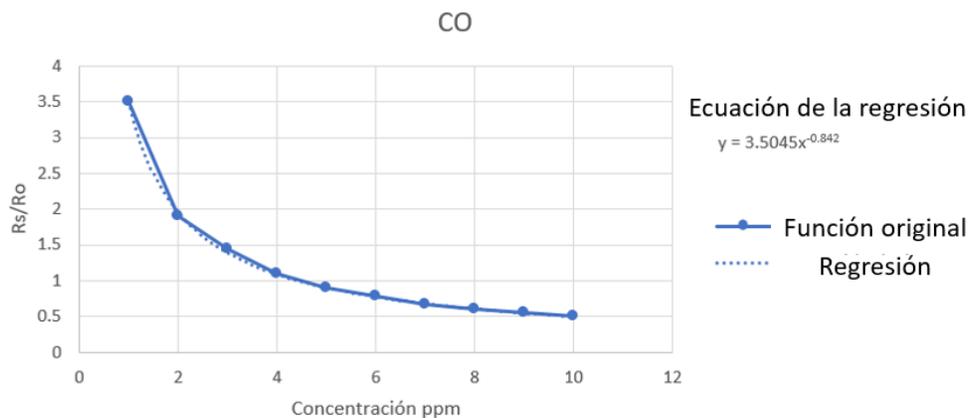


Figura 25. Regresión CO

Se puede observar que la curva obtenida se acopla a una función potencial como se muestra en la ecuación 3.

$$Rs/Ro = 3.5045(CO_{ppm})^{-0,842} \quad EC (3).$$

De la ecuación 3 se puede despejar la concentración de CO en ppm, obteniendo la ecuación 4 donde dicha concentración dependerá de la relación entre Rs y Ro y constantes.

$$CO_{ppm} = e^{\left[\ln\left(\frac{Rs}{Ro \cdot 3.5045}\right) \left(\frac{-1}{0.842}\right) \right]} \quad EC (4).$$

De igual manera se realiza la regresión para los valores de NO₂ de la Figura 24 como se muestra en la Figura 26 identificando que se ajusta a la función potencial mostrada en la ecuación 5.

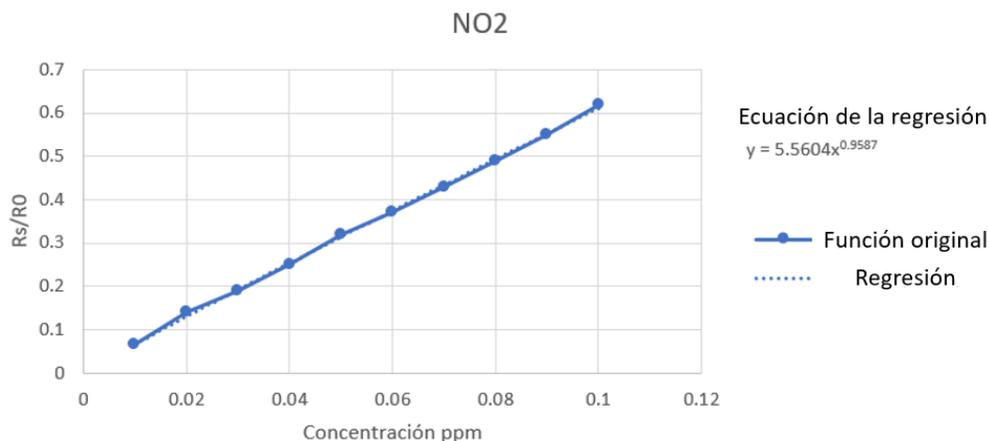


Figura 26. Regresión NO2

$$Rs/Ro = 5.5604(NO2ppm)^{0.9587} \quad EC (5).$$

En la ecuación 6 se muestra en ppm una vez más, despejado la concentración de NO2.

$$NO2ppm = e^{\left[\ln\left(\frac{Rs}{Ro \cdot 5.5604}\right) \left(\frac{1}{0.9587}\right) \right]} \quad EC (6).$$

La ecuación 6 y 4 se usan posteriormente para obtener los valores de la concentración de los gases que dependen de la variación de las Rs.

Para entender cómo obtener la variación de las Rs para cada salida se muestra el circuito de suministro del módulo MiCS 4514 en la Figura 27. Del pin “B” se obtiene el valor de la salida NOX y del “D” la de la salida RED. En estos pines se tiene una caída de tensión formada por los divisores de voltaje que se crean por Rs y las resistencias de carga

(RLOAD) de cada salida. Estas últimas resistencias son fijas y sus valores se muestran en la Tabla 28

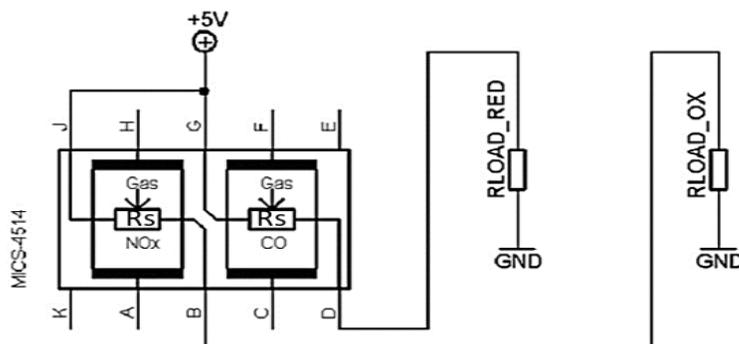


Figura 27. Circuito de suministro MiCS 4514
Fuente: (SGX, s.f.)

Tabla 28

Valores de RLOAD del MiCS

RLOAD	Valor
NOX	22kΩ
RED	47kΩ

En la ecuación 7 se muestra dicho divisor de tensión que se puede conseguir del circuito de la Figura 27 en el pin B.

$$B = \frac{RLOAD_OX}{RLOAD_OX + R_s} * 5V \quad \text{EC (7).}$$

La tensión en el pin B varía de acuerdo con Rs ya que los demás parámetros son constantes, por lo tanto, se puede obtener el valor de Rs de la salida NOX midiendo solamente la tensión en B y despejando Rs como se muestra en la ecuación 8.

$$R_s = \left(\frac{5V}{B} - 1 \right) RLOAD_OX \quad \text{EC (8).}$$

De la misma manera se obtiene el valor de R_s para la salida RED midiendo la tensión en D y colocando el valor de la resistencia de carga R_{LOAD_RED} .

De esta forma, se obtiene los valores de R_s de la salida NOX y RED que posteriormente se reemplazarán en las ecuaciones 4 y 6 respectivamente para obtener la concentración de NO₂ y CO.

b. Sensor de temperatura

Para la elección del sensor de temperatura, se realizó una comparación en la Tabla 29 con las principales características de varios sensores para seleccionar al adecuado para este proyecto según los requerimientos iniciales.

Tabla 29

Comparación Sensores

Sensor	Precisión	Resolución	Precio
LM35	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	10mV/C°	Bajo
DHT11	$\pm 2^\circ\text{C}$	8 bits	Bajo
DS18B20	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	12 bits	Medio

Una vez evaluada las opciones, se selecciona el sensor LM35 debido a que tiene una buena precisión de 0.5°C (a 25°C) y cumple con los requerimientos según la Tabla 31. El LM35 tiene 3 pines y generalmente se encuentra encapsulado con el TO-92 como se observa en la Figura 28. (Texas Instruments, 2000)

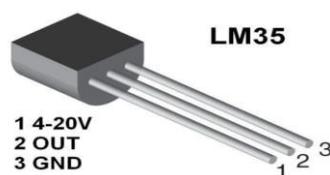


Figura 28. LM35

Fuente: (ElectroCrea, 2019)

Tabla 30*Pines LM35*

Número de pin	Nombre	Tipo	Descripción
1	VCC	Energía	Tensión de alimentación de 4 a 30V
2	GND	Energía	Tensión de referencia
3	RED	Salida analógica	Mide temperatura

La Tabla 31 muestra las características del sensor LM35 y su comparación con los requerimientos.

Tabla 31*Características del sensor LM35*

Característica	Detalle	Requerimiento	Cumple con el requerimiento
Tensión de alimentación	De 4V a 20V (DC)	De 3.3V a 5V (DC)	Sí
Corriente de alimentación	60 μ A	Hasta a 100 mA	Sí
Tipo de señal de entrada	Analógica	Analógica	Sí
Tipo de señal de salida	Analógica	Analógica	Sí
Rango de medición	-55 a 150°C	0 – 30°C	Sí
Peso	Menor a 5g	Menor a 10g	Sí
Dimensiones	4x5.2x2.27 mm	Menor a 6x6x6 mm	Sí
Sensibilidad	10mV/°C	Al menos 10mV/°C	Sí

En la Figura 29 se muestra una prueba realizada del sensor. Se tomó valores de temperatura cada dos minutos por una hora para verificar su funcionamiento. Cabe notar que la salida es lineal (10mV/°C) y tiene un error de menos de 0.5°C (Alzate, Montes, & Silva, 2007).

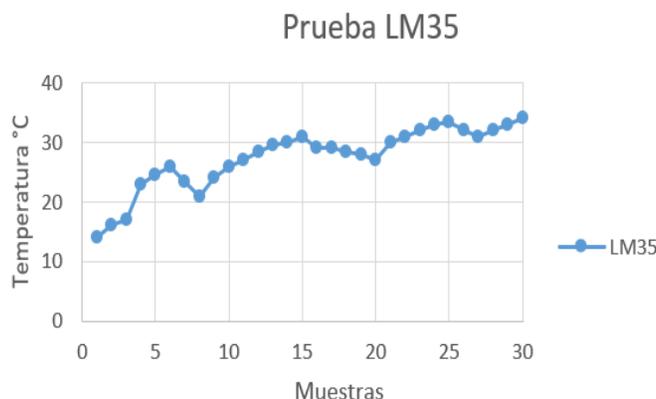


Figura 29. Prueba LM35

3.3.3. Selección de la placa de desarrollo y módulo LoRa

Existen varias placas de desarrollo en el mercado, entre estas se encontraron la LoRa32u II de BS France y la TTGO ESP32 LoRa. Ambas tienen integrado el chip LoRa SX1276 que cumple con las características del módulo LoRa mostradas en la Tabla 23, sin embargo, la última placa tiene integrada un módulo WiFi y una pantalla OLED que no se necesitan en el proyecto e incrementa costos, por lo tanto, se selecciona la LoRa32u II. En la Tabla 32 se muestra la comparación de los sensores.

Tabla 32

Comparación placas desarrollo LoRa

Placa	Módulo LoRa	Microcontrolador	Precio
LoRa32u II	SX1276	Atmega32u4	Medio
TTGO ESP32	SX1276	ATmega328	Alto

La Figura 30 muestra la disposición de los pines (pinout) de la placa de desarrollo seleccionada.

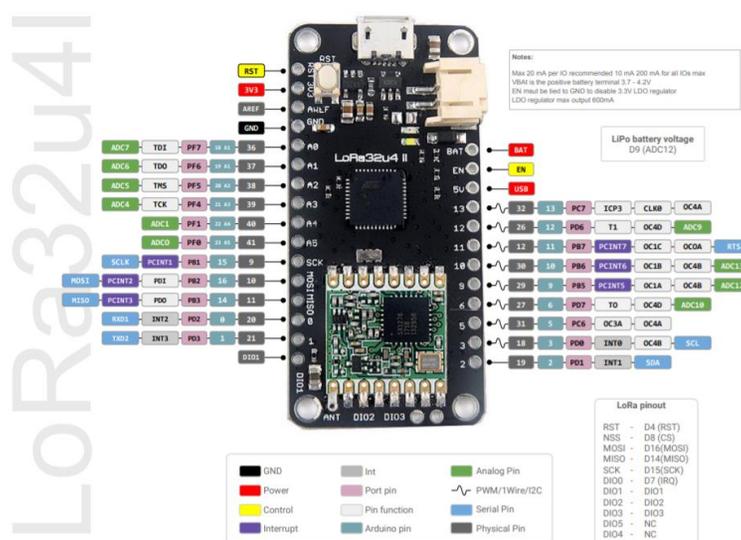


Figura 30. Pinout placa desarrollo

Fuente: (BSFrance, 2019)

En la Tabla 33 se muestran las características de la placa de desarrollo. Como se puede observar, están en el rango de los requerimientos descritos en la Tabla 23.

Tabla 33
Características placa de desarrollo

Características	Detalle	Requerimiento	Cumple con requerimiento
Tensión de alimentación	De 3.3V (DC)	De 3.3V a 5V (DC)	Sí
Corriente de alimentación	Hasta a 300 mA	Hasta a 450 mA	Sí
Velocidad de reloj	20Mhz	20Mhz	Sí
Tamaño de memoria RAM	2 KB	2 KB	Sí
Memoria flash	32KB	32KB	Sí
Interfaces de operación	UART, TWI, SPI.	UART, TWI, SPI.	Sí
Arquitectura	8 bits	8 bits	Sí
Cantidad de pines de entrada	14 digitales y 6 analógicos	Al menos 11 digitales y 2 analógicos	Sí
Peso	50g	Menor a 60g	Sí
Dimensiones	5.3x25.4x0.5 cm	Menor a 6x3x0.5 cm	Sí
Radio LoRa		Transceptor	Sí
Banda de operación LoRa		915 Mhz	Sí
Sensibilidad LoRa		Al menos -136dBm	Sí
Potencia de transmisión LoRa		20dBm	Sí

3.3.4. Selección del módulo GSM/GPRS

Para la transmisión de datos hacia el Internet se necesita un módulo GSM que permita la conexión mediante una red móvil celular. Se dos módulos disponibles en el mercado como se observa en la Tabla 34.

Tabla 34

Comparación módulos GSM

Módulo	Chip GSM/GPRS	Tipo	Precio
Geek Electronics	SIM8001	Módulo	Medio
SimCOM	SIM9001	Shield	Alto

De la comparación se selecciona el módulo de la marca Geek Electronics debido a que cumple con los requerimientos propuestos y tiene un precio accesible. La placa y distribución de los pines se muestra en la Figura 31. Además, la Tabla 35 muestra los requerimientos del módulo GSM/GPRS comparados con la placa elegida.

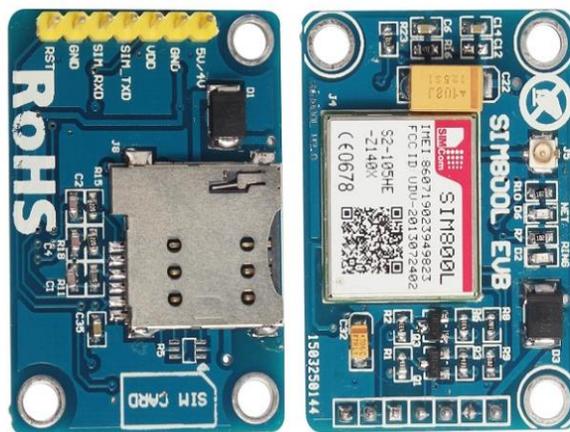


Figura 31. Pinout módulo GSM/GPRS

Fuente (GeekElectronics, 2019)

Tabla 35
Características módulo GSM/GPRS

Características	Detalle	Requerimiento	Cumple con el requerimiento
Tensión de alimentación	5V (DC)	De 3.3V a 5V (DC)	Sí
Corriente de alimentación	Hasta a 500 mA	Hasta a 500 mA	Sí
Bandas	850 / 1900 MHz	850 / 1900 MHz	Sí
Sensibilidad	-100dBm	Al menos -100dBm	Sí
Peso	45g	Menor a 50g	Sí
Dimensiones	3.9x2.9x0.4 cm	Menor a 4x3x0,5 cm	Sí

3.3.5. Selección de la fuente de energía.

Se elije alimentar a los módulos con conexión directa de energía a un tomacorriente en lugar de baterías para minimizar el costo, disminuir el riesgo de una falla en la batería y porque al realizar las mediciones cerca de estructuras que disponen de un tomacorriente, no es necesario baterías. Para tal efecto, se necesita una fuente de 5V de corriente directa (DC) para alimentar los módulos. Se selecciona un cargador de celular de marca CIRO que tiene las especificaciones de la Tabla 36 y están en el rango de los requerimientos mostrados en la Tabla 25.

Tabla 36
Características fuente de tensión

Requerimiento	Detalle	Requerimientos	Cumple con los requerimientos
Tensión de alimentación	120V (AC) – 60Hz	120V (AC) – 60Hz	Sí
Corriente de alimentación	200mA	Hasta 200mA	Sí
Clavija	Tipo A	Tipo A o B	Sí
Tensión de salida	5V (DC)	De 3.3V a 5V (DC)	Sí
Corriente de salida	2 A	Al menos 1.5A	Sí
Peso	Menor a 100g	Menor a 100g	Sí
Dimensiones	4.5x3x3 cm	Menor a 5x3x4 cm	Sí

3.3.6. Estructura del hardware

Las entradas y salidas del hardware se muestran en la Figura 32

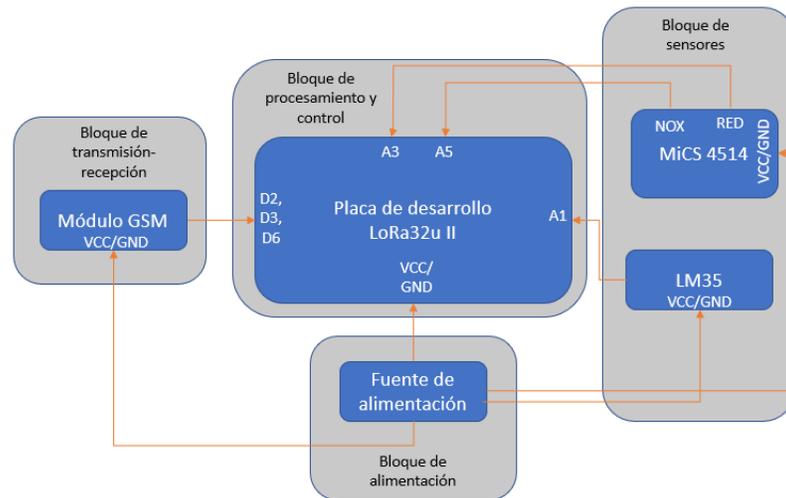


Figura 32. Pinout hardware

a. Bloque de sensado y procesamiento

El bloque de sensado consta con dos sensores, el primero monitorea CO y NO₂ y el segundo es el sensor de temperatura LM35 como se muestra en la Figura 32.

Módulo de temperatura

Se debe obtener el valor analógico de su pin de salida que corresponde a la temperatura medida. La placa de desarrollo cuantifica los valores de sus pines analógicos con 10 bits, es decir usando 1023 niveles y se alimenta con 3.3V, de tal forma que 0V será igual al nivel 0 y 3.3V será igual al nivel 1023. Así, con regla de 3 simple se puede obtener el valor de la tensión del LM35. Para esto se creó una variable float en Arduino llamada *lm* y se tomó 5 valores con un retardo de 300ms. Posteriormente, en la variable temperatura se colocó el valor del promedio de las 5 mediciones.

Módulo CO y NO2

De ese módulo se obtiene el valor de la tensión en las entradas A3 para el CO, haciendo un promedio de 10 mediciones con intervalos de 300ms y guardándolas en la variable “co” y de la misma forma para el NO en la entrada A5 para la variable “no”

Usando la ecuación 8 y el valor medido del módulo, se procede a obtener la concentración en ppm para el CO como se muestra en la ecuación 4 y el NO2 como se muestra en la ecuación 6.

Posteriormente, se procede a obtener el valor en microgramos por metro cúbico como lo muestra el Ministerio de Ambiente del Ecuador. La fórmula de la conversión de muestra en la ecuación 9 (CCSSO, 2006)

$$Cc = 0.0409 * ppm * peso * 1000 \quad \text{EC (9).}$$

Donde:

- Cc= concentración en microgramos por metro cúbico ($\mu g/m^3$)
- ppm= concentración del gas en partes por millón
- peso= peso molecular del contaminante en gramos sobre mol. Para el CO es $28.01g/mol$ y para el NO2 es $46.01g/mol$ (Glynn & Gary, 1991)

A este valor se le aplica la ecuación 2 para corregir según las condiciones locales y se agrega al payload de LoRa

b. Bloque de transmisión - recepción

El módulo LoRa está integrado a la placa de desarrollo, así que con la librería llamada “LoRa.h” de Arduino se tiene que cambiar los pines de control SS, RST y DIO como se especifica en la Figura 30 para que se pueda comunicar el micro controlador con el módulo LoRa.

Además, se tiene que levantar una comunicación serial entre la placa desarrollo y el módulo GSM/GPRS, por lo tanto, se procedió a seleccionar los pines digitales 2 y 3 en la placa de desarrollo para que sirvan como transmisión y recepción respectivamente. De esta forma, el pin 2 de la placa de desarrollo se conecta al RXD del módulo y el 3 al TXD y se inicializa la comunicación serial.

c. Bloque de alimentación

Usando la fuente de alimentación seleccionada y un cable de bus serial universal (USB) se alimenta la placa de circuito impreso (PCB) y los módulos usados. Además, se realiza un plano de tierra en la PCB conectado al negativo de la alimentación para minimizar el posible ruido, mejorar las lecturas de los sensores y la comunicación de la placa de desarrollo con el módulo GSM/GPRS.

Las conexiones en el diagrama se muestran en la Figura 33. Cabe recalcar que el módulo GSM/GPRS encerrado en líneas punteadas de color rojo solo está presente en el gateway.

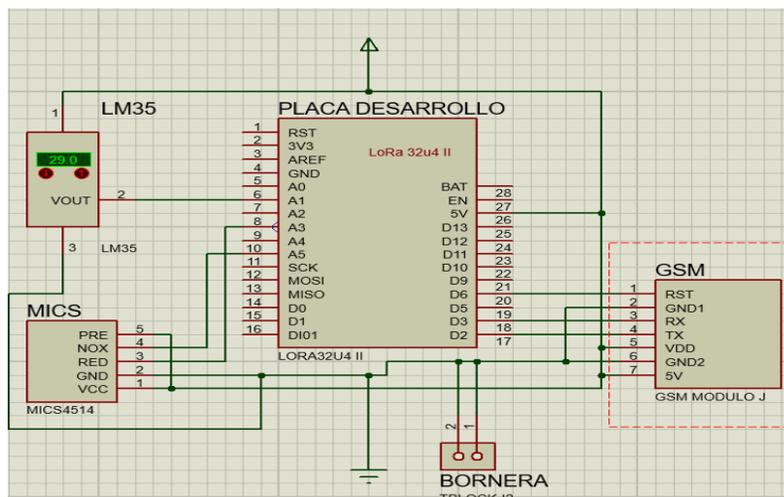


Figura 33. Conexiones nodos

3.4. Diseño de Software

El software es la parte lógica de la obtención y envío de los datos de temperatura, CO, NO₂ y los demás identificadores de LoRaWAN para luego almacenarlos en una base de datos y mostrarlos en una aplicación web para su visualización en Internet.

3.4.1. Requerimientos de software

En este apartado se analizan estas especificaciones de requisitos de software (ERS) tomando en cuenta el estándar IEE 830-1998 que sugiere que los requisitos de software deben incluir un “propósito, ámbito del sistema, definiciones, referencias y una visión general del documento.” (IEEE 830-1998, 1998). Por lo tanto, se analizan los requerimientos funcionales (RF) y requerimientos no funcionales (RNF) del software.

Los RF son, según Requeridos (2018), los servicios que prestará el sistema como interacciones con el usuario y con otros procedimientos, es decir, muestra lo que el sistema

debe hacer. Por otro lado, los RNF son las propiedades del sistema como “rendimiento, seguridad y disponibilidad” (Requeridos, 2018).

a. Requerimientos funcionales (RF) del software

Los RF se obtienen para el sistema del envío de datos (nodos) y para el sistema de la aplicación web donde se mostrará la información y de la base de datos. En la Tabla 37 se muestran los RF de los nodos

Tabla 37

RF nodos

Identificador	Nombre	Descripción
RF1	Sensores	Se obtiene el valor de CO, No y temperatura
RF2	Envío	Se envía el paquete por LoRa
RF3	Recepción	Se recibe el paquete por LoRa (solamente el gateway)
RF4	GSM/GPRS	Se envía el paquete a la base de datos mediante GPRS (solamente el gateway)

En la Tabla 38, se muestran los RF del sistema web

Tabla 38

RF de la aplicación web

Identificador	Nombre	Descripción
RF7	Ingreso a la aplicación web	EL usuario debe ingresar a la aplicación web validando sus credenciales.
RF8	Registrarse	El usuario se registra en la plataforma
RF9	Obtener información de la base de datos	Se debe ingresar pedir la información de los sensores a la base de datos y validar las credenciales.
RF10	Mostrar página principal	Se muestra la página home al usuario para que pueda ingresar a las demás páginas
RF11	Mostrar páginas de gráficas, tablas y mapa de calor	Si el usuario selecciona los menús, se deben abrir en otras ventanas
RF12	Descargar datos en Excel	El usuario puede descargar los datos de cada sensor en formato .xls

En la Tabla 39, se muestran los RF del sistema de la base de datos

Tabla 39*RF de la base de datos*

Identificador	Nombre	Descripción
RF13	Petición	Mediante el método POST, la base de datos recibe una petición para ingresar los datos
RF14	Insert data	Si el token es el correcto, se ingresan los datos a la página web
RF15	ACK	El servidor de base de datos devuelve como respuesta la hora actual como ACK
RF16	Enviar datos	Cuando la base de datos reciba una petición, verifica credenciales y envía la información

b. Requerimientos no funcionales (RNF) del software

En la Tabla 40, se muestran los RNF de los nodos.

Tabla 40*RNF nodos*

Identificador	Nombre	Descripción
RNF1	Encriptación	La carga útil LoRa debe estar encriptada por el AES-128
RNF2	Bloqueos del microcontrolador	Se activa el Watch Dog Timer (WDT) del microcontrolador para evitar que se bloquee
RNF3	Librerías	Las librerías del IDE de Arduino

En la Tabla 41, se muestran los RF del sistema de la base de datos

Tabla 41*RF de la base de datos*

Identificador	Nombre	Descripción
RF16	Token de la API	Se verifica que el token haya sido una de las generadas para esa aplicación
RF18	Credenciales	Verifica las credenciales y envía la información al servidor web

3.4.2. Estructura del software

La estructura del software comprende el diagrama de bloques que se muestra en la Figura 34. La información de la lectura de los sensores se toma cada 6 minutos para tener 10 datos cada hora y obtener un promedio. Esto se pensó así ya que en la norma ecuatoriana de aire se verifica la concentración de los contaminantes realizando un promedio de las muestras obtenidas en al menos una hora. Después de obtener el valor de los sensores, se compensa los datos de temperatura y se corrige la concentración obtenida de CO y NO2 según la ecuación dada por el Ministerio de Ambiente del Ecuador. Posteriormente se conforma el mensaje LoRa y se envía al gateway con un identificador de cada nodo. El gateway realiza la verificación según la activación por personalización (ABP) de LoRa y agrega a la carga útil el localizador uniforme de recursos (URL) de la base de datos y el token para la aplicación web. De esta manera, se crea una conexión GPRS con el módulo GSM y se envía la información mediante el método POST a la base de datos.

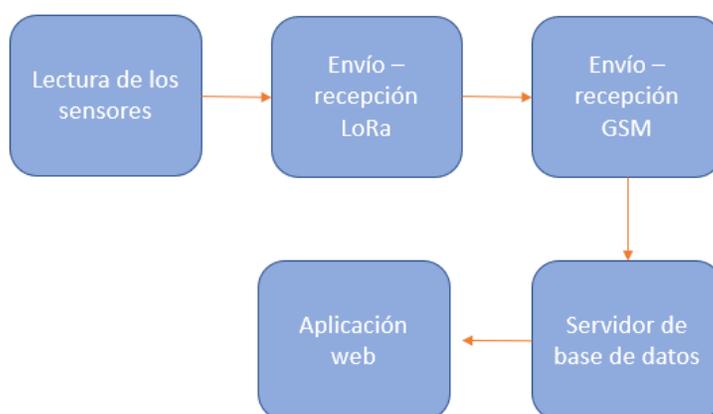


Figura 34. Bloques del software

Finalmente, la aplicación web realiza las consultas necesarias a la base de datos para mostrar la información al usuario.

3.4.3. Diseño del programa en Arduino

La placa de desarrollo es compatible con el IDE de Arduino, por lo que se programó pensando en ese entorno. No se usa servidores de red LoRa públicos ya que tienen limitantes como, por ejemplo, The Things Network (TTN) que en su política de acceso justo informa que se debe tener como máximo 10 mensajes de bajada al día, incluyendo los ACK (TTN, 2019). Al contrario, se otorga la función de servidor de red al gateway y se hacen las verificaciones respectivas de los nodos según ABP.

a. Diseño del programa en Arduino del nodo

En la Figura 35 se muestra el diagrama de flujo correspondientes a los cinco (5) nodos de la red. Se usa las librerías de LoRa para configurar el chip SX1276 seleccionado.

La memoria de solo lectura programable y borrrable eléctricamente (EEPROM) se utiliza para guardar el número de intento del paquete enviado por LoRa, es decir, cada vez que llegue un mensaje de acuse de recibido (ACK) al nodo luego de enviar un paquete LoRa al gateway, se sumará una unidad a este contador. De esta manera, si existe un fallo en la comunicación se podrá verificar en la base de datos si fue por la conexión GPRS o LoRa.

La librería AES de Arduino se usa para encriptar el Payload de LoRa con AES-128 usando como clave la llave de sesión de aplicación AppSKey. Esta llave es una cadena aleatoria de 128 bits. Además, se usa el “watch dog timer” (WDT) que es una medida de seguridad para evitar bloqueos del sistema. (GG1, 2013).

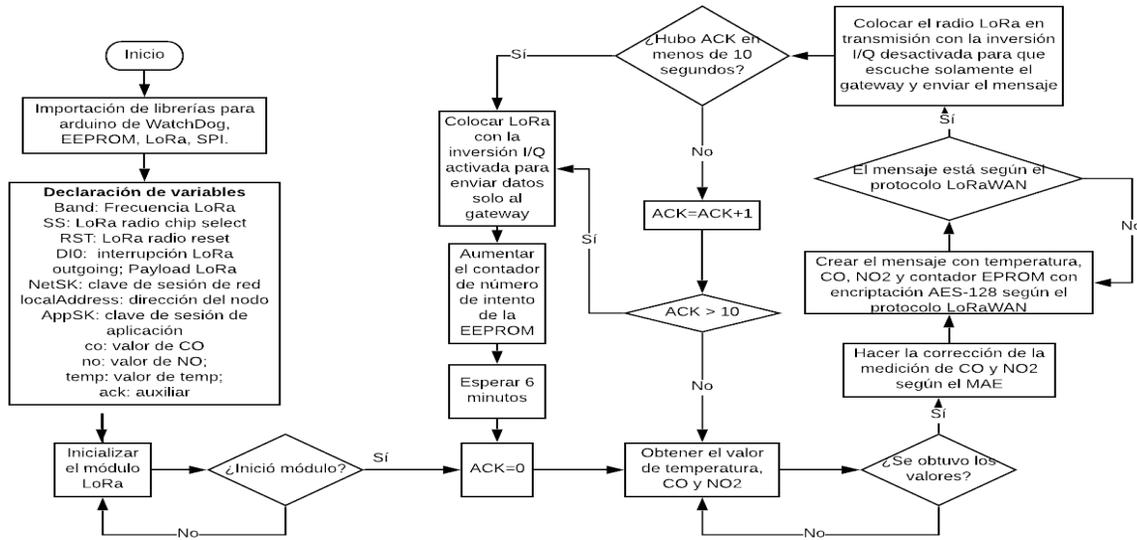


Figura 35. Diagrama de flujo nodo

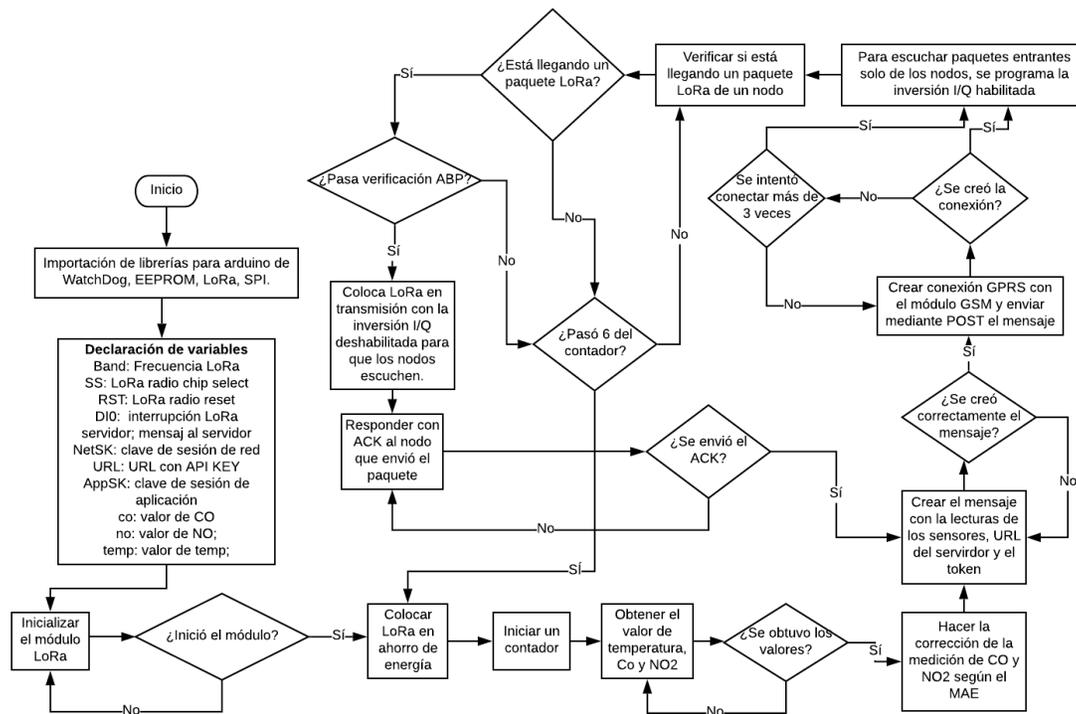


Figura 36. Diagrama de flujo gateway

En la Figura 36 se muestra el diagrama de flujo del gateway. Se puede observar que está sirviendo como servidor de red ya que hace la verificación ABP con la NeksKey, la AppSKey y la dirección del nodo. Al enviar la información por el módulo GSM, crea una conexión GPRS y se usa el método POST. Existe un token para que solamente las personas con esa clave puedan ingresar datos a la base.

b. Diseño e implementación de la aplicación web

En este apartado se analizará el backend, el frontend del sistema y cómo las diferentes tecnologías y elementos permiten interactuar al servidor y al usuario como se muestra en el diagrama de la Figura 37.

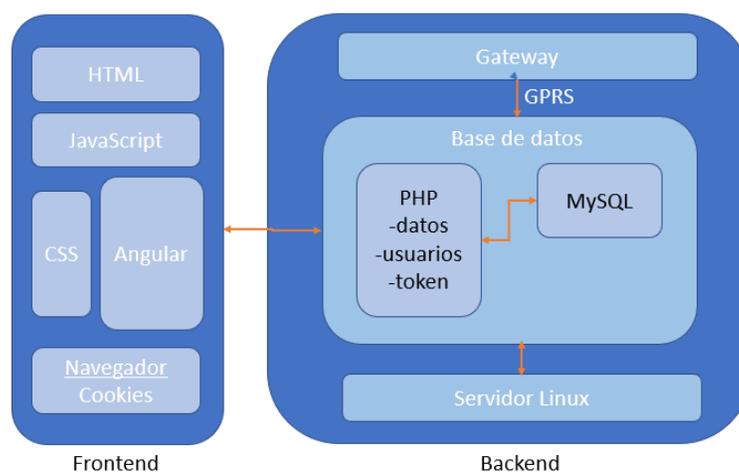


Figura 37. Diagrama de tecnologías

Frontend

El frontend describe la interfaz gráfica que el usuario ve y accede por un navegador. Posee diseños y elementos gráficos de la página. El frontend comprende:

- HTML: crea la estructura visual de una página web como la cabecera, cuerpo, pie de página, etc.
- CSS: cambia lo relacionado a los colores, tipografía, tamaño, etc.
- JavaScript: es un lenguaje que sirve para interactuar con el usuario y crear objetos.
- Angular: es un framework para aplicaciones web de una sola página (SPA).

Ahora, usando las herramientas anteriores y según los requerimientos funcionales y no funcionales del software se propone el diseño de la aplicación web según el storyboard de la Figura 38 donde se muestran 6 pantallas que se detallan así:

- Pantalla 1: Para ingresar al sitio con las credenciales de usuario.
- Pantalla 2: Para registrarse según el tipo de usuario. Existen dos (2) tipos de usuarios. El regular y el premium, este último podrá acceder a mejores funcionalidades de la aplicación web.
- Pantalla 3: Es donde se muestra un resumen de los sensores y los últimos datos que han llegado.
- Pantalla 4: Se muestra una tabla con la información de cada sensor sobre los valores medidos y la fecha de ingreso del dato. En esta pantalla se podrá descargar un archivo en Excel de toda la información obtenida por los nodos,
- Pantalla 5: Se exponen los datos medidos en gráficos.
- Pantalla 6: Se observa un mapa de calor donde se muestra con colores los sectores con mayor concentración de contaminantes en el campus.

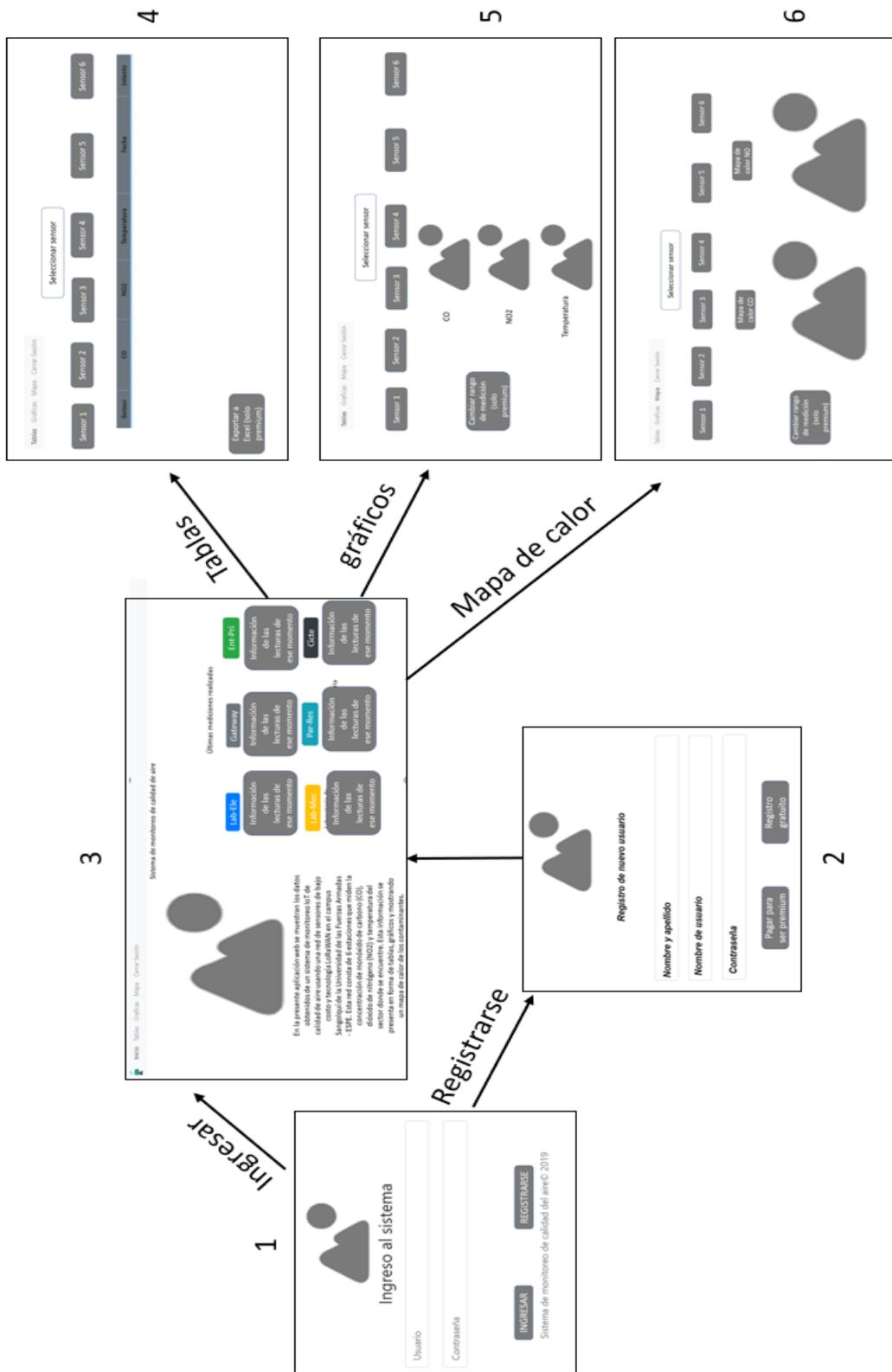


Figura 38. Storyboard aplicación web

Backend

El backend es la arquitectura interna que el usuario no puede ver, pero está a cargo de toda la parte lógica del sitio web. Generalmente cuenta con una serie de lenguajes y frameworks, sin embargo, este proyecto solo usa PHP y JavaScript como herramientas de desarrollo. El backend está formado de:

- PHP: permite la conexión a la base de datos (BD)
- CPanel: donde se puede administrar los servicios más importantes del alojamiento del sitio web.
- phpMyAdmin: administra el sistema de gestión de la BD MySQL.
- HTTP: permite la transferencia de información en el Internet.
- MySQL: sistema de gestión de base de datos relacional.

Servidor web

Se inició la búsqueda de un servidor web para alojar la aplicación donde se pueda implementar las herramientas de frontend y backend. Se usa el servidor de Kubxy Corp ya que es un servidor de tráfico ilimitado y sin límites en las peticiones requeridas, además, se pudo obtener hosting gratuito en un subdominio llamado demo2 obteniendo la dirección <http://demo2.kubxy.com>. Las características son:

- Espacio en disco: 1GB
- Ancho de banda: ilimitado
- Sistema operativo: Linux
- Arquitectura: x64

Base de datos

Estructura de la base de datos:

Se crea tres (3) tablas en MySQL para almacenar los datos. La primera es llamada “datos” y es donde se guardarán toda la información de los sensores según un identificador para diferenciarlos. La segunda tabla se llama “token” para validar el ingreso de la información a la tabla “datos” mediante el método POST y la última tabla se llama “usuarios” y es donde se coloca la información de estos. Las tablas se muestran en la Figura 39.

En las Tablas 42, 43 y 44 se muestra los tipos de datos según la tabla y su descripción.

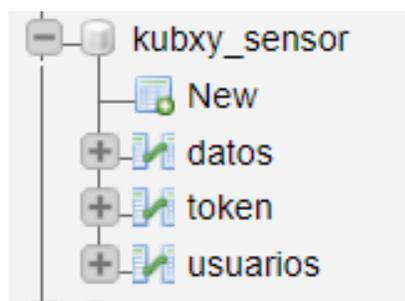


Figura 39. Estructura BD

Tabla 42

Tipos de variables tabla datos

Tabla	Variable	Tipo	Descripción
datos	id	int	Contador de todos los datos ingresados a la base
	sensor	varchar	El identificador del sensor
	CO	decimal	Concentración de CO
	NO2	decimal	Concentración de NO2
	intento	int	Contador del envío de datos de los sensores

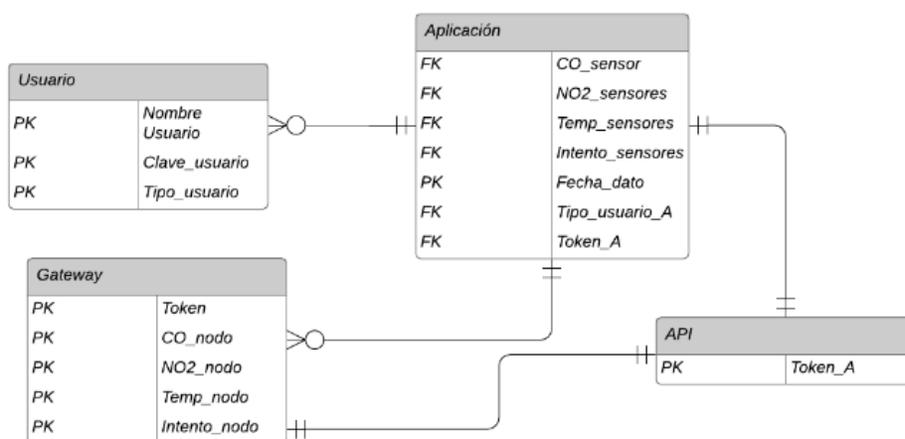
Tabla 43*Tipos de variables tabla token*

Tabla	Variable	Tipo	Descripción
token	id	int	Identificador del token
	token	varchar	Token

Tabla 44*Tipos de variables tabla usuarios*

Tabla	Variable	Tipo	Descripción
usuarios	id	int	Identificador del usuario
	nombre	varchar	Nombre del usuario
	user	varchar	Usuario
	pass	varchar	Contraseña
	cuenta	varchar	Tipo de cuenta (0 si es gratuita y 1 si es premium)

Para explicar mejor las tablas y la relación de los actores de la base de datos, se muestra un diagrama de entidad – relación (DER) de estas en la Figura 40. Un DER representa entidades de la base de datos de forma gráfica para entender la relación entre la información.

**Figura 40.** DER de la base de datos

En la base es donde se registra la información de los sensores como se muestra en el diagrama de secuencia de la Figura 41. Como se puede observar, solo se ingresa los datos si el token de la API es correcto.

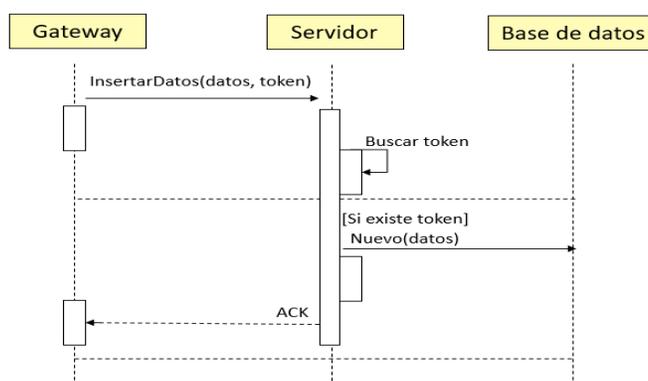


Figura 41. Diagrama de secuencia insert data

Por otro lado, para la consulta de información que se realiza con un script PHP, el servidor debe solicitar la información con las credenciales para acceder a la base de datos. Este diagrama de secuencia se muestra en la Figura 42.

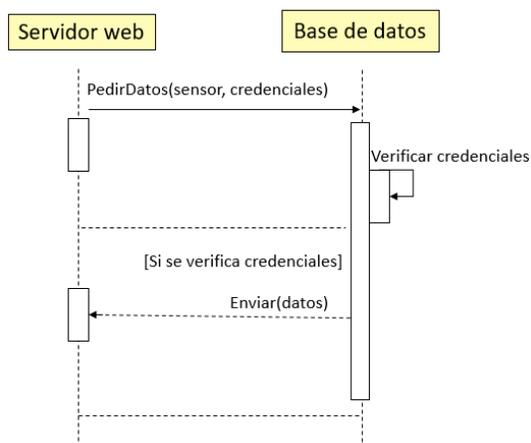


Figura 42. Diagrama base de datos petición

3.5. Implementación

3.5.1. Circuito implementado de los nodos

Se procedió a realizar la placa de circuito impreso (PCB) como se muestra en la Figura 43.

Cabe recalcar que, a pesar de que se aprecian el sensor de temperatura LM35 y el sensor de contaminantes MiCS 4514 directamente conectados en la placa, se va a colocar en esos lugares cables para extender estos conectores y lograr ubicar los sensores donde deben estar según el diseño de la carcasa.

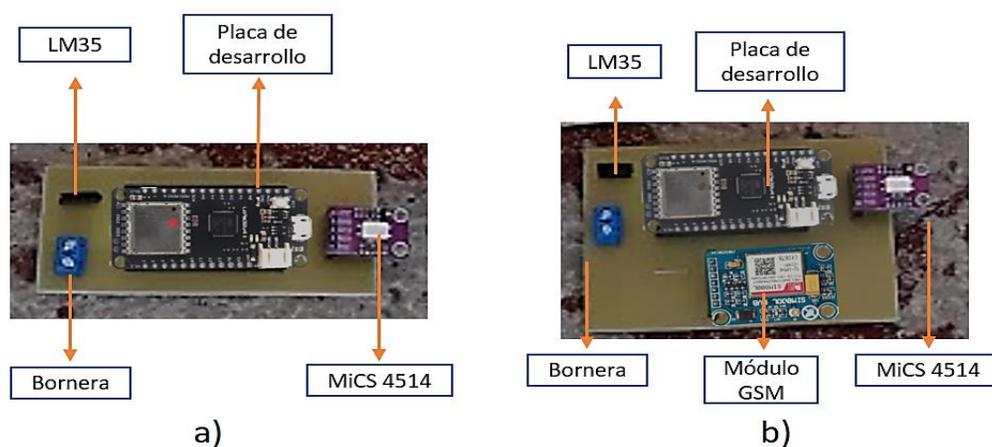


Figura 43. Circuito implementado
 a) circuito nodos b) circuito gateway.

3.5.2. Diseño de la carcasa

Para iniciar con el diseño de la carcasa se investiga las garitas o “abrigos meteorológicos” para tener una guía de construcción. Según Brunet, & Sigró (2008) se utiliza comúnmente la garita Stevenson que cumple con las recomendaciones de la

Los elementos numerados en rojo en la Figura 44 corresponden a:

1. Salida del LM35 (agujero de $5 \times 7 \text{ mm}$)
2. Salida solamente del sensor MiCS de la placa (agujero de $5 \times 7 \text{ mm}$)
3. Antena LoRa
4. Agujero para ingreso y asegurado de la antena LoRa de radio de 7 mm
5. Agujero para ingreso de cable para alimentar la fuente de radio de 7 mm

Para el gateway la disposición de la antena LoRa es distinta ya que está por encima de toda la carcasa y bajo otro techo; esto se pensó ya que recibe la señal LoRa de los nodos por casi sus 360° , por lo tanto, no debe estar tapada. La carcasa del gateway se muestra en la Figura 45. La antena GPRS está donde solía estar la antena LoRa de los nodos.

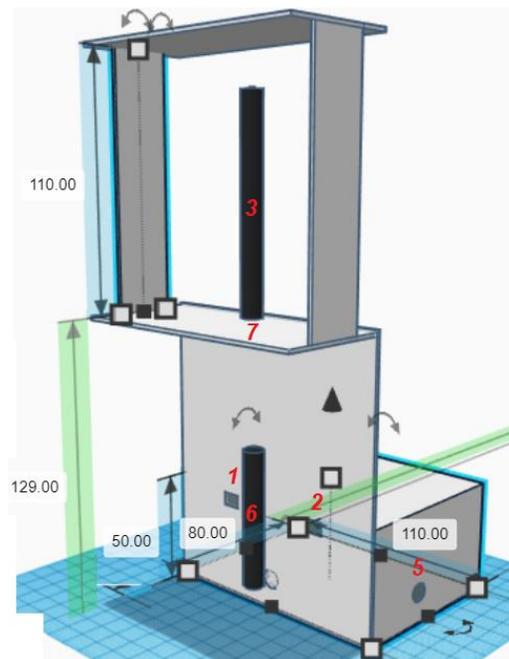


Figura 45. Carcasa gateway

3.5.3. Dispositivo implementado

Se procede a armar el nodo en la carcasa construida según el diseño como se muestra en la Figura 46. En la Figura 47 y 48 se muestra el nodo y el gateway ya montado respectivamente.

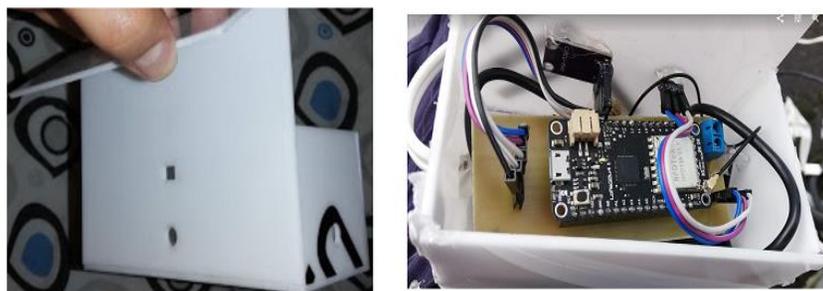


Figura 46. Construcción nodo

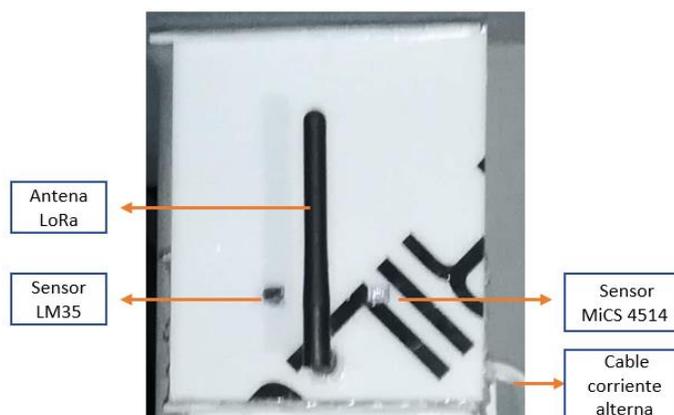


Figura 47. Nodo construido

Por último, se procede a colocar los nodos en su lugar luego de las pruebas realizadas en el capítulo IV. La ubicación de los nodos se muestra en la Figura 48.

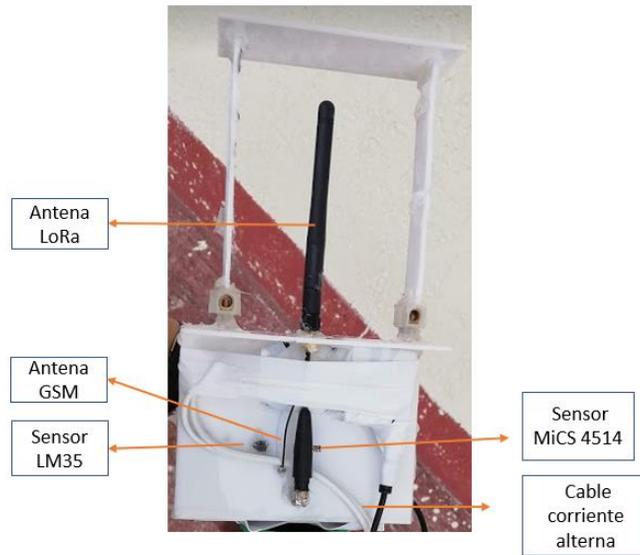


Figura 48. Gateway construido



Figura 49. Ubicación nodos

3.6. Protocolos de prueba

Para la validación de los nodos, sensores y del sistema son necesarias ciertas pruebas. En este apartado se describen aquellas que se realizan para asegurar la fiabilidad y correcto funcionamiento de los sensores y de la comunicación de datos entre nodos y hacia la base de datos.

3.6.1. Prueba N°1: calibración del sensor MiCS 4514

Esta prueba pretende validar la calibración, exactitud y confiabilidad del sensor MiCS 4514, para ello se debe encontrar el valor de R_o de cada una de las salidas del sensor (R_{oRED} y R_{oNOX}) y usarlo para calibrarlos. De esta manera, se toma como equipo de referencia una estación llamada AQM65 de la empresa aeroQUAL que mide O3, NO2, CO, SO2, VOC, H2S, CO2, PM2.5 y PM10. Este equipo está disponible en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE en Sangolquí y ha sido calibrado, según lo indicado por el Jefe de Laboratorio de Ambiental de la universidad, en el mes de febrero de 2019. Para esto, se pretende obtener la medición de la concentración del CO y NO2 del dispositivo e introducirlo como dato en un programa de Arduino junto con su correspondiente R_s para despejar la R_{oRED} y la R_{oNOX}

En la ecuación 9 y 10 se observa el despeje de los R_o par la salida RED y NOX (R_{oRED} y R_{oNOX}) respectivamente.

$$R_{oRED} = \frac{R_{sRED}}{3.5045(CO_{ppm})^{-0,842}} \quad \text{EC (9)}$$

$$R_{oNOX} = \frac{R_{sNOX}}{5.5604(NO2_{ppm})^{0,9587}} \quad \text{EC (10)}$$

Visualizando la ecuación 9 y 10, es necesario saber el valor de R_s de la salida RED y de la NOX ($R_{S_{RED}}$ y $R_{S_{NOX}}$) y la concentración del gas correspondiente para calcular el valor de $R_{O_{RED}}$ y $R_{O_{NOX}}$.

Por lo tanto, para calcular $R_{O_{RED}}$ y $R_{O_{NOX}}$ se coloca como dato la concentración en ppm del CO o del NO₂ mostrados por el equipo de referencia en ese momento y se adquiere el valor de $R_{S_{RED}}$ y $R_{S_{no}}$ tomando la tensión de cada salida mediante la placa de desarrollo y despejándolas con el divisor de voltaje mostrado en la ecuación 8.

Procedimiento para calibrar la salida RED de CO y NOX de NO₂.

1. Colocar el nodo 1 junto al equipo de referencia y alimentarlo eléctricamente según la Figura 50.
2. Conectar el nodo a un computador y abrir el IDE de Arduino para observar el valor de R_o calculado.
3. Comprobar el valor de concentración de CO (NO₂) del equipo de referencia y documentarlo.
4. Calcular el valor de la tensión de la salida RED (NOX) y despejar $R_{S_{RED}}$ ($R_{S_{NOX}}$) con la ecuación del divisor de voltaje mostrado en la ecuación 8.
5. Calcular el valor de $R_{O_{RED}}$ ($R_{O_{NOx}}$) con la ecuación 9 (10) colocando como dato los valores de concentración de CO (NO₂) y $R_{S_{RED}}$ ($R_{S_{NOX}}$) obtenidos en el paso 3 y 4 respectivamente.
6. Documentar el valor obtenido en la Tabla 45.
7. Repetir los pasos 3 y 4 cuando haya cambios en la concentración de CO (NO₂) del equipo de referencia para obtener los diferentes valores de $R_{O_{RED}}$ ($R_{O_{NOx}}$) en una hora.

8. Repetir el paso 3, 4 y 5 para la salida NOX.
9. Repetir el paso 1 al 6 para los nodos 2, 3, 4, 5 y 6
10. Analizar los resultados

Tabla 45

Tabla para el Ro de CO (NO2)

Identificador del nodo	Promedio $Ro_{RED} (Ro_{NOx}) [\Omega]$
-	-



Figura 50. Diagrama de conexión prueba MiCS

3.6.2. Prueba N°2: sensor de temperatura LM35

Esta prueba pretende validar la sensibilidad, exactitud y repetibilidad del sensor LM35. Para esto, se realiza un programa en Arduino para obtener las mediciones del sensor LM35 y se compara con un dispositivo de referencia de la marca Proskit, modelo NT-312 que tiene una resolución de 0.1°C y una exactitud de $\pm 1^{\circ}\text{C}$

Procedimiento

1. Colocar el nodo 1 junto al sensor de referencia y alimentarlo eléctricamente como se muestra en la Figura 51.
2. Conectar el nodo a un computador y abrir el IDE de Arduino para verificar la medición del LM35.
3. Anotar la medición de temperatura del LM35 y del sensor de referencia en la Tabla 46.
4. Realizar el monitoreo por 5 minutos.
5. Repetir el paso 1 al 4 para los nodos 2, 3, 4, 5 y 6.

Tabla 46

Calibración temperatura

Identificador del nodo	Temperatura del sensor de referencia [°C]	Temperatura del sensor LM35 [°C]	Error [%]
-	-	-	-

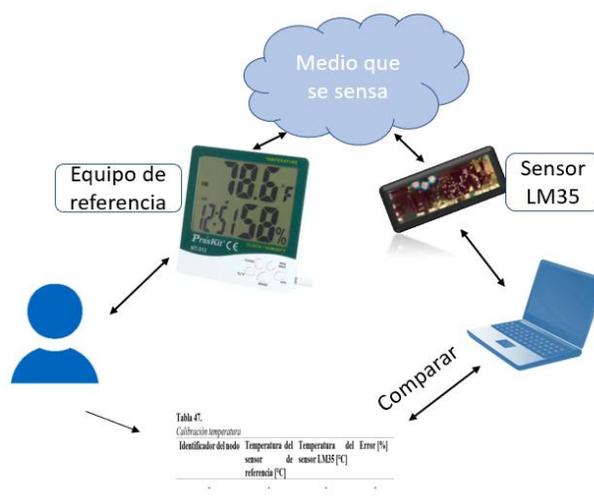


Figura 51. Diagrama prueba sensor temperatura

3.6.3. Prueba N°3: obtención del SF de la red LoRa

Esta prueba permite verificar el SF necesario para una comunicación adecuada en el escenario real.

Procedimiento

1. Colocar el nodo gateway y el nodo 1 en su lugar del campo de pruebas como se muestra en la Figura 52 y configurar el SF en el mínimo (SF=7).
2. Probar la comunicación por 10 minutos y documentar el RSSI y la SNR de los paquetes recibidos por el gateway. Sacar promedio de 5 paquetes recibidos y colocar en la Tabla 47.
3. Subir el SF en 1 y repetir el paso 3 hasta llegar a un SF de 12 y registrar en la Tabla 47.
4. Repetir el paso 1, 2 y 3 para el nodo 3, 4, 5 y 6.
5. Graficar los datos obtenidos.
6. Analizar y concluir el SF que se va a utilizar

Tabla 47

Prueba conexión LoRa

Nodo	SF	RSSI	SNR
7	-	-	-
8	-	-	-
9	-	-	-
10	-	-	-
11	-	-	-
12	-	-	-

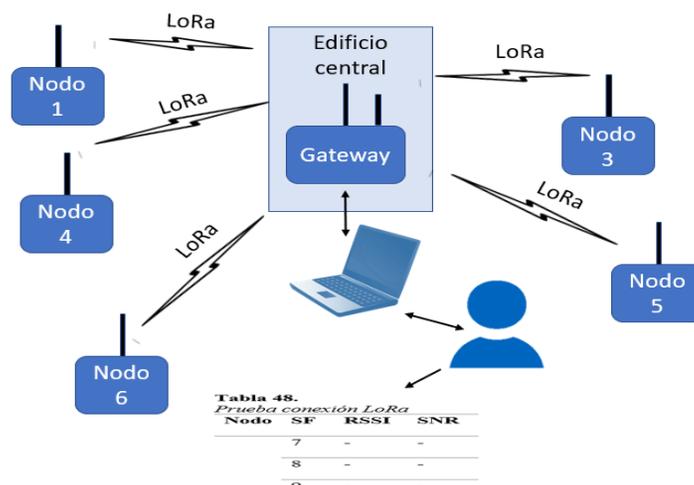


Figura 52. Diagrama pruebas SF

3.6.4. Prueba N°4: Conectividad de red

En esta prueba se pretende verificar el funcionamiento del módulo GSM/GPRS y evaluar la mejor operadora móvil celular para el envío de datos hacia el internet.

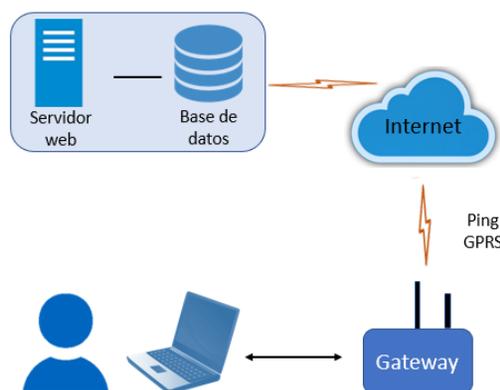
Procedimiento

1. Encender el gateway y conectarlo a un computador mediante el puerto serial como se muestra en la Figura 53 para verificar los datos mostrados por el módulo GSM/GPRS en el monitor serial de Arduino.
2. Colocar un chip de un operador en el módulo GSM/GPRS y comprobar la conexión a la red mediante GPRS.
3. Usar el protocolo ICMP, enviando un ping extendido durante 10 minutos hacia la dirección de la base de datos.
4. Utilizar la herramienta trace route para verificar los saltos que realiza el paquete hasta llegar a la base de datos (servidor).

5. Escribir los resultados en la Tabla 48.
6. Desconectar el servicio.
7. Repetir los pasos del 1 al 6 para diferentes operadoras.
8. Analizar los datos obtenidos.

Tabla 48*Pruebas de latencia operadoras*

Operadora	Promedio de latencia [ms]	Porcentaje paquetes perdidos [%]	Número de saltos hacia la base
-	-	-	-

**Figura 53.** Diagrama prueba módulo GSM / GPRS

3.6.5. Prueba N°5: envío de los datos a la base de datos.

En esta prueba se pretende validar el envío y almacenamiento en la base de datos de la información recolectada por el gateway.

Procedimiento

1. Encender un nodo para captar y enviar datos hacia la base.

2. Conectar el nodo al computador a través del puerto serial para verificar los datos que se van a enviar.
3. Ingresar a la base de datos y verificar la tabla correspondiente de la aplicación para analizar los datos recibidos.
4. Recolectar datos por 1 hora.
5. Comparar los datos obtenidos y analizar.

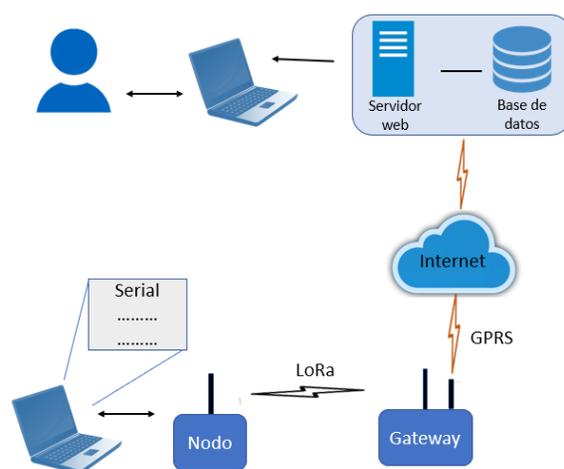


Figura 54. Diagrama pruebas envío de datos

3.6.6. Prueba N°6: Prueba de funcionalidad y confiabilidad del sitio Web.

Las pruebas funcionales permiten verificar que el sitio web funciona de acuerdo a los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema, mientras que los de usabilidad permiten evaluar la aplicación web mediante usuarios de prueba.

Procedimiento

1. Con la red implementada, monitorear durante 1 semana el sitio de prueba.
2. Ingresar a la aplicación web desde una computadora.

3. Evaluar el control de acceso con un usuario regular y uno premium
4. Verificar el acceso a la página de inicio y visualización de los datos en tiempo real
5. Comprobar enlaces entre páginas en las diferentes pestañas.
6. Evidenciar el despliegue de gráficas según la elección del nodo en la pestaña gráficas
7. Observar el despliegue de información en la pestaña tablas según el nodo elegido.
 - a. Comprobar la descarga de la información del nodo elegido.
8. Comprobar el despliegue de las gráficas en la pantalla historial luego de elegir el nodo y tiempo.
9. Verificar el mapa de calor y la información presentada según las opciones de filtro usadas
10. Analizar los resultados.

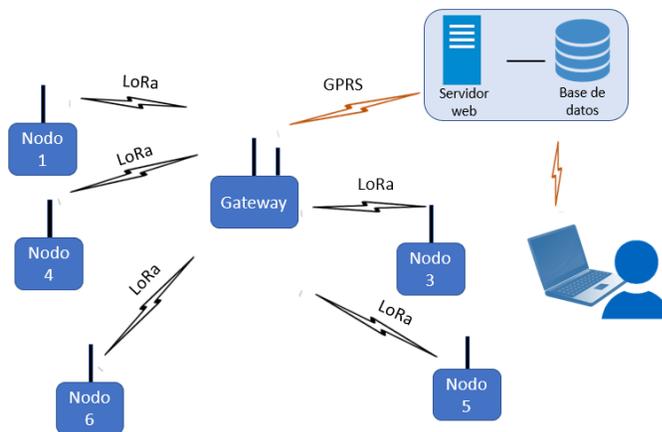


Figura 55. Diagrama prueba red

3.6.7. Prueba N°7: Funcionalidad de toda la red.

Después de las pruebas realizadas, se recolecta la información por dos (2) meses para obtener los resultados de las variables de CO, NO₂ y temperatura y relacionarlos con los datos mostrados por una estación cercana de monitoreo de calidad de aire del municipio.

Procedimiento

1. Ingresar a la aplicación web con un usuario premium.
2. Descargar la información de todos los datos obtenidos en Excel de los dos meses de prueba.
3. Obtener el coeficiente de correlación de las variables de CO, NO2 y temperatura de las estaciones con respecto al equipo de referencia del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ).
4. Graficar y visualizar la información.
5. Analizar los datos y evidenciar la funcionalidad de la red de sensores.

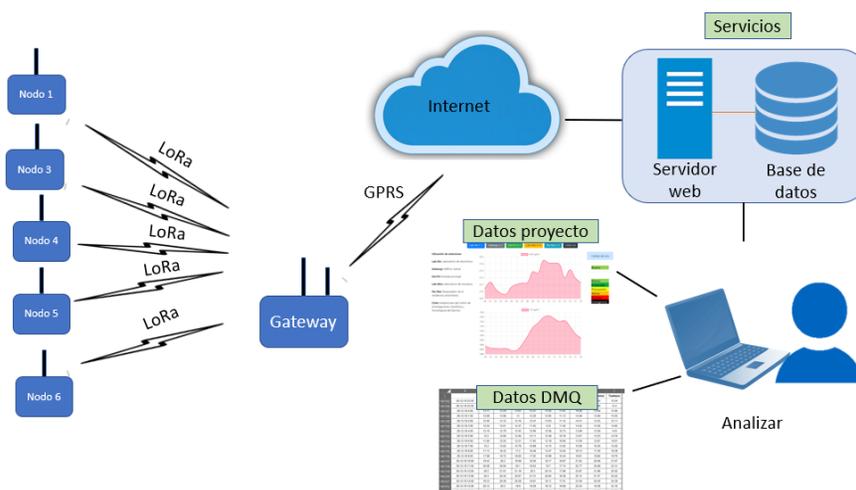


Figura 56. Funcionalidad de la red

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

El sistema de monitoreo consta de 6 nodos o estaciones que tienen integrados sensores para medir la concentración de CO, NO₂ y temperatura. Estos sensores y demás hardware junto con el software son evaluados en este apartado para obtener resultados.

4.1. Sistema de monitoreo

La Figura 57 muestra un diagrama general de red del sistema.

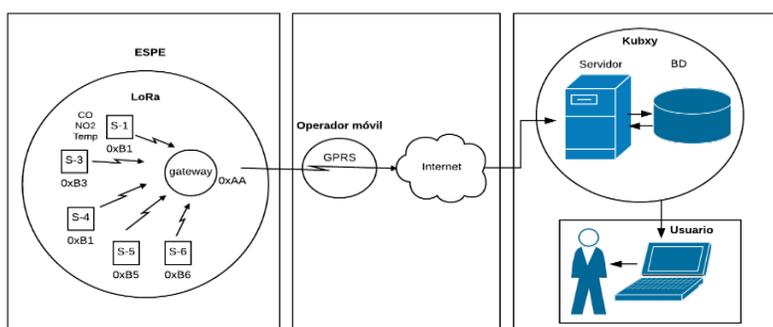


Figura 57. Diagrama general de red del sistema

4.2. Análisis de información de variables sensadas.

4.2.1. Calibración usando pruebas 1 y 2.

a. Salida RED de CO

Se procede con las pruebas para encontrar el Ro de la salida RED ($R_{O_{RED}}$) y así calibrar el sensor. Se arma cada nodo y se coloca en la entrada de aire del equipo de referencia.

El resultado del promedio de la resistencia RO_{RED} de cada nodo se muestra en la Tabla 49.

Tabla 49

Ro salida RED

Identificador del nodo	Promedio RO_{RED} [Ω]
S-1	181795.2
S-2	322768
S-3	116855.6
S-4	218875.5
S-5	314857.5
S-6	172635.8

Teniendo la RO_{RED} de cada sensor, se procede a validar la concentración de CO de los nodos con respecto al equipo de referencia. Cabe recordar que en la prueba inicial se coloca como dato la concentración del gas del equipo de referencia para obtener el RO_{RED} , por lo tanto, se está realizando indirectamente la calibración a la vez que se obtiene el valor de Ro.

Se valida la calibración tomando 50 muestras en un lapso de una hora de todos los sensores para comparar con el equipo de referencia. Se lo realiza con los primeros 3 nodos y posteriormente con los últimos 3. La Figura 58 muestra la verificación con los nodos 1, 2 y 3. Se puede observar que existe mediciones donde el error es 0% y otras donde el error es alto, sin embargo, para verificar si los datos obtenidos por los sensores de los nodos tienen correlación con los datos del equipo referencia, se procede a obtener el coeficiente de correlación de Pearson. Este método sirve para identificar si se tiene una relación lineal entre dos grupos de variables según el valor del coeficiente como se muestra en la Tabla 50.

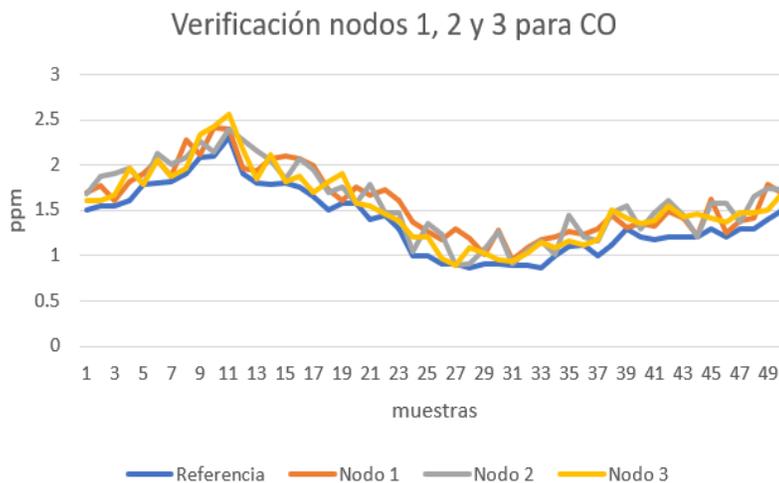


Figura 58. Verificación nodos 1-3 para CO

Tabla 50

Correlación de Pearson

Rango		Relación
± 0.96	± 1.0	Perfecta
± 0.85	± 0.95	Fuerte
± 0.70	± 0.84	Significativa
± 0.50	± 0.69	Moderada
± 0.20	± 0.49	Débil
± 0.10	± 0.19	Muy Débil
± 0.09	± 0.0	Nula

Fuente: (Pérez G. , 2013)

Como se observa en la Tabla 51, y en la Figura 58 la correlación de los datos de los 3 primeros nodos comparado con el equipo de referencia es alta ya que está entre “perfecta” para el nodo S-1 y “fuerte” para los nodos S-2 y S-3, por lo tanto, se podría afirmar que la información obtenida por los sensores es confiable.

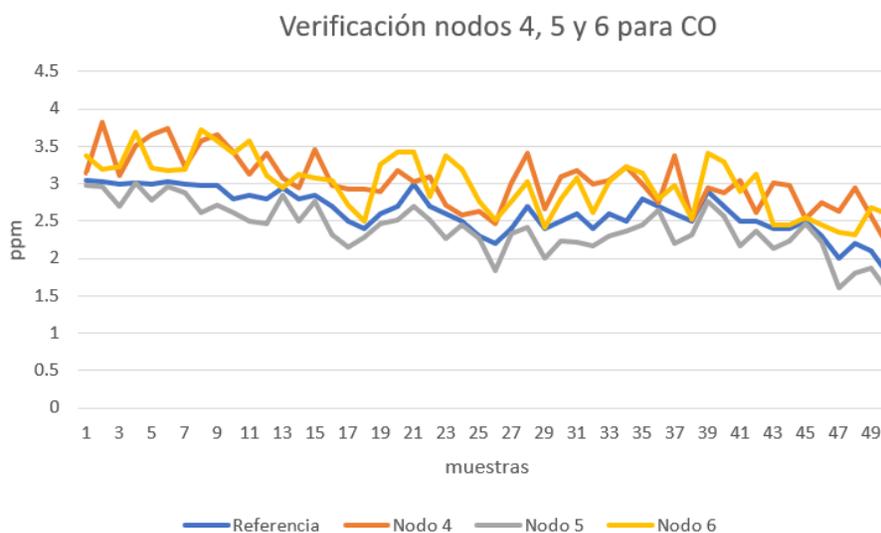
Tabla 51*Correlación nodos 1,2 y 3 para CO*

Identificador del nodo	Coefficiente de correlación	Relación nodo - referencia	Error promedio
S-1	0.94	Perfecta	9.93%
S-2	0.89	Fuerte	11.68%
S-3	0.88	Fuerte	11.13%

Asimismo, se realiza con los nodos faltantes obteniendo como resultado la Figura 59 y la Tabla 52. Como se observa, al tener una correlación fuerte y significativa, los datos pueden considerarse confiables.

Tabla 52*Correlación nodos 4, 5 y 6 para CO*

Identificador del nodo	Coefficiente de correlación	Relación nodo - referencia	Error promedio
S-4	0.81	Fuerte	14.10%
S-5	0.79	Significativa	7.96%
S-6	0.72	Significativa	15.75%

**Figura 59.** Verificación nodos 4-6 para CO

b. Salida NOX de NO2

Se procede a obtener la Ro de la salida NOX (Ro_{NOX}). En Tabla 53 se muestra el resultado del promedio de la Ro de NO2 para cada nodo.

Tabla 53

Ro de salida NOX

Identificador del nodo	Promedio Ro_{NOX} [Ω]
S-1	1212.2
S-2	2389.3
S-3	2567.9
S-4	1027.9
S-5	3987.8
S-6	1789.7

Con este dato, se procede a la validación de la medición de la concentración de NO2 de los sensores con el equipo de referencia. En la Figura 60 y Tabla 54 se muestran los resultados del nodo 1, 2 y 3 mostrando que la calibración ha sido exitosa ya que se tiene correlaciones fuertes y significativas.

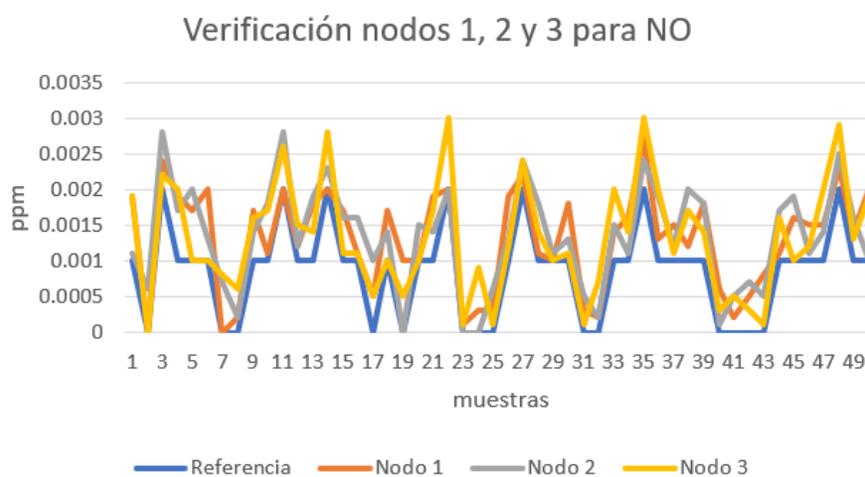
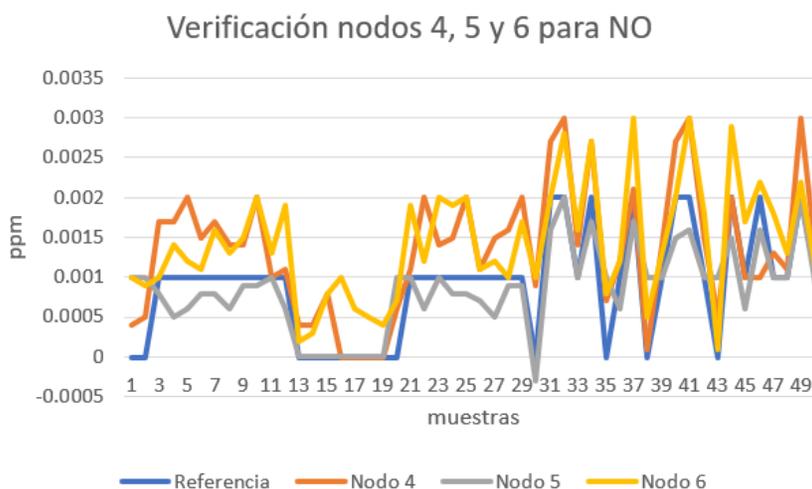


Figura 60. Verificación nodos 1-3 para NO2

Tabla 54*Correlación nodos 1, 2 y 3 para NO2*

Identificador del nodo	Coefficiente de correlación	Relación nodo - referencia
S-1	0.89	Fuerte
S-2	0.83	Significativa
S-3	0.82	Significativa

De igual manera se muestra en la Figura 61 y Tabla 55 los datos de los nodos 4, 5 y 6, verificando que los datos obtenidos por los sensores son confiables ya que se tiene una correlación de 0.87 (fuerte) para el nodo S-4 con respecto a la referencia y una de 0.7 y 0.73 (significativa) para el nodo S-5 y S-6 respectivamente con respecto al equipo de referencia.

**Figura 61.** Verificación nodos 4-6 para NO2**Tabla 55***Correlación nodos 4, 5 y 6 para NO2*

Identificador del nodo	Coefficiente de correlación	Relación nodo - referencia
S-4	0.87	Fuerte
S-5	0.7	Significativa
S-6	0.73	Significativa

c. Sensores de temperatura LM35

Se procede a obtener el valor de la temperatura para los 6 nodos. En la Tabla 56 se puede observar el promedio de las mediciones de temperatura ambiental realizadas en cinco minutos. Como se puede apreciar, los LM35 tienen de 2 a 3°C de diferencia con el sensor de referencia.

Tabla 56

Promedio sensores temperatura

Identificador del nodo	Temperatura del sensor de referencia [°C]	Temperatura del sensor LM35 [°C]	Error [%]
S-1	18.2	20.9	14.84
S-2	19.4	21.5	10.82
S-3	20.1	23.2	15.42
S-4	18.5	21.1	14.05
S-5	22.4	25.4	13.39
S-6	25.2	27.7	9.92

Posteriormente, se procedió a ajustar cada uno de los sensores para obtener datos más cercanos a los mostrados por el equipo de referencia.

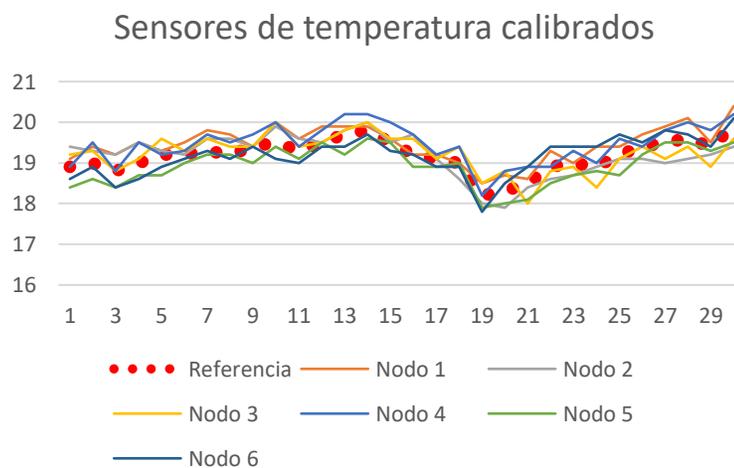


Figura 62. Sensores de temperatura calibrados

Los sensores ajustados se pueden verificar en la Figura 62 y sus errores en la Tabla 57, se puede observar que el error más grande es de 1.47%.

Tabla 57

Promedio sensores de temperatura calibrados

Identificador del nodo	Temperatura del sensor de referencia [°C]	Temperatura del sensor LM35 [°C]	Error [%]
S-1	19.18	19.45	1.44
S-2		19.18	0.03
S-3		19.23	0.28
S-4		19.26	1.47
S-5		18.93	1.29
S-6		19.16	0.1

4.3. Determinación del SF para la red LoRa

Esta prueba se lo realiza para obtener el factor de dispersión (SF) óptimo para la comunicación LoRa verificando el indicador de fuerza de la señal (RSSI) y la relación señal a ruido (SNR) recibidas por el gateway.

El RSSI mínimo con el cual LoRa puede demodular la señal es -120dBm, siendo -30dBm cuando la señal es muy fuerte. Con respecto al SNR, típicamente suele estar entre -20dB y 10dB (TTN, 2018).

En la Figura 63 se muestra un ejemplo de cómo se recibe la información que se va a documentar.

```
Demora en ms: 221
Sent to: 0xcc
Message length: 3
Message: ACK
RSSI: -122
Snr: -9.75
```

Figura 63. Pruebas de SF y tiempo en aire

4.3.1. SF nodo S-1

Para el nodo S-1 se obtiene los resultados de la Tabla 58. Como se observa, a pesar de ser el segundo nodo más cercano al gateway, no existe comunicación con un SF menor a 11. Esto se puede deber a que no existe línea de vista ya que el edificio de postgrados está entre el nodo y el gateway como se muestra en la Figura 64.

De igual forma se verifica que, para este nodo, con un SF de 11 se tiene una baja RSSI y SNR, por lo cual se debe trabajar con un SF de 12.

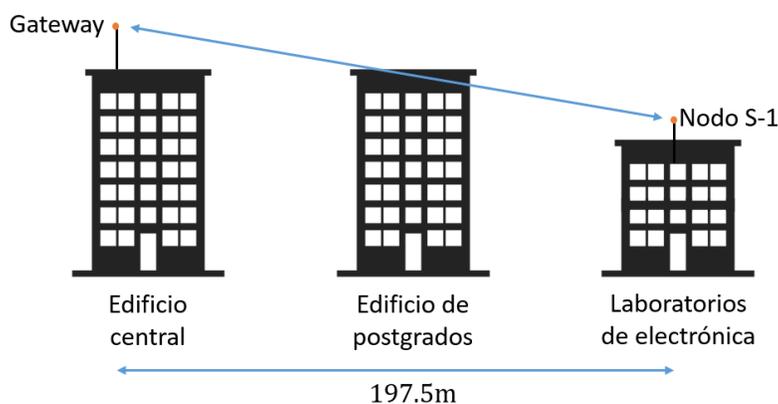


Figura 64. Referencia posición nodo S-1

Tabla 58

Prueba SF nodo 1

Nodo	SF	RSSI [dBm]	SNR [dB]
S-1	7	No hay comunicación	
	8	No hay comunicación	
	9	No hay comunicación	
	10	No hay comunicación	
	11	-119.6	-19.12
	12	-116.4	-10.3

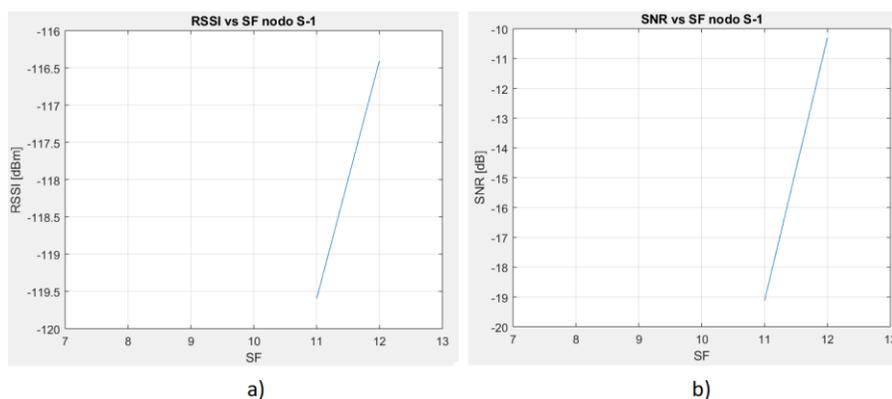


Figura 65. Factor dispersión nodo S-1.
a) RSSI vs SF, b) SNR vs SF

4.3.2. SF nodo S-3

Se efectúa la misma verificación con el nodo S-3 hacia el gateway. Se comprueba en la Tabla 59 que se tiene una SNR muy baja para los SF 10 y 11 de prácticamente -20dBm, por lo cual la conexión sería inestable. Por lo tanto, el SF adecuado es de 12. Se muestra un gráfico de referencia de la posición del nodo con respecto al gateway en la Figura 66.

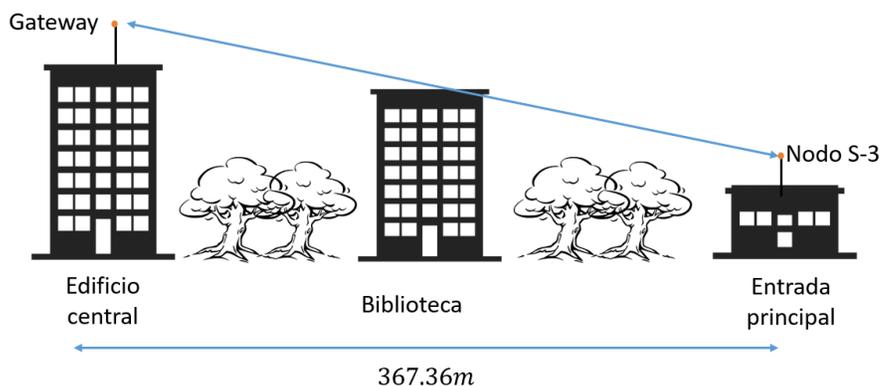
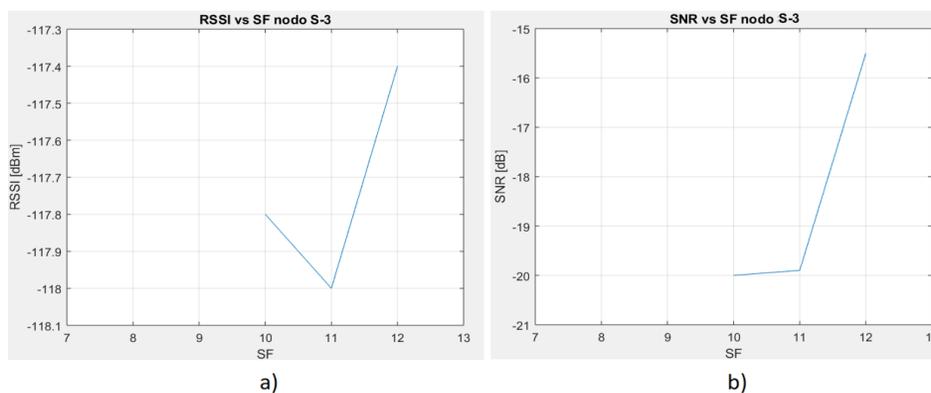


Figura 66. Referencia posición nodo S-3

Tabla 59*Prueba SF nodo 3*

Nodo	SF	RSSI [dBm]	SNR [dB]
S-3	7	No hay comunicación	
	8	No hay comunicación	
	9	No hay comunicación	
	10	-117.8	-20
	11	-118	-19.9
	12	-117.4	-15.5

**Figura 67.** Factor dispersión nodo S-3.

a) RSSI vs SF, b) SNR vs SF

4.3.3. SF nodo S-4

Con respecto al nodo S-4 se puede observar en la Tabla 60 que se tiene unos excelentes valores en la SRN con todos los SF. De igual manera se tiene un SNR aceptable. Sin embargo, se puede observar que con un SF de 7 se tiene los mejores valores de RSSI y SNR a pesar de ser el que menos alcance tiene. Esto se puede producir por interferencia de otras comunicaciones LoRa con un SF de más de 7 que existan en el campus.

Este nodo es el más cercano al gateway, sin embargo, tampoco tiene línea de vista con este como se muestra en la Figura 68.

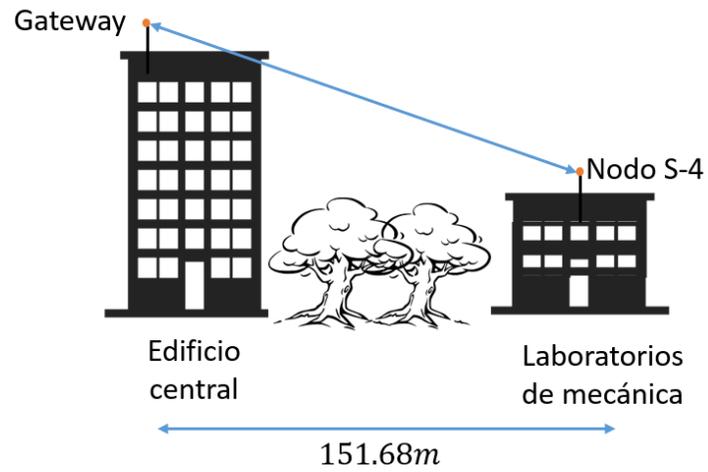


Figura 68. Referencia posición nodo S-4

Tabla 60

Pruebas SF nodo 4

Nodo	SF	RSSI [dBm]	SNR [dB]
S-4	7	-117.4	-4.22
	8	-118	-7.1
	9	-119	-8.25
	10	-119.8	-4.15
	11	-118.4	-6.9
	12	-118.6	-9.5

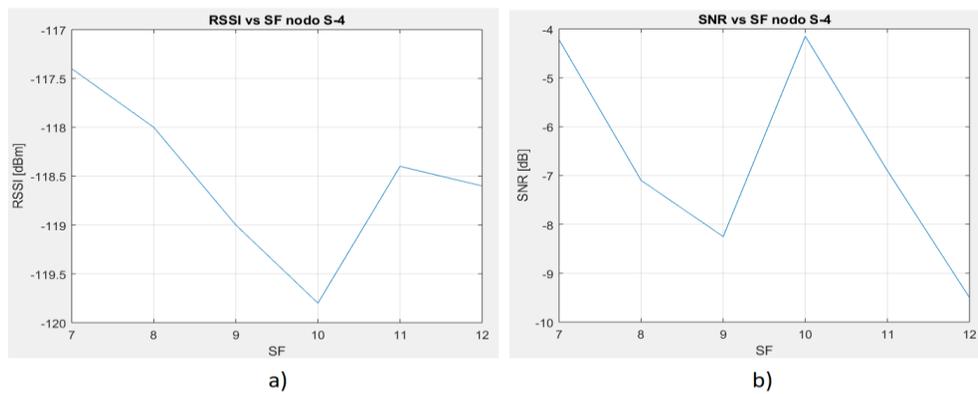


Figura 69. Factor dispersión nodo S-4.
a) RSSI vs SF, b) SNR vs SF

4.3.4. SF nodo S-5

El nodo S-5 tiene los resultados en la Tabla 61. Se puede verificar que a partir de SF 11 se tiene unos muy buenos valores de RSSI y SNR, por lo tanto, se podría elegir un SF de 11 o 12.

Además, como se puede observar en la Figura 70, este nodo podría tener línea de vista si no fuera por la vegetación que existe entre la residencia y el edificio central por lo que la señal se atenúa al llegar al gateway.

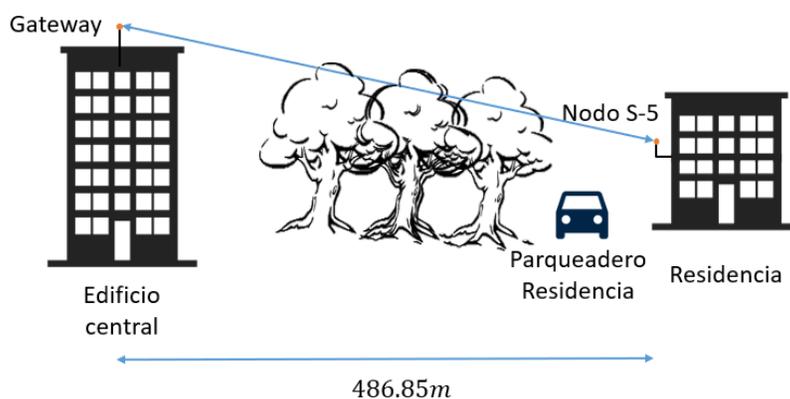


Figura 70. Referencia posición nodo S-5

Tabla 61

Pruebas SF nodo 5

Nodo	SF	RSSI [dBm]	SNR [dB]
S-5	7	No hay comunicación	
	8	No hay comunicación	
	9	No hay comunicación	
	10	-119.2	-21.4
	11	-116.6	-19.73
	12	-113.6	-12.1

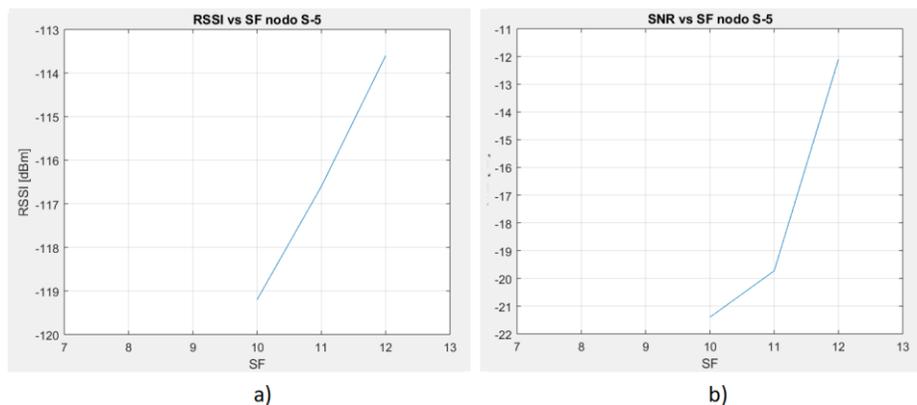


Figura 71. Factor dispersión nodo S-5.
a) RSSI vs SF, b) SNR vs SF

4.3.5. SF nodo S-6

A pesar de que el nodo S-6 es el que tiene la distancia más larga hacia el gateway, se puede observar en la Tabla 62 que a partir de un SF de 9 se podría tener una excelente comunicación. Esto se puede deber a que prácticamente sí tiene línea de vista el nodo con el gateway como se muestra en la Figura 72.

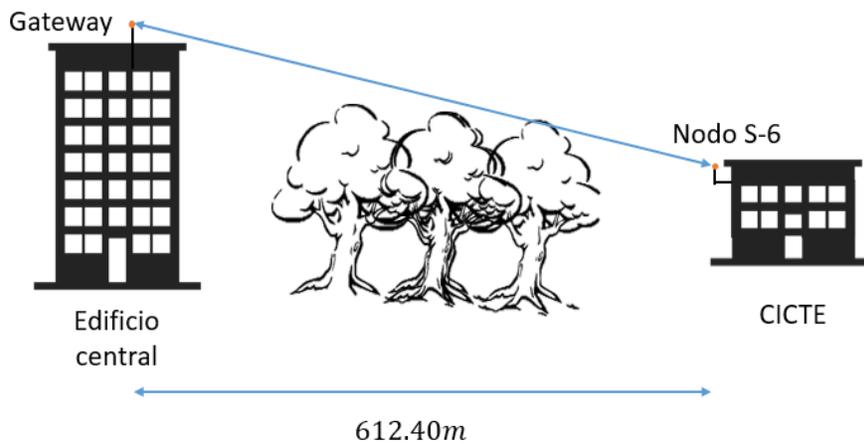
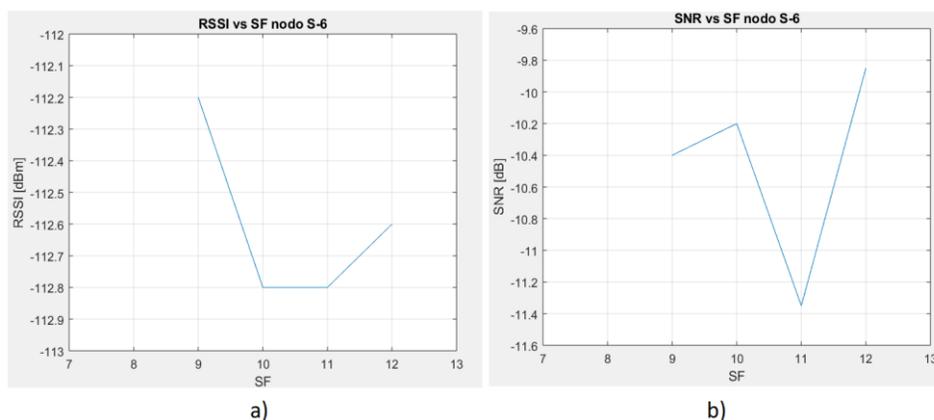


Figura 72. Referencia posición nodo S-6

Tabla 62*Pruebas SF nodo 6*

Nodo	SF	RSSI [dBm]	SNR [dB]
S-6	7	No hay comunicación	
	8	No hay comunicación	
	9	-112.2	-10.4
	10	-112.8	-10,2
	11	-112.8	-11.35
	12	-112.6	-9.85



a)

b)

Figura 73. Factor dispersión nodo S-6.

a) RSSI vs SF, b) SNR vs SF

Tabla 63*Resumen SF nodos LoRa*

SF	Nodo S-1		Nodo S-3		Nodo S-4		Nodo S-5		Nodo S-6	
	RSSI [dBm]	SNR [dB]								
7	-	-	-	-	-117.4	-4.22	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-118	-7.1	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-119	-8.25	-	-	-112.2	-10.4
10	-	-	-117.8	-20	-119.8	-4.15	-119,2	-21.4	-112.8	-10.2
11	-119.6	-19.12	-118	-19.9	-118.4	-6.9	-116.6	-19.73	-112.8	-11.35
12	-116.4	-10.3	-117.4	-15.5	-118.6	-9.5	-113.6	-12.1	-112.6	-9.85
Distancia gateway	197.5m		367.36m		151.68m		486.85m		612.4m	
Línea de vista	No		No		No		No		Sí	

En la Tabla 63 se muestra un resumen de los SF y sus valores de RSSI y SNR para cada nodo. Como se puede verificar, el gateway más cercano (S-3) y el que tiene línea de vista (S-6) son los que pueden funcionar un SF más bajo que los demás, demostrando así que mientras más alto sea el SF, más robusta es la comunicación porque aumenta la sensibilidad del receptor. (LoRaAlliance, 2018)

Tomando en cuenta estos resultados, se selecciona un SF de 12 para toda la red ya que el nodo S-3 y el S-1 solo podrían aceptar ese. Cabe recalcar que el gateway es de un solo canal, por lo tanto, se debe seleccionar el mismo SF para todos los nodos, incluyendo el gateway, para que se puedan escuchar entre sí.

Un SF alto conlleva a que la comunicación LoRa tenga más tiempo en aire y menos velocidad de transmisión. Esto no es un inconveniente ya que no se necesita que los datos lleguen lo más pronto al gateway, sino que lo hagan sin errores ni interrupciones.

4.3.6. Tiempo en aire

De estas pruebas también se obtuvo el tiempo en aire de la comunicación según el SF. Este tiempo se midió desde que se envía el paquete LoRa hasta que se recibe y se autentifica, por lo tanto, se debe tomar en cuenta que existe un retardo correspondiente al procesamiento del módulo LoRa y de la placa de desarrollo.

Se tomó el tiempo en aire del nodo S-4 que pudo funcionar con todos los SF para mostrarlos en la Figura 74. Cabe recalcar que el tiempo en aire no varía con un mismo SF para los demás nodos.



Figura 74. SF vs tiempo en aire prueba

Como se puede observar, cada vez que se aumenta en uno (1) el SF, el tiempo en aire se duplica, es decir, se comprueba que cada vez que aumenta el SF en una unidad, se duplica el tiempo de símbolo (LoRaAlliance, 2018), como se muestra en la Figura 75. En esta figura se muestra un chip LoRa (en rojo) representado con varios SF. Un chip es cómo se envía un símbolo LoRa con respecto al tiempo y al barrido de frecuencia. El eje X del gráfico corresponde al tiempo de símbolo y el eje Y a la frecuencia de barrido de LoRa, siendo la notada como “fh” la frecuencia alta, “fc” la central y “fl” la baja. De esta manera, con un SF, por ejemplo de 7, se tiene un tiempo de símbolo determinado que ocupa una de las divisiones horizontales, con un SF=8 se tiene que el tiempo de símbolo ahora es el doble, es decir dos divisiones horizontales, un SF=9 duplica lo anterior a cuatro divisiones horizontales y, de la misma forma, hasta llegar a SF=12. No se ha dibujado este último por falta de espacio en la gráfica. Cabe recalcar que el tiempo del símbolo cambia con cada SF, pero la comunicación puede seguir saltando a cualquiera de las frecuencias entre la alta (fh) y la baja (fl).

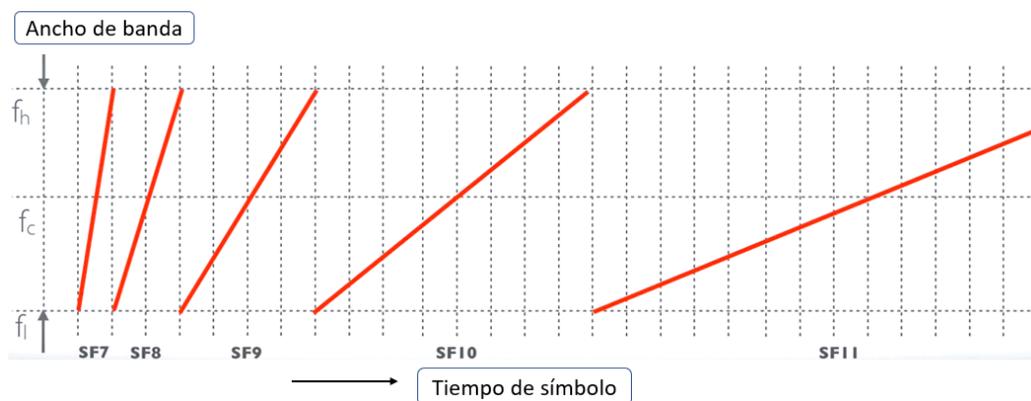


Figura 75. SF vs duración de símbolo

Fuente: (Mobilefish, 2018)

En la Figura 76 se muestra un espectro de frecuencias de una comunicación real LoRa donde se puede observar los chips enviados con un determinado SF. Se puede notar cómo empiezan en diferentes tiempos estos chips según el símbolo que están enviando.

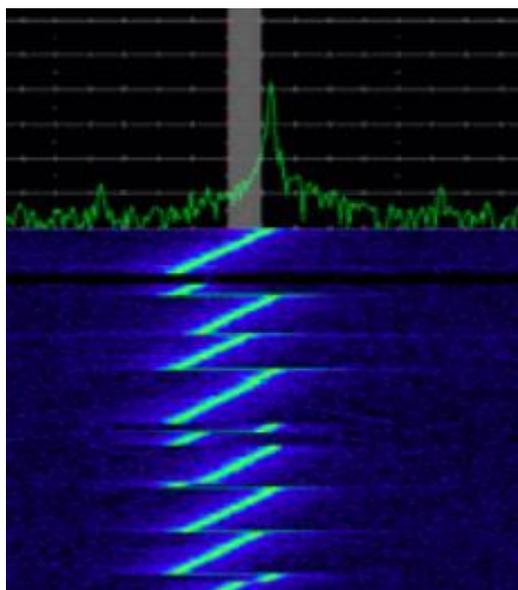


Figura 76. Chips comunicación LoRa

Fuente: (Casanova, 2018)

4.3.7. Comprobación de la comunicación con el software Radio Mobile.

Se comprueba la conexión con el software Radio Mobile como se muestra en la Figura 77 con los parámetros propiamente de LoRa que se muestran en la Tabla 64. Ya que se está dentro del campus donde existen construcciones, vehículos, etc, se consideró un escenario urbano para las pérdidas de propagación. Cabe recalcar que la sensibilidad se coloca -137dBm que es lo correspondiente a un SF=12.

Tabla 64

Parámetros Radio Mobile

Parámetro	Valor
Banda de frecuencia	902.3 – 903.7 Mhz
Tipo de antena	Omnidireccional
Potencia de transmisión	20dBm
Ganancia de la antena	2dBi
Alto de la antena	0.1m
Sensibilidad	-137dBm (con SF=12)
Pérdidas cable, conectores	0.5dB

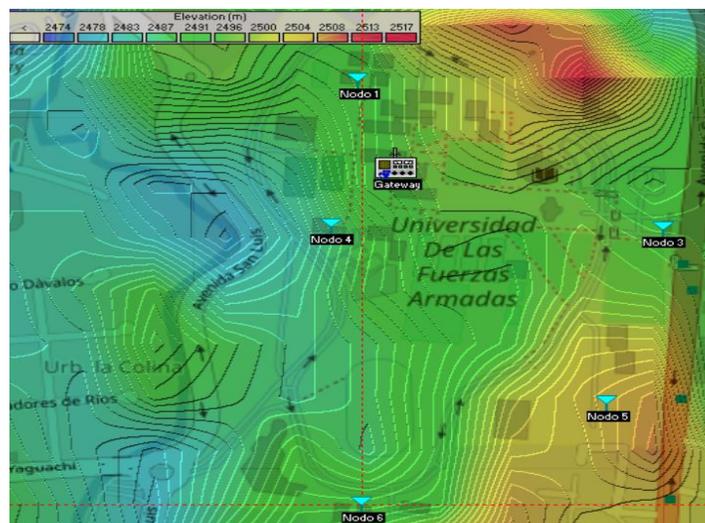


Figura 77. Enlace LoRa en Radio Mobile

Se verifica que existe una buena conexión desde el gateway hacia los nodos como se comprueba visualmente en la Figura 78 para el nodo 6 y en la Tabla 65 con la potencia de recepción de todos los nodos.

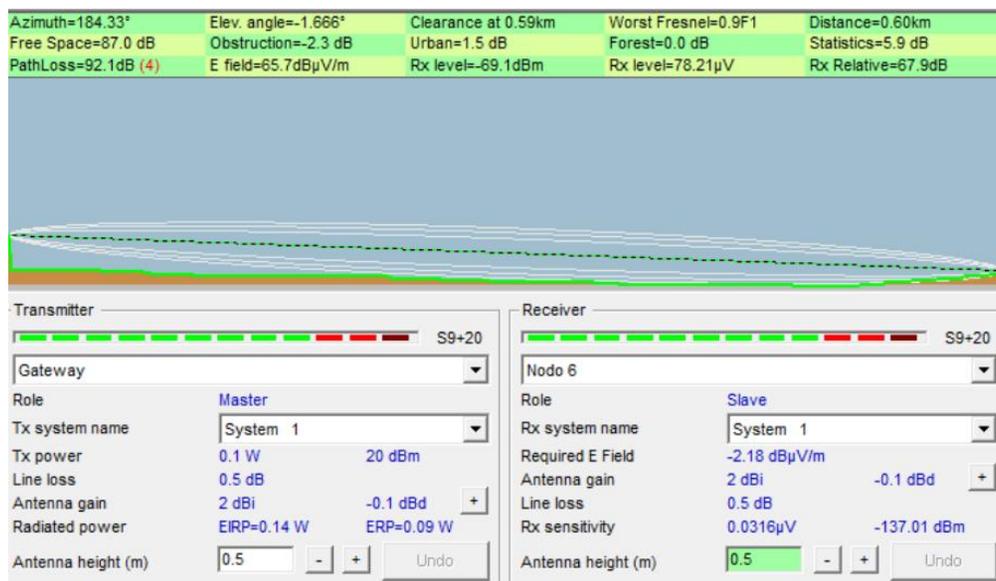


Figura 78. Nodos Radio Mobile

Tabla 65

Potencia recepción nodos

Nodo	S-1	S-3	S-4	S-5	S-6
Potencia Rx	-58dBm	-68dBm	-59dBm	-70.1dBm	-69dBm

4.4. Pruebas del módulo GSM

Se enciende el nodo 2 (gateway) y se coloca un chip de la operadora “C”. Se usa el protocolo ICMP por 10 minutos hacia la base de datos con el comando AT+CIPPING y se documenta el promedio de la latencia y porcentaje de paquetes perdidos. Posteriormente se realiza un trace route hacia la misma base y se documentan el número de saltos que dio el

paquete. Se repite el procedimiento con un chip de otras operadoras (CN y M). En la Tabla 66 y en la Figura 79 se muestra el promedio del tiempo de latencia para cada operadora. Como se observa, no se tiene paquetes perdidos, sin embargo, la que tiene menos latencia es la operadora móvil “C”. Por tal razón se selecciona el chip de esta para enviar los datos recolectado por los nodos hacia Internet mediante GPRS y porque, según la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL, 2018) en su Boletín Estadístico del 2018, esta operadora tiene el 63% de radio bases de 2G (GPRS) en Ecuador.

Tabla 66
Promedio ping

Operadora	Promedio de latencia [ms]	Porcentaje paquetes perdidos [%]	Número de saltos hacia la base
C	76.27	0	17
M	86.64	0	23
CN	151.1	0	20

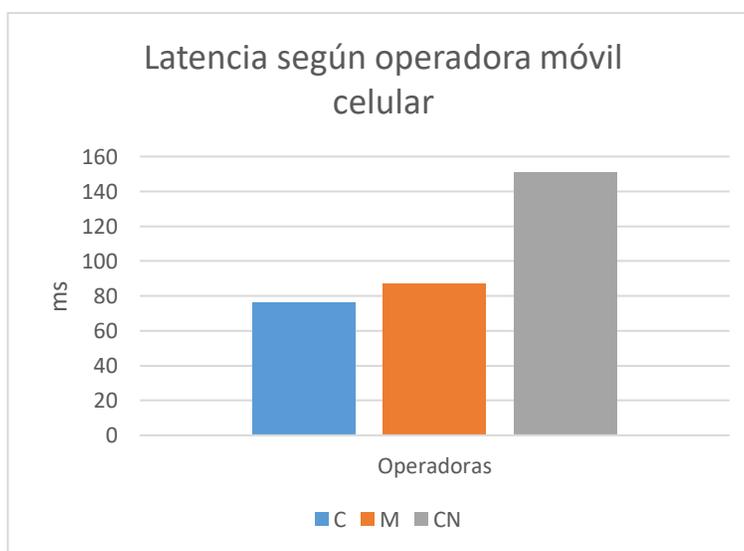


Figura 79. Latencia según operadora

4.5. Envío de información a la base de datos.

Se enciende el nodo S-5 y el gateway para generar datos y enviar a la BD información sobre el identificador del nodo, concentración de los contaminantes y la temperatura. Estas se guardan en la tabla correspondiente en las variables llamadas “sensor”, “CO”, “NO2” y “T”. Esta información se muestra en la Figura 80.

+ Options		id	sensor	CO	NO2	T	H	fecha	intento	día	hora
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6278	5	2238.45	19.60	19.84		2019-11-22 14:53:31	22	22	14
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6284	5	2302.52	18.12	16.68		2019-11-22 14:59:41	23	22	14
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6290	5	2389.15	18.39	18.16		2019-11-22 15:05:54	24	22	15
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6296	5	2245.10	19.30	15.32		2019-11-22 15:12:05	25	22	15
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6302	5	2365.49	18.95	15.61		2019-11-22 15:18:17	26	22	15
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6307	5	2453.99	19.68	18.29		2019-11-22 15:24:29	27	22	15
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6313	5	2210.16	19.12	15.42		2019-11-22 15:30:41	28	22	15
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6319	5	2366.87	19.78	17.13		2019-11-22 15:36:53	29	22	15
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6325	5	2203.21	18.19	14.87		2019-11-22 15:43:05	30	22	15
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6331	5	2392.00	18.33	17.16		2019-11-22 15:49:17	31	22	15
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6336	5	2249.76	17.98	14.52		2019-11-22 15:55:28	32	22	15
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6342	5	2226.62	18.69	14.35		2019-11-22 16:01:40	33	22	16
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6348	5	2302.01	19.74	16.61		2019-11-22 16:07:52	34	22	16
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6354	5	2294.93	18.92	15.03		2019-11-22 16:14:04	35	22	16
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6360	5	2409.19	19.76	16.90		2019-11-22 16:20:16	36	22	16
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	6366	5	2331.10	18.92	15.10		2019-11-22 16:26:28	37	22	16

Figura 80. Prueba envío a la base de datos

Se verifica que la información está ingresando correctamente en la tabla de la base de datos, que el contador del nodo llega de forma continua sin interrupciones y cada 6 minutos como se tiene previsto. Cabe recalcar que el contador se aumenta en 1 cuando la conexión LoRa fue exitosa desde el nodo al gateway, por lo tanto, si por alguna razón un paquete LoRa no llegaría a la base de datos, el contador que aparece en esta no estaría en orden, sino que se mostraría una discontinuidad en el conteo por el siguiente paquete LoRa que llegue.

4.6. Usabilidad del sitio web

Después de armar toda la red en el escenario de prueba, se procede a verificar que estén ingresando correctamente los datos a la base y se deja a los nodos recolectando datos por una semana desde el 6 al 12 de noviembre de 2019.

El día 13 de noviembre se ingresa a la aplicación web. Se crea un usuario regular (gratuito) con el nombre “usuario” y clave “usuario” y uno premium con el nombre y clave “premium” y el código “1618” de comprobación para este tipo de usuario. La validación de este código sirve para simular un pago de una persona que desea registrarse como premium y debería ser enviado al usuario luego del pago. Este registro se muestra en la Figura 81.

The figure displays two side-by-side screenshots of a web registration form titled 'Registro de usuarios'. Each form has a header with a Wi-Fi icon and the title. Form (a) is for a regular user, with fields for 'Usuario' (containing 'usuario'), password (containing 'usuario'), a masked password field, and a dropdown for 'Tipo de cuenta' set to 'Gratis'. Form (b) is for a premium user, with fields for 'Premium' (containing 'Premium'), password (containing 'premium'), a masked password field, a dropdown for 'Tipo de cuenta' set to 'Premium', and a verification code field containing '1618'. Both forms feature a blue 'Registrar' button and a footer with the text 'Sistema de monitoreo de calidad del aire© 2019'.

Figura 81. Creación usuario
a) regular y b) premium

En la base de datos se comprueba que se ha creado el usuario con tipo de cuenta “0”, es decir un usuario regular y otro con tipo de usuario “1”, es decir uno premium como se observa en la Figura 82.

				id	nombre	user	pass	cuenta			
<input type="checkbox"/>		Edit		Copy		Delete	40	Usuario	usuario	usuario	0
<input type="checkbox"/>		Edit		Copy		Delete	41	Premium	premium	premium	1

Figura 82. Usuario regular en base de datos

Se verifica las funcionalidades de la aplicación web con el usuario premium. Se comprueba la página de inicio de la aplicación y se verifica las últimas mediciones y las palabras “cuenta premium” en la esquina superior derecha como se comprueba en la Figura 83

Figura 83.

Inicio Gráficas Tablas Historial Mapa Cerrar Sesión

Cuenta Premium

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

Haz clic en cualquiera de las estaciones para verificar su estado actual

En la presente aplicación web se muestran los datos obtenidos de un sistema de monitoreo IoT de calidad de aire usando una red de sensores de bajo costo y tecnología LoRaWAN en el campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Esta red consta de 6 estaciones que miden la concentración de monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y temperatura del sector donde se encuentre. Esta información se presenta en forma de tablas, gráficos y mostrando un mapa de calor de los contaminantes.

Estación	CO ₂ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	T (°C)
Lab. Sta. 1	1094.90	21.53	14.55
Gateway 2	1994.55	19.42	14.52
Est. Pto. 3	2262.30	21.32	18.45
Lab. Sta. 4	2041.17	21.28	14.84
Car. Sta. 5	2305.77	18.95	15.52
Cinto 6	2665.32	20.89	16.8

Figura 83. Página de inicio usuario premium

Se procede a verificar las pestañas de la aplicación en la Figura 84. Se puede observar que la pestaña b) Historial se grafica los datos ya que esta pestaña es solo para usuarios premium porque se puede cambiar los rangos de tiempo de medición. De igual forma, con este tipo de usuario se verifica que se puede descargar un reporte en Excel de todos los datos obtenidos por el sensor. Esta descarga se confirma en la Figura 85 y 86.

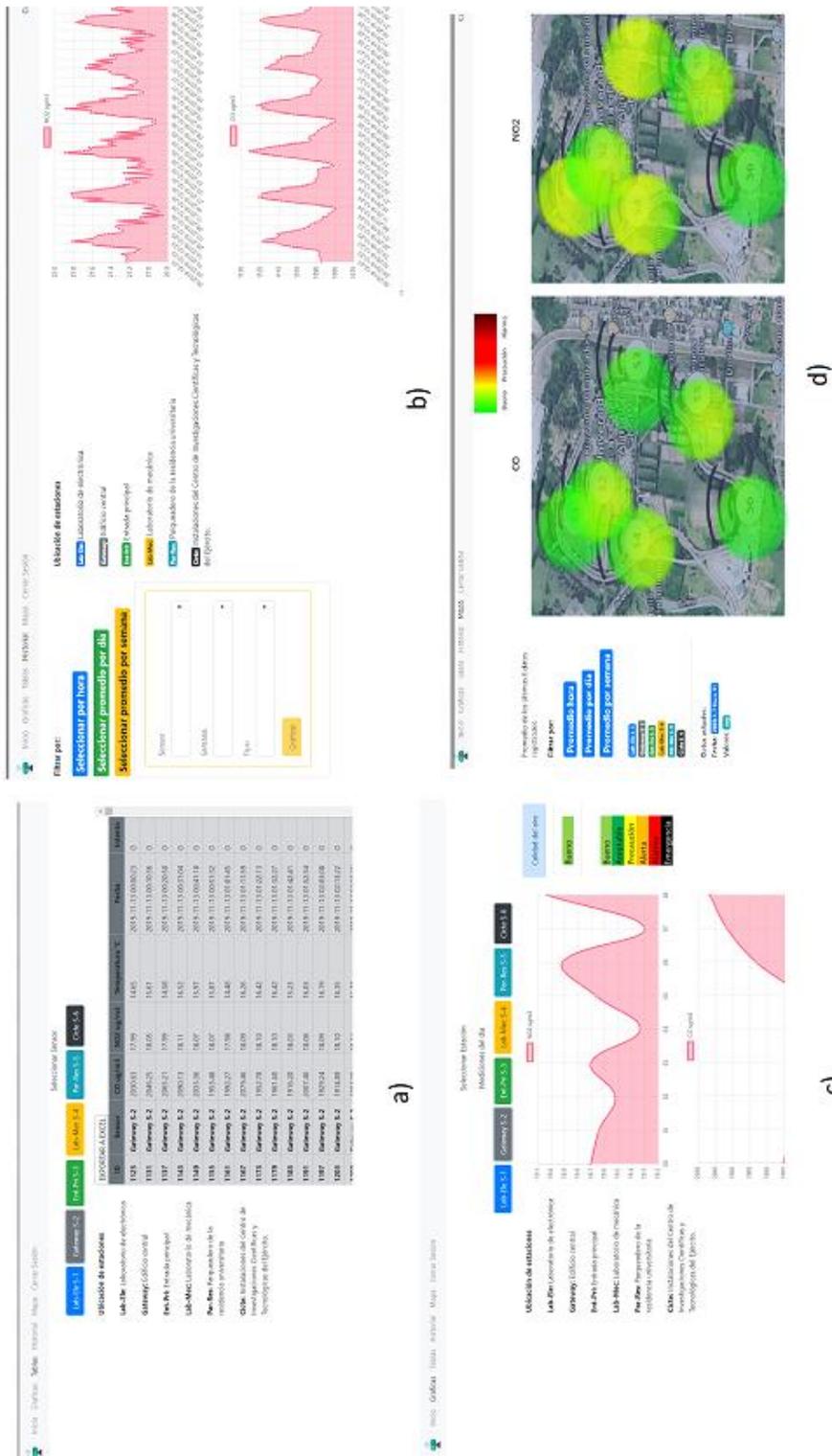


Figura 84. Comprobación aplicación web usuario premium a) Tablas, b) Historial, c) Gráficas y d) Mapa de Calor

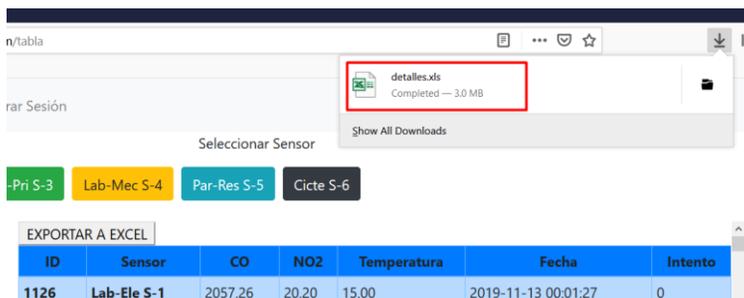


Figura 85. Descarga Excel usuario premium

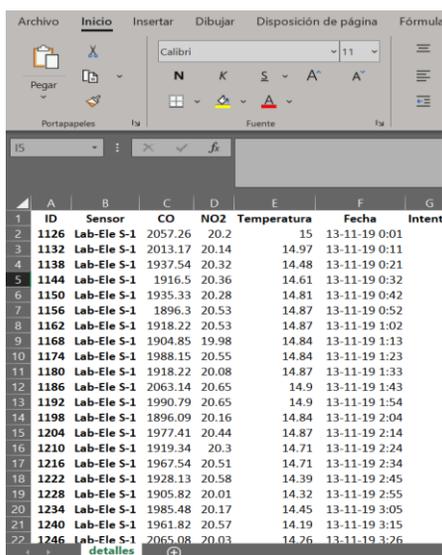


Figura 86. Reporte Excel nodo 1



Figura 87. Limitaciones usuario regular
 a) rangos medición, b) descargar Excel

Con el usuario gratuito se comprueba que no se puede descargar en Excel ni cambiar los rangos de medición en la pestaña historial como se muestra en la Figura 87.

4.7. Resultados del sistema de monitoreo

Se obtiene los resultados del sistema en su escenario final, para ello se habilita toda la red y se comprueba que está llegando normalmente la información a la base de datos. Los primeros datos hábiles de la base se muestran en la Figura 88.

Se deja el sistema obteniendo datos por dos (2) meses y se ingresa a la aplicación web para descargar toda la información en Excel. Cabe recalcar que en este tiempo solo se han tenido problemas con respecto a una desconexión de tipo eléctrica del gateway y del nodo S-3. Se tiene alrededor de 77000 datos ingresados por los nodos en la base en estos dos meses, con lo cual se podría hacer una investigación de Big Data con el sistema funcionando más tiempo y centrarse más profundamente en estudios de clima y contaminación.

Options		id	sensor	CO	NO2	T	H	fecha	inten
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1125	2	2030.63	17.99	14.65		2019-11-13 00:00:23	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1126	1	2057.26	20.20	15.00		2019-11-13 00:01:27	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1127	5	1096.37	20.05	14.94		2019-11-13 00:03:31	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1128	4	1997.77	20.46	16.87		2019-11-13 00:04:23	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1129	6	1105.83	20.25	17.4		2019-11-13 00:04:50	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1130	3	1934.89	20.28	14.74		2019-11-13 00:07:47	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1131	2	2046.25	18.05	15.61		2019-11-13 00:10:36	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1132	1	2013.17	20.14	14.97		2019-11-13 00:11:41	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1133	5	1096.37	20.44	14.94		2019-11-13 00:13:45	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1134	4	2011.24	20.13	16.90		2019-11-13 00:14:38	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1135	6	1107.18	20.19	17.8		2019-11-13 00:15:04	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1136	3	1895.45	20.52	14.74		2019-11-13 00:18:01	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1137	2	2065.21	17.99	14.58		2019-11-13 00:20:50	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1138	1	1937.54	20.32	14.48		2019-11-13 00:21:55	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1139	5	1095.88	20.25	14.81		2019-11-13 00:23:59	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1140	4	2075.27	20.28	16.90		2019-11-13 00:24:51	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1141	6	1106.32	20.84	17.5		2019-11-13 00:25:20	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1142	3	1916.07	20.50	14.55		2019-11-13 00:28:15	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1143	2	2090.13	18.11	16.52		2019-11-13 00:31:04	
<input type="checkbox"/>	Edit Copy Delete	1144	1	1916.50	20.36	14.61		2019-11-13 00:32:09	

Figura 88. Datos de la aplicación web

Con el fin de comparar los datos obtenidos de los sensores del proyecto, se obtiene información de referencia de los historiales de los datos de temperatura del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) disponibles en el link <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/datos-horarios-historicos> para la estación llamada “Los chillos”. Lamentablemente no se encuentra documentados historiales para los valores de NO₂ y CO en la página web del municipio para la misma estación

Se toma los datos de una semana de la variable de temperatura para verificar la correlación de los datos obtenidos por los nodos y la estación del municipio. La base de datos del municipio muestra la temperatura en promedios de una hora por lo que se realizó un promedio de cada hora de los datos obtenidos por el sistema. Para el análisis se tomaron los datos desde el lunes 16 hasta el domingo 22 de diciembre de 2019.

4.7.1. Datos de temperatura

En la Figura 89 se muestran los datos de temperatura en la semana seleccionada. En naranja se observa los datos obtenidos por el nodo S-1 y en azul los del municipio.

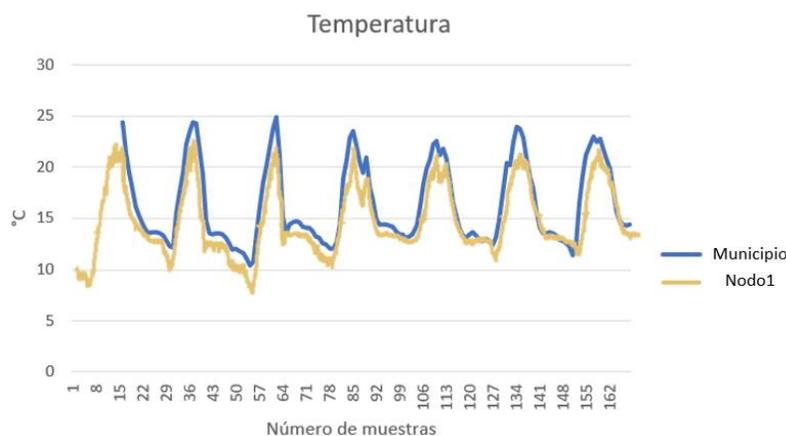


Figura 89. Temperatura nodo S-1 vs municipio

Se procede a realizar la misma verificación en los nodos restantes. La Figura 90 muestra el nodo S-2, mientras que la Figura 91 el nodo S-3.

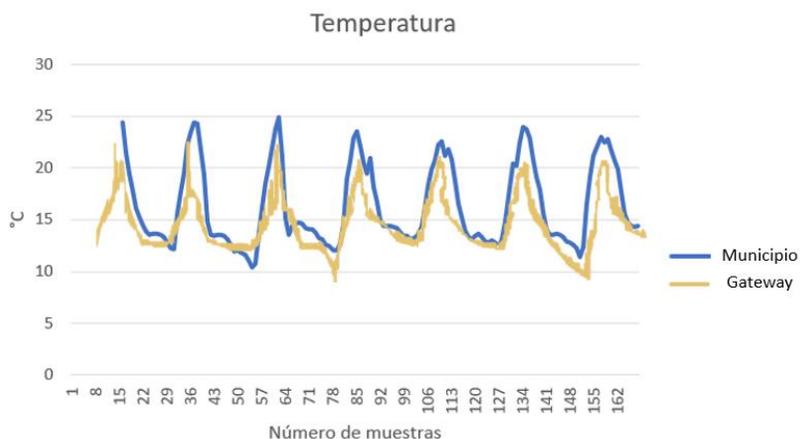


Figura 90. Temperatura nodo S-2 vs municipio

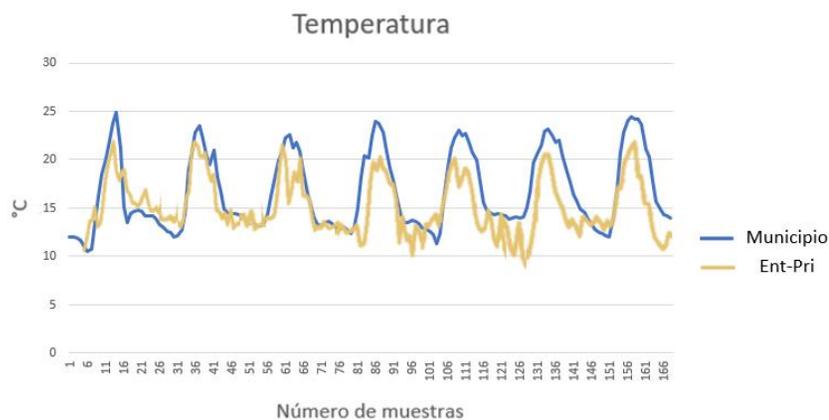


Figura 91. Temperatura nodo S-3 vs municipio

Por último, se realiza para el nodo S-4, 5 y 6 como se muestra en la Figura 92, 93 y 94. Se puede verificar que el nodo S-4 tiene una menor temperatura, esto puede ser debido a que es el único nodo que está bajo techo.

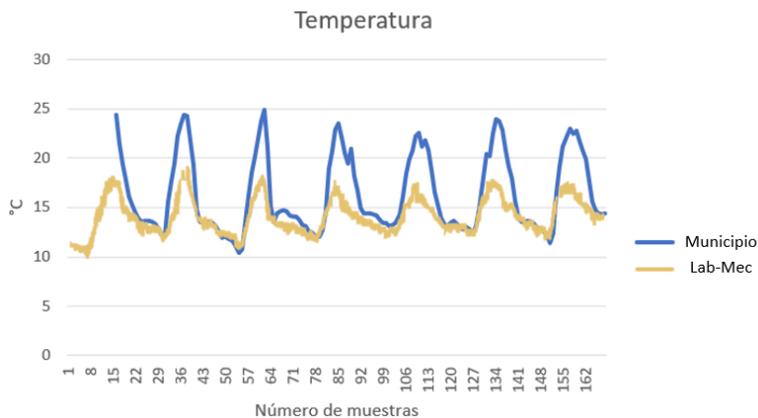


Figura 92. Temperatura nodo S-4 vs municipio

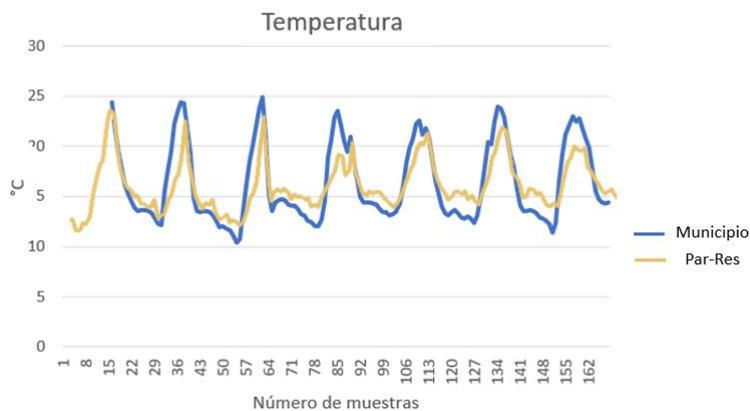


Figura 93. Temperatura nodo S-5 vs municipio

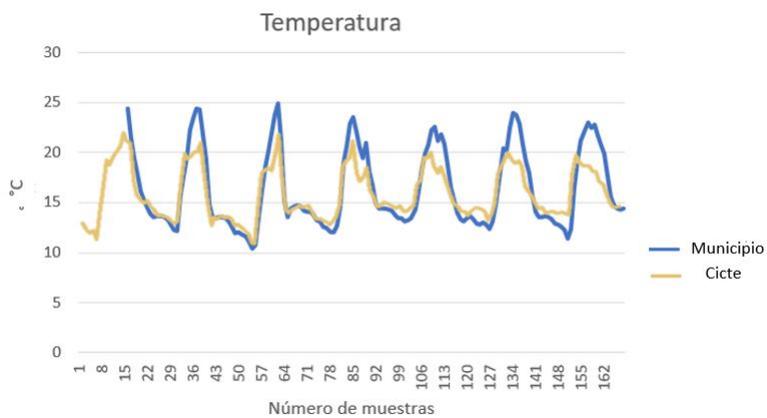


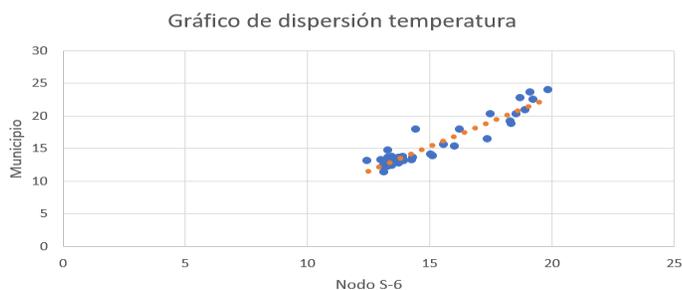
Figura 94. Temperatura nodo S-6 vs municipio

Para tener una idea de la correlación de los datos con la temperatura del sector, se procede a realizar una matriz de correlación de los datos con respecto a la referencia de la estación del municipio en la Tabla 67. Como se muestra, todos los coeficientes de correlación con respecto a la referencia (Municipio) son mayores a 0.93, es decir una correlación fuerte y solamente para le entrada principal se tiene una correlación de 0.81, es decir, significativa. Esto quiere decir que las mediciones están correlacionadas a la temperatura del sector obtenida por el municipio.

Tabla 67*Matriz correlación temperatura*

	Lab-Ele	Gateway	Ent-Pri	Lab-Mec	Par-Res	Cicte	Municipio
Lab-Ele	1						
Gateway	0.97674043	1					
Ent-Pri	0.89267374	0.87394595	1				
Lab-Mec	0.93629392	0.93788192	0.77012147	1			
Par-Res	0.93373879	0.90755676	0.75165849	0.93539911	1		
Cicte	0.93987899	0.9207305	0.79472488	0.93530731	0.92634894	1	
Municipio	0.93251923	0.9254982	0.81505651	0.93860482	0.94550352	0.93613742	1

De igual manera, se procede a realizar un gráfico de dispersión para verificar visualmente la relación entre las estaciones y el municipio. Se realizó con la estación S-6 y los datos de la estación Los Chillos del DMQ en la Figura 95.

**Figura 95.** Gráfico dispersión temperatura

A continuación, se realiza una tabla con los mínimos, promedio y máximos de esta variable para observar qué sitio de la universidad tiene mayor temperatura. Esta información está en la Tabla 68 y en la Figura 96. Como se puede observar el sitio con una mayor temperatura promedio es el S-3 ubicado en la garita de la entrada principal de la ESPE. Cabe recalcar que este sitio está bajo un domo de policarbonato por lo que puede ser la causa de su temperatura relativamente alta. Además, el sitio con un mínimo más bajo es el S-1 ubicado en los laboratorios de electrónica. De igual forma, el nodo con una temperatura mayor es el S-6 ubicado en las instalaciones del CICTE. Con respecto a la estación del municipio, se puede observar que esta tiene un promedio de 0.85°C más que el nodo con mayor temperatura. Según las diferencias entre las temperaturas de los sectores de la universidad, se comprueba la existencia de microclimas como lo demuestra (Rodríguez, 2017) en su tesis sobre los microclimas en el campus Sangolquí de la ESPE.

Tabla 68

Resumen temperatura

	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	Municipio
Mínimo	6	6,45	7.9	11.03	6.94	9	10.46
Promedio	14.45	14.95	16.22	14.42	14.63	15.45	16.3
Máximo	23.39	26	26.1	20.61	26.2	27	24.85

Por último, se procede a realizar un promedio de todas las estaciones en un día para verificar las horas con mayor y menor temperatura. Este gráfico se presenta en la Figura 97. Se puede observar que las horas con mayor temperatura es desde las 11h00 a las 13h00 y las que tienen menor temperatura es desde las 02h00 hasta las 5h00.

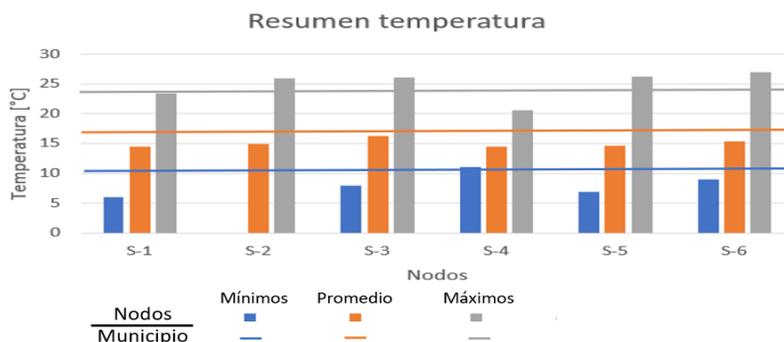


Figura 96. Resumen temperatura

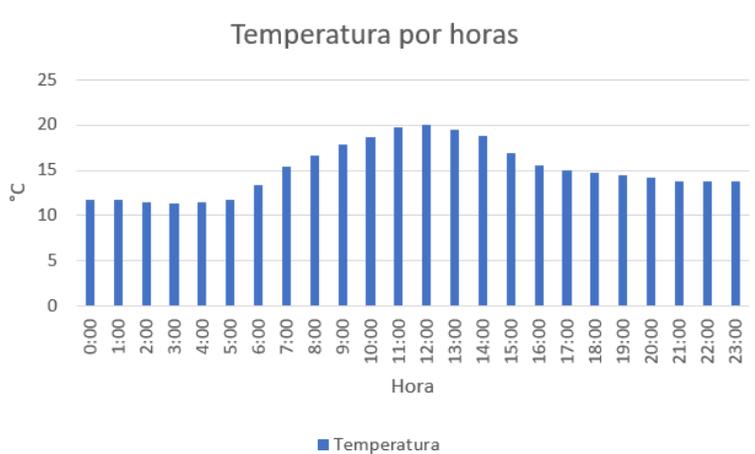


Figura 97. Temperatura promedio por horas - ESPE

4.7.2. Datos de CO

Se procede a analizar los datos de CO de todas las estaciones para verificar en qué sector se encuentra la mayor concentración de este contaminante. En la Figura 98 se puede observar las mediciones de CO para una semana entre el 1 al 8 de enero del 2020. Se puede verificar que el punto con menos concentración de este contaminante es los laboratorios de electrónica, por otro lado, el que tiene mayor concentración es el parqueadero de la

residencia. Esto es entendible, como lo demuestra Lara, Meneses, Márquez, Gordillo, & Benítez (2019), porque un vehículo al acelerar consume más combustible y emite una mayor concentración de los contaminantes como el CO. Los vehículos en el parqueadero de la residencia cuando están detenidos (parqueados) y deben acelerar para moverse emiten mayor concentración de CO que los que están a una velocidad constante. Además, ya que los edificios de la residencia son grandes, el aire no se puede dispersar correctamente.

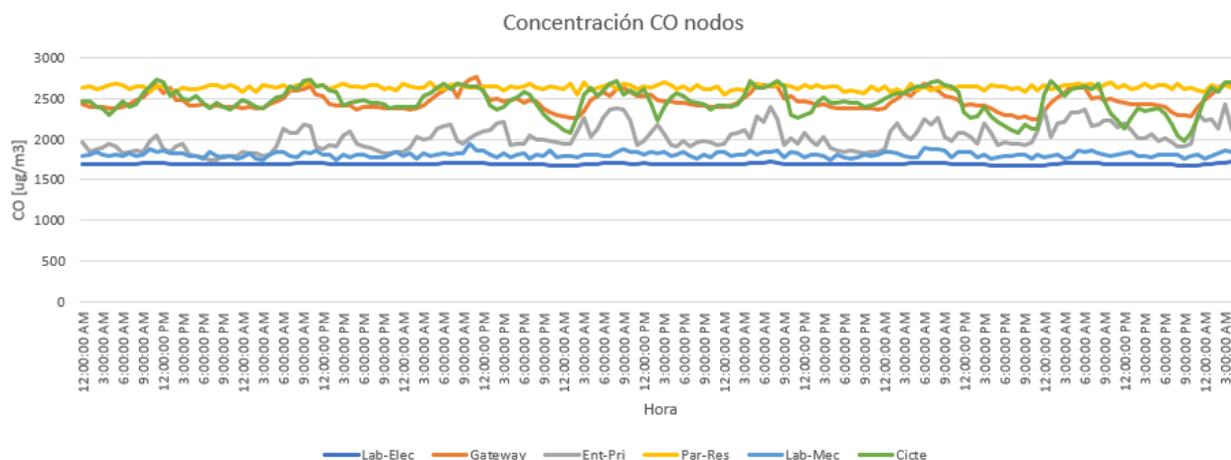


Figura 98. Concentración CO

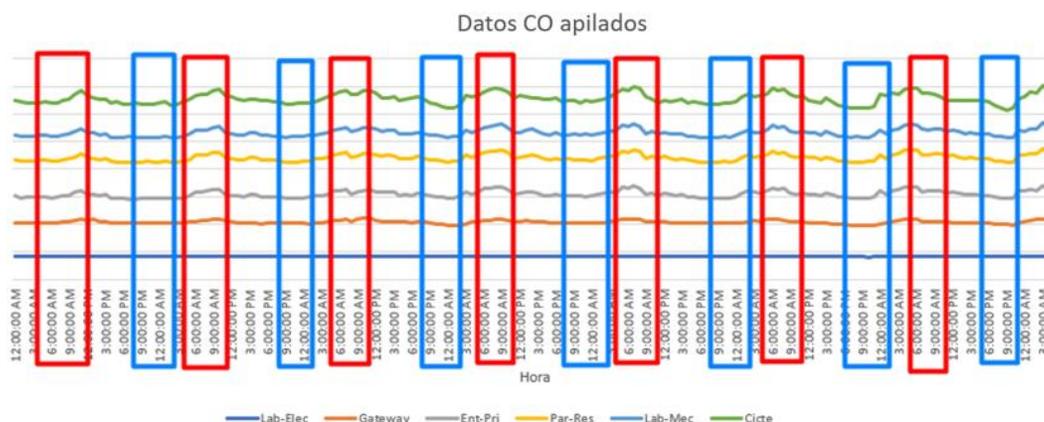


Figura 99. Datos CO apilados

Además, para verificar las horas con mayor y menor concentración se procedió a graficar la información de forma apilada. En la Figura 99 está encerrado en rectángulos rojos las horas con mayor concentración de CO donde se puede observar que principalmente es desde las 6h00 hasta las 9h00 y con azul las horas con menor concentración que están entre las 21h00 hasta las 4h00. Además, se verifica que todos los nodos corresponden en sus picos y valles en las gráficas, dando a entender que probablemente están correlacionados. Esto quiere decir que, en promedio, las concentraciones de CO suben o bajan en todo el campus al mismo tiempo, pero en diferente proporción por la ubicación de los nodos.

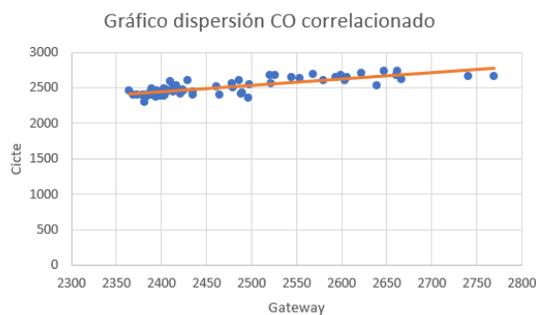
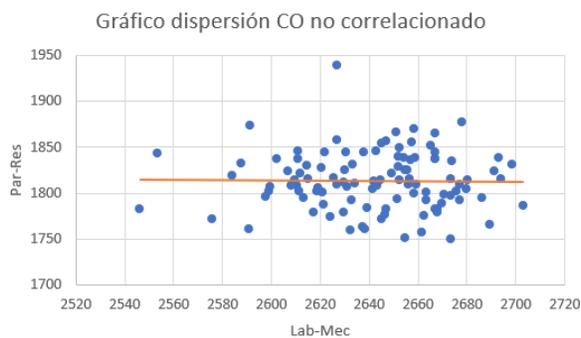
En la Tabla 69 se muestra la matriz de correlación entre los datos de CO de los nodos. Se puede observar que el único nodo que no tiene una correlación fuerte con ningún otro es el del parqueadero de la residencia (Par-Res) como se muestra en negrita. Todos los demás tienen una alta correlación entre sí, demostrando que tienen una misma fuente de contaminación, en este caso, los vehículos que ingresan a la universidad.

Una baja correlación como por ejemplo el parqueadero de la residencia (Par-Res) con los laboratorios de mecánica (Lab-Mec) indican que sus fuentes de contaminante podrían no son las mismas o que el aire se está dispersando de forma diferente. En este caso, esta última opción puede ser la explicación de esta baja correlación ya que el aire en el parqueadero de la residencia no se puede dispersar correctamente por estar confinado entre edificios altos.

Tabla 69*Matriz de correlación CO*

	Lab-Ele	Gateway	Ent-Pri	Par-Res	Lab-Mec	Cicte
Lab-Ele	1					
Gateway	0.94	1				
Ent-Pri	0.53	0.53	1			
Par-Res	0.21	0.16	0.18	1		
Lab-Mec	0.5	0.51	0.3	0.03	1	
Cicte	0.81	0.78	0.31	0.09	0.36	1

En la Figura 100 se muestra un ejemplo de gráfico de dispersión de dos nodos correlacionados como son el Cicte y el gateway y en la Figura 101 de dos nodos no correlacionados como son el Lab-Mec y Par-Res

**Figura 100.** Dispersión CO Cicte y Gateway**Figura 101.** Dispersión CO Par-Res y Lab-Mec

Para terminar, se muestra un resumen en la Figura 102 de todos los datos ingresados por los nodos a la base. Se puede verificar nuevamente que los lugares con un promedio más alto de concentración de CO es el parqueadero de la residencia universitaria (S-5) y la que tiene menor concentración es el nodo del laboratorio de electrónica (S-1). Además, ni los niveles máximos de estos contaminantes que son de $2884.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora provocarían un peligro en la salud del ser humano según la Norma Ecuatoriana de Calidad de Aire ya que existe verdaderamente un peligro en concentraciones de más de $15000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio de ocho (8) horas (MAE, 2011). Sin embargo, se debe tomar en cuenta que en un futuro podría aumentar estos niveles y ser nocivos para la salud, en especial en el parqueadero de la residencia universitaria. En esta misma imagen se muestra los datos de la estación Belisario del Municipio del DMQ para poder compararlos con los nodos. Se seleccionó esta estación porque está cerca del Colegio San Gabriel lo cual podría simular el campus de la ESPE. Se puede observar que su media es semejante a las medias de los nodos, sin embargo, sus datos mínimos y máximos difieren mucho. Esto se puede deber a que está en un lugar con mayor contaminación ya que está ubicado en la Av. América y Mariana de Jesús, cerca del colegio San Gabriel.

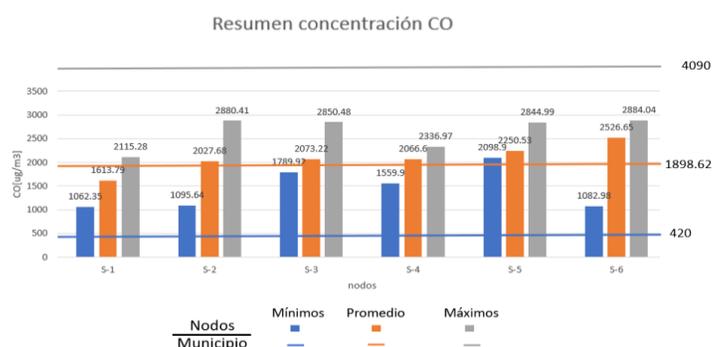


Figura 102. Resumen concentración CO

4.7.3. Datos de NO₂

Se procede de la misma manera que con los datos de CO. Se dibuja las concentraciones en una misma semana para obtener resultados. Se puede observar en la Figura 103 que, de nuevo, el lugar con menos contaminación son los laboratorios de electrónica y uno de los lugares con más concentración de este gas es la entrada principal y el parqueadero de la residencia con máximos de hasta $22.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora, lo cual no conlleva un riesgo para la salud ya que, según el MAE (2011), existe peligro desde $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en concentraciones promedio de ocho (8) horas.

De igual manera que con la concentración de CO, se procedió a realizar un gráfico con los datos de los sensores de NO₂ apilados para observar alguna relación y verificar las horas con mayor contaminación. Este gráfico está en la Figura 104 y se puede observar encerrado en rojo las horas con más concentración que son a partir de las 6h00 hasta las 10h00 aproximadamente y las horas con menor concentración son en la madrugada, a partir de las 23h00. También se puede observar que existe una correlación entre los datos, en especial entre el nodo del parqueadero de la residencia universitaria y el del CICTE debido a su cercanía en el campus.

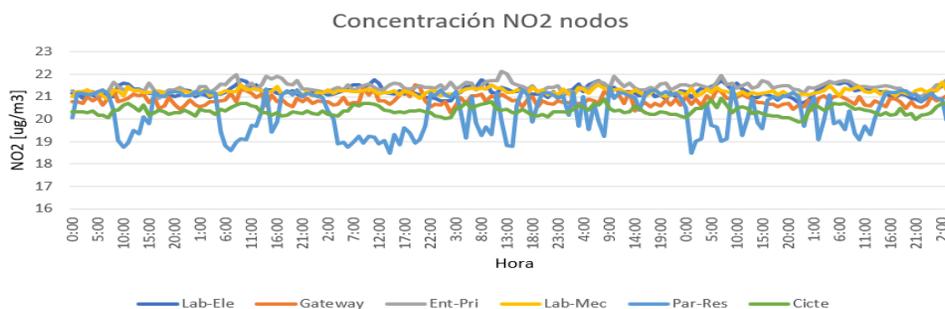


Figura 103. Concentración NO₂ nodos

Asimismo, se realiza la tabla de coeficientes de correlación para verificar si existe una relación entre nodos. Se verifica en la Tabla 70 que efectivamente la correlación entre los sensores del parqueadero de la residencia y el CICTE es alta. Sin embargo, también se puede observar que existe una correlación significativa entre el sensor del laboratorio de electrónica y el CICTE. Además, se comprueba que existe correlaciones inversas entre el laboratorio de mecánica y los demás nodos. Esto puede ser porque la fuente de contaminación de los laboratorios de mecánica no es la misma que con los demás nodos.

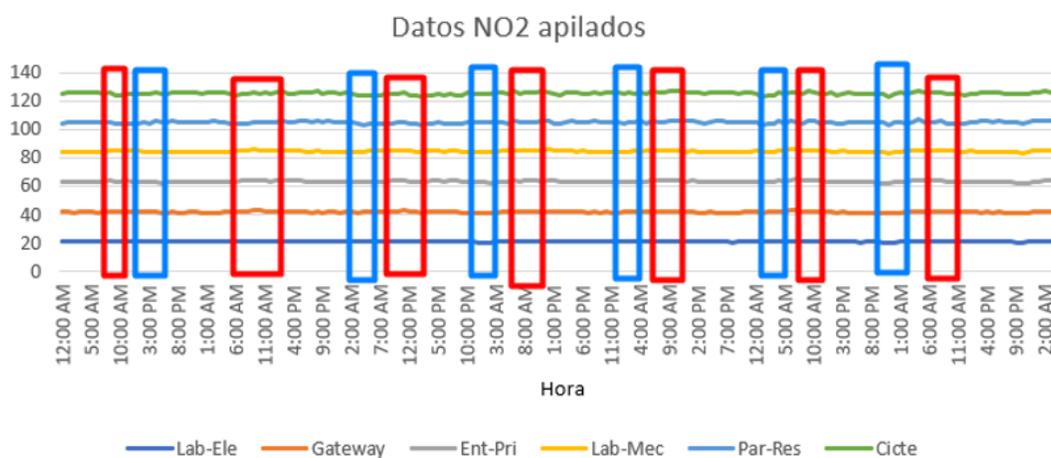


Figura 104. Datos NO2 apilados

Tabla 70

Matriz coeficientes de correlación NO2

	Lab-Ele	Gateway	Ent-Pri	Par-Res	Lab-Mec	Cigte
Lab-Ele	1					
Gateway	0.42	1				
Ent-Pri	0.38	0.229	1			
Par-Res	0.48	0.22	0.27	1		
Lab-Mec	-0.48	-0.42	-0.3	-0.21	1	
Cigte	0.78	0.43	0.3	0.46	-0.48	1

En la Figura 105 se muestra el gráfico de dispersión para dos nodos correlacionados. Se puede verificar que su línea de tendencia es positiva, mientras que en la Figura 106 se observa dos nodos no correlacionados.

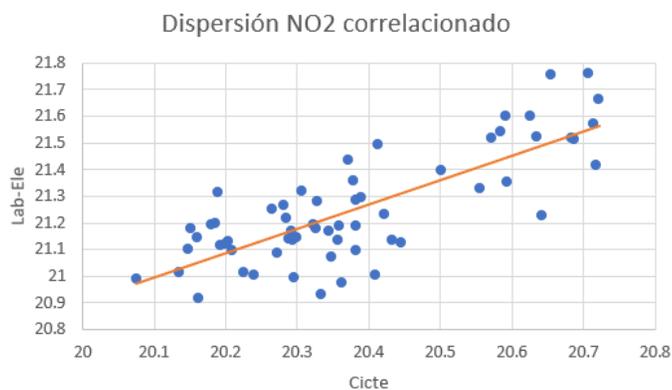


Figura 105. Dispersión CO Cicte y Lab-Ele

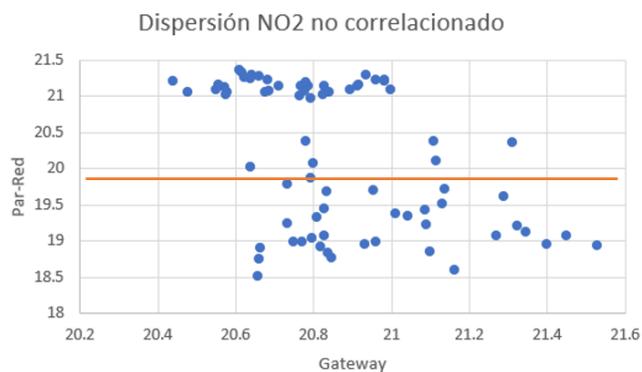


Figura 106. Dispersión CO Par-Res y Gateway

Finalmente, se muestra un resumen en la Figura 107 junto con la estación Belisario del municipio. El nodo con mayor concentración es la entrada principal (S-3) y el de menor concentración es el gateway (S-2) sin tener riesgo en la salud con ninguna concentración de

NO₂ máxima según el MAE (2011). Cabe recalcar que con respecto a la estación Belisario del DMQ, se mantiene un menor promedio de este contaminante en los nodos, además que los máximos de los nodos están muy por debajo del máximo de la estación del municipio, demostrando que en la ESPE existe menos contaminación que a los alrededores de esa estación de la ciudad de Quito.

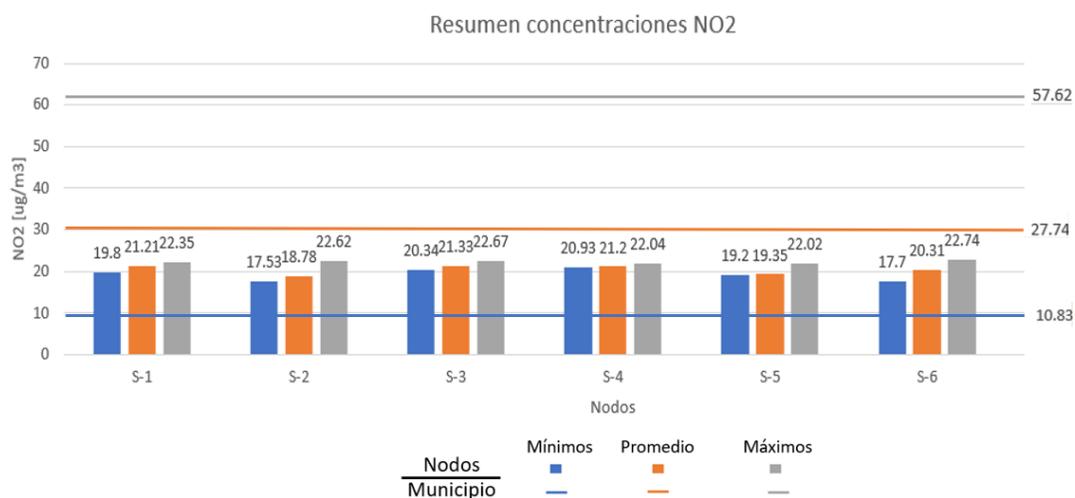


Figura 107. Resumen concentraciones NO₂

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se ha diseñado e implementado un sistema de monitoreo IoT de calidad de aire usando una red de sensores fijos de bajos costo y tecnología LoRaWAN para el campus Sangolquí de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Se realizó la caracterización de los sensores de contaminantes MiCS 4514 y se los calibró con un equipo de referencia de la universidad. Cabe recalcar que, a pesar de que no pudo obtener errores menores al 7.63%, los datos de los sensores tuvieron una alta correlación con los del equipo de referencia, esto quiere decir que, a pesar de que los valores que arrojan no son 100% precisos, se puede saber en qué hora del día o en qué lugar del campus se tiene más o menos contaminación

Se realizó la caracterización y se compensaron de 2 a 3°C, según el sensor, los valores de los sensores de temperatura LM35 mediante software, que luego al compararlos con un equipo de referencia propio, se obtuvo errores de 0.03% a 1.47%.

Se diseñó e implementó una aplicación web donde se muestra las mediciones obtenidas de los sensores mediante tablas, gráficos y mapas de calor.

Se comprobó que el mejor factor de dispersión (SF) para la red LoRa es de SF=12 ya que existen nodos que solo tendrían una comunicación estable y parámetros adecuados de indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI) y relación señal a ruido (SNR) con ese SF como es el caso del nodo S-1 que, a pesar de ser el segundo más cercano al gateway, fue

el que tuvo mayores problemas de comunicación, transmitiendo con buenos parámetros únicamente con un SF=12 debido a que el edificio de postgrados de la universidad tapa su línea de vista con el gateway. Por lo tanto, toda la red se debe configurar a ese factor de dispersión para que exista comunicación entre los nodos y el gateway ya que si están configurados a diferentes SF no se escucharían entre sí.

Se verificó que el área con mayor temperatura promedio en la universidad es la entrada principal y que el sitio con menor temperatura promedio está en los alrededores del laboratorio de electrónica con una diferencia de aproximadamente 1.77°C .

Del análisis de los datos se identificó que las horas de mayor temperatura ambiental en el campus son desde las 11h00 a las 13h00 y las de menor temperatura es desde las 02h00 hasta las 5h00.

El sitio con mayor concentración de CO fue el parqueadero de la residencia universitaria y el área con menor concentración de CO fue alrededor del laboratorio de electrónica con una diferencia promedio de alrededor de $636.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, se realiza un análisis donde se encontró una correlación muy alta entre el gateway y los laboratorios de electrónica, posiblemente por su cercanía y por ser sitios con menos concentración de este contaminante.

Las horas con mayor concentración de CO en el campus es desde las 6h00 hasta las 9h00, mientras que la menor concentración se da desde las 21h00 hasta las 4h00. Además, ni los niveles máximos de estos contaminantes que son de $2884.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora provocarían un peligro en la salud del ser humano según la Norma Ecuatoriana de Calidad

de Aire ya que existe un peligro en concentraciones de más de $15000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio de ocho (8) horas.

Existe mayores concentraciones de NO_2 en la entrada principal de la ESPE y menores en los alrededores del gateway con una diferencia promedio de $2.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$. También se verificó correlaciones entre el área de los parqueaderos de la residencia universitaria y el CICTE, posiblemente debido a su cercanía.

Las horas del día con mayor concentración de NO_2 en el campus son a partir de las 6h00 hasta las 10h00 aproximadamente y las de menor concentración son en la madrugada, a partir de las 23h00 hasta las 5h00.

Los valores de las concentraciones de los contaminantes no son muy precisos, aunque tienen un rango de error pequeño, pero pueden dar una idea de los focos de contaminación dentro de la universidad para ayudar a tomar medidas que mitiguen los efectos nocivos de los contaminantes.

Se obtuvo más de 77000 datos sobre la contaminación de la universidad y su temperatura en solo dos (2) meses, por lo que podrán ser usados para investigaciones de Big Data, identificación de patrones, etc.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda implementar más áreas verdes cerca de los lugares donde se tiene una mayor temperatura en el campus para que tengan la función de “absorber calor” como lo afirma (Krellenberg, 2014) en su estudio Climate Adaptation Santiago.

Si la tasa de transmisión no es un problema en una red LoRa, se recomienda usar el SF más alto posible para evitar interrupciones en el envío de datos por futuros problemas como ruidos inesperados a mayores distancias.

El uso de placas de desarrollo que incluyen un módulo LoRa es recomendable para evitar problemas de compatibilidad y desconexiones físicas entre la placa y el módulo, ya que vienen soldadas y probadas de fábrica.

Si existe un tomacorriente cerca de donde se pretende colocar alguno de los nodos del proyecto, se recomienda alimentarlos eléctricamente directo del tomacorriente, en lugar de baterías, para disminuir costos y minimizar el riesgo de un fallo en la alimentación de energía.

Se recomienda usar acrílico como material para la construcción de la carcasa de la estación ya que es fácil de cortar y más económico que la madera usada en garitas climáticas como la de Stevenson.

REFERENCIAS

- Aakvaag, N., & Frey, J. (abril de 2006). *Material Eléctrico*. Recuperado el 18 de septiembre de 2019, de Redes de sensores inalámbricos: http://www.materialelectrico.com.co/pdf/ABB/02-2006/39-42%25202M631_SPA72dpi.pdf
- Acosta, M., Suárez, A., & Suárez, S. (2016). Desarrollo y ensayo de un sensor químico de fibra óptica para la medición de concentraciones de dióxido de carbono. *Tecnura*, 29-42.
- Aguilera, I., Pedersen, M., García, E., Fernandez, M., Grimalt, J., & Ibarluezea, J. (2014). Environment and Childhood Project. *J Epidemiol*, 930-940.
- Álvarez, I., Martínez, J., Pérez, L., Figueroa, F., Mestre, J., & Rivero, M. (2016). Contaminación ambiental por ruido.
- Alzate, E., Montes, J., & Silva, C. (2007). Medición de temperatura: sensores termoeléctricos. *Scientia et technica*.
- AMAP. (2011). *Assessment Report: Artic Pollution Issues*. Obtenido de Artic Monitoriin & Assessment Programme: www.amap.no
- Andrade, K., & Sevilla, N. (2018). *Polución del aire generado por los automotores e incidencia en niños/as*. Milagro: Universidad Estatal de Milagro.
- Archila, D., & Santamaría, F. (2013). Estado del arte de las redes de sensores inalámbricos. *Revista Digital TIA*.

- Ballester, F., Tenías, J., & Pérez, S. (2017). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: una introducción. *Revista Española de Salud Pública*.
- Bañón, M., Brunet, M., & Sigró, J. (2008). Comparación de las temperaturas obtenidas en las garitas Montsouris y Stevenson. Resultados provisionales del proyecto Screen. *Asociación Meteorológica Española*.
- Bareceló, D., & López, M. (2012). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. *Fundación Nueva Cultura del Agua*.
- Barrón, J. (2010). Modelado de un sistema de supervisión de la calidad del aire usando técnicas de fusión de sensores y redes neuronales. *Universidad Politécnica de Madrid*.
- Bonilla, I., Tavizon, A., Morales, M., Guajardo, L., & Laines, C. (2016). IoT, el internet de las cosas y la innovación de sus aplicaciones. *Vincula Téctica*.
- Borrego, C., Costa, A., Ginja, J., Amorim, M., Coutinho, M., Karatzas, K., & Penza, M. (2016). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The. *Atmospheric Environment*, 246-263.
- BSFrance. (2019). *LoRa32u4 II Lora LiPo Atmega32u4 SX1276 HPD13 868MHZ EU Antenna*.
Obtenido de LoRa Long Range: <https://bsfrance.fr/lora-long-range/1345-LoRa32u4-II-Lora-LiPo-Atmega32u4-SX1276-HPD13-868MHZ-EU-Antenna.html>
- Casals, L., Mir, B., Vidal, R., & Carles, G. (2017). Modeling the Energy Performance of LoRaWAN. *MDPI*.

- CCSSO. (2006). *Conversión de Límites de Exposición Ocupacional de mg/m³ a ppm*. Obtenido de Químicos y materiales: <http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/convert.html>
- Celi, J., & Ponguillo, R. (2017). Implementación Hardware del Estándar de Encriptación Avanzado (AES) en una FPGA. *semanticscholar*.
- CEPAL. (s.f.). *Diagnóstico de las estadísticas del agua en Ecuador*. Quito.
- Chen, B., Chan, C., Lee, C., Cheng, T., Huang, W., & Jhou, J. (2012). The association of ambient air pollution with airway inflammation in schoolchildren. *Am J Epidemiol*, 764 - 774.
- Chepesiuk, R. (2019). Extrañando la oscuridad, los efectos de la contaminación lumínica sobre la salud. *Salud Pública de México*.
- de la Caridad, A. (2013). Efectos nocivos de la contaminación ambiental sobre la embarazada. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 226-238.
- Delgadillo, A., González, C., García, F., Villagomez, J., & Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 597-612.
- DHgate. (2019). *CJMCU-4541 MICS-4514 monóxido de carbono nitrógeno sensor de oxígeno CO / NO₂ / H₂ / NH₃ / CH₄*. Obtenido de <https://es.dhgate.com/product/cjmcu-4541-mics-4514-carbon-monoxide-nitrogen/448803656.html>
- Diana, A., & Santamaría, F. (2013). State of the art of wireless sensor networks. *Revista Digital Tia*.

- ElectroCrea. (2019). *Sensor de temperatura LM35 Z*. Obtenido de <https://electrocrea.com/products/sensor-de-temperatura-lm35-z>
- EPA. (2009). "Integrated Science Assessment for Particulate Matter. *Environmental Protection Agency*.
- Escalona, L., Manganiello, L., López, M., & Vega, C. (2012). Los sensores químicos y su utilidad en el control de gases contaminantes. *Ingeniería UC*, 77-88.
- FundaciónNatura. (2008). Estado del aire. *Geo Ecuador*, 37-54.
- Gabarino, J. (2011). *Protocolos para redes inalámbricas de sensores*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- García, X., García, I., & García, J. (2010). Los efectos de la contaminación acústica en la salud: conceptuzliaciones del alumnado de enseñanza secundaria obligatoria de valencia. *Didácticas de las ciencias experimentales y sociales*, 123- 137.
- GG1. (24 de junio de 2013). *Three ways to reset an Arduino Board by code*. Recuperado el 1 de noviembre de 2019, de Xappsoftware: <http://www.xappsoftware.com/wordpress/2013/06/24/three-ways-to-reset-an-arduino-board-by-code/>
- Glynn , H., & Gary, H. (1991). *Ingeniería ambiental*. México: Prentince Hall.
- Guijarro, J., Terán , I., & Valdez, M. (2015). Determinación de la contaminación acústica de fuentes fijas y móviles en la vía a Samborondón en Ecuador. *Ambiente y Desarrollo*, 41-51.

Gurjar, B., Bulet, T., Lawrence, M., & Lelieved, J. (2015). Evalutaion of emissions and air quiality in megacities. *Atmospheric Enviroment*.

Industrial Scientific Corp. (abril de 2018). *Impomak*. Recuperado el 19 de septiembre de 2019, de Monóxido de carbono vs dióxido de carbono: <http://www.impomak.com/03/wp-content/uploads/2018/05/Arti%CC%81culoISC-CO-vs-CO2.pdf>

INSP. (2009). Extrañando la oscuridad. *Enviromental health perspectives*, A20-A17.

ISO. (2018). *Information technology – Internet of Things Reference Architecture (IoT RA) - ISO/IEC 30141:20160910(E)*. Ginebra.

Lara, R., Meneses, P., Márquez, M., Gordillo, R., & Benítez, D. (2019). Air Quality Monitoring System Within Campus by Using Wireless Sensor Networks . *Research Gate*.

LoRaAlliance. (2018). *LoRa Alliance*. Obtenido de <https://www.lora-alliance.org>.

MAE. (2010). *Plan nacional de la calidad de aire*. Quito.

MAE. (2011). Norma Ecuatoriana de Calidad de Aire.

MICSE. (2013). Catálogos de Políticas Sectoriales. *Consejo Sectorial de los Sectores Estratégicos*.

Miraglia, & Georges , S. (2014). El Khouri. *Gouveia*.

Mobilefish. (18 de septiembre de 2018). *LoRa/LoRaWAN tutorial 10: RSSI and SNR*. Obtenido de LoRaWAN:
https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_tutorial.html

Mobilefish. (20 de 10 de 2018). *LoRa/LoRaWAN tutorial 21: OTAA, ABP and LoRaWAN Security*.

Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=KrNDOBzhxeM>

Moreno, C., & Moreno, A. (2016). La contaminación lumínica. Aproximación al problema en el barrio de Sants (Barcelona) . *Observatorio Medioambiental*, 133-163.

Moya, M. (2018). Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos. *Máster Universitario en Tecnologías, Sistemas y Redes de Comunicaciones*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Nagendra, S., Reddy, P., MV, N., Khadirnaikar, S., & Rani, P. (2019). Mobile monitoring of air pollution using low cost sensors to visualize spatio temporal variation of pollutants at urban hotspots. *Sustainable Cities and Society*, 520-535.

NewieVentures. (2018). LoRaWAN - OTAA or ABP? *Squarespace*.

Omaye, S. (2002). Metabolic modulation of carbon monoxide toxicity. *Toxicology 2002*, 139-150.

OMS. (1999). Guidelines for Community Noise. *WHO*.

OMS. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Obtenido de WHO: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=C7EC41160E3754179C744CE5BAC7D034?sequence=1

OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable. *Biblioteca de la OMS*.

OMS. (2016). Ambient air pollution: a global assessment of exposure. *Tech. rep. Worl Health Organization*.

- OMS. (2 de mayo de 2018). *Datos y cifras*. Obtenido de Calidad del aire y salud:
[https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- ONU. (2019). *Departamento de Economía y Asuntos Sociales*. Obtenido de División para el Desarrollo Sostenible:
<http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/spanish/agenda21spchapter18.htm>
- Oyarzún, M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 16-25.
- Pallás, R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal*. Barcelona: Publicaciones digitales S.A.
- Patel, S., Pandev, A., Pervez, S., & Chakrabarty, R. (2017). Spatio-temporal measurement of indoor particulate matter concentrations using a wireless network of low-cost sensors in households using solid fuels. *Environmental research*, 59-65.
- Pedersen, M., Giorgis, L., Bernard, C., Aguilera, I., Andersen, A., & Ballester, F. (2013). Ambient air pollution and low birthweight: a European cohort study. *Lancet Respir Med*, 695-704.
- Peña, S. (2018). Impacto de la contaminación atmosférica en dos principales ciudades del Ecuador. *Scielo*.
- Pereira, E., Alves, M., Pinto, A., & Montenegro, R. (2010). Contaminantes ambientais e os interferentes endócrinos. *Scielo*, 54-61.

- Pérez, G. (14 de octubre de 2013). *Introducción a las correlaciones bivariadas, índices y el cálculo del coeficiente de correlación en Excel*. Recuperado el 6 de enero de 2020, de Correlaciones estadísticas: <https://es.slideshare.net/GabrielPerezSalazar/correlaciones-estadisticas>
- Pérez, R. (2017). Evaluación de LoRa/LoRaWAN para escenarios de Smart City. *Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels*. Cataluña: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Pope, & Dockery. (2016). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 709-742.
- Popoola, O., Carruthers, D., Lad, C., Bright, V., Mead, M., Stettler, M., . . . Jones, R. (2018). Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings. *Atmospheric Environment*, 58-70.
- Pousa, A. (2011). Algoritmo de cifrado simétrico AES. Aceleración de tiempo de cómputo sobre arquitecturas multicore. *Universidad de la plata*.
- Querol, X. (2008). Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Revista Española de Salud Pública*, 18-26.
- Reimondo, G. (2019). *Seguridad en redes LoRaWAN*. Obtenido de Encriptación de punto a punto para las aplicaciones de IoT: <https://humanizationoftechnology.com/seguridad-en-redes-lorawan/revista/iot/01/2019/>
- Reina, C., Sola, C., Ampudia, S., Puertas, C., Bustamante, L., & Ramírez, F. (2018). Contaminación del aire a filo de calle Espejo en Quito: caso estudio Guayaquil y Espejo. *UCE*.

- Ren, M., Li, N., Wang, Z., Liu, y., Chen, X., Chu, Y., & Xiang, H. (2017). The short-term effects of air pollutants on respiratory disease mortality in. *Sci.*
- Requeridos. (20 de abril de 2018). *Requerimientos Funcionales y No Funcionales, ejemplos y tips*. Obtenido de Medium: <https://medium.com/@requeridosblog/requerimientos-funcionales-y-no-funcionales-ejemplos-y-tips-aa31cb59b22a>
- Rodríguez, D. (2013). Arquitectura y Gestión de la IoT. *Revista digital de las tecnologías de la información y las comunicaciones*, 49-60.
- Schneider, P., Castell, N., Vogt, M., Dauge, F., & Lahoz, W. (2017). Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information. *Environment International*.
- SecretaríaDeAmbiente. (2018). *Informe de Calidad del Aire 2017*. Quito.
- Semtech. (2015). LoRa Modulation Basics. *Semtech Corporation*, 1-26.
- Serna, A., Ros, F., & Rico, J. (2010). *Guía práctica de sensores*. España: Creacionaes Copyright.
- SGX. (s.f.). The MiCS-4514 is a compact MOS sensor with two fully independent sensing elements on one package. - DATASHEET. *Sensortech*.
- Silva, S., & Correa, F. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico - Universidad de Medellín*.
- Sohraby, K., Minoli, D., & Znati, T. (2007). *Wireless Sensor Networks*. Wiley.
- Téllez, J., Rodríguez, A., & Fajardo, Á. (2006). Contaminación por Monóxido de Carbono: un Problema de Salud Ambiental. *Public Health*.

- Temkin, B., Ávila, S., & Martínez, E. (2018). EL impacto diferencial de la globalización económica y la democracia sobre las emisiones de CO2 en países ricos y pobres. *Scielo*.
- Terezinha, S., & León, B. (2017). El rigor científico en el vídeo online. La percepción de los expertos obre los vídeos de contaminación del aire en Youtube. *Scielo*.
- TexasInstruments. (2000). *Precision Centigrade Temperature Sensore*. Obtenido de National semiconductor.
- Torres, C., Granados, S., Rodríguez, G., & Robles, F. (2009). Ecología industrial y desarrollo sustentable. *Ingeniería Revista Académica*, 63-70.
- TTN. (2 de noviembre de 2018). *No lower RSSI than -121 dBm possible in TTN*. Recuperado el 10 de noviembre de 2019, de <https://www.thethingsnetwork.org/forum/t/no-lower-rssi-than-121-dbm-possible-in-ttn/19890>
- TTN. (febrero de 2019). *Limitations: data rate, packet size, 30 seconds uplink and 10 messages downlink per day Fair Access Policy [guidelines]*. Recuperado el 1 de noviembre de 2019, de <https://www.thethingsnetwork.org/forum/t/limitations-data-rate-packet-size-30-seconds-uplink-and-10-messages-downlink-per-day-fair-access-policy-guidelines/1300>
- TTN. (2019). *The things network*. Obtenido de Learn LoRaWAN: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes.html>
- UN. (s.f.). *United Nations Open Working Group on Sustainable Development Goals*. Obtenido de sustainable development goals: <http://sustainabledevelopment.un.org>

- UNE. (2018). Primera Norma internacional ISO/IEC para Internet de las cosas. *Nota de Prensa*, (pág. 2).
- UNEP. (2010). Annual Report. En U. Nations, *Annual Report*. Matlta: Progress Press Co.
- UNHCR. (diciembre de 2018). *Agencia de la Onu Para los Refugiados*. Recuperado el 10 de septiembre de 2019, de ¿Qué tipos de contaminación existen y qué puedes hacer tú?: <https://eacnur.org/blog/que-tipos-de-contaminacion-existen/>
- USB. (2011). *Características de los Instrumentos de Medición*. Caracas.
- Vallejo , P., González , C., & Mena , F. (2016). Cálculo referencial de material particulado en el aire como factor de contaminación ambiental en el área urbana de la ciudad de Pujilí. *Scielo*.
- WAQI. (17 de 11 de 2019). *Info*. Obtenido de World Air Quality Index: <https://waqi.info/es/#/c/8.839/0.176/2z>
- Woodruff, T., Darrow, A., & Parker, J. (2008). Air pollution and postneonatal infant mortality in the United States, 1999-2002. *Environ Health Perspect*.
- Yáñez, J. (2019). Análisis de desempeño y cobertura de la nueva red inalámbrica de la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE - campus Sangolquí provista por un proveedor de servicios de telecomunicaciones. *Repositorio ESPE*.
- Zúñiga, F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*. Mérida: Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.