



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**Sistema de monitoreo de calidad del aire y ruido ambiental
para la determinación de índices de contaminación basado
en redes inalámbricas de sensores**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autores:

JORGE SANTIAGO CARRANCO ZUMBA

FRANCISCO DAVID SALGADO CASTILLO

Director:

HUGO MARCELO TORRES SALAMEA, PhD.

Codirector:

OMAR DELGADO INGA, Mst.

CUENCA, ECUADOR

2017

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado con gran sinceridad y afecto a mi familia y amigos, con quienes celebré mis logros, y me dieron aliento en los momentos más difíciles de este proceso, especialmente a mis padres por acompañarme en cada paso que he dado, por su comprensión y apoyo constante.

Jorge Santiago Carranco Zumba

DEDICATORIA

A mi familia y amigos, quienes me acompañaron y apoyaron durante todo este camino en la Universidad. A mis hermanas y hermano por todo lo que hemos podido compartir. A mi Mamá, Luz Marina, una incansable luchadora llena de amor que ha hecho de mí la persona que soy hoy. A mi Papá, Francisco, con quien tuve la maravillosa suerte de tenerlo como profesor; por su constante guía, enseñanza y cariño.

Francisco David Salgado Castillo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco muy atentamente a todos los profesores, compañeros, y amigos que aportaron con ideas y ánimos para la conclusión de este trabajo, así como a mi colega de tesis por su gran dedicación en este proyecto. Agradezco con especial énfasis a mi director de tesis Ing. Hugo Torres Salamea, por su apoyo incondicional durante este proyecto, y su gran contribución en mi formación como profesional y ser humano. Al director del IERSE Mst. Omar Delgado Inga, por permitirme colaborar con el Instituto junto a todo el equipo de trabajo quienes desinteresadamente me brindaron su apoyo y buena voluntad.

A todos ustedes, muchas gracias.

Jorge Santiago Carranco Zumba

AGRADECIMIENTOS

A nuestro Director, el Doctor Hugo Torres, por su paciencia y apertura. Un admirable académico con gran calidad humana que nos llena de orgullo el haber trabajado con él.

Al cuerpo de investigadores del Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador, con especial atención al Ingeniero Chester Sellers y al Director del IERSE, el Mst. Omar Delgado; por su guía en la realización de este trabajo y quienes nos dieron la oportunidad de integrarnos a los proyectos de investigación de este Instituto.

A la Universidad del Azuay, la cual nos ha impartido una formación profesional y humana; con la que esperamos servir de manera correcta a nuestra sociedad.

Francisco David Salgado Castillo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN	1
1. CAPÍTULO I: MARCO REFERENCIAL.....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Motivación.....	2
1.3. Problemática.....	3
1.4. Contaminación del aire.....	7
1.4.1. Principales contaminantes atmosféricos	7
1.4.2. Niveles máximos de concentración de gases	8
1.4.3. Efectos específicos de los contaminantes sobre la salud y el medio ambiente.....	8
1.4.4. Índice de Calidad del Aire (ICA).....	10
1.5. Emisiones de ruido	13
1.5.1. Niveles máximos de emisión de ruido	14
1.5.2. Efectos en la salud causados por el ruido	15
1.6. Trayectoria del IERSE.....	16
1.6.1. Trabajo actual del IERSE en el monitoreo de calidad del aire y ruido ambiental.....	17
1.7. Conclusiones del capítulo.....	19

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	20
2.1. Introducción.....	20
2.2. Arquitectura de las WSN en el modelo IoT	21
2.2.1. Conectividad de sensores y red.....	23
2.2.2. <i>Gateway</i> y red	32
2.2.3. Administración de servicios.....	33
2.2.4. Aplicación.....	34
2.3. Aplicaciones de las WSN	34
2.4. Conclusiones del capítulo.....	39
3. CAPÍTULO III: DISEÑO Y DESARROLLO	41
3.1. Introducción.....	41
3.2. Cuadro de trabajo	41
3.3. Mediciones de ruido	42
3.4. Mediciones de gases	44
3.4.1. Principio de funcionamiento de los sensores de gas	46
3.5. Mediciones de variables meteorológicas.....	48
3.5.1. AWOS.....	49
3.6. Sensores propuestos	55
3.7. Características técnicas de los sensores.....	58
3.7.1. Nodo Smart Environment Pro.....	58
3.7.2. Nodo Smart Cities	63
3.8. Panel solar externo	68
3.9. <i>Gateway</i> central Meshlium.....	69
3.10. Comunicación y transmisión de datos	71
3.11. Desarrollo y programación	72
3.11.1. Programación de los nodos	72
3.11.2. Programación de la plataforma web.....	77

3.12.	Ubicación nodos	78
3.12.1.	Montaje de los equipos.....	79
3.13.	Conclusiones del capítulo	81
4.	CAPÍTULO IV: IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS	82
4.1.	Introducción.....	82
4.2.	Pruebas de recepción de datos	82
4.3.	Consumo de batería y fuentes de suministro de carga	83
4.4.	Comparación de valores de temperatura	86
4.4.1.	Comparación de temperatura entre sensores	86
4.4.2.	Comparaciones de temperatura entre sensores con cobertura aislante	88
4.4.3.	Comparación de valores de temperatura con estación meteorológica AWOS.....	91
4.5.	Comparación de valores de humedad.....	93
4.5.1.	Comparación de humedad entre sensores	93
4.5.2.	Comparación de valores de humedad con cobertura de equipos	94
4.5.3.	Comparación de valores de humedad con estación meteorológica AWOS	95
4.6.	Medición de presión atmosférica.....	96
4.7.	Comparación de valores de ruido	97
4.8.	Corrección de variables meteorológicas y ruido	99
4.9.	Comparación de valores de contaminantes gaseosos	100
4.9.1.	Monóxido de carbono (CO).....	101
4.9.2.	Dióxido de azufre (SO ₂).....	102
4.9.3.	Dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	103
4.9.4.	Ozono (O ₃)	104
4.10.	Conclusiones del capítulo.....	105
5.	CAPÍTULO V: RESULTADOS	108
5.1.	Introducción.....	108

5.2. Cálculo del ICA	108
5.3. Plataforma desarrollada	110
5.3.1. Consultas de registros	113
5.3.2. Consulta horaria	113
5.3.3. Consulta diaria	114
5.3.4. Consulta octohoraria	115
5.3.5. Consulta horaria (cruce de variables)	116
5.3.6. Consulta horaria (cruce de variables en escala logarítmica).....	116
5.3.7. Consulta diaria (cruce de variables).....	117
5.3.8. Consulta diaria (cruce de variables en escala logarítmica).....	118
5.4. Conclusiones del capítulo.....	119
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
Conclusiones teóricas	121
Conclusiones metodológicas	121
Discusión y recomendaciones	122
BIBLIOGRAFÍA.....	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Estación automática para el monitoreo de calidad del aire localizada en el Municipio	4
Figura 1.2: Localización de las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Cuenca.....	4
Figura 1.3: Dispositivos empleados en el muestreo pasivo de contaminantes gaseosos.	5
Figura 1.4: Operador de sonómetro en proceso de medición.....	6
Figura 1.5: Interfaz para visualizar el Índice de Calidad del Aire en Cuenca.	18
Figura 1.6: Puntos de medición de ruido en la ciudad de Cuenca.	18
Figura 1.7: Mapa de Ruido en Cuenca.....	19
Figura 2.1: Capas del modelo OSI.	22
Figura 2.2: Arquitectura del modelo IoT.	23
Figura 2.3: Ilustración de una comunicación con topología estrella.....	26
Figura 2.4: Ilustración de una comunicación con topología punto a punto.	27
Figura 2.5: Espectro de frecuencias especificado por el estándar 802.15.4.....	28
Figura 2.6: WSN con comunicación salto simple, y multi salto.....	31
Figura 2.7: Consumo promedio de energía de un nodo.	32
Figura 2.8: Esquema de monitoreo del estado físico de una persona.	35
Figura 2.9: Esquema de monitoreo climático en campo de Olivas.....	36
Figura 2.10: Aplicación de una WSN en una ciudad.	38
Figura 3.1: Esquema del diseño del trabajo.	41
Figura 3.2: Curvas de ponderación A, B, C y D.	43
Figura 3.3: Respuesta humana a tonos puros de igual nivel de presión sonora.	43
Figura 3.4: Fotografías del sistema AWOS del Aeropuerto Mariscal Lamar, Cuenca.	51

Figura 3.5: AWOS categoría I: Velocidad del viento, ráfagas de viento, dirección del viento, dirección variable del viento, temperatura, punto de rocío, ajuste del altímetro, altitud de densidad.	52
Figura 3.6: Sonda de humedad y temperatura 5190 de un AWOS.	53
Figura 3.7: Sondass de temperatura series 4470 y 4480 de un AWOS.	53
Figura 3.8: Sensor de presión barométrica 7150 de un AWOS.	54
Figura 3.9: Barómetro digital de un AWOS.	55
Figura 3.10: Nodo Waspote Plug & Sense.	56
Figura 3.11: Lado de control de la carcasa.	57
Figura 3.12: Lado de sensores de la carcasa.	57
Figura 3.13: Lado de antena de la carcasa.	57
Figura 3.14: Nodo Smart Environment PRO Waspote Plug & Sense.	59
Figura 3.15: Sensor de temperatura, humedad y presión.	59
Figura 3.16: Rango de operación del sensor de humedad.....	60
Figura 3.17: Sensor de monóxido de carbono montado en su módulo AFE.....	61
Figura 3.18: Sensor de monóxido de carbono montado en su módulo AFE.....	62
Figura 3.19: Sensor de monóxido de carbono montado en su módulo AFE.....	62
Figura 3.20: Sensor de monóxido de azufre montado en su módulo AFE.	63
Figura 3.21: Nodo Smart Cities Waspote Plug & Sense.....	64
Figura 3.22: Sonda del sensor de temperatura (MCP9700A).	64
Figura 3.23: Sonda del sensor de humedad (808H5V5).	65
Figura 3.24: Salida del sensor de humedad 808H5V5.....	65
Figura 3.25: Sonda del sensor de luminosidad (LDR).	66
Figura 3.26: Gráfica de la respuesta en frecuencia del sensor POM-2735P-R.....	67
Figura 3.27: Conexión el panel solar al nodo Waspote	69
Figura 3.28: <i>Gateway Meshlium v3.8</i>	69

Figura 3.29: Esquema de comunicación, transmisión y almacenamiento de información.	72
Figura 3.30: Secciones del IDE de Waspnote.....	73
Figura 3.31: Diagrama de flujo general del sistema.	74
Figura 3.32: Diagrama de flujo para nodo Smart Environment.....	75
Figura 3.33: Diagrama de flujo para nodo Smart Cities.	77
Figura 3.34: Diagrama de flujo de la plataforma web.	78
Figura 3.35: Mapa de puntos cobertura en el campus universitario.	79
Figura 3.36: Montaje de <i>gateway</i> meshlium.....	80
Figura 3.37: Montaje de los nodos con sensores.....	80
Figura 3.38: Adecuación de nodos en poste (puerta principal Universidad del Azuay).	81
Figura 4.1: Estado de la recepción de datos.....	83
Figura 4.2: Implementación de paneles solares, vista inferior.....	84
Figura 4.3: Implementación de paneles solares, vista superior.....	84
Figura 4.4: Comportamiento de nivel de batería sin fuente de carga conectada, nodo SC_NODE y SEP_NODE.....	85
Figura 4.6: Comportamiento de nivel de batería del nodo SC_NODE (Azul), SEP_NODE (Naranja) conectado a una fuente de carga; porcentaje de luminosidad presente (Gris).....	86
Figura 4.6: Comportamiento de sensores de temperatura en el día 1.	87
Figura 4.7: Comportamiento de los sensores de temperatura desde día 1 al día 4. ...	88
Figura 4.8: Equipos con cobertura de poliestireno expandido, vista frontal.....	89
Figura 4.9: Equipos con cobertura de poliestireno expandido, vista inferior.	89
Figura 4.10: Comportamiento de los sensores de temperatura con cobertura del día 6.	90
Figura 4.11: Comportamiento de los sensores de temperatura, con cobertura, desde día 5 al día 8.	90

Figura 4.12: Estación AWOS ubicada en el Aeropuerto Mariscal Lamar.....	91
Figura 4.13: Disposición de los nodos sensores junto a la estación AWOS.....	92
Figura 4.14: Comparación de resultados de temperatura.....	92
Figura 4.15: Curva GP_TC corregida en contraste con mediciones de estación AWOS.....	93
Figura 4.16: Comparación entre sensores de humedad.....	94
Figura 4.17: Comportamiento de los sensores de humedad, días 1-4.....	94
Figura 4.18: Comportamiento de los sensores de humedad, con cobertura, desde día 5 al día 8.....	95
Figura 4.19: Comparación de valores de humedad con equipo certificado.....	95
Figura 4.20: Curva corregida del sensor de humedad.....	96
Figura 4.21: Comparación de niveles de presión atmosférica: Nodo sensor GP_PRES (Azul), Estación AWOS (Naranja), desde día 1 al día 4.....	96
Figura 4.22: Curva GP_PRES Corregida en contraste con curva de respuesta de AWOS.....	97
Figura 4.23: Ruido de impacto: Nivel de ruido 30 – 50dB.....	98
Figura 4.24: Ruido de impacto: Nivel de ruido 50 – 70dB.....	99
Figura 4.25: Ruido de impacto: Nivel de ruido mayor a 70dB.....	99
Figura 4.26: Porcentaje de mejora en mediciones.....	100
Figura 4.27: Porcentaje de precisión del dato.....	100
Figura 4.28: Instalación de nodos sensores junto a Estación Automática.....	101
Figura 4.29: Disposición de los nodos sensores.....	101
Figura 4.30: Comparación de los niveles de concentración de CO.....	102
Figura 4.31: Comparación gas contaminante SO ₂	103
Figura 4.32: Comparación gas contaminante NO ₂	104
Figura 4.33: Comparación gas contaminante O ₃	104
Figura 4.34: Registro de valores de O ₃ , variación del funcionamiento del sensor..	105

Figura 5.1: Interfaz completa de visualización.	111
Figura 5.2: Visualización del ICA en la plataforma web.	112
Figura 5.3: Tipos de visualización de la concentración de gases contaminantes en la plataforma web.	112
Figura 5.4: Niveles de carga de los nodos en la plataforma web.	113
Figura 5.5: Interfaz para la consulta por fecha y hora de los diferentes parámetros.	114
Figura 5.6: Interfaz para la consulta por fecha de los diferentes parámetros.	115
Figura 5.7: Interfaz para la consulta por octohorarios de los gases contaminantes.	115
Figura 5.8: Interfaz para la consulta por fecha y hora para el cruce de los diferentes parámetros.	116
Figura 5.9: Interfaz para la consulta por fecha y hora para el cruce de los diferentes parámetros en escala logarítmica.	117
Figura 5.10: Interfaz para la consulta por fecha para el cruce de los diferentes parámetros.	117
Figura 5.11: Interfaz para la consulta por fecha para el cruce de variables atmosféricas y ruido en escala logarítmica.	118
Figura 5.12: Interfaz para la consulta por fecha para el cruce de gases contaminantes en escala logarítmica.	118
Figura 5.13: Presentación de los puntos de medición de ruido en los años 2012, 2014 y 2015.	119

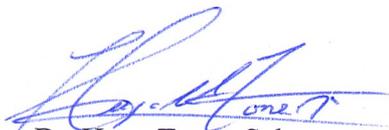
ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Normas generales para concentraciones de contaminantes en el aire ambiente.	8
Tabla 1.2. Efectos en la salud, en el medio ambiente y en el clima de los principales contaminantes atmosféricos.	9
Tabla 1.3: Codificación rangos ICA.	11
Tabla 1.4: Consideraciones a tomar ICA.	11
Tabla 1.5: Clasificación de rango de valores contaminantes EPA.....	13
Tabla 1.6: Niveles máximos de emisión de ruido (LKeq) para fuentes fijas de ruido.	14
Tabla 1.7: Niveles máximos de emisión para fuentes móviles de ruido.....	15
Tabla 2.1: Comparación de características técnicas de sistemas embebidos.	24
Tabla 3.1. Descripciones de los usos potenciales para sensores de aire de bajo costo según la EPA.	45
Tabla 3.2: Especificaciones del nodo Waspmote Plug & Sense.	56
Tabla 3.3: Referencia de ruido en dbA producido por diferentes fuentes.	67
Tabla 3.4: Unidades de medición de los sensores y el indicado en la norma TULSMA.	67
Tabla 3.5: Especificaciones técnicas de Meshlium v3.8.....	70
Tabla 5.1: Promedios de concentración e ICA diario del Dióxido de Nitrógeno. ...	108
Tabla 5.2: Promedios de concentración e ICA diario del Dióxido de Azufre.	109
Tabla 5.3: Promedios de concentración e ICA diario del Monóxido de Carbono. ..	109
Tabla 5.4: Promedios de concentración e ICA diario del Ozono.....	110

RESUMEN

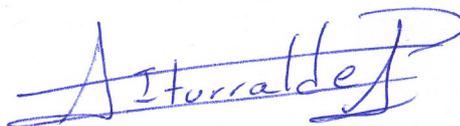
Este trabajo de titulación comprende la implementación de sensores de bajo costo siguiendo los conceptos de las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN) para la consulta, monitoreo y visualización continua de variables atmosféricas, ruido, gases contaminantes y cálculo referencial del Índice de Calidad del Aire (ICA); información que es presentada en una plataforma web para la consulta y visualización gráfica del comportamiento de las variables en el tiempo. Los datos fueron comparados y ajustados en base a equipos y estaciones certificadas.

Palabras clave: WSN, índice de calidad de aire, estación automática de monitoreo, contaminación del aire, ruido ambiental.



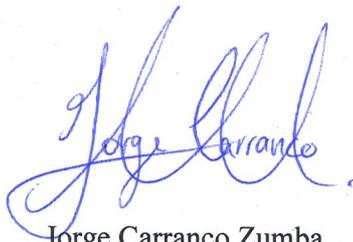
Dr. Hugo Torres Salamea

Director



Dr. Daniel Iturralde Piedra

Coordinador de Escuela



Jorge Carranco Zumba

Autor



Francisco Salgado Castillo

Autor

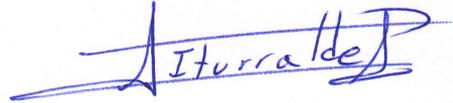
ABSTRACT

This graduation work dealt with the implementation of low-cost sensors based on Wireless Sensor Networks (WSN) concepts, for the consultation, monitoring and continuous visualization of atmospheric variables, noise, pollutant gases and reference calculation of the Air Quality Index (AQI). This information was presented on a web platform for inquiries and graphical visualization of the variables behavior over time. Data were compared and adjusted based on certified equipment and stations.

Keywords: WSN, air quality index, automatic monitoring station, air pollution, environmental noise.



Dr. Hugo Torres Salamea
Director



Dr. Daniel Iturralde Piedra
School Coordinator



Jorge Carranco Zumba
Author



Francisco Salgado Castillo
Author

INTRODUCCIÓN

El trabajo de titulación, "Sistema de monitoreo de calidad del aire y ruido ambiental para la determinación de índices de contaminación basado en redes inalámbricas de sensores", propone un sistema web de monitoreo continuo basado en la implementación de redes de sensores para la determinación de índices referenciales de calidad del aire y ruido.

Este trabajo hace énfasis en la evaluación de las mediciones registradas por los sensores de bajo costo en comparación con estaciones certificadas de monitoreo ambiental y meteorológico, con la finalidad de estimar la similitud en las mediciones.

La selección del tema surge de la necesidad de continuar con los proyectos en la línea de investigación de contaminación atmosférica que realiza el Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE), adscrito al Vicerrectorado de Investigaciones de la Universidad del Azuay. Es la intención del IERSE seleccionar y emplear sensores de bajo costo para comparar las mediciones de ruido, variables atmosféricas y gases contaminantes con la de equipos y estaciones de monitoreo certificadas que requieren inversiones muy altas para su operación y mantenimiento.

La metodología y los objetivos del trabajo consisten en: la revisión de la información vigente sobre el análisis de la calidad del aire y las normas que la rigen, además, de las definiciones y aplicaciones actuales de las redes inalámbricas de sensores para el monitoreo ambiental; la programación de nodos sensores disponibles para su vinculación, gestión y almacenamiento de datos en el servidor del Instituto; la determinación de índices de contaminación referenciales en base a la información recolectada; y finalmente, la implementación de una plataforma web que permita visualizar los datos de la calidad de aire, variables atmosféricas y ruido adquiridos por los sensores.

Se expone el desarrollo de este trabajo en cinco capítulos: Marco referencial, Marco teórico, Diseño y Desarrollo del Sistema, Implementación y Pruebas, y Resultados, respectivamente.

1. CAPÍTULO I: MARCO REFERENCIAL

"Hoy en día, el desarrollo es una preocupación mundial que trasciende las ideologías y los intereses inmediatos. Es ahora un reto tanto moral como político... Que demuestra que la estabilidad y la prosperidad son indivisibles."

Kofi Annan

1.1.Introducción

En este primer capítulo se presentan los antecedentes del trabajo realizado en conjunto con el Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE), adscrito al Vicerrectorado de Investigaciones de la Universidad del Azuay; describiendo la motivación y problemática actual, tratando los aspectos más significativos de la legislación ambiental en el país y otras normativas internacionales, las cuales son importantes conocer para el desarrollo de este trabajo.

1.2.Motivación

En los últimos años, la ciudad de Cuenca ha representado el destino turístico preferido por los jubilados extranjeros. De acuerdo a la Cámara de Comercio de Cuenca, durante el año 2015 se estimó que en la ciudad residen cerca de 5.000 extranjeros. De ellos, el 95% procedente de Estados Unidos, el 3% de Canadá, el 1% de Alemania e igual porcentaje de Australia (Paredes, 2015). Este atractivo turístico posiblemente se deba, en parte, a la baja polución que tiene la ciudad, lo que permite una mejor calidad de vida. Es por eso que surge la necesidad de proponer soluciones económicas y productivas para el monitoreo y control de los niveles de contaminación para evitar que estos se eleven en exceso y, en el caso de que lo hagan, tomar medidas correctivas así como preventivas para mantener una buena calidad de vida para todos los habitantes de la ciudad.

Complementariamente a lo descrito anteriormente, las ciudades están cambiando a lo que se conoce como ciudades inteligentes, estas son ciudades que se caracterizan por el uso intensivo de las tecnologías de la información y comunicaciones (TIC) en la creación y mejoramiento de los sistemas que componen la ciudad; permitiendo mejorar la calidad de vida de la población mediante el uso eficiente de los recursos.

Estas ciudades comienzan a ser vistas como medios innovadores que ayudan al desarrollo y al progreso de la población logrando así una integración de las diversas áreas. Para este propósito se combina software con las redes de telecomunicaciones digitales, la inteligencia integrada y los sensores (Mitchell, 2007).

1.3.Problemática

Conjuntamente con los extranjeros, en general, los habitantes de la ciudad han aumentado. Según los datos el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, INEC, la población de Cuenca alcanzó más de 580.700 habitantes durante el 2015 (Diario El Tiempo, 2016), este incremento también se ha visto reflejado en el parque automotor de Cuenca, En 2013 se matricularon 79.567 vehículos, mientras que en 2014 se elevó a 84.176, es decir, hubo un crecimiento del 5,8 por ciento, hasta noviembre del año 2015, fueron 800 vehículos más que en 2014, según los datos de la Empresa Municipal de Movilidad, EMOV (Diario El Tiempo, 2015).

Durante la revisión vehicular para la matrícula de estos autos, la emisión de gases es la principal causa para que los vehículos que circulan por Cuenca no aprueben la revisión en primera instancia. De los automotores que son condicionados, el 60% se debe a la emanación de partículas contaminantes (Diario El Telégrafo, 2014). Se puede determinar entonces que las actividades contaminantes en Cuenca como el tráfico vehicular, las industrias, el consumo de combustibles y el incremento de la población; contribuyen al deterioro de la calidad de aire y en una mayor contaminación acústica (ruido) en ciertas zonas de la ciudad.

Actualmente, la EMOV cuenta con una red de monitoreo de la calidad del aire de Cuenca, la cual consta con 20 puntos de vigilancia localizados en diferentes sitios de la ciudad. De las cuales tan solo una estación es automática, como se ilustra en la Figura 1.1, registrando en tiempo real las concentraciones de CO, SO₂, NO₂, O₃ y MP2.5 con un radio de cobertura de medición de aproximadamente 4 Km. La Figura 1.2 indica las ubicaciones de dichos puntos en la ciudad.



Figura 1.1: Estación automática para el monitoreo de calidad del aire localizada en el Municipio (estación MUN en Figura 1.2).

Fuente: (Municipalidad de Cuenca, 2015).

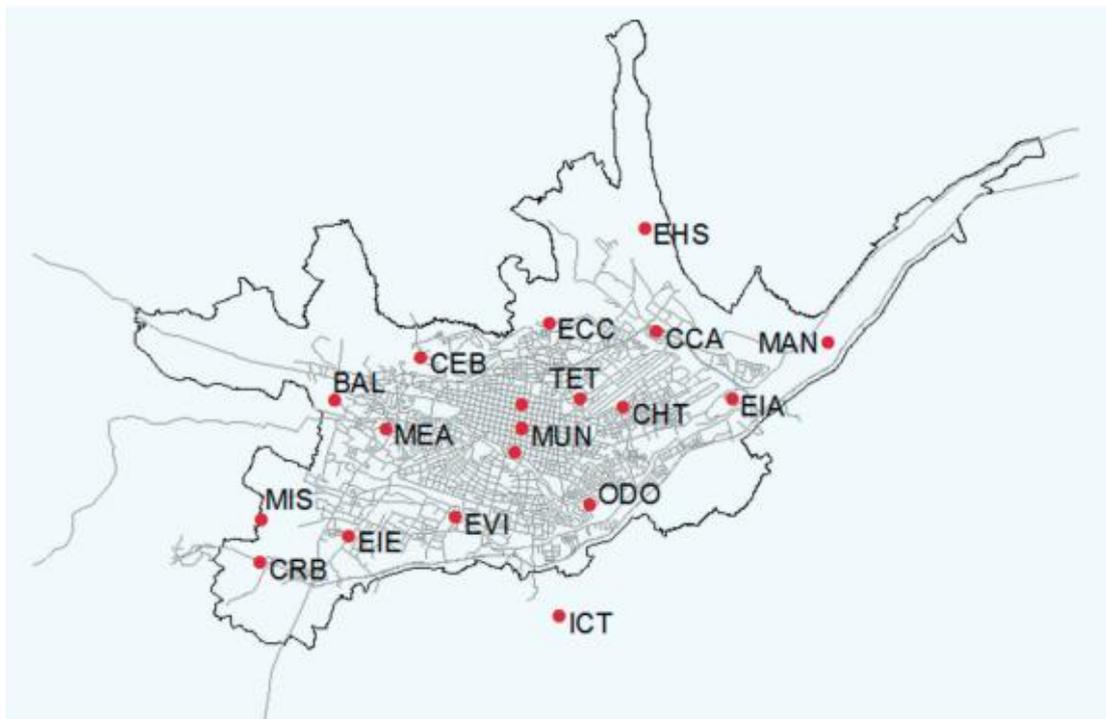


Figura 1.2: Localización de las estaciones de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Cuenca.

Fuente: (Municipalidad de Cuenca, 2015).

Las 19 estaciones restantes conforman una red pasiva y su muestreo se realiza en promedio 2 veces al mes con un análisis llevado a cabo en laboratorio (Municipalidad

de Cuenca, 2015). Todo este proceso requiere personal presente en cada punto, lo cual incrementa los gastos operativos y el tiempo de ejecución, además de no presentar resultados en tiempo real. En la Figura 1.3 se presenta las unidades utilizadas en la medición de gases.



Figura 1.3: Dispositivos empleados en el muestreo pasivo de contaminantes gaseosos.

Fuente: (Municipalidad de Cuenca, 2015).

En cuanto a la estación automática de monitoreo, por ser un punto de medición estático, posee un rango limitado de cobertura, además de un alto costo de implementación y mantenimiento, que se estima supera los \$250.000 (Balarezo & Tapia, 2011), además del recurso humano que conlleva la calibración de los sensores, al menos una vez por mes por parte de técnicos calificados.

Por otro lado, en cuanto a la contaminación acústica, El IERSE ha realizado levantamientos de datos de ruido ambiente desde el año 2009, lo cual ha contribuido para conocer los niveles de dicha contaminación en la ciudad de Cuenca en los años 2009, 2012, 2014, 2015 y 2016 (Martinez Gavilanes, 2017). Debido al crecimiento de la ciudad y las obras realizadas, las dinámicas de la población varían continuamente, por lo que los datos levantados son estáticos (sin variación temporal) mediante un sonómetro manipulado por un operador, como se ilustra en la Figura 1.4, y no reflejan los cambios en la medida que éstos se van presentando.



Figura 1.4: Operador de sonómetro en proceso de medición.

La información de la calidad del aire y de ruido no converge en un solo sistema, y por lo indicado anteriormente, se demanda más recursos como personal capacitado, tiempo de ejecución e inversión.

Por estas razones se propone diseñar e implementar un sistema de monitoreo de calidad del aire (CO , SO_2 , NO_2 , O_3) y ruido para la estimación de índices de contaminación basado en redes inalámbricas de sensores. En esta primera etapa de prueba, el sistema se evalúa en el campus de la Universidad del Azuay con dos puntos de medición que capten los datos de manera continua y permita visualizarlos en la web. Luego de estas pruebas, se contrastará la información adquirida con la Estación Automática de Monitoreo de Calidad del Aire de la EMOV, y con el Sistema de Observación Meteorológica Automatizado (AWOS) del Aeropuerto Mariscal Lamar de Cuenca.

1.4. Contaminación del aire

De acuerdo al artículo 2 de la Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, las fuentes potenciales de contaminación del aire son (Ministerio del Ambiente, 2004):

- a) "Las artificiales, originadas por el desarrollo tecnológico y la acción del hombre, tales como fábricas, calderas, generadores de vapor, talleres, plantas termoeléctricas, refinerías de petróleo, plantas químicas, aeronaves, automotores y similares, la incineración, quema a cielo abierto de basuras y residuos, la explotación de materiales de construcción y otras actividades que produzcan o puedan producir contaminación; y,
- b) Las naturales, ocasionadas por fenómenos naturales, tales como erupciones, precipitaciones, sismos, sequías, deslizamientos de tierra y otros. "

1.4.1. Principales contaminantes atmosféricos

A los contaminantes mencionados anteriormente, la norma ecuatoriana indicada en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) los define de la siguiente manera (Ministerio del Ambiente, 2015):

- **Dióxido de azufre (SO₂):** Es un gas incoloro e irritante formado principalmente por la oxidación de combustibles fósiles.
- **Material particulado:** Se refiere al constituido por material sólido o líquido en forma de partículas, con excepción del agua no combinada, emitido por la fuente fija hacia la atmósfera.
- **Monóxido de carbono (CO):** Es un gas incoloro, inodoro y tóxico, producto de la combustión incompleta de los combustibles.
- **Óxidos de nitrógeno (NO_x):** Es la suma del óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). El NO es un gas incoloro que se genera por la combinación del nitrógeno (N₂) y del oxígeno (O₂) de la atmósfera durante los procesos de combustión, el NO₂, que se forma a partir de la oxidación del NO.
- **Ozono (O₃):** Es un contaminante secundario del aire, que se genera por las reacciones fotoquímicas de los NO_x y compuestos orgánicos volátiles.

1.4.2. Niveles máximos de concentración de gases

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo están involucrados los gases CO, SO₂, NO₂ y O₃. La Tabla 1.1 indica los niveles de concentración máximos permitidos, según el TULSMA, donde los valores de concentración de contaminantes criterio del aire, están sujetos a las condiciones de referencia de 25 °C y 760 mm Hg. (Ministerio del Ambiente, 2015).

Tabla 1.1: Normas generales para concentraciones de contaminantes en el aire ambiente.

Contaminante atmosférico	Normas en periodos
Dióxido de azufre (SO ₂)	En 24 horas: no exceder 125 µg/m ³ En 10 minutos: no exceder 500 µg/m ³ El promedio aritmético de la concentración de todas las muestras en un año no deberá exceder de 60 µg/m ³
Monóxido de Carbono (CO)	En 8 horas: 10 000 µg/m ³ (no más de una vez al año) En 1 hora: 30 000 µg/m ³ (no más de una vez al año)
Ozono (O ₃)	En 8 horas: 100 µg/m ³ (no más de una vez al año)
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	En 1 hora: no exceder 200 µg/m ³ El promedio aritmético de la concentración de todas las muestras en un año no deberá exceder de 40 µg/m ³

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2015).

1.4.3. Efectos específicos de los contaminantes sobre la salud y el medio ambiente

Muchos contaminantes atmosféricos, pueden permanecer en el medio ambiente durante largos períodos de tiempo y son llevados por el viento a largas distancias de su origen. Los efectos que resultan de dichos contaminantes pueden ser vistos/asociados después de exposiciones a corto plazo (horas a semanas) o a largo plazo (meses a años). La contaminación del aire también puede causar daños ambientales, incluyendo el cambio climático, lluvia ácida, smog y neblina (U.S. Environmental Protection Agency, 2014). La Tabla 1.2 resume los efectos adversos de los principales contaminantes atmosféricos.

Tabla 1.2. Efectos en la salud, en el medio ambiente y en el clima de los principales contaminantes atmosféricos.

Contaminante	Efectos en la Salud	Efectos Ambientales y Climatológicos
Dióxido de azufre (SO ₂)	Agrava enfermedades respiratorias preexistentes en asmáticos que conducen a síntomas como tos y presión en el pecho. Los asmáticos están en mayor riesgo, pero niveles muy altos pueden causar síntomas respiratorios en personas sin enfermedad pulmonar. Las exposiciones durante periodos de tiempo más largos pueden resultar en admisiones hospitalarias.	Contribuye a la acidificación del suelo y de las aguas superficiales. Causa daños a la vegetación y pérdidas de especies locales en sistemas acuáticos y terrestres. Aumenta la biodisponibilidad del mercurio en las aguas superficiales impactando a los peces y otras especies silvestres. Contribuye a la formación de partículas, que tiene un efecto de refrigeración neta sobre la atmósfera.
Monóxido de Carbono (CO)	Reduce la cantidad de oxígeno que llega a los órganos y tejidos del cuerpo; Agrava la enfermedad cardíaca, lo que lleva a las admisiones hospitalarias.	Contribuye a la formación de CO ₂ y ozono, gases de efecto invernadero que calientan la atmósfera.
Ozono (O ₃)	Respirar ozono puede desencadenar una variedad de problemas de salud incluyendo dolor en el pecho, tos, irritación de la garganta y congestión. Puede empeorar la bronquitis, enfisema y asma. El ozono a nivel del suelo también puede reducir la función pulmonar e inflamar los revestimientos de los pulmones. La exposición repetida puede cicatrizar permanentemente el tejido pulmonar.	Daña la vegetación al afectar las hojas, reduciendo la fotosíntesis, perjudicando la reproducción y el crecimiento, y disminuyendo los campos de cultivos. Los daños a las plantas pueden alterar la estructura del ecosistema, reducir la biodiversidad y disminuir la absorción de dióxido de carbono (CO ₂). El ozono es un gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento de la atmósfera.

<p style="text-align: center;">Dióxido de Nitrógeno (NO₂)</p>	<p>Agrava los síntomas respiratorios, aumenta las admisiones hospitalarias, particularmente en asmáticos, niños y adultos mayores; aumenta la susceptibilidad a infecciones respiratorias.</p>	<p>Contribuye a la acidificación y enriquecimiento de nutrientes (Eutrofización, saturación de nitrógeno) del suelo y de las aguas superficiales. Conduce al agotamiento de oxígeno en aguas, pérdidas de plantas y animales, y cambios en las pérdidas de biodiversidad. Impacta los niveles de ozono, de partículas y de metano con los efectos ambientales y climáticos asociados.</p>
--	--	---

Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency, 2014).

1.4.4. Índice de Calidad del Aire (ICA)

El ICA es un índice para el reporte diario de la calidad del aire. Indica cuán limpio o poco saludable es el aire, y los efectos asociados a la salud que podrían ser de preocupación. El ICA se enfoca en los efectos sobre la salud que pueden surgir dentro de unas pocas horas o días después de inhalar aire contaminado. El ICA se calcula para cinco contaminantes atmosféricos principales: ozono a nivel del suelo, material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. Para cada uno de estos contaminantes, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, EPA por sus siglas en inglés, ha establecido normas de calidad del aire para proteger la salud pública (U.S. Environmental Protection Agency, 2016).

El valor del ICA se divide en seis categorías, como se muestra en la Tabla 1.3. Mientras las consideraciones a tomar para cada categoría se indican en la Tabla 1.4.

Tabla 1.3: Codificación rangos ICA.

Valores Índices de Calidad del Aire (ICA)	Niveles de cuidado para la salud	Colores
Cuando el ICA se encuentra en este rango:	La condición es:	Simbolizada por el color:
0 - 50	Bueno	Verde
51 - 100	Moderado	Amarillo
101 -150	Desfavorable para grupos Sensibles	Naranja
151 - 200	Desfavorable	Rojo
201 - 300	Muy Desfavorable	Púrpura
301 - 500	Peligroso	Marrón

Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency, 2016)

Tabla 1.4: Consideraciones a tomar ICA.

Índice de Calidad del Aire para el cuidado de la Salud		Significado
0 - 50	Bueno	La calidad del aire se considera satisfactoria, y la contaminación del aire presenta poco o ningún riesgo.
51 - 100	Moderado	La calidad del aire es aceptable; sin embargo, para algunos contaminantes puede haber un problema de salud moderada para un número muy pequeño de personas que son excepcionalmente sensibles a la contaminación del aire.
101 -150	Desfavorable para grupos Sensibles	Los siguientes grupos deberían limitar su exposición: Personas con problemas pulmonares, ejemplo asma. Niños y adultos mayores. Personas activas en exteriores.
151 - 200	Desfavorable	Los siguientes grupos deberían limitar su exposición prolongada:

		Personas con problemas pulmonares, ejemplo asma. Niños y adultos mayores. Personas acivas en exteriores. El resto de personas debe limitar exposiciones prolongadas en el exterior.
201 - 300	Muy Desfavorable	Alerta: todos podrían experimentar efectos de salud más graves.
301 - 500	Peligroso	Advertencias de salud en condiciones de emergencia. Toda la población tiene más probabilidades de ser afectada.

Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency, 2016)

1.4.4.1. Cálculo del índice de contaminación del aire

Como indica Sellers, el procedimiento para la obtención del Índice de Calidad del Aire (ICA) consiste en tomar el valor promedio generado en un periodo de tiempo de 8 horas o de 1 hora de cada contaminante atmosférico (Sellers, 2013). En este cálculo se emplea la fórmula 1.1.

$$ICA = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad (1.1)$$

Donde:

ICA = Índice de Calidad del Aire.

C_p = Concentración promedio.

BP_{Hi} = Punto de ruptura mayor o igual a C_p (Tabla 1.5)

BP_{Lo} = Punto de ruptura menor o igual a C_p (Tabla 1.5)

I_{Hi} = Valor del ICA correspondiente a BP_{Hi} (Tabla 1.5)

I_{Lo} = Valor del ICA correspondiente a BP_{Lo} (Tabla 1.5)

La Tabla 1.5 es el conjunto de Tablas de referencia EPA para evaluar los valores de los contaminantes y poder establecer los índices. La Tabla contiene varias columnas, la primera, ICA, representa los rangos de valores de 0 a 500 de los índices posibles según los parámetros establecidos por la EPA; la segunda, COLOR, representa la codificación en formato de colores asociada al rango de valores posibles de índices (ver Tablas 1.3 y 1.4); y las siguientes columnas representan el contaminante, su unidad de medida en ppb y ppm con las concentraciones mínimas y máximas para cada rango de valores índices (Sellers, 2013).

Tabla 1.5: Clasificación de rango de valores contaminantes EPA

$$ICA_{O_3} = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} * (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo}$$

ICA	COLOR	O3 8h ppb	O3 8h ppm	PM2.5 24 h ug/m3	PM2.5 1h ug/m3	CO 8h ppm	SO2 24h ppb	SO2 24h ppm	NO2 1h ppb	NO2 1h ppm
0 - 50	Verde	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		59,000	0,059	54,000	15,400	4,400	34,000	0,034	0,000	0,000
51 -100	Amarillo	60,000	0,060	55,000	15,500	4,500	35,000	0,035	0,000	0,000
		75,000	0,075	154,000	40,400	9,400	144,000	0,144	0,000	0,000
101 -150	Naranja	76,000	0,076	155,000	40,500	9,500	145,000	0,145	0,000	0,000
		95,000	0,095	254,000	65,400	12,400	224,000	0,224	0,000	0,000
151 - 200	Rojo	95,000	0,095	255,000	65,500	12,500	225,000	0,225	0,000	0,000
		115,000	0,115	354,000	150,400	15,400	304,000	0,304	0,000	0,000
201 - 300	Purpura	116,000	0,116	355,000	150,500	15,500	305,000	0,305	650,000	0,650
		374,000	0,374	424,000	250,400	30,400	604,000	0,604	1240,000	1,240
301 - 500	Marrón	--	--	425,000	250,500	30,500	605,000	0,605	1250,000	1,250
				604,000	500,400	50,400	1004,000	1,004	2040,000	2,040

Fuente: (Sellers, 2013).

1.5.Emisiones de ruido

Así mismo, en el TULSMA se indican los niveles máximos de emisión de ruido y metodología de medición para las diferentes fuentes. Las cuales se definen a continuación (Ministerio del Ambiente, 2015):

- **Fuente Emisora de Ruido (FER):** "Toda actividad, operación o proceso que genere o pueda generar emisiones de ruido al ambiente, incluyendo ruido proveniente de seres vivos."

- **Fuente Fija de Ruido (FFR):** "La fuente fija de ruido se considera a una fuente emisora de ruido o a un conjunto de fuentes emisoras de ruido situadas dentro de los límites físicos y legales de un predio ubicado en un lugar fijo o determinado. Ejemplo de estas fuentes son: metal mecánicas, lavaderos de carros, fabricas, terminales de buses, discotecas, etc."
- **Fuente Móvil de Ruido (FMR):** "Se entiende como fuentes móviles de ruido a todo vehículo motorizado que pueda emitir ruido al medio ambiente. Si una FMR se encontrase dentro de los límites de una FFR será considerada como una FER perteneciente a esta última."

1.5.1. Niveles máximos de emisión de ruido

El nivel de ruido se mide en decibeles (dB), una unidad adimensional que se utiliza, en este caso, para describir niveles de presión sonora.

Para una FFR, el nivel de presión sonora continua equivalente (LKeq en dB), no se puede exceder los niveles que se indican en la Tabla 1.6, de acuerdo al uso del suelo en que se encuentre. Por otro lado, para una FMR, el nivel de presión sonora (NPS en dBA) no podrá sobrepasar los niveles señalados en la Tabla 1.7, establecidos según la categoría del vehículo.

Tabla 1.6: Niveles máximos de emisión de ruido (LKeq) para fuentes fijas de ruido.

NIVELES MÁXIMOS DE EMISIÓN DE RUIDO PARA FFR		
Uso de Suelo	Lkeq (dB)	
	Periodo Diurno 07:01- 21:00	Periodo Nocturno 21:01- 07:00
Residencial	55	45
Equipamiento de Servicios Sociales	55	45
Equipamiento de Servicios Públicos	60	50
Comercial	60	50
Agrícola Residencial	65	45
Industrial	70	65

Uso múltiple	<p>Cuando existan usos de suelo múltiple o combinados se utilizará el LKeq más bajo de cualquiera de los usos de suelo que componen la combinación.</p> <p>Ejemplo: Uso de suelo: Residencial + ID2</p> <p>LKeq para este caso = Diurno 55 dB y Nocturno 45dB.</p>
--------------	--

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2015).

Tabla 1.7: Niveles máximos de emisión para fuentes móviles de ruido.

CATEGORÍA DE VEHÍCULO	DESCRIPCIÓN	NPS MÁXIMO (dBA)
Motocicletas	De hasta 200 c.c.	80
	Entre 200 y 500 c.c.	85
	Mayores a 500 c.c.	86
Vehículos	Transporte de personas, nueve asientos, incluido el conductor	80
	Transporte de personas, nueve asientos, incluido el conductor, y peso no mayor a 3.5 toneladas.	81
	Transporte de personas, nueve asientos, incluido el conductor, y peso mayor a 3.5 toneladas.	82
	Transporte de personas, nueve asientos, incluido el conductor, peso mayor a 3.5 toneladas, y potencia de motor mayor a 200 HP.	85
Vehículo de Carga	Peso máximo hasta 3.5 toneladas.	81
	Peso máximo de 3.5 toneladas hasta 12 toneladas.	86
	Peso máximo mayor a 12 toneladas	88

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2015).

1.5.2. Efectos en la salud causados por el ruido

El daño causado por la contaminación del aire es ampliamente reconocible. La evidencia es lógica, por ejemplo: en el *smog* que quema los ojos e irrita los pulmones. Sin embargo, el ruido es un contaminante más sutil. Aparte de los *booms* sónicos que pueden romper ventanas, el ruido generalmente no deja evidencia visible, aunque también puede representar un peligro para nuestra salud y bienestar.

En el cuerpo humano, la primera y más rápida detección de señales de sonido está mediada por un área subcortical - la amígdala, por esta razón, incluso durante el sueño, el ruido de los aviones o de los vehículos pesados puede clasificarse como señales de peligro e inducir la liberación de hormonas de estrés. Consecuentemente, de acuerdo con la hipótesis de estrés por ruido, es de esperar un mayor riesgo de infarto de miocardio. Los resultados de estudios individuales sobre este tema en la mayoría de los casos no alcanzan una importancia estadística, sin embargo, según estudios muestran una tendencia constante hacia un aumento del riesgo cardiovascular y presión alta si el nivel de exposición continua a largo plazo durante el día excede los 65 dB (A), mientras que a corto plazo, una exposición más alta a los 80 dB (A) aumentará el riesgo de daño auditivo y/o cambios permanentes en el umbral de audición (Ising & Kruppa, 2004).

1.6. Trayectoria del IERSE

El IERSE, como se encuentra descrito en su sitio web, es una "organización creada el 3 de junio de 1985 dependiente del Decanato General de Investigaciones (actual Vicerrectorado de Investigaciones) de la Universidad del Azuay como parte de la Comisión de Vinculación con la Colectividad y que trabaja para el desarrollo descentralizado del Ecuador, con reconocimiento de los gobiernos y comunidades locales, constituyéndose en un importante nexo entre la Universidad y la colectividad." (IERSE, 2016)

A lo largo de su trayectoria, EL IERSE ha realizado planes de desarrollo provincial, cantonal y parroquial; "en los que se consideran aspectos sociales, productivos, de infraestructura y redes, planes de ordenamiento territorial, estudios de medición del impacto generado por proyectos en diferentes áreas, proyectos de mitigación ambiental, entre otros." (Universidad del Azuay, s.f.)

Actualmente, y dentro de línea de investigación en Geomática y Territorio, el Instituto ha dedicado sus esfuerzos al desarrollo de una Infraestructura de Datos Espaciales o IDE, la cual consiste en un conjunto de políticas, leyes, normas, estándares, proyectos, recursos humanos, tecnológicos y financieros, para facilitar la producción, el acceso y uso de la geoinformación regional, nacional o local, para el

apoyo al desarrollo social, económico y ambiental. Otros programas y proyectos que se han ejecutado son los siguientes (IERSE, 2016):

1. Patrones de distribución espacial de contaminantes atmosféricos en el perímetro urbano de la ciudad de Cuenca.
2. Monitoreo del ruido ambiente generado por el tránsito vehicular en el perímetro urbano de la ciudad de Cuenca.
3. Fortalecimiento de la infraestructura de datos espaciales. Nodo Universidad del Azuay.
4. Planificación física del territorio: herramientas geomáticas para el uso y gestión del suelo.
5. Tecnología LIDAR (*Light Detection and Ranging*).
6. Sensores remotos en teledetección.
7. Fotogrametría arquitectural.
8. Evaluación de la calidad ambiental en centros urbanos.

Este trabajo de titulación se ha vinculado a los relacionados con medición de contaminantes atmosféricos (Sellers W., Pachecho, & Delgado I., 2015) y medición de ruido ambiente (Martínez G. & Delgado I., 2015) (Pachecho & Samaniego, 2014). El monitoreo de estos parámetros forma parte de la calidad del aire.

1.6.1. Trabajo actual del IERSE en el monitoreo de calidad del aire y ruido ambiental

Como se había descrito anteriormente, en el sitio web del IDE que ha realizado el IERSE, se encuentran los proyectos y trabajos pasados y actuales del Instituto ¹.

En relación con la calidad del aire, la misma plataforma cuenta con la medición de la contaminación del aire en Cuenca. Un esfuerzo conjunto con la EMOV, en el que el IERSE recibe los datos de la estación automática, los procesa y calcula el ICA para finalmente visualizarlo en una interfaz como se ejemplifica en la Figura 1.5.

¹ Dirección web del IDE: <http://gis.uazuay.edu.ec/ide2015/>



Figura 1.5: Interfaz para visualizar el Índice de Calidad del Aire en Cuenca.

Fuente: (IERSE, 2016).

En este sitio web también se encuentran los resultados de las mediciones de ruido en la Ciudad, cuyos datos fueron tomados en los puntos señalados en la Figura 1.6 de forma manual con un sonómetro calibrado. La Figura 1.7 presenta un mapa de ruido que se ha generado con los datos obtenidos en el año 2014. Este proyecto fue realizado en conjunto con la CGA: Comisión de Gestión Ambiental del GAD Municipal de Cuenca.



Figura 1.6: Puntos de medición de ruido en la ciudad de Cuenca.

Fuente: (IERSE, 2016).

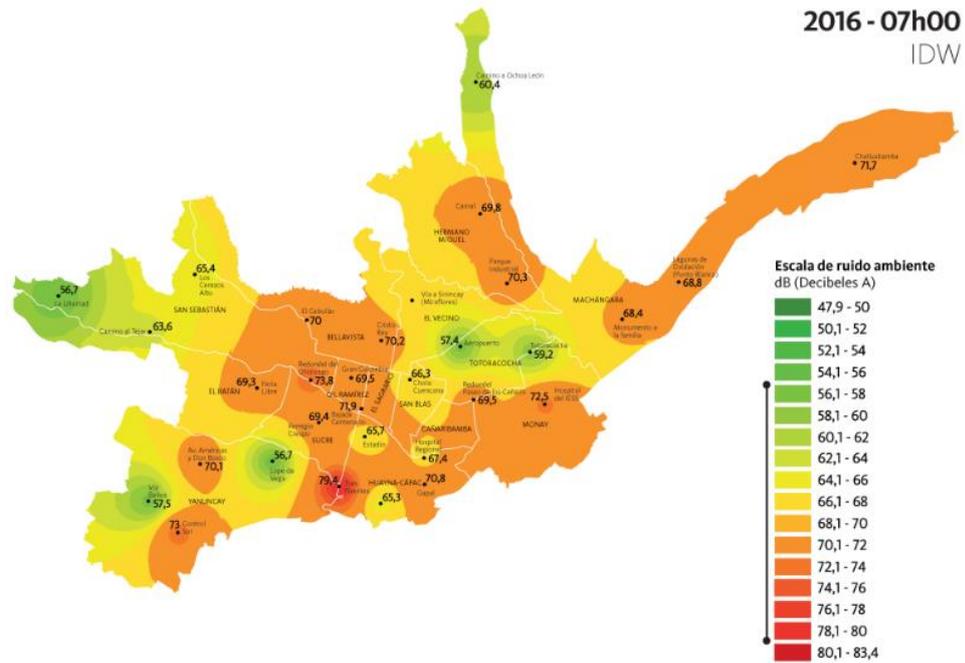


Figura 1.7: Mapa de Ruido en Cuenca.

Fuente: (IERSE, 2016).

1.7. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se conoció sobre el problema de contaminación del aire y ruido ambiente en la ciudad de Cuenca, las normativas legales y efectos adversos en la salud y medio ambiente. Si bien existen acciones que se han tomado para el monitoreo de los contaminantes atmosféricos y ruido por parte de la Municipalidad y del IERSE, las metodologías actuales requieren de una inversión muy alta y con resultados que no son siempre presentados de manera continua.

Además, es aspiración del IERSE que para la obtención del índice de calidad del aire también se puedan utilizar sensores remotos propios de la Institución para poder compararlos con la estación automática. Al mismo tiempo que el monitoreo de ruido sea automatizado con mediciones continuas mediante sensores que puedan ajustarse a los equipos certificados, para así, en un futuro, se pueda disponer con una red escalable de sensores y ofrecer el servicio de monitoreo, ya sea para municipalidades del país u otras entidades que lo requieran.

De esto parte la importancia de este trabajo el cual echa raíces para un proyecto mayor que evolucionará en conjunto con el equipo técnico y de investigación del IERSE, para mejorar la calidad de vida de las personas.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

"La mejor manera de planificar la ciudad es ver cómo la gente la usa hoy; buscar sus fortalezas, explotarla y reforzarla. No hay lógica que pueda superponerse a la ciudad; la gente la hace, y es a ellos, no a los edificios, a quien debemos adaptar nuestros planes"

Jane Jacobs

2.1. Introducción

El desarrollo tecnológico ha permitido lograr avances importantes en el enfoque de la tecnología para la interconexión de objetos, personas, aplicaciones e información a través de Internet, modelo conocido como internet de las cosas (IoT).

Este modelo está conformado por varios dispositivos sensores pequeños de bajo costo con capacidades computacionales, de procesamiento, almacenamiento de archivos y módulos de comunicación. Estos dispositivos son configurados como nodos de sensores inalámbricos, los cuales al ser implementados en un área con una escala numérica mayor, forman una Red Inalámbrica de Sensores (WSN) (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam, & Cayirci, 2002).

Una implementación más ágil, costos reducidos de instalación, no necesidad de cableado, y alta movilidad de las WSN, han permitido que sobresalga entre tecnologías previas como las redes cableadas y las hacen atractivas como opciones de desarrollo de infraestructura inteligente para aplicaciones de control de procesos, automatización, y muchas otras. Al ser dispositivos energizados por baterías y con una comunicación inalámbrica, son ideales para su implementación en zonas de difícil acceso.

Esta tecnología, siempre creciente, afronta retos específicos debido a sus características como el consumo y fuente de energía (Aziz, Sekercioglu, Fitzpatrick, & Ivanovich, 2013), protocolos de comunicación (Mahgoub & Ilyas, 2016), administración de servicios (Goyal & Tripathy, 2012), seguridad (Kumar, Jain, & Barwal, 2014), y demás temas que se analizan con más detalle observando la arquitectura de la red.

2.2. Arquitectura de las WSN en el modelo IoT

Antes de mencionar la arquitectura de las redes inalámbricas de sensores dentro del modelo de internet de las cosas, es oportuno resumir las 7 capas del modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) por sus siglas en inglés (Briscoe, 2000).

Capa 1: Física

Define la relación entre un dispositivo físico y un medio de transmisión, pudiendo ser este un radio enlace.

Capa 2: Capa de enlace de datos

Provee la funcionalidad y procedimientos para la transferencia de información entre actores de una misma red y detección de posibles errores que puedan suceder en la capa física.

Capa 3: Red

Esta capa proporciona la funcionalidad para transferir secuencias de datos de un host origen en una red hacia un host origen de una red diferente. Además realiza funciones de ruteo.

Capa 4: Transporte

Mantiene un seguimiento de los segmentos y retransmite los que fallan, esta capa se encarga de la fiabilidad de los enlaces mediante un control de flujo, segmentación, y control de errores.

Capa 5: Sesión

Controla las conexiones entre computadoras, establece, administra y termina las conexiones entre aplicaciones locales y remotas. Es la responsable del cierre correcto de sesiones.

Capa 6: Presentación

La capa de presentación convierte los datos en la forma que la aplicación acepta, además provee formato y cifra los datos que se envían a través de la red.

Capa 7: Aplicación

Es la capa que se encarga directamente de la interacción entre el usuario y la aplicación de software.

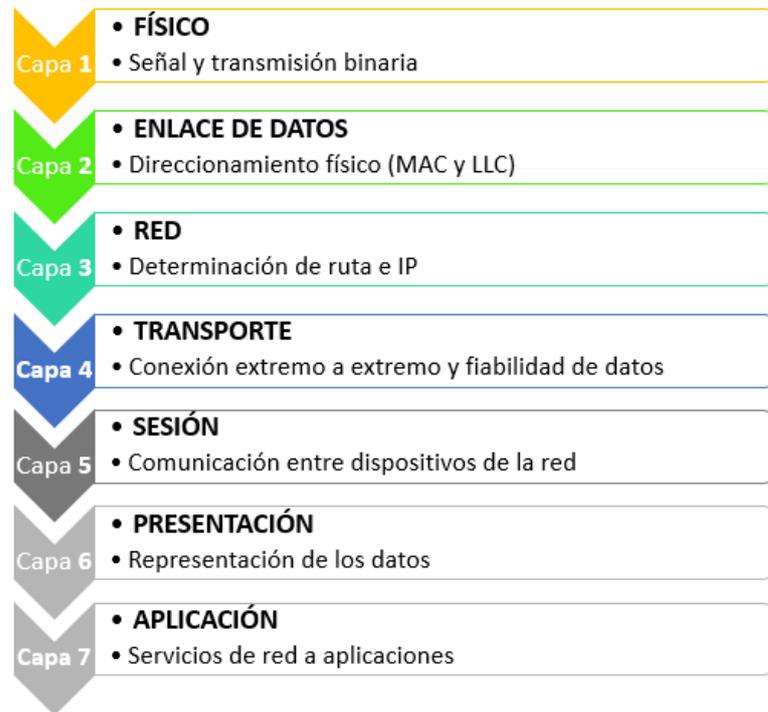


Figura 2.1: Capas del modelo OSI.

Las WSN están conformadas por nodos sensores que pueden hacer el rol de transceptores teniendo la capacidad de comunicarse entre ellos. Estos nodos se encuentran esparcidos por una determinada área de la que recolectan información de forma independiente, luego, se comunican entre ellos o directamente con la Puerta de Enlace (*Gateway*) para hacer llegar la información obtenida. Esta arquitectura (Alkhatib & Baicher, 2012), (Gubbi, Buyya, Marusic, & Palaniswami, 2013) que permite el pleno funcionamiento del concepto de IoT y por ende de las WSN para el control remoto, administración, e integración interactiva de servicios se divide en cuatro capas principales, que si bien se basan en el modelo OSI, se pueden analizar como: Conectividad de Sensores y Red, *Gateway* y Red, Administración de Servicios, y Aplicación.

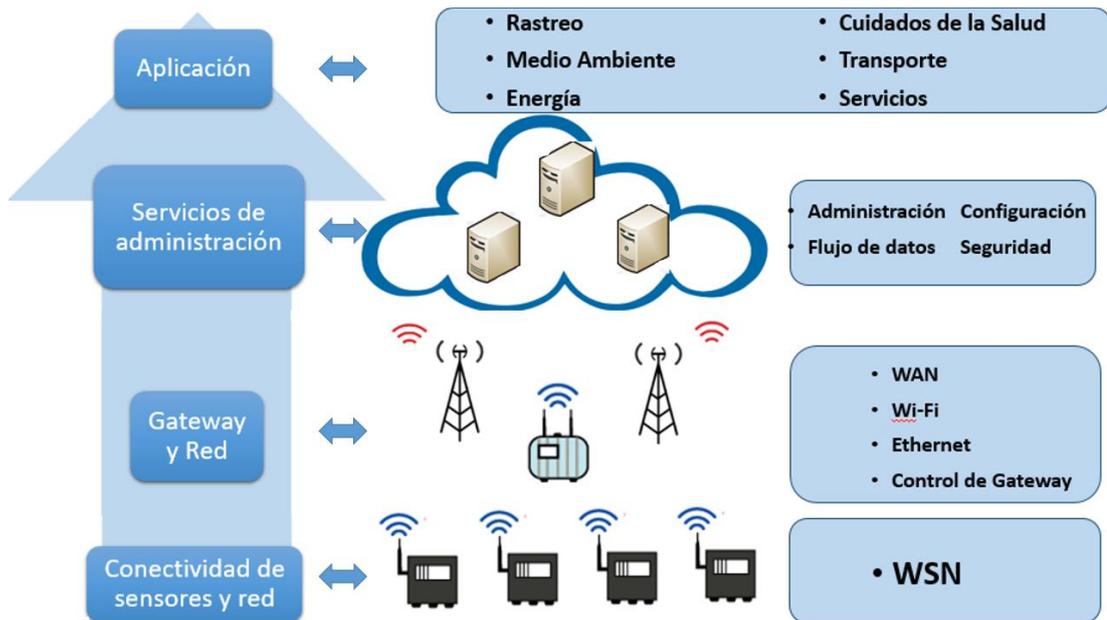


Figura 2.2: Arquitectura del modelo IoT.

2.2.1. Conectividad de sensores y red

En esta capa de conectividad se encuentran dispuestas las redes de sensores, transductores, actuadores, identificadores por radiofrecuencia (RFID), dispositivos inteligentes y demás elementos interconectados dentro de una misma red (Kyusakov, Eliasson, Delsing, Van Deventer, & Gustafsson, 2013), agrupados de acuerdo al propósito y relación que tienen. La información en tiempo real es adquirida y procesada con el menor consumo de energía posible y enviada a través de enlaces, que pueden ser por ejemplo, llamada a función remota (RFC), Bluetooth, XBee, entre otros. Por tal motivo es aquí donde recae la importancia de la conectividad de una WSN para que la información recolectada pueda ser entregada a la siguiente capa para un posterior procesamiento.

Los nodos están compuestos por cinco componentes principales que se describen a continuación:

Unidad de microcontrolador

La unidad de microcontrolador se encarga del procesamiento de datos, y el control de otros componentes en el nodo. Esta unidad es la controladora principal del nodo y con la que cualquier otro elemento del dispositivo es controlado. Así, administra los

procesos que le permiten al nodo realizar los muestreos mediante los sensores, ejecutar algoritmos asociados, y colaborar con otros nodos mediante la comunicación inalámbrica (Parai, Das, & Das, 2013) .

Unidad de memoria

Los nodos sensores no almacenan grandes tamaños de información, más bien utilizan un almacenamiento temporal como una memoria de acceso aleatoria (RAM), en la que almacenan la información antes de enviarla; memoria de sólo lectura (ROM), en la cual se almacena el sistema operativo de los nodos sensores; y demás tipos de memorias como SDRAM, SRAM, EPROM, entre otras (Manzoor, 2010). En el caso que se requiera un almacenamiento más amplio, en el mismo nodo se puede incluir una memoria externa como una SD o almacenamiento por USB (Maksimović, Vujović, Davidović, Milošević, & Perišić, 2014). La Tabla 2.1 indica las características de unidades de memoria para diferentes sistemas embebidos.

Tabla 2.1: Comparación de características técnicas de sistemas embebidos.

Nombre	Procesador	RAM	Memoria Externa
Raspberry Pi	ARM BCM2835	256-512 Mb	2-64 Gb
MicaZ	ATMEGA128	4 Kb	128 Kb
TelosB	TI MSP430	10 Kb	48 Kb
Iris	ATMEGA1281	8 Kb	128 Kb
Cricket	ATMEL128L	4 Kb	512 Kb
Lotus	ARM NXP LPC1758	64 Kb	512 Kb
Waspote	ATmega1281	8Kb	2 Gb

Fuente: (Vujović & Maksimović, 2014), (Libelium, Waspote Plug & Sense! Technical Guide, 2016).

Unidad de transceptor

La unidad de transceptor (transmisor y receptor) es la encargada de ejecutar la comunicación a través de la red con los demás nodos y demás componentes de la WSN.

La adaptación de una red a una WSN afronta el desafío de las limitaciones de las comunicaciones inalámbricas, como las múltiples atenuaciones y cobertura (Mahmood, Javaid, & Razzaq, 2015), por lo que al incrementar la distancia de un nodo hacia la base, es necesario incrementar también la potencia de la comunicación para alcanzar la estación. Por lo tanto, en algunos casos, resulta más conveniente energéticamente distribuir varios nodos en distancias cortas para que se intercomunicuen entre ellos y trabajen de forma cooperativa.

IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 es un estándar que especifica la capa física y de control de acceso al medio para redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (*low-rate wireless personal area network*, LR-WPAN) (Kurniawan, 2014).

Una LR-WPAN es una red de comunicaciones de bajo costo que permite conectividad inalámbrica en aplicaciones con potencia limitada y requisitos de rendimiento simples. Los objetivos principales de una LR-WPAN son la facilidad de instalación, transferencia de datos confiable, costo bajo, y una vida de batería razonable; manteniendo un protocolo simple y flexible.

En una red IEEE 802.15.4, se integran dos tipos diferentes de dispositivos: un dispositivo de funcionalidad completa (*full-function device*, FFD) y un dispositivo de funcionalidad reducida (*reduced-function device*, RFD). Un FFD es capaz de servir como un coordinador de una red de área personal (*personal area network*, PAN) mientras que un RFD no puede hacerlo. Un RFD está destinado para aplicaciones muy simples, tales como: un interruptor de luz o un sensor infrarrojo pasivo; no posee la necesidad de enviar grandes volúmenes de datos y solo se asocia con un solo FFD a la vez. Consecuentemente, el RDF puede ser implementado con mínimos recursos y capacidad de memoria (IEEE, 2011).

Topologías de red

Dependiendo de los requerimientos de aplicación, una red LR-WPAN 802.15.4 puede operar en dos topologías: estrella o punto a punto.

Topología estrella

En la topología en estrella, la comunicación se establece entre dispositivos y un único controlador central, denominado coordinador PAN. Todos los dispositivos que operan en una red de cualquiera de las topologías tienen direcciones únicas, denominadas direcciones extendidas. Además, a un dispositivo se le puede asignar una dirección corta durante el proceso de asociación. Un dispositivo usará la dirección extendida o la dirección corta para la comunicación dentro de la PAN. La transmisión de los campos de dirección extendida y corta es opcional para dispositivos RFD-TX (transmisor). El coordinador PAN a menudo será alimentado por la red eléctrica, mientras que los dispositivos probablemente estarán alimentados por baterías (IEEE, 2011).

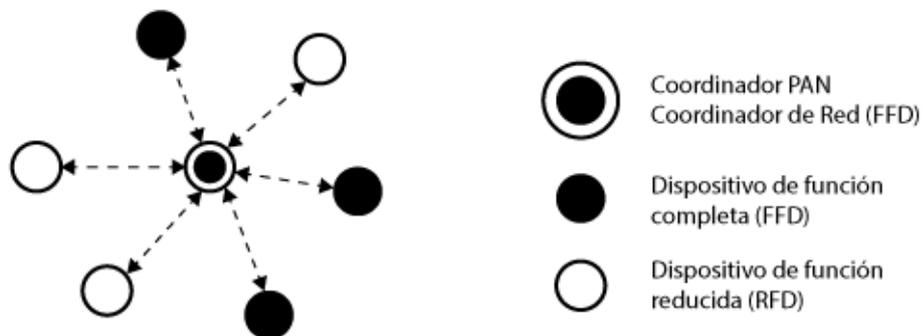


Figura 2.3: Ilustración de una comunicación con topología estrella.

Topología punto a punto

La topología punto a punto también tiene un coordinador PAN; Sin embargo, difiere de la topología en estrella en que cualquier dispositivo es capaz de comunicarse con cualquier otro dispositivo, siempre y cuando estén en el rango correspondiente. La topología punto a punto permite la implementación de formaciones de red más complejas, como la topología de redes de mesh o malla. Aplicaciones tales como control y monitoreo industrial, redes de sensores inalámbricos, seguimiento de activos e inventario, agricultura inteligente y seguridad se beneficiarían de tal topología de red.

Una red punto a punto permite que múltiples saltos encaminen mensajes de un dispositivo a cualquier otro en la red. Cada PAN independiente selecciona un identificador único. Este identificador PAN (ID) permite la comunicación entre dispositivos dentro de una red utilizando direcciones cortas y permite transmisiones entre dispositivos a través de redes independientes (IEEE, 2011).

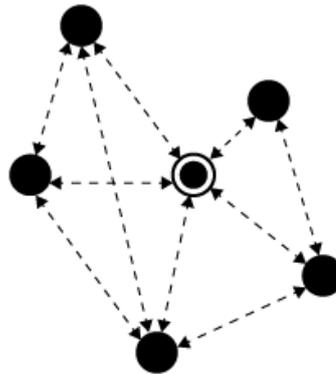


Figura 2.4: Ilustración de una comunicación con topología punto a punto.

Formación de una red estrella

Después de activar un FFD, puede establecer su propia red y convertirse en el coordinador PAN. Todas las redes estrella operan independientemente de otras redes del mismo tipo actualmente en funcionamiento, esto se logra eligiendo un PAN ID que no esté siendo utilizado por ninguna otra red dentro del rango de comunicaciones por radio.

Una vez que el PAN ID es elegido, el coordinador PAN permite que otros dispositivos, potencialmente FFDs y RFDs, se unan a su red. Un RFD-RX (receptor) también puede servir como punto de terminación del coordinador PAN para RFD-TXs.

Formación de una red punto a punto

En una topología punto a punto, cada dispositivo es capaz de comunicarse con cualquier otro dentro de su rango de comunicaciones por radio. Un dispositivo se designa como coordinador PAN, por ejemplo, en virtud de ser el primer dispositivo que se comunica en el canal.

Frecuencia de operación

El estándar 802.15.4 especifica que la comunicación puede ocurrir en las bandas de uso industrial, científico y médico (*Industrial Scientific and Medical, ISM*) 868-868.8 MHz, 902-928 MHz o 2.400-2.4835 GHz. Aunque cualquiera de estas bandas puede ser técnicamente utilizada por dispositivos 802.15.4, la banda de 2.4 GHz es más popular, ya que está abierta en la mayoría de los países del mundo. La banda de 868 MHz se especifica principalmente para uso europeo, mientras que la banda de 902-928 MHz sólo se puede utilizar en los Estados Unidos, Canadá y algunos otros países y territorios que aceptan las regulaciones de la Comisión Federal de Comunicaciones de EEUU (*Federal Communications Commission, FCC*).

La norma 802.15.4 especifica que la comunicación debe producirse en canales de 5 MHz que varían de 2.405 a 2.480 GHz. Mientras que el estándar especifica canales de 5 MHz, aproximadamente solo 2 MHz del canal se consume con el ancho de banda ocupado. En la banda de 2.4 GHz, se especifica una velocidad máxima de transmisión de datos de 250 kbps, pero debido a la sobrecarga del protocolo, la tasa de datos máxima teórica real es aproximadamente la mitad.

Para inmunidad a interferencias, 802.15.4 especifica el uso del espectro de dispersión de secuencia directa (*Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS*) y utiliza una codificación de desplazamiento de fase en cuadratura (*Offset Quadrature Phase Shift Keying, O-QPSK*) con modulación de medio pulso senoidal para modular la portadora de radiofrecuencia (RF). La siguiente gráfica muestra los diferentes canales a la distancia especificada por 802.15.4 (Digi International, 2016).

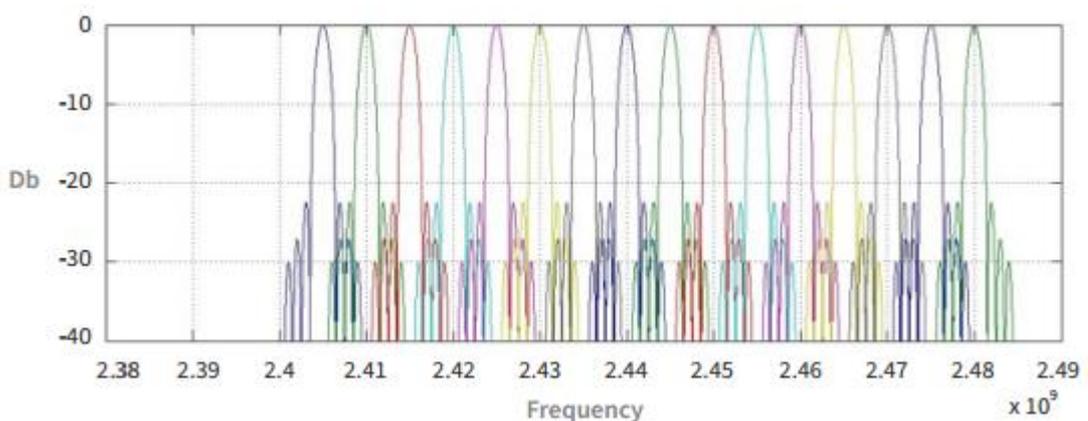


Figura 2.5: Espectro de frecuencias especificado por el estándar 802.15.4.

Fuente: (Digi International, 2016).

Mientras que el estándar IEEE siempre requiere un coordinador, los radios Digi 801.15.4 se configuran para que no se requiera un coordinador, haciendo que estos módulos sean rápidos y sencillos para poner en funcionamiento una red inalámbrica.

802.15.4 constituye la base de muchos protocolos como ZigBee, 6LowPan, y DigiMesh, es decir, estos protocolos están diseñados encima de la pila 802.15.4. También es muy útil en la habilitación de protocolos como el protocolo Modbus y los sistemas SCADA que fueron construidos sobre una tecnología cableada llamada RS-485 que es un sistema de comunicación habilitado para bus.

Consideraciones alternativas: Wi-Fi & Bluetooth

Wi-Fi

Wi-Fi es otro estándar abierto popular en el ámbito de 2,4 GHz, basado en el estándar IEEE 802.11.

Utilizando bandas de 22 MHz en el rango de frecuencias de 2,4 GHz, Wi-Fi utiliza su gran ancho de banda para lograr rápidas velocidades de datos. Cuando se compara con la energía más pequeña e intensa de los canales 802.15.4.

Esta capacidad de ancho de banda, sin embargo, hace que Wi-Fi sea la conexión inalámbrica de elección para muchas de las necesidades generales de redes actuales en el hogar o lugar de trabajo manejo de archivos de mayor volumen, imágenes o transmisión de vídeo. Por lo general, Wi-Fi es fácil de configurar y ofrece funciones de seguridad estándar, además, debido a su estándar abierto, Wi-Fi también tiene una amplia gama de interoperabilidad con otros dispositivos (Digi International, 2016).

Como se mencionó anteriormente, Wi-Fi tiene un gran consumo de energía, lo que significa que no es bueno para las aplicaciones con energización por batería, ya que normalmente requiere una fuente de alimentación con cable, además, no se puede hacer *meshing* o mallado; La conectividad se limita a dondequiera que la puerta de enlace o el punto de acceso pueda alcanzar.

Bluetooth

Bluetooth es otro estándar abierto popular que está creciendo significativamente. Concebido en 1994 como el reemplazo inalámbrico para RS-232, un protocolo de comunicación serial con cable, Bluetooth ha evolucionado para conectar casi cualquier dispositivo que una PC, laptop o smartphone. Bluetooth utiliza la misma gama de frecuencias de 2,4 GHz que la utilizada por 802.15.4 y Wi-Fi.

Bluetooth empaqueta los datos y transmite cada paquete en uno de sus 79 canales designados. Cada canal tiene un ancho de banda de 1 MHz, típicamente realizando 800 saltos por segundo, con espectro ensanchado adaptable con salto de frecuencia (*Adaptive Frequency-Hopping*, AFH) habilitado. La energía baja de Bluetooth utiliza el espaciamiento de 2 MHz, que acomoda 40 canales. Al encontrar interferencias, Bluetooth simplemente salta a una nueva banda y vuelve a enviar.

La principal ventaja de Bluetooth es su bajo consumo de energía en relación con sus capacidades de ancho de banda, especialmente la versión Bluetooth Low Energy (BLE) que ha surgido recientemente. Esto hace que la tecnología sea muy útil para dispositivos móviles y portátiles. Al igual que Wi-Fi en su facilidad de uso, y de muy bajo costo, la simple conectividad punto a punto y el ancho de banda relativamente decente también ha ayudado a hacer esta tecnología difundida en la actualidad.

Mientras que el estándar sigue evolucionando, tiene sus inconvenientes. Con una potencia inferior a la de Wi-Fi, su ancho de banda todavía consume suficiente energía para limitar el funcionamiento de una batería, además su alcance se limita a usualmente unos pocos metros en uso práctico. Mientras que la norma ha anunciado planes para apoyar mesh en el futuro, lo que ayudará a su rango y escala, debido a su arquitectura todavía será limitada en comparación con alternativas, como ZigBee. Su seguridad también es muy limitada hoy, por lo que es inseguro para infraestructura crítica (Digi International, 2016).

Selección del protocolo de comunicaciones

Digi ofrece varios productos 802.15.4 incluyendo DigiMesh, módulos XBee, puertas de enlace y enrutadores.

Con el firmware Digi 802.15.4, Digi ha introducido una línea de hardware para permitir que múltiples protocolos -incluidos 802.15.4, ZigBee y DigiMesh- se carguen en una sola plataforma electrónica.

Esto significa que si se adquiere un módulo básico 802.15.4 y se encuentra la necesidad de una red mesh en su lugar, es sencillo volver a cargar el firmware con la solución de firmware adecuada.

Así, un nodo puede actuar como fuente o enrutador de información (Fischione, 2016).

- **Modo Fuente:** El nodo sensor se enfoca en recolectar información de su entorno, procesarla y transmitirla hacia un nodo cercano en forma de multi salto, o directamente al *Gateway* con un denominado salto simple.
- **Modo Enrutador:** Adicionalmente de los datos producidos por sus sensores, cada nodo es responsable de retransmitir la información que llega de los nodos vecinos, hacia otro nodo aledaño continuando la comunicación multi salto o directamente hacia el *Gateway* dependiendo de la disposición de los nodos.

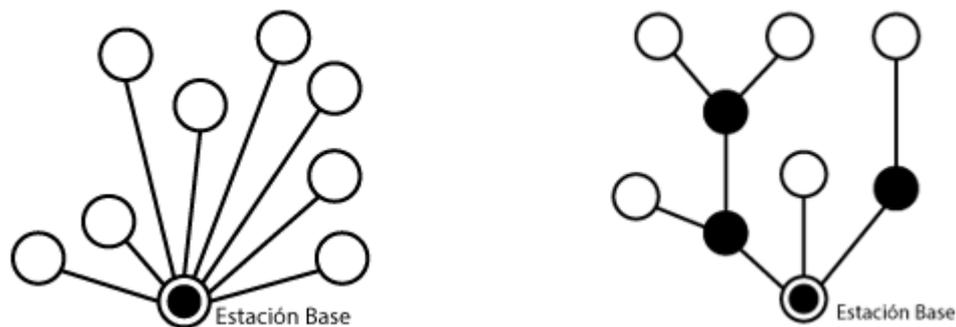


Figura 2.6: WSN con comunicación salto simple (Izquierda), y multi salto (Derecha).

Unidad de poder

La unidad de poder es la encargada de suministrar la energía para el funcionamiento de los nodos y por ende es de suma importancia ya que de su rendimiento dependen otros elementos de los nodos, pueden ser comúnmente, acumuladores de energía como baterías que en caso de ser recargables pueden recibir carga de fuentes naturales, como la energía solar mediante paneles solares.

Cabe considerar que la mayor parte del consumo energético proviene de la unidad de transceptor (Fischione, 2016), la cual representa más de la mitad del consumo total del nodo, como se ilustra en la Figura 2.7.

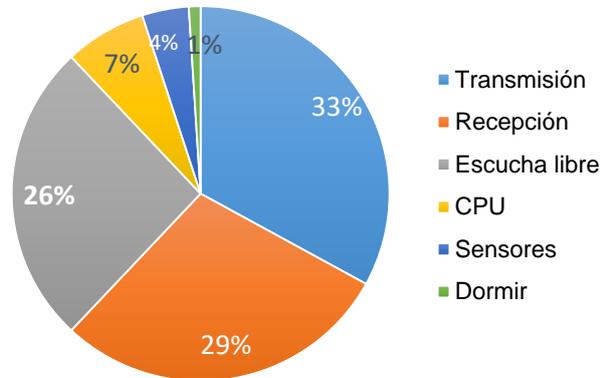


Figura 2.7: Consumo promedio de energía de un nodo.

El consumo de energía debe ser eficiente ya que por el hecho de que las WSN están diseñadas para cubrir amplias áreas de difícil acceso, en algunos casos la batería debe durar periodos extensos.

Unidad de sensor

El componente principal de un nodo es sin duda la unidad de sensor ya que es quien adquiere la información proveniente del entorno. Usualmente los nodos están compuestas por varias unidades de sensores, cada uno específico para un cierto tipo de variable. Dentro de sus componentes también se encuentra un conversor analógico digital (ADC), encargado de convertir en señales digitales los muestreos analógicos provenientes de los sensores, para su posterior paso a la unidad de procesamiento (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam, & Cayirci, 2002).

2.2.2. Gateway y red

En la siguiente etapa del modelo IoT se encuentra el *Gateway*, que integra en su hardware microcontroladores, módulos de comunicación, moduladores y procesadores de señal, puntos de acceso, sistemas operativos y sistemas embebidos, módulos de encriptación, entre otros. Soporta además altos volúmenes de información producida

por las redes de sensores y demás dispositivos inteligentes conectados a éste, por lo que es necesario que sean dispositivos robustos con un desempeño confiable.

Adicionalmente, los modelos de redes son diseñados para soportar los requerimientos de latencia del servicio para la calidad de comunicación, además, es necesario remarcar la importancia de integrar diversos tipos de redes en una sola plataforma IoT, de manera que los sensores puedan ser agregados con varios tipos de protocolos de comunicación y redes heterogéneas usando diferentes tecnologías.

Es necesario que las redes sean escalables para que puedan abastecer un amplio número de aplicaciones y servicios, con diversos protocolos, tipos de paquetes y diferentes requerimientos de seguridad.

2.2.3. Administración de servicios

En la capa de administración de servicios, OSS por sus siglas en inglés, se incluye el modelado de dispositivos, configuración, administración, administración de rendimiento, administración de seguridad.

Estos sistemas de administración permiten realizar reportes, obtener análisis estadísticos, minería de datos, minería de texto, análisis en memoria y análisis predictivo. Además la administración de servicios de seguridad está ligado a un control de acceso, encriptación e identificación de los accesos.

Las WSN, en cuanto a la gestión de datos, manejan información con características periódicas y aperiódicas. Los datos periódicos, al ser generados de manera continua y constante necesitan un filtrado ya que cierta información puede no ser necesaria.

Un caso diferente ocurre con los eventos aperiódicos generados en una red de sensores, por su característica de no ser singulares deben ser entregados y atendidos a la brevedad ya que representan niveles de prioridad altos.

El impacto de las soluciones OSS en los modelos de negocios han generado un cambio en los procesos de las empresas ya que al proporcionar un mejor análisis de datos pueden brindar un servicio más completo, en tiempo real, controlando costos operativos, y más características.

En cuanto a la seguridad en una WSN, es un tema que toma gran notoriedad al considerar que la información que manejan los nodos puede ser sensible y que al tener un número considerable de equipos desatendidos éstos pueden ser blanco fácil de ataques. Sin embargo al momento de incrementar la seguridad también incrementan los costos computacionales solicitados por los nodos, por ende el consumo de energía, así, este tema representa un campo de investigación de interés.

2.2.4. Aplicación

Las aplicaciones de las WSN tienen alcances en varios campos como el control de energía (Weber, 2009), monitoreo medio ambiental, transporte (Kumbhar, 2012), cuidados de la salud (Baig & Gholamhosseini, 2013), seguridad (Simon, y otros, 2004), rastreo (Zhang, Sadler, Lyon, & Martonosi, 2004), gestión de flotas (Padmavathi, Shanmugapriya, & Kalaivani, 2010), cadenas de suministros (Shin, Chin, Yoon, & Kwon, 2011), vigilancia (Rinner & Wolf, 2008), entre otras. En ésta capa, varias aplicaciones del sector industrial pueden usar tecnología de IoT con WSN.

2.3. Aplicaciones de las WSN

Debido al amplio campo de aplicación de las WSN, como se mencionó anteriormente, las aplicaciones pueden clasificarse en función del tipo de disponibilidad de la red, el tamaño de la cobertura, la heterogeneidad, modelo de negocio, requerimientos en tiempo real, entre otros, además, el manejo de datos, la longitud de la red y su escala se definen también dependiendo de la aplicación que se desee, de tal manera que una escala relativamente pequeña se puede considerar a una aplicación de oficina inteligente, vivienda inteligente, entre otras. Una escala mediana pueden considerarse las aplicaciones de agricultura inteligente. De similar manera ejemplos de redes a gran escala pueden considerarse aplicaciones de mayor impacto como energía inteligente, transporte inteligente, ciudades inteligentes, milicia, entre otras.

Por lo tanto, las aplicaciones deben estar enfocadas en base al tamaño, usuarios y finalidad para la que se va a emplear, se mencionan algunas a continuación.

Viviendas inteligentes: Las aplicaciones dentro del hogar en las que intervienen actuadores y nodos sensores pueden generar un ambiente más adecuado e inteligente.

Las WSN en las viviendas pueden medir remotamente consumo de energía, agua, niveles de gas, y enviar estos resultados inalámbricamente. Además se pueden incluir nodos sensores en los electrodomésticos habituales, de manera que exista una comunicación entre estos y se mantenga un monitoreo por parte del usuario y se pueda administrar su uso más eficientemente (Suryadevara, Mukhopadhyay, Kelly, & Gill, 2015).

Aplicaciones en cuidados de la salud: Los cuidados de salud en el adulto mayor requieren de un chequeo constante que puede ser mejorado notablemente con un monitoreo continuo de signos vitales y comportamiento del paciente, esto, implementando sensores en su domicilio o dispositivos biomédicos a manera de implantes, así el médico recibe alertas en caso de un evento inusual que requiera asistencia inmediata (Latre, Braem, Moerman, Blondia, & Demeester, 2011), (Jovanov, Milenkovic, Otto, & De Groen, 2005).



Figura 2.8: Esquema de monitoreo del estado físico de una persona.

Aplicaciones en agricultura: En la agricultura se han implementado WSN para reducir el trabajo de realizar cableados en áreas de difícil implementación, así, el

agricultor pierde cuidado del mantenimiento de extensos sistemas de monitoreo, además, al adicionar actuadores, se puede generar un riego preciso en base a las condiciones ambientales actuales, controlando inalámbricamente bombas de agua, medidores de presión, tanques de reserva y más. De esta manera se mejora el uso del agua y disminuye su desperdicio.

Casos aplicados se pueden observar en Europa, donde más de 1.8 millones de granjas trabajan en la producción de Olivo. Específicamente en Italia, debido a la presencia del "mosquito del olivo" la producción disminuye su calidad lo cual genera pérdidas en la industria. Al implementar una red de monitoreo de condiciones climáticas se puede tener un seguimiento del comportamiento del clima y consecuentemente de las condiciones en las que dicha plaga se expande con mayor intensidad. Así, mediante un análisis predictivo se pueden programar tiempos para fumigación en la que los insecticidas actúen mejor (Libelium, Waspnote Plug & Sense! Case Studies, 2016).

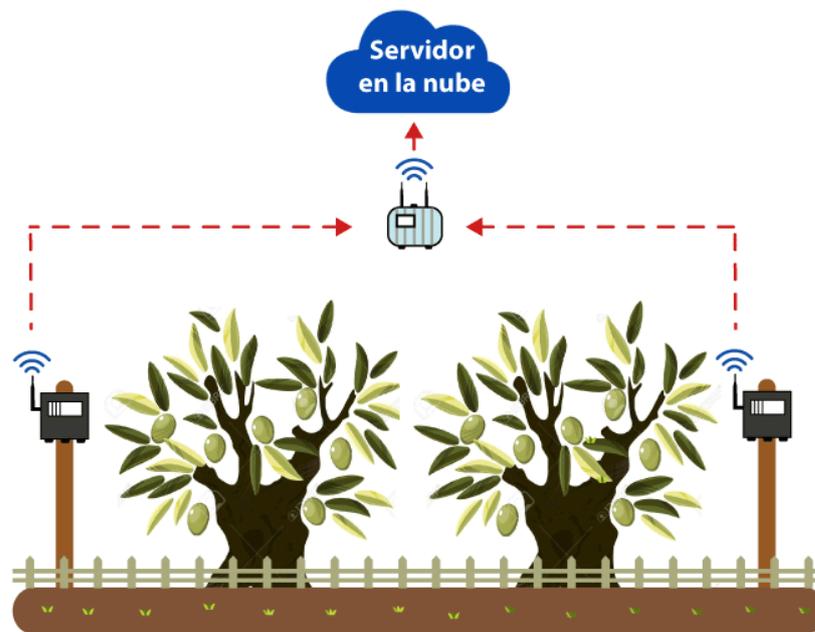


Figura 2.9: Esquema de monitoreo climático en campo de Olivas.

Un análisis predictivo para la mejora de cosechas se da también en Suiza, donde para un óptimo cultivo en viñedos se han instalado nodos sensores inalámbricos que recopilan información de condiciones climáticas presentes, información que conjuntamente con complejos modelos matemáticos permiten conocer el

comportamiento a futuro de la presencia de plagas y demás condiciones adversas (Diario El Mundo, 2015).

Cuando hablamos de campo también podemos referirnos al cuidado de animales, y en países como España la implementación de las WSN para el monitoreo del estado de salud de caballos se ha hecho una realidad. Los sensores colocados en la superficie del animal adquieren información en cuanto a la temperatura y sudoración en busca de signos de enfermedades como cólico, laminitis, o comportamientos anormales en el sistema digestivo que de no ser tratados a tiempo por un veterinario pueden terminar en la muerte temprana del animal. Adicional al monitoreo de su salud, la red de sensores también se extiende a lo largo de su entorno enviando información de niveles de agua, estado de las puertas o portones, y ubicación de los caballos en el establo. Toda la información recolectada puede ser visualizada en tiempo real por los cuidadores (Libelium, Waspnote Plug & Sense! Case Studies, 2015).

Control de procesos industriales: El campo de la industria lleva un tiempo considerable utilizando soluciones de sensores, control de aplicaciones, automatización y control de acceso. Sin embargo los costos que se manejan para implementación y mantenimiento de sensores cableados limitan el alcance y aplicabilidad de éstos. Por otro lado, considerar operadores para el manejo y control manual limita la precisión en la respuesta de estos sistemas. En cambio, la implementación de una red de sensores inalámbricos llega a ser una alternativa llamativa debido a su implementación sencilla, precisión, y versatilidad.

Un caso aplicado puede observarse en la industria de impresión de empaquetado, en la cual la red de sensores distribuida a lo largo de las instalaciones monitorea condiciones ambientales de los trabajadores para controlar temperatura del entorno de trabajo y niveles de ruido a los que se encuentran sometidos los empleados; procesos industriales para un monitoreo de condiciones correctas para la producción; monitoreo de emisiones de gases contaminantes de la maquinaria; y estado del almacenamiento de productos. Toda esta información es receptada por un *Gateway* y luego enviada para su almacenamiento en la nube, de manera que el departamento de control tenga acceso a esta información en tiempo real (Libelium, Waspnote Plug & Sense! Case Studies, 2015).

Aplicaciones ambientales: Debido a la versatilidad de los sistemas WSN su implementación dentro del campo ambiental se encuentra en una variedad de aplicaciones. Su uso puede estar en cuanto al seguimiento de aves; monitoreo de condiciones ambientales en ciudades; control de temperatura, luminosidad y humedad en edificios. Estos sistemas de monitoreo en combinación con actuadores pueden controlar dichos parámetros en base a la información de los nodos sensores distribuidos y tratan de mejorar, de la mano de la tecnología, la calidad de vida de los habitantes.

Existen varios proyectos de ciudades inteligentes desplegados, un caso en particular se ha llevado a cabo en Santander, una ciudad española ubicada al norte del país. Aquí, la implementación de un proyecto de Ciudad Inteligente denominado SmartSantander incluye una cantidad de 1125 nodos distribuidos entre sensores de temperatura, luminosidad, CO, ruido, y disponibilidad de parqueo. Además, cada nodo tiene integrado un sistema de posicionamiento global (GPS) que permite tener un control del lugar donde se encuentra el nodo (Sanchez, y otros, 2014).

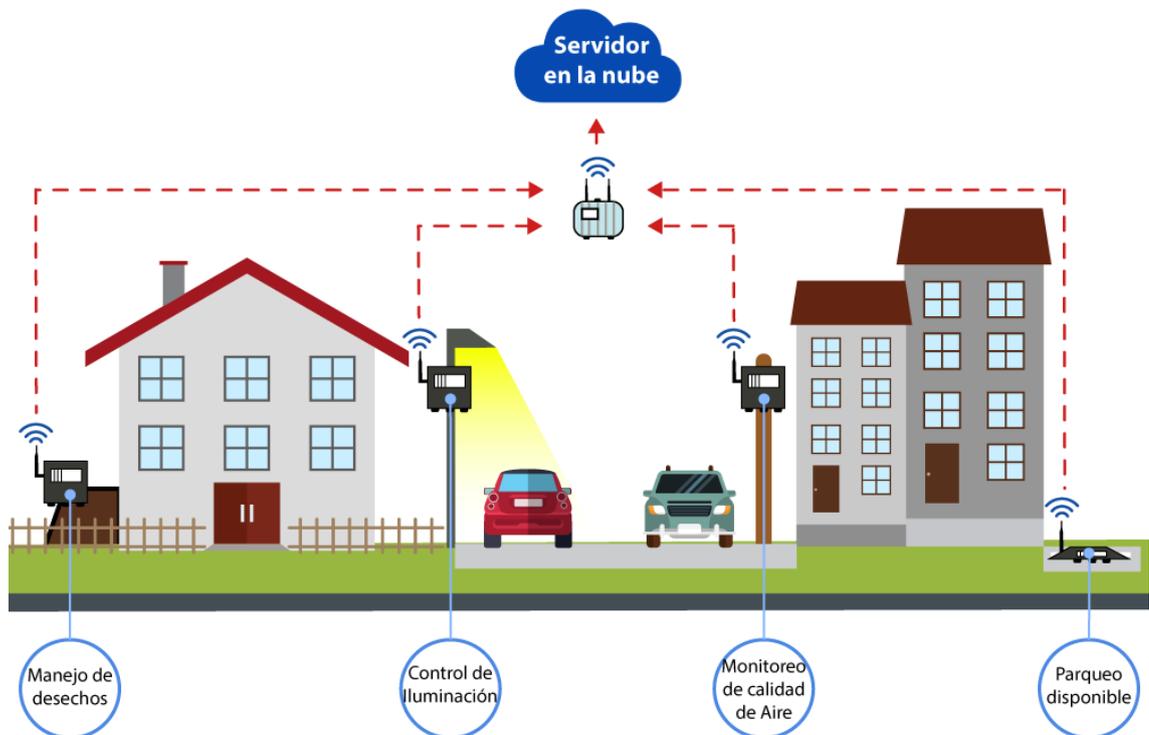


Figura 2.10: Aplicación de una WSN en una ciudad.

La finalidad del proyecto es mejorar la calidad de vida de los ciudadanos al implementar un monitoreo del ecosistema presente, considerando que, si bien los niveles de contaminación han disminuido, el ambiente todavía presenta un elevado índice de contaminación sobrepasando los niveles admisibles en cuanto a niveles de ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), y material particulado (PM), causantes de afecciones en la salud. Es así que en un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 46 urbes de España que se han estudiado, 37 de ellas no cumplen con los niveles recomendados de contaminación, entre ellas Santander (The Huffington Post, 2014). De esta manera, en el caso de existir un exceso de contaminantes en el aire se pueden emitir alertas.

De similar forma, el tema de plazas de parqueo para el parque automotor es de gran preocupación ya que involucra factores resaltantes como el desperdicio de combustible debido al tiempo empleado en buscar estacionamiento y consecuentemente mayor emisión de gases, esto también genera un stress de los conductores lo cual disminuye la calidad de vida de la población. Al desplegar una red que permita conocer la disponibilidad de plazas de parqueo se mejora considerablemente el ahorro de combustible y más aspectos que involucra la movilidad.

Otra aplicación de carácter ambiental es el monitoreo de prevención de desastres naturales como el implementado para el monitoreo volcánico llevado a cabo en Ecuador (Werner-Allen, y otros, 2006). Aquí una red de sensores inalámbrica se despliega en el área del volcán Reventador para recibir información de actividad volcánica, la red recolecta información acústica y sísmica a lo largo de 3 km y la transmite hacia una estación base del observatorio del volcán. La información de aproximadamente 230 erupciones a lo largo de tres semanas fue muy útil para futuros análisis.

2.4. Conclusiones del capítulo

Los nodos sensores que se encuentran dentro de una WSN tienen como mayor reto el tener un consumo mínimo de energía, por lo cual las operaciones internas de las unidades de sensor, microcontrolador, memoria y transceptor deben ser lo más eficientes posibles.

Las tarjetas de desarrollo actuales permiten incrementar la capacidad de almacenamiento mediante memorias externas o SD en el caso que se requiera aumentar el espacio de almacenamiento interno disponible

802.15.4 se utiliza comúnmente en redes simples y rápidas ya que tienen más ancho de banda y menos latencia que los protocolos que son construidos sobre la pila 802.15.4 como ZigBee y DigiMesh.

Aunque los dispositivos que usan el protocolo 802.15.4 pueden no ser capaces de saltar mensajes de nodo a nodo como pueden hacer los dispositivos ZigBee, las diferencias de latencia y el mayor ancho de banda hacen que 802.15.4 sea la elección principal para aplicaciones que no requieren *meshing* para saltar alrededor de obstáculos RF o ampliar el área que cubre la red inalámbrica.

Si una aplicación necesita comunicarse en serie de una manera punto a punto o punto a multipunto a distancias mayores que las de Bluetooth y Wi-Fi, entonces 802.15.4 es conveniente. 802.15.4 es capaz de manejar las comunicaciones entre dispositivos y con facilidad de implementar en lugar de tratar de usar un protocolo mesh para lograr el mismo objetivo. 802.15.4 también es más rápido (latencia reducida) y tiene un ancho de banda de datos más amplio (más bits por segundo) que lo ofrecido por mesh (ZigBee y DigiMesh). Si se necesitase usar una red de mesh para la extensión del rango, a través de enrutadores o enrutar datos alrededor de obstáculos RF, se podría utilizar, por ejemplo, un mismo módulo XBee S2C de Digi con 802.15.4, ya que este puede volver a cargarse (firmware) con una solución mesh.

Un nodo sensor, dependiendo de la configuración que se le asigne, puede trabajar en modo fuente, únicamente como generador de información; o en modo enrutador, generando información y retransmitiendo datos hacia otros nodos.

La capa de *Gateway* y Red en una WSN debe estar diseñada para manejar altos volúmenes de información, así como fiable y robusto para manejar latencias de servicio.

Las aplicaciones de WSN en la actualidad se encuentran desplegadas en diversas áreas ya que la recolección de información en tiempo real y su manejo favorece a los usuarios. Dado esto, la tendencia actual es que cada dispositivo sea un dispositivo inteligente que recopile datos y que contribuya con información.

3. CAPÍTULO III: DISEÑO Y DESARROLLO

"La mejor manera de predecir el futuro, es diseñarlo."

Buckminster Fuller

3.1.Introducción

En este capítulo se describen: el hardware (nodos y *gateway*), sensores a utilizarse y la ubicación inicial de los equipos, incluye el desarrollo y programación para el envío y visualización de los datos.

3.2.Cuadro de trabajo

La Figura 3.1 ilustra el esquema en el que se enmarca el desarrollo del trabajo. El diseño del mismo comprende los nodos sensores, basados en WSN, que recopilan mediciones de variables atmosféricas, ruido, y gases contaminantes, datos que son enviados mediante comunicación inalámbrica hacia un *gateway*, que a su vez se comunica con un servidor de base de datos, almacenando los registros generados de manera continua. Adicionalmente, se implementa una plataforma web para la consulta y visualización de registros, y cálculo del ICA.

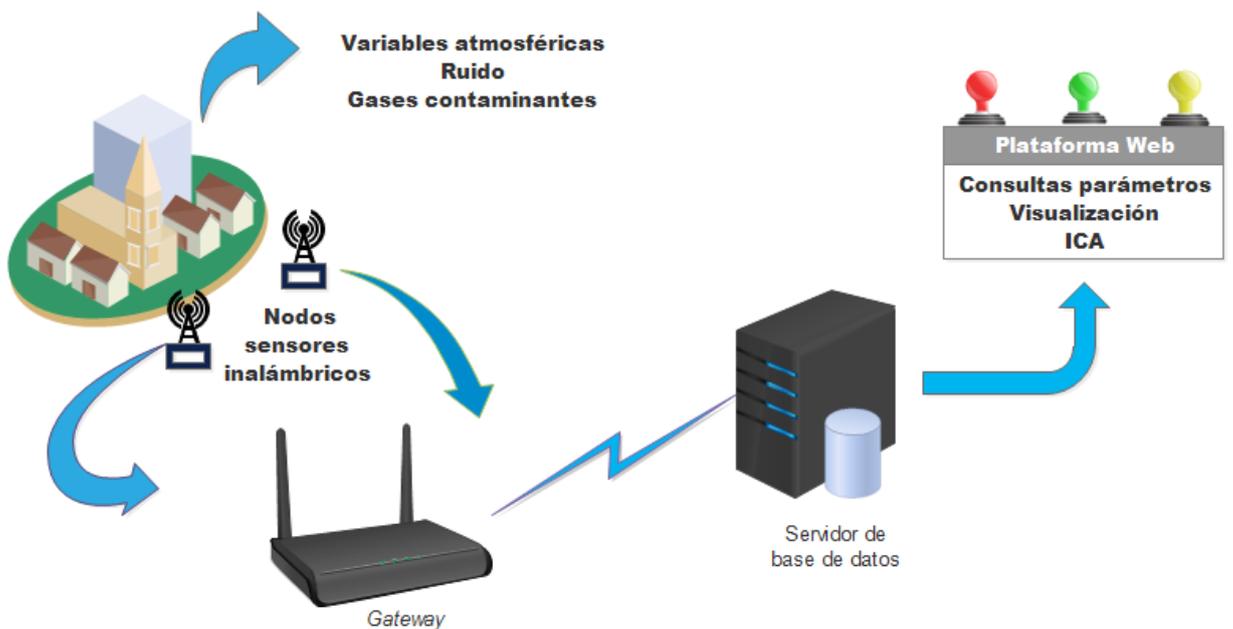


Figura 3.1: Esquema del diseño del trabajo.

Es necesario tener presentes los principios e instrumentos de medición de los parámetros mencionados para así determinar la metodología que permita llevar a cabo el diseño antes descrito. A continuación se detallan los siguientes principios y consideraciones:

3.3. Mediciones de ruido

Como se indicó en la sección 1.3, para la medición de ruido se emplea un sonómetro calibrado. A continuación se explicará a breves rasgos el funcionamiento de estos dispositivos.

Los sonómetros tienen en su parte superior un micrófono, que es el micrófono que las muestra y mide el sonido. El micrófono se mantiene lejos del cuerpo del instrumento, cortando los reflejos, y dando una medición más precisa. Dentro de la parte inferior del medidor, los circuitos electrónicos miden el sonido detectado por el micrófono y lo amplifican y filtran de varias maneras antes de mostrar una lectura en una pantalla LCD digital.

Los sonómetros tienen hasta cuatro escalas para medir el ruido, como se observa en la Figura 3.2. La ponderación o escala "A" se utiliza con mayor frecuencia para medir ruido comunitario. El dispositivo filtra electrónicamente las frecuencias bajas y altas y responde a los sonidos de forma muy similar a la del oído humano. La Figura 3.3 muestra que el oído es más sensible a los sonidos en el rango de 1000-4000 Hz.

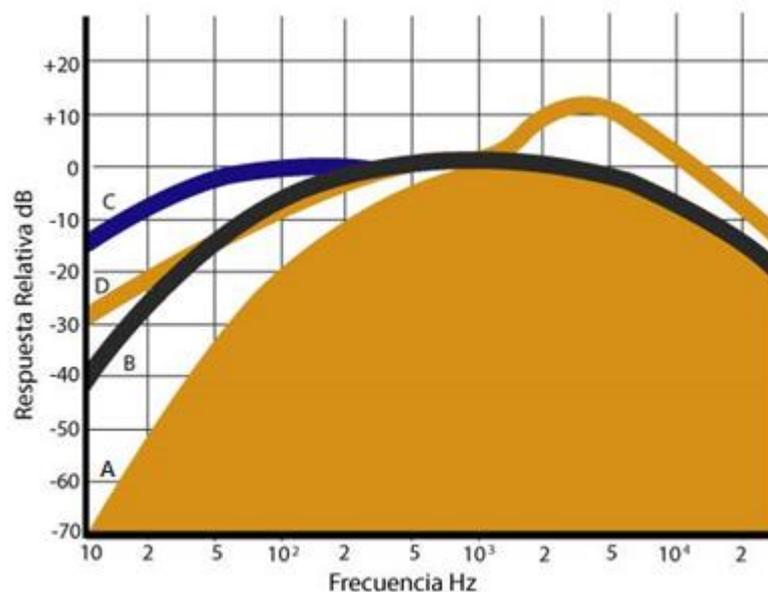


Figura 3.2: Curvas de ponderación A, B, C y D.

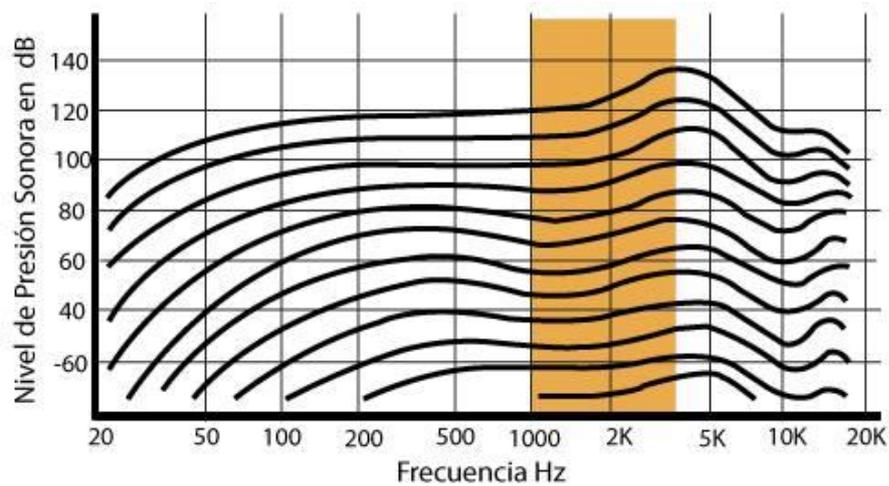


Figura 3.3: Respuesta humana a tonos puros de igual nivel de presión sonora.

Las escalas "B", "C" y "D" en los sonómetros se utilizan para lecturas de ruido más especializadas. La escala "D", por ejemplo, es la que se considera para su uso en la medición del ruido de turbinas en los aeropuertos.

Mientras que las turbinas generan una gran concentración de ruido de alta frecuencia, las locomotoras a diésel generan ruido que está fuertemente ponderado en las frecuencias más bajas, por lo que puede emplearse una escala para medir su ruido, generalmente la escala "C".

Las especificaciones de los sonómetros se dan en el estándar IEC 60651 para cuatro tipos 0, 1, 2, 3 que difieren por la precisión de la medición. La precisión de medición se reduce a medida que aumenta el número del tipo, lo que afecta significativamente los costos de fabricación. La norma IEC 60651 especifica las siguientes características (Malchaire, 2006):

- Características direccionales.
- Características de la ponderación de frecuencia.
- Características de la ponderación de tiempo, del detector y del indicador.
- Sensibilidad a diversos ambientes.

El sonómetro tipo 0 está diseñado como un estándar de referencia de laboratorio. El tipo 1 está diseñado especialmente para uso en laboratorio y para uso en campo donde el ambiente acústico tiene que ser estrechamente especificado y controlado. El

sonómetro tipo 2 es adecuado para aplicaciones generales de campo. El tipo 3 se destina principalmente a aplicaciones de reconocimiento de ruido de campo. La respuesta de frecuencia para todos los tipos se define de 10 Hz a 20000 Hz con una mayor precisión en frecuencias de 100 Hz a 8000 Hz.

Los sonómetros tipo 2 y tipo 3 normalmente incluyen sólo la red de ponderación A y la respuesta RÁPIDA y LENTA². Los modelos con tomas de corriente alterna permiten grabar el ruido en una grabadora de cinta magnética para su posterior análisis. Por lo general, están equipados con un micrófono piezoeléctrico de campo difuso o de condensador.

Los sonómetros 0 y 1 son a menudo mucho más versátiles con la posibilidad de medir vibraciones o insertar filtros de banda. Por lo general, permiten medir una señal no ponderada (respuesta PLANA), así como una señal ponderada "A" y una señal ponderada "C". Están provistos con una opción de una variedad de micrófonos de condensador de diferentes sensibilidades y características (Malchaire, 2006). Cabe mencionar que dichos equipos deben ser calibrados al menos una vez al año en un laboratorio o centro autorizado.

3.4.Mediciones de gases

Los sensores de calidad de aire portables y de bajo costo están proporcionando una oportunidad para que se utilice esta tecnología en una amplia gama de aplicaciones más allá del tradicional monitoreo regulatorio o equivalente. Los sensores de contaminación atmosférica están todavía en una etapa temprana de desarrollo, y muchos sensores aún no han sido evaluados para determinar la exactitud de sus mediciones. La EPA tiene pautas específicas que debe usar para establecer monitoreos de aire de grado reglamentario. Actualmente, ningún sensor de bajo coste cumple estos estrictos requisitos o pocos han sido presentados formalmente a esta agencia para tal determinación (U.S. Environmental Protection Agency, 2014). En la Tabla 3.1, esta

² El sonómetro obtiene el valor eficaz (RMS) de la señal y este entonces se promedia exponencialmente usando una constante de tiempo de 0.1 s ("RÁPIDA") o 1 s ("LENTA") y el resultado se muestra digitalmente o en un medidor analógico.

agencia- resume algunas áreas de aplicación potencialmente no regulatorias para sensores de aire y proporciona breves descripciones y ejemplos.

Tabla 3.1. Descripciones de los usos potenciales para sensores de aire de bajo costo según la EPA.

Aplicación	Descripción	Ejemplo
Investigación	Estudios científicos destinados a descubrir nuevas informaciones sobre la contaminación atmosférica.	Se utiliza una red de sensores de aire para medir la variación de material particulado en una ciudad.
Monitoreo de exposición personal	Monitoreo de la calidad del aire al que se somete una sola persona mientras realiza actividades normales.	Un individuo que tiene una condición clínica con mayor sensibilidad a la contaminación del aire usa un sensor para identificar cuándo y dónde está expuesto a contaminantes que puedan afectar su salud.
Complemento de datos de monitoreo existentes	Colocar sensores dentro de un área existente de monitoreo regulatorio estatal/local para extender la cobertura.	Se coloca un sensor en un área entre los monitores reguladores para caracterizar mejor el gradiente de concentración entre las diferentes ubicaciones.
Identificación y caracterización de fuentes	Establecimiento de posibles fuentes de emisión mediante monitoreo cerca de la fuente en sospecha.	Un sensor se coloca a favor del viento de una instalación industrial para monitorear las variaciones en las concentraciones de contaminantes del aire en el tiempo.

Educación	Uso de sensores en entornos educativos para la ciencia, la tecnología, la ingeniería y lecciones matemáticas.	Los sensores son proporcionados a los estudiantes para monitorear y entender los problemas de calidad del aire.
Información / Concientización	Uso de sensores para la concientización informal de la calidad del aire.	Se utiliza un sensor para comparar la calidad del aire en el hogar o en el trabajo de las personas, en automóviles o en escuelas.

Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency, 2014).

3.4.1. Principio de funcionamiento de los sensores de gas

Los sensores de gas miden e indican la concentración de ciertos gases en el aire a través de diferentes tecnologías. Típicamente empleados para prevenir la exposición tóxica y el fuego, los detectores de gas son a menudo dispositivos de baterías utilizados con fines de seguridad. Se fabrican como unidades portátiles o estacionarias (fijas) y funcionan al informar altos niveles de gases a través de una serie de indicadores audibles o visibles, como alarmas, luces o una combinación de señales. Algunos detectores pueden utilizarse como unidades individuales para monitorear pequeñas zonas, o las unidades pueden ser combinadas o unidas entre sí para crear un sistema de protección.

Cuando los detectores miden una concentración de gas especificada, la respuesta del sensor sirve como punto de referencia o escala. Hay varios tipos de detectores disponibles y la mayoría sirve la misma función: supervisar y advertir de un nivel de gas peligroso. Sin embargo, al considerar qué tipo de detector instalar, es útil considerar las diferentes tecnologías de sensores (Chokshi, 2014).

3.4.1.1. Tecnologías de sensores de gas

Los detectores de gas se clasifican por el tipo de gas que detectan: combustible o tóxico. Dentro de esta categorización amplia, se subclasifican por la tecnología que utilizan: los sensores catalíticos e infrarrojos detectan gases combustibles y las tecnologías de semiconductores electroquímicos y de óxido metálico generalmente detectan gases tóxicos.

3.4.1.1.1. Medición de gases tóxicos

Los sensores (o células) electroquímicos: son comúnmente utilizados en la detección de gases tóxicos como el monóxido de carbono, el cloro y los óxidos de nitrógeno. Funcionan a través de señales de electrodos cuando un gas es detectado. Generalmente, estos tipos de detectores son altamente sensibles y emiten señales de advertencia a través de corrientes eléctricas. Estos sensores tienen dos electrodos divididos por una capa de electrolitos, la cual puede ser líquida, sólida o en forma de gel. Cuando el gas entra en el sensor a través de una membrana y la tensión de polarización está aplicada a los electrodos, se presenta una reacción de reducción-oxidación que genera una corriente eléctrica directamente proporcional a la concentración de gas.

Los Óxidos Metálicos Semiconductores, o MOS: también se utilizan para detectar gases tóxicos (comúnmente monóxido de carbono) y funcionan a través de una película sensible al gas que está compuesta de óxidos de estaño o de tungsteno. La película sensible reacciona con los gases, activando el dispositivo cuando están presentes niveles tóxicos. Generalmente, los sensores de óxido metálico se consideran eficientes debido a su capacidad para operar en rangos de baja humedad. Además, son capaces de detectar una gama de gases, incluyendo combustibles (Barsan, Koziej, & Weimar, 2007).

3.4.1.1.2. Medición de gases combustibles

Los sensores catalíticos: representan un gran número de dispositivos de detección de gases que se fabrican hoy en día. Esta tecnología se utiliza para detectar gases combustibles tales como hidrocarburos, y funciona a través de la oxidación catalítica. Los sensores de este tipo de detector se construyen típicamente a partir de una bobina

de alambre tratada con platino. Cuando un gas combustible entra en contacto con la superficie catalítica, se oxida y la resistencia del cable cambia por el calor que se libera.

Los sensores infrarrojos o detectores IR: funcionan a través de un sistema de transmisores y receptores para detectar gases combustibles, específicamente los vapores de hidrocarburos. Típicamente, los transmisores son fuentes de luz y los receptores son detectores de luz. Si un gas está presente en la trayectoria óptica, interferirá con la potencia de la transmisión de luz entre el transmisor y el receptor. El estado alterado de la luz determina el tipo de gas que esté presente (Chokshi, 2014).

3.4.1.2. Consideraciones de los sensores de gas

Aunque los sensores de gas son generalmente una tecnología confiable, con algunos modelos capaces de durar hasta cinco años, su función adecuada depende generalmente del mantenimiento del usuario, la inspección de la batería y la calibración. La calibración es un procedimiento de seguridad ejecutado para asegurar que los sensores miden el nivel correcto de gas. Además, la vida útil de estos también depende a menudo de la cantidad de vapores de gas a los que están expuestos. Los sensores contaminados pueden no registrar niveles peligrosos de gas, por lo que es esencial una calibración frecuente (Yamazoe, 2005).

En base al estudio previo y lo descrito anteriormente, los sensores de gas que se han seleccionado para este trabajo son electroquímicos pues por su principio de funcionamiento, resultan ser económicos y con el nivel de precisión adecuado aunque se necesite calibración periódica de estos sensores. Además, los sensores electroquímicos tienen un consumo muy bajo (menos de 1 mA) por lo que es apto cuando se utilicen baterías como fuente de alimentación.

3.5. Mediciones de variables meteorológicas

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), indica que las observaciones meteorológicas (relacionadas con el medio ambiente y geofísica) se hacen por una variedad de razones. Se utilizan para la preparación en tiempo real de análisis meteorológicos, previsiones y avisos meteorológicos severos, para el estudio del clima, para operaciones locales dependientes del clima (por ejemplo, operaciones de

vuelo de aeródromo local, trabajos de construcción en tierra y mar), para hidrología y la meteorología agrícola, y para la investigación en meteorología y climatología (OMM, 2014).

La mayoría de los elementos necesarios para fines sinópticos, climatológicos o aeronáuticos pueden medirse mediante instrumentación automática o por estaciones meteorológicas automáticas. A medida que aumentan las capacidades de estos, aumenta la proporción de estaciones meteorológicas puramente automáticas con estaciones meteorológicas dotadas de personal de observación (OMM, 2014).

Una estación meteorológica automática (*Automatic Weather Station, AWS*) se define como una "estación meteorológica en la que se hacen observaciones que se transmiten automáticamente" (OMM, 1992).

En una AWS, las mediciones del instrumento son leídas o recibidas por una unidad central de adquisición de datos. Los datos recogidos de los dispositivos de medición autónomos pueden procesarse localmente en la AWS o en otro lugar, por ejemplo, en el procesador central de la red (OMM, 2010). Las AWS pueden diseñarse como un concepto integrado de varios dispositivos de medición en combinación con las unidades de adquisición y procesamiento de datos. Este sistema combinado de instrumentos, interfaces y unidades de procesamiento y transmisión se denomina generalmente un Sistema de Observación Meteorológica Automatizado (*Automated Weather Observing System, AWOS*) o un Sistema de Observación de Superficie Automatizado (*Automated Surface Observing System, ASOS*).

3.5.1. AWOS

Los Sistemas de Observación Meteorológica Automatizada (AWOS) miden e informan las condiciones meteorológicas para aplicaciones en la aeronáutica. Los sistemas AWOS se instalan en una gran variedad de ubicaciones, incluyendo aeropuertos comerciales y privados, bases aéreas militares y helipuertos. Los sistemas AWOS difieren en tamaño y complejidad, desde una estación meteorológica única hasta una red de grupos de sensores (Coastal Environmental Systems, Inc., 2015).

Un típico sistema AWOS consiste de los siguientes sensores meteorológicos de campo:

- Temperatura del aire
- Punto de rocío (humedad relativa)
- Presión barométrica (ajuste del altímetro)
- Velocidad y dirección del viento
- Visibilidad
- Altura de las nubes
- Cantidad e identificación de precipitaciones (clima actual)
- Aguanieve
- Detección de rayos (tormenta eléctrica)
- RVR (alcance visual en pista)
- Luz del ambiente
- Monitor de intensidad de luz en pista (RLIM)
- Radiación solar
- Condición de la superficie de pista

El Aeropuerto Mariscal Lamar de la ciudad de Cuenca cuenta con un sistema AWOS, proveniente de la casa comercial de All Weather Inc. (AWI), el cual se encarga de la fabricación de sistemas AWOS diseñados para aeropuertos pequeños, medianos, grandes y con multipista. En la Figura 3.4 se muestran las imágenes de este sistema dentro de las instalaciones del aeropuerto.



Figura 3.4: Fotografías del sistema AWOS del Aeropuerto Mariscal Lamar, Cuenca.

El sistema del aeropuerto consiste en la denominada categoría I de los sistemas AWOS, el cual está conformado por los siguientes componentes:

- Torre de 10m
- Velocidad y dirección del viento
- Temperatura / Humedad
- Presión Barométrica (Dual)
- Precipitación
- Visibilidad + alcance visual de pista (RVR)
- Altura de las nubes
- Tiempo actual
- Detección de rayos

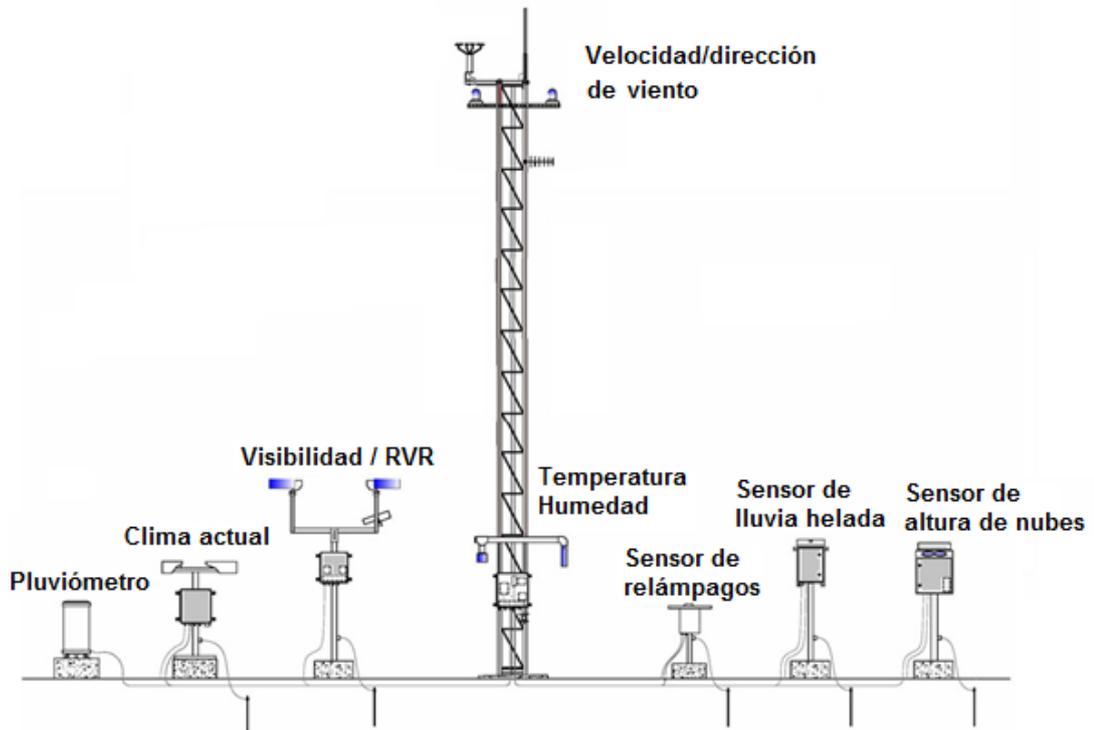


Figura 3.5: AWOS categoría I: Velocidad del viento, ráfagas de viento, dirección del viento, dirección variable del viento, temperatura, punto de rocío, ajuste del altímetro, altitud de densidad.

Fuente: (All Weather Inc., 2014).

De los sensores que esta estación meteorológica posee, es del interés de este trabajo los sensores que miden temperatura, humedad y presión; descritos a continuación.

Sonda de temperatura y humedad

Esta sonda (modelo 5190) está diseñada para una variedad de aplicaciones de monitoreo ambiental, incluyendo los sistemas AWOS. La misma que funciona con una tensión de alimentación de corriente continua con un bajo consumo de corriente. La humedad relativa es medida con un sensor de condensador de película delgada, mientras que la temperatura se mide utilizando un detector de temperatura de resistencia, Pt100, altamente preciso. La baja deriva y el amplio rango de funcionamiento del Pt100 hacen que el modelo 5190 sea ideal para aplicaciones de precisión.

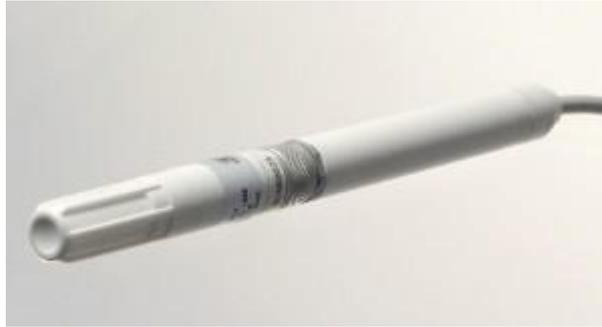


Figura 3.6: Sonda de humedad y temperatura 5190 de un AWOS.

Fuente: (All Weather Inc., 2014).

Sondas de temperatura

Esta sonda (series 4470 y 4480) utiliza un elemento de platino. Tiene una precisión de $\pm 0,01$ ° C y un amplio rango de medición de -50 ° C a $+100$ ° C. Además, la sonda incorpora un termistor de precisión compuesto que produce una tensión de salida lineal que es proporcional al rango de temperatura. Todas las unidades de la serie 4480 cuentan con un compuesto de 3 elementos, con un rango de medición de -50 ° C a $+50$ ° C.



Figura 3.7: Sondas de temperatura series 4470 y 4480 de un AWOS.

Fuente: (All Weather Inc., 2014).

Sensor de presión barométrica

El barómetro digital de AWI (series 7150) fue diseñado para proporcionar mediciones precisas de presión en un rango amplio de temperaturas y presiones ambientales. Este barómetro digital, completamente compensado, es ideal para aplicaciones en estaciones meteorológicas automatizadas.

Los barómetros utilizan transductores de presión con sensores de presión absoluta peizoresistivos de silicio. Los sensores de presión tienen buenas características de histéresis y repetibilidad, baja dependencia de temperatura y buena estabilidad a largo

plazo. Todos los barómetros de la serie 7150 están disponibles con comunicación RS-232 o RS-485.



Figura 3.8: Sensor de presión barométrica 7150 de un AWOS.

Fuente: (All Weather Inc., 2014).

Barómetro digital de grado de aviación

Los barómetros digitales (series 11906) están diseñados para hacer mediciones precisas de presión en una serie de condiciones ambientales. Usando tecnología capacitiva, absoluta del sensor de presión, este barómetro logra buena histéresis así como estabilidad a largo plazo. Al combinar el sensor con la tecnología de puerto de presión de cuatro placas de AWI, los efectos Venturi por la velocidad del viento se minimizan contribuyendo a la excepcional repetibilidad del barómetro. Similarmente a la serie anterior, Los barómetros de la serie 11906 son ideales para aplicaciones de alto rendimiento como estudios de aviación y meteorología y vienen con un certificado de calibración de fábrica.



Figura 3.9: Barómetro digital de un AWOS.

Fuente: (All Weather Inc., 2014).

3.6.Sensores propuestos

Tomando en cuenta las consideraciones antes mencionadas de: los sensores de contaminación del aire y ruido, de la revisión teórica del protocolo de comunicación inalámbrico que se concluyó utilizar en el capítulo anterior, de la revisión de aplicaciones actuales en redes WSN, y a partir de la Tabla comparativa 2.1; se ha optado por la implementación de equipos provenientes de la casa comercial Libelium.

Libelium ofrece soluciones IoT y WSN para diferentes aplicaciones. Para este trabajo, se realizó la adquisición de dos módulos (nodos) con sus respectivos sensores y de un *gateway* central.

Los nodos de Libelium, llamados Waspote Plug & Sense, permiten a los desarrolladores centrarse en servicios y aplicaciones, simplificando las tareas electrónicas. Se pueden implementar redes WSN de una manera fácil y escalable, lo que garantiza costos de mantenimiento mínimos. El nodo de la Figura 3.10 se compone de una robusta carcasa impermeable con zócalos externos específicos para conectar los sensores, panel solar, antena, y cable USB para reprogramar el módulo. En la Tabla 3.2 se indican sus especificaciones constructivas.



Figura 3.10: Nodo Wasmote Plug & Sense.

Tabla 3.2: Especificaciones del nodo Wasmote Plug & Sense.

Material	policarbonato
Sellado	poliuretano
Tornillos de cubierta	Acero inoxidable
Protección de ingreso	IP65
Resistencia de impacto	IK08
Tensión de aislamiento nominal CA	690 V
Tensión de aislamiento nominal CD	1000 V
Libre de metales pesados	Sí
A prueba de agua	nach UL 746 C
Temperatura ambiente (min.)	-10 °C
Temperatura ambiente (máx.)	50 °C
Peso aproximado	800 g

Fuente: (Libelium, 2016).

En las siguientes figuras se presenta una vista general de las partes principales de Wasmote Plug & Sense. Algunos elementos están dedicados al control de nodos, otros están designados para la conexión de sensores y otras partes son elementos de identificación.



Figura 3.11: Lado de control de la carcasa.



Figura 3.12: Lado de sensores de la carcasa.



Figura 3.13: Lado de antena de la carcasa.

Se adquirieron dos modelos distintos de nodos de la serie Waspnode Plug and Sense. El primero, con nombre Smart Environment Pro (SEP_NODE), opera para la medición de gases contaminantes y variables atmosféricas. El segundo, de nombre Smart Cities (SC_NODE), opera para la medición de ruido y otras variables atmosféricas. Cabe señalar que los sensores entre estos nodos no son intercambiables

pues la construcción electrónica interna de los nodos solo les permite trabajar con los sensores correspondientes, es por eso que son dos modelos diferentes.

El primer nodo trabaja con los siguientes 5 sensores:

- Temperatura, humedad y presión atmosférica.
- Monóxido de carbono (CO) calibrado de fábrica.
- Ozono (O₃) calibrado de fábrica.
- Dióxido de nitrógeno (NO₂) calibrado de fábrica.
- Dióxido de azufre (SO₂) calibrado de fábrica.

El segundo nodo comprende 4 sensores, los cuales son:

- Temperatura.
- Humedad.
- Luminosidad.
- Ruido en ponderación "A".

A continuación se describen cada uno de ellos.

3.7. Características técnicas de los sensores

3.7.1. Nodo Smart Environment Pro

Descripción general

De acuerdo a los fabricantes, este nodo es normalmente implementado en proyectos ambientales, industriales, en agricultura, contaminación y calidad del aire con altos requerimientos en términos de precisión, fiabilidad y rango de medición. Los sensores de gases vienen calibrados de fábrica y para un mejor funcionamiento se recomienda cambiarlos aproximadamente cada 6 meses (Libelium, 2016).



Figura 3.14: Nodo Smart Environment PRO Waspnote Plug & Sense.

Fuente: (Libelium, 2016).

Sensor de temperatura, humedad y presión

El BME280 es un sensor digital de temperatura, humedad y presión desarrollado por Bosch Sensortec.

Especificaciones:

Sensor de temperatura

- Rango de medida: $-40 \sim +85^{\circ}\text{C}$
- Exactitud: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (se asegura en $0^{\circ}\text{C} \sim +65^{\circ}\text{C}$)
- Tiempo de respuesta: 1.65 (63% respuesta de $+30$ a $+125^{\circ}\text{C}$).



Figura 3.15: Sensor de temperatura, humedad y presión.

Fuente: (Libelium, 2016).

Sensor de humedad

- Rango de medida: 0 ~ 100% de Humedad Relativa (para temperaturas $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ver la Figura 3.15)
- Exactitud: $< \pm 3\%$ HR (a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, rango 20 ~ 80%)
- Temperatura de operación: $-40 \sim +85\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Tiempo de respuesta: 1 segundo.

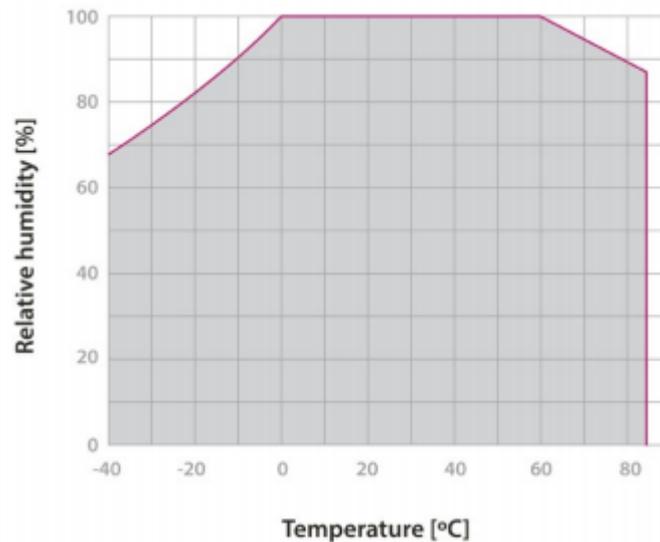


Figura 3.16: Rango de operación del sensor de humedad.

Fuente: (Libelium, 2016).

Sensor de presión

Rango de medida: 30 ~ 110 kPa

Temperatura de operación: $-40 \sim +85\text{ }^{\circ}\text{C}$

Exactitud: $\pm 0.1\text{ kPa}$ (se asegura en $0 \sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Sensor de gas monóxido de carbono (CO) [calibrado]

Especificaciones:

Características de desempeño:

- Rango Nominal: 0 a 500 ppm
- Sobrecarga máxima: 2000 ppm
- Desviación a largo plazo: $< 2\%$ señal/mes
- Tiempo de respuesta: ≤ 30 segundos

- Sensibilidad: 70 ± 15 nA/ppm
- Exactitud: ± 1 ppm* (condiciones ideales)

Condiciones operacionales:

- Rango de temperatura: -20 °C a 50 °C
- Humedad de operación: 15 a 90% HR sin condensación
- Rango de presión: 90 a 110 kPa
- Tiempo de vida esperado: 5 años en aire.



Figura 3.17: Sensor de monóxido de carbono montado en su módulo AFE.

Fuente: (Libelium, 2016).

Sensor de gas ozono (O₃) [calibrado]

Especificaciones:

Características de desempeño:

- Rango Nominal: 0 a 5 ppm
- Sobrecarga máxima: 10 ppm
- Desviación a largo plazo: -20 a -35% cambio/año
- Tiempo de respuesta: ≤ 15 segundos
- Sensibilidad: -200 a -400 nA/ppm
- Exactitud: ± 0.005 ppm* (condiciones ideales)

Condiciones operacionales:

- Rango de temperatura: -20 °C a 50 °C
- Humedad de operación: 15 a 90% HR sin condensación
- Rango de presión: 80 a 120 kPa
- Tiempo de vida esperado: >18 meses en aire.



Figura 3.18: Sensor de monóxido de carbono montado en su módulo AFE.

Fuente: (Libelium, 2016).

Sensor de gas dióxido de nitrógeno (NO₂) [calibrado]

Especificaciones:

Características de desempeño:

- Rango Nominal: 0 a 20 ppm
- Sobrecarga máxima: 250 ppm
- Desviación a largo plazo: < 2% señal/mes
- Tiempo de respuesta: ≤ 30 segundos
- Sensibilidad: 600 ± 150 nA/ppm
- Exactitud: ± 0.1 ppm* (condiciones ideales)

Condiciones operacionales:

- Rango de temperatura: -20 °C a 50 °C
- Humedad de operación: 15 a 90% HR sin condensación
- Rango de presión: 90 a 110 kPa
- Tiempo de vida esperado: 2 años en aire.



Figura 3.19: Sensor de dióxido de nitrógeno montado en su módulo AFE.

Fuente: (Libelium, 2016).

Sensor de gas dióxido de azufre (SO₂) [calibrado]

Especificaciones:

Características de desempeño:

- Rango nominal: 0 a 20 ppm
- Sobrecarga máxima: 150 ppm
- Desviación a largo plazo: < 2% señal/mes
- Tiempo de respuesta: ≤ 45 segundos
- Sensibilidad: 500 ± 150 nA/ppm
- Exactitud: ±0.1 ppm* (en condiciones ideales)

Condiciones operacionales:

- Rango de Temperatura: -20 °C a 50 °C
- Humedad de operación: 15 a 90%RH sin condensación
- Rango de presión: 90 a 110 kPa
- Tiempo de vida esperado: 2 años en aire



Figura 3.20: Sensor de monóxido de azufre montado en su módulo AFE.

Fuente: (Libelium, 2016).

3.7.2. Nodo Smart Cities

Descripción general

De acuerdo a los fabricantes, la aplicación general de este equipo son los mapas de ruido (monitoreo en tiempo real de niveles acústicos en las calles de una ciudad), calidad de aire, etc. (Libelium, 2016). Este es el único modelo que puede tener un sensor de ruido.



Figura 3.21: Nodo Smart Cities Wasmote Plug & Sense.

Fuente: (Libelium, 2016).

Sensor de temperatura

- Modelo de componente: MCP9700A
- Rango de medida: $-40^{\circ}\text{C}, +125^{\circ}\text{C}$
- Sensibilidad: $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$
- Exactitud: $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (rango $0^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$), $\pm 4^{\circ}\text{C}$ (rango $-40 \sim +125^{\circ}\text{C}$)
- Tiempo de respuesta: 1.65 segundos (63% respuesta desde $+30$ hasta $+125^{\circ}\text{C}$).



Figura 3.22: Sonda del sensor de temperatura (MCP9700A).

Fuente: (Libelium, 2016).

El MCP9700A es un sensor que convierte los valores de temperatura a un voltaje analógico proporcional, el rango de voltaje va desde los 100mV (-40°) a los 1.75V (125°), con una variación de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ con una salida de 500mV a los 0°C .

Sensor de humedad

- Modelo de sensor: 808H5V5
- Rango de medida: 0 ~ 100% HR
- Exactitud: $<\pm 4\%$ HR (a 25°C, rango en el rango de 30 ~ 80%), $<\pm 6\%$ HR (rango de 0 ~ 100%)
- Temperatura de operación: -40 ~ +85°C
- Tiempo de respuesta: <15 segundos



Figura 3.23: Sonda del sensor de humedad (808H5V5).

Fuente: (Libelium, 2016).

Este sensor analógico genera un voltaje en proporción a la humedad relativa en la atmósfera.

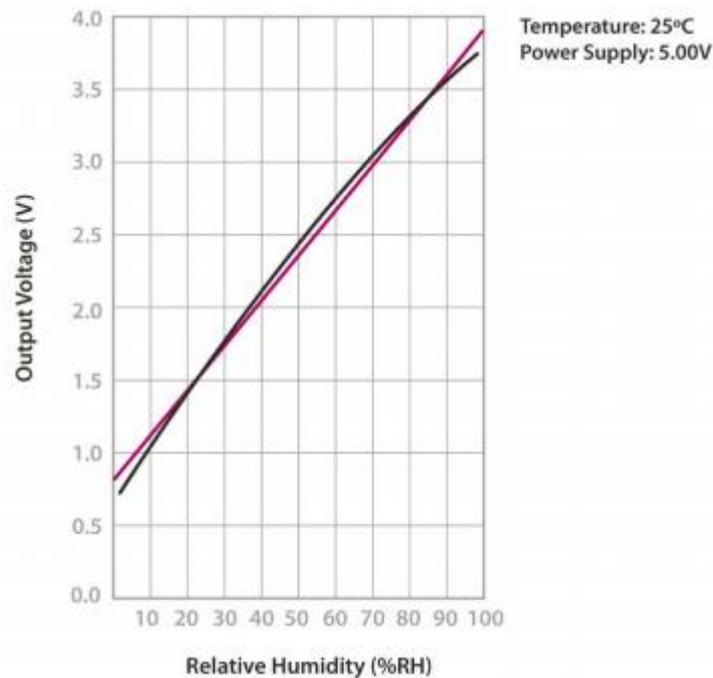


Figura 3.24: Salida del sensor de humedad 808H5V5.

Fuente: (Libelium, 2016).

Sensor de luminosidad

- Resistencia en oscuridad: $20M\Omega$
- Resistencia en luz (10lux): $5 \sim 20k\Omega$
- Rango espectral: $400 \sim 700nm$
- Temperatura de operación: $-30^{\circ}C \sim +75^{\circ}C$



Figura 3.25: Sonda del sensor de luminosidad (LDR).

Fuente: (Libelium, 2016).

Sensor de ruido

Este es un sensor de ruido que mide el ruido en la ponderación o escala "A", siendo posible medir ruido comunitario, sin embargo, posee limitaciones que lo distinguen de los sonómetros certificados, principalmente en el rango de medición como se indica a continuación:

- Modelo de sensor de ruido: POM-2735P-R
- Sensibilidad: $-35\pm 4dB$
- Impedancia: $<2.2k\Omega$
- Dirección: Omnidireccional
- Frecuencia: $20Hz \sim 20kHz$
- Reducción de la sensibilidad: $-3dB$ a $1.5V$
- Nivel de presión sonora máxima: $114.5\pm 10dB_{SPL}$ aproximadamente
- Relación S/N: $60dB$
- Nivel de ruido: $26 \pm 1 dBA$
- Rango de medición de etapa: $50dBA \sim 100dBA$

En la Tabla 3.3 se indican los niveles de ruido comunes para diferentes escenarios, y, según las especificaciones antes mencionadas, el sensor de ruido de Libelium no

podrá registrar niveles por debajo de los 50 dB. En la Figura 3.26 se muestra la respuesta en frecuencia del sensor de ruido.

Tabla 3.3: Referencia de ruido en dbA producido por diferentes fuentes.

Sonido	dBa
Umbral auditivo	0
Habitación en silencio	30
Conversación normal	60 ~ 70
Tráfico pesado (pérdida de escucha bajo exposición continua)	90
Umbral del dolor	130
Motor de Jet (daño permanente)	140

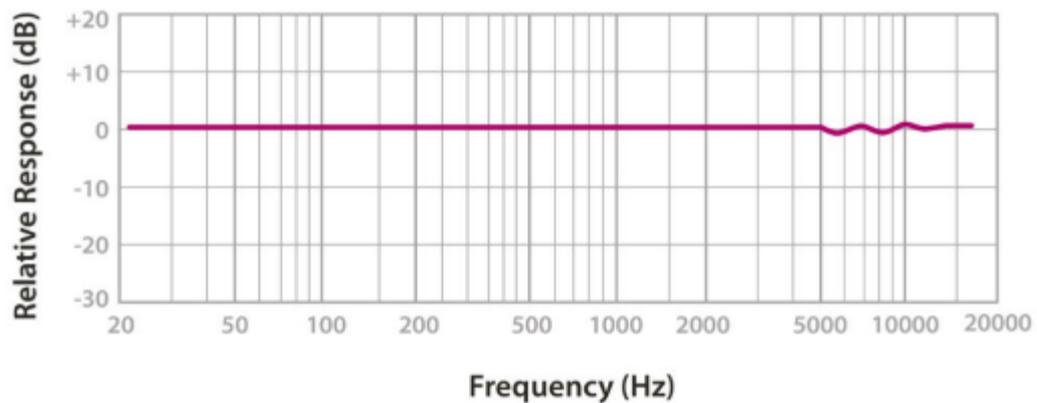


Figura 3.26: Gráfica de la respuesta en frecuencia del sensor POM-2735P-R.

Fuente: (Libelium, 2016).

La Tabla 3.4 resume las unidades en que los sensores registran cada parámetro comparados con la norma ecuatoriana, siendo necesario el algunos parámetros, transformación de unidades. Es importante destacar que el cálculo es diferente para los gases contaminantes, pues varía según la masa molecular de cada uno.

Tabla 3.4: Unidades de medición de los sensores y el indicado en la norma TULSMA.

Parámetro	Sensor	Norma	Transformación a unidades norma
Temperatura	°C	°C	-
Humedad	%HR	%HR	-

Luminosidad	% Luz		-
Presión	Pa	mmHg	1 Pa = 0.0075 mmHg
Ruido	dBA	dB (FFR) dBA (FMR)	-
CO	ppm	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 ppm = 1230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
O ₃	ppm	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 ppm = 2110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO ₂	ppm	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 ppm = 2030 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
SO ₂	ppm	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 ppm = 2280 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

3.8.Panel solar externo

Este panel se conecta al zócalo correspondiente. Como se muestra en la Figura 3.27, tiene una forma idéntica a los conectores del sensor pero se coloca en el lado de control de la carcasa (ver Figura 3.10), debajo del botón ON/OFF.

Características del panel solar externo:

- Potencia máxima: 3W
- Tensión de alimentación máxima: 5,8 V
- Corriente de alimentación máxima: 520 mA
- Dimensiones: 234 x 160 x 17 mm
- Peso: 0.54 Kg



Figura 3.27: Conexión el panel solar al nodo Waspote (Libelium, 2016).

Fuente: (Libelium, 2016).

3.9. Gateway central Meshlium

Meshlium, de Libelium, es un *gateway* o enrutador Linux que funciona como puerta de enlace para las redes de nodos de esta marca. Puede contener 6 interfaces de radio diferentes: WiFi 2.4GHz, WiFi 5GHz, 3G/GPRS, Bluetooth, XBee y LoRa. Además de esto, Meshlium también puede integrar un módulo GPS para aplicaciones móviles y vehiculares. Además, cuenta con una carcasa de aluminio IP65 que lo permite ser colocado en cualquier lugar al aire libre (Libelium, 2014). En la Figura 3.28 se observa este dispositivo y en la Tabla 3.5 se indican sus principales características técnicas.



Figura 3.28: Gateway Meshlium v3.8.

Fuente: (Libelium, 2014).

Tabla 3.5: Especificaciones técnicas de Meshlium v3.8.

Procesador	500MHz (x86)	
Memoria RAM	256MB (DDR)	
Memoria Disco	8GB	
Potencia	5W (18V)	
Fuente de alimentación	POE (Power Over Ethernet)	
Consumo normal de corriente	270mA	
Consumo alto de corriente	450mA	
Corriente máxima de suministro	1.5 A	
Carcasa/Revestimiento	Material	Aluminio
	Dimensiones	210x175x50mm
	Peso	1.2Kg
	Protección externa	IP65
Rango de temperatura	-20°C / 50°C	
Tiempo de respuesta a ping ethernet	60s	
Tiempo de espera de ejecución de todos los servicios	90s	
Tipos de alimentación para POE	AC-220V	
	Batería - panel solar (DC -12V)	
	Encendedor de auto (DC-12V)	
Sistema	Linux, Debian. Protocolo de comunicación mesh OLSR. Controladores MadWifi.	
Software de Gestión	Meshlium Manager System (open source)	
Seguridad	Autenticación WEP, WPA-PSK, HTTPS y acceso SSH.	

Fuente: (Libelium, 2014).

3.10. Comunicación y transmisión de datos

Debido a las conclusiones del capítulo anterior sobre los protocolos de comunicación y a causa de que se cuenta con dos nodos (RFD) y un *gateway* central (Coordinador PAN FFD), se ha optado una topología estrella con el protocolo XBee - PRO - 802.15.4, donde el *gateway* Meshlium presenta las siguientes características de radio:

- Modelo: XBee - PRO - 802.15.4.
- Frecuencia: 2.4 GHz.
- Potencia transmisión: 100mW.
- Sensibilidad recepción: -100dBm.
- Antena: Dipolo 5dBi.
- Distancia: 7 Km (en línea de vista).

Para la configuración de los parámetros de la red, estos deben ser los mismos en ambos lados de la comunicación. Los parámetros configurados en los nodos son:

- Dirección MAC de destino: es la dirección MAC a la que se envían las tramas de datos. En este caso es la dirección del *gateway* Meshlium, que es 0x 0013 A200 4102 2FBE
- PAN ID: 0x3332
- Canal: 0x0C
- Encriptación: habilitada (configurado a 1)
- Clave de encriptación: generada al azar y configurado tanto en los nodos como en el *gateway*. La clave es Bf0Se1jA45EwJW71

El esquema topológico de la comunicación entre los nodos y *gateway* o coordinador PAN, es el indicado en la Figura 3.29. En el que el nodo A representa al módulo Smart Environment (SEP_NODE) y el nodo B, el módulo Smart Cities (SC_NODE). Además, la imagen señala que los datos recibidos por los sensores (almacenados localmente en Meshlium también) son sincronizados en una base de datos externa. En este caso, en una base de datos del IERSE con dirección 172.16.1.169:3306 de la sub red interna de la Universidad del Azuay.

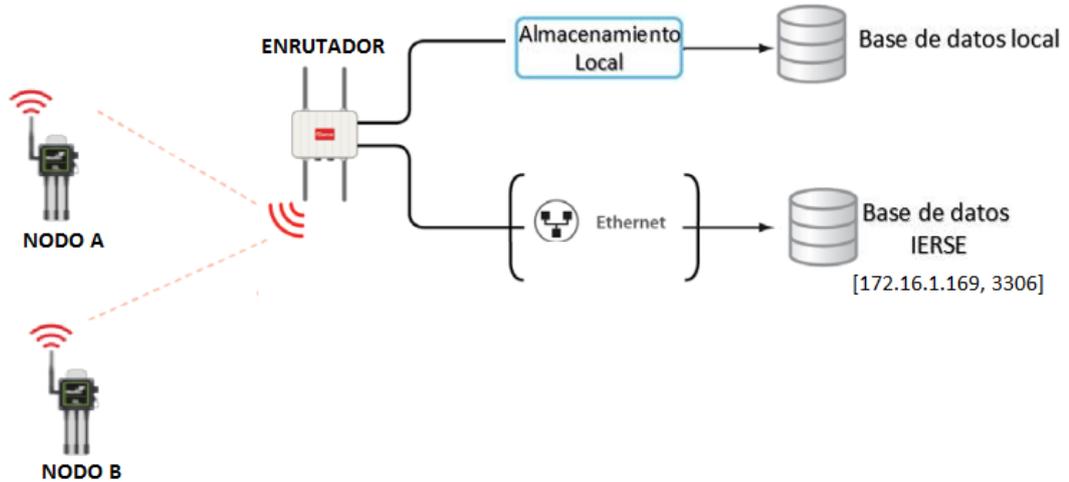


Figura 3.29: Esquema de comunicación, transmisión y almacenamiento de información.

3.11. Desarrollo y programación

3.11.1. Programación de los nodos

Para la programación de nodos en el muestreo de los sensores y transmisión de datos, se aplica el entorno de desarrollo integrado (*Integrated Development Environment*, IDE) propio de Libelium que puede ser instalado en Windows, Mac OS X y Linux. Este IDE se utiliza para escribir código y cargarlo en Waspnotes, también se lo usa para monitorear la salida serial y para depuración. El IDE contiene la interfaz de programación de aplicaciones de Waspnote (*Application program interface*, API). Esta API es el conjunto de todas las bibliotecas que Waspnote necesita para compilar programas. Finalmente, está basado en el IDE de Arduino, incluyendo el lenguaje de programación Processing (Libelium, 2014). La Figura 3.30 muestra la interfaz gráfica del IDE.

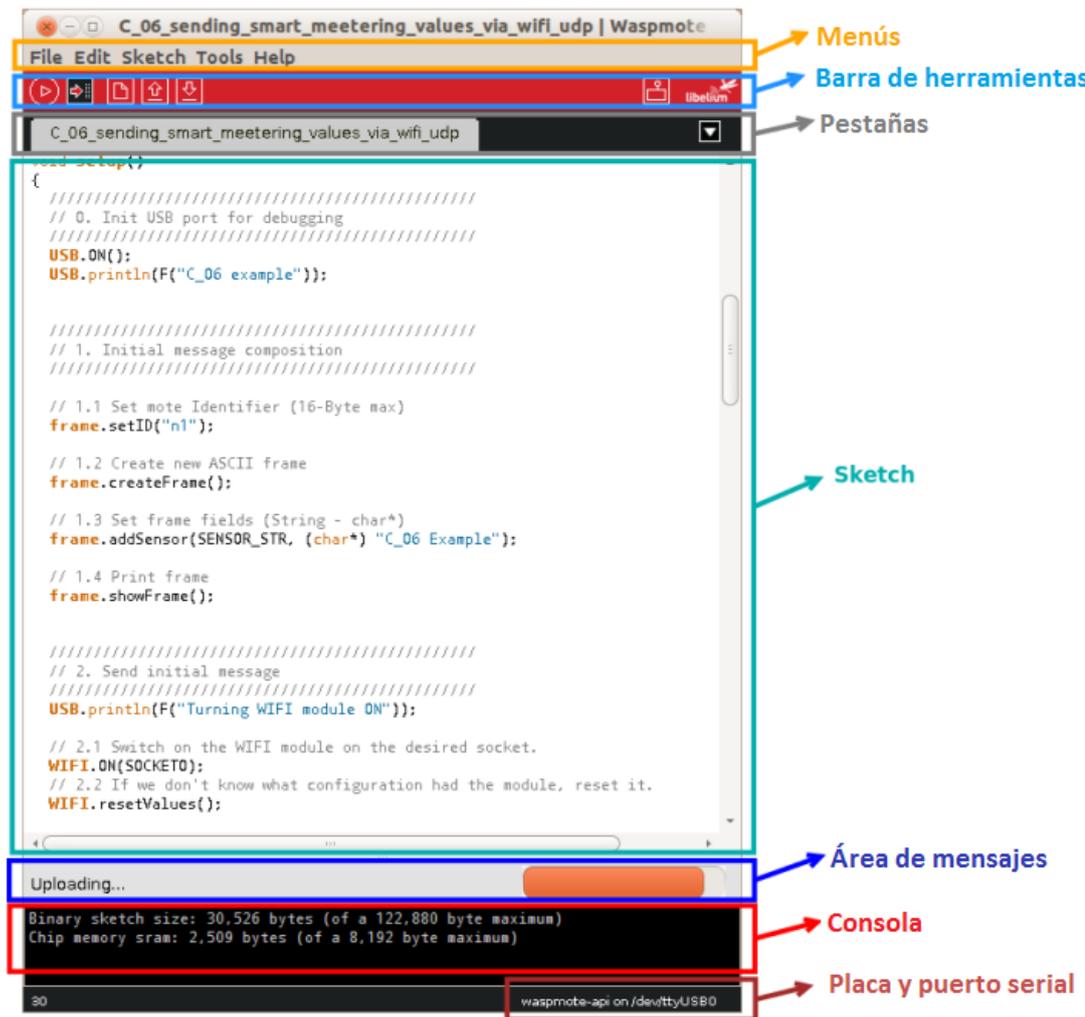


Figura 3.30: Secciones del IDE de Waspote.

3.11.1.1. Diagramas de flujo

El flujo general del sistema de recolección de datos por parte de los sensores, transmisión, almacenamiento y visualización de la información, se presenta en la Figura 3.31.

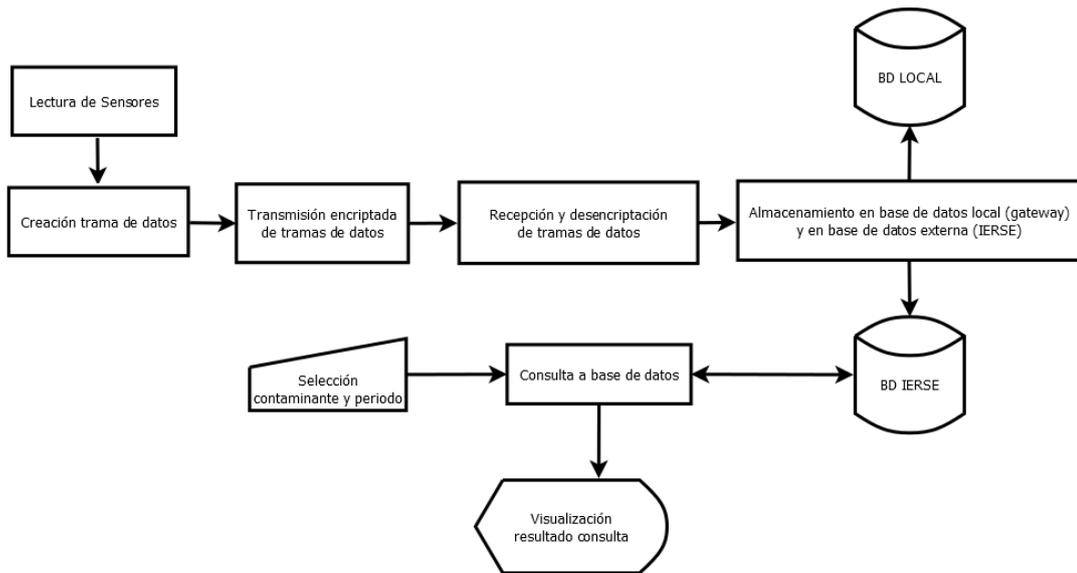


Figura 3.31: Diagrama de flujo general del sistema.

El primer nodo (SEP_NODE), contiene los sensores, como se había indicado anteriormente, de los gases O₃, CO, NO₂, SO₂ y los parámetros de temperatura, humedad y presión barométrica. El código implementado se lo representa en el flujo de la Figura 3.32.

La trama que este nodo envía contiene los siguientes datos: temperatura, humedad, luminosidad, ruido en dB y estado de la batería. Una cadena adicional que contiene el número de interrupciones acumuladas durante el tiempo de reposo se puede agregar a la trama en caso de detección de interrupciones. La trama se divide en campos por el caracter "#".

Ejemplo de trama: <=>#408489673# SC_NODE #21# TCA :23.87# HUMA :41.5# LUM :1.955# MCP :55# BAT :33#

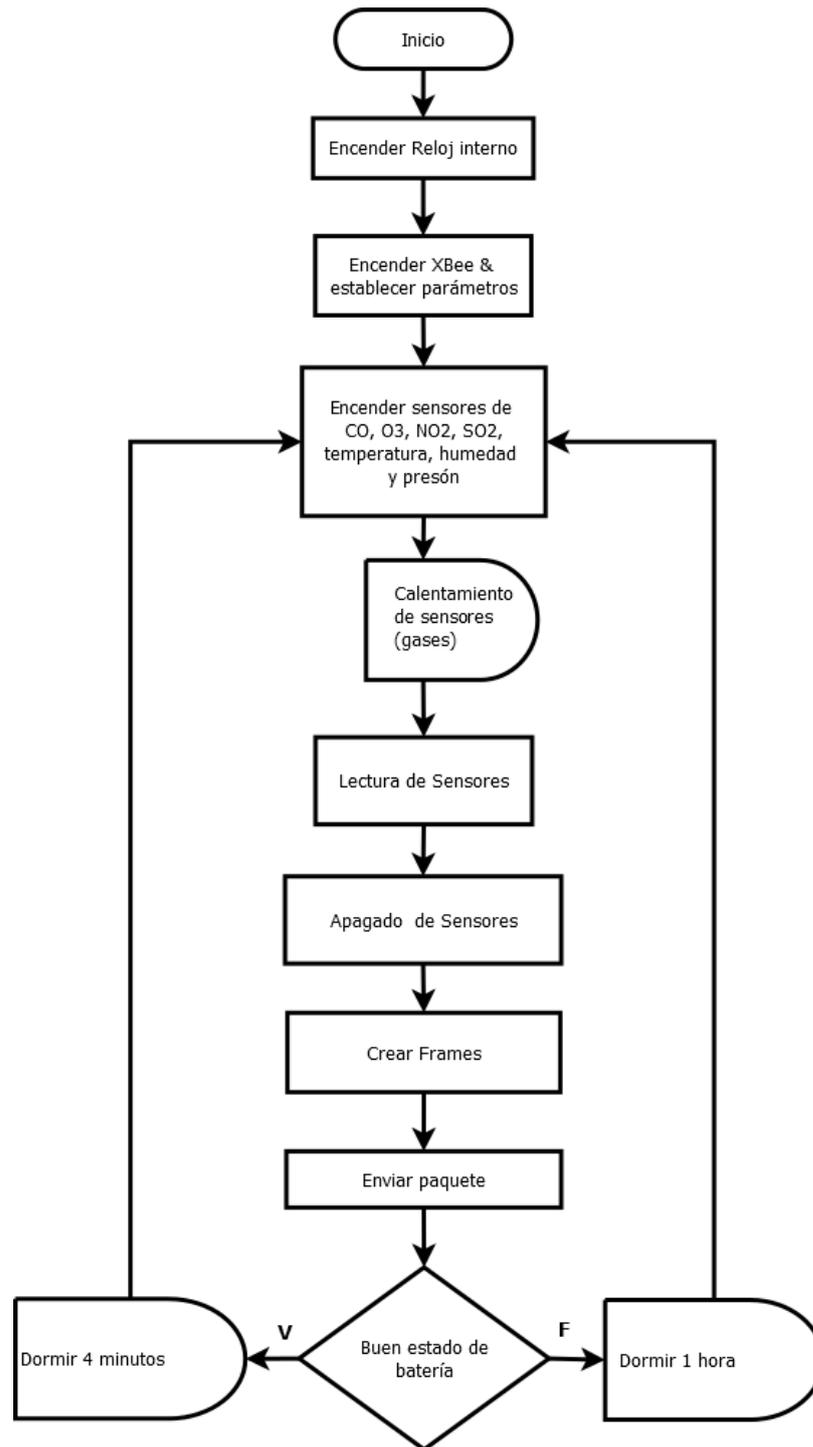


Figura 3.32: Diagrama de flujo para nodo Smart Environment.

El segundo nodo (SC_NODE), contiene los sensores de ruido, temperatura, humedad y luminosidad. El código implementado es similar al del primer nodo, como se observa en el flujo de la Figura 3.33. La principal diferencia está en que este nodo no necesita un tiempo de calentamiento, como es en el caso de los sensores de gases, y el periodo de dormir es más corto.

Como la longitud de las tramas está limitada a 128 Bytes, en este nodo se tiene que enviar los datos divididos en dos tramas; el primero contendrá los siguientes datos: nivel de batería, temperatura, humedad y presión atmosférica. Una cadena adicional que contiene el número de interrupciones acumuladas durante el tiempo de reposo se puede agregar a la trama en caso de detección de interrupciones. La segunda, contiene los datos de: CO, O3, NO2 y SO2. Cada trama se divide en campos por el carácter "#".

Ejemplo de la primera trama:

```
<=>#408423818#SEP_NODE#68# BAT :51# GP_TC :26.210# GP_HUM :52.15# GP_PRES:99314#
```

Ejemplo de la segunda trama:

```
<=>#4408423818# SEP_NODE #69# GP_CO :19.693# GP_O3 :10.948# GP_NO2 :0.223# GP_SO2  
:0.421#
```

Los paquetes enviados son entonces recibidos por el *gateway* Meshlium el cual los descompone y almacena el valor de cada sensor en una Tabla de una base de datos local, y se sincroniza a la vez con la base de datos del IERSE (MySQL).

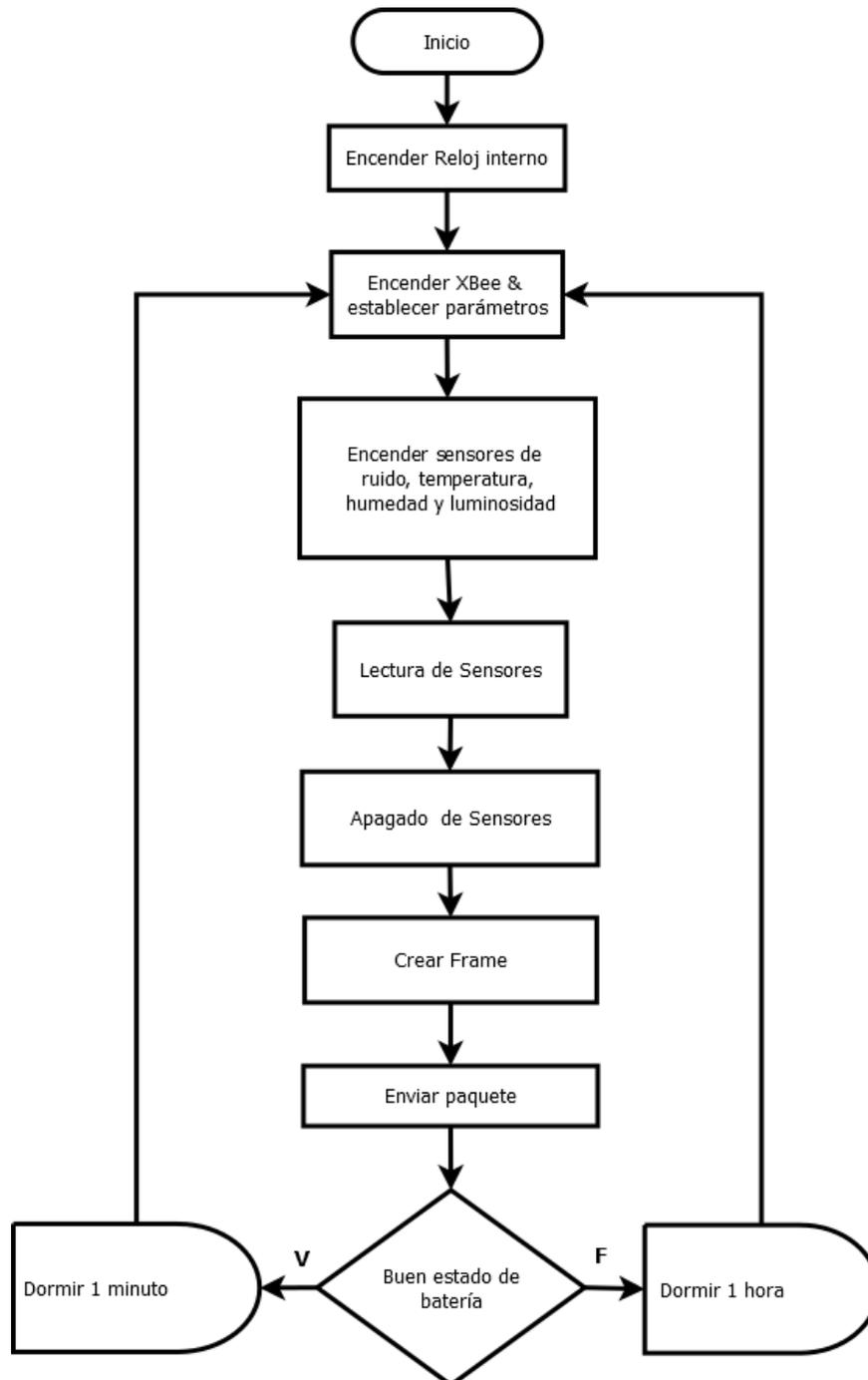


Figura 3.33: Diagrama de flujo para nodo Smart Cities.

3.11.2. Programación de la plataforma web

Para la visualización y consulta de datos, se realiza un interfaz en Java EE 6 en el entorno de desarrollo de Netbeans 7, el cual viene ya pre configurado con el servidor de aplicaciones GlassFish 3. El ambiente es web por lo que se ha empleado la librería

de Primefaces 5.3 para el diseño y visualizaciones de algunos componentes de la interfaz como las gráficas de los valores a consultar.

3.11.2.1. Diagrama de flujo

La funcionalidad de la plataforma desarrollada se ve resumida en la Figura 3.34. Donde los valores de los sensores ya almacenados en la base de datos, son accedidos y visualizados según el tipo de consulta realizada. Todas las operaciones requieren entrada por el usuario excepto el cálculo del ICA actual, el cual es presentado automáticamente.

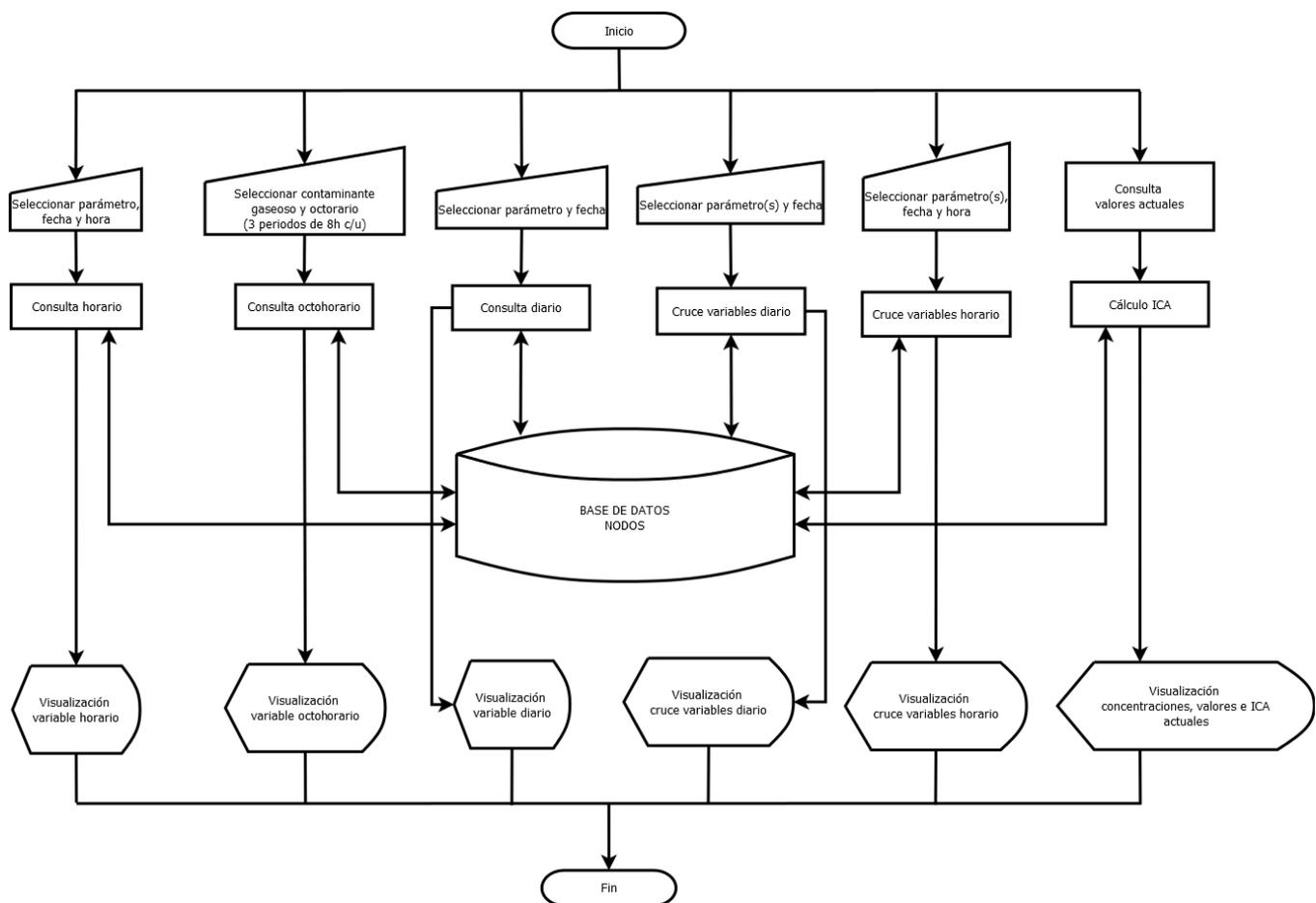


Figura 3.34: Diagrama de flujo de la plataforma web.

3.12. Ubicación nodos

Al ser este trabajo parte de un proyecto de experimentación, el equipo técnico IERSE establece que las primeras pruebas de recolección de datos de los sensores, se

las realicen en el campus de la Universidad del Azuay. Para así comprobar la sensibilidad de los mismos y determinar condiciones de transmisión y recepción de los datos.

Luego de un análisis de cobertura con los equipos en el campus universitario, se determinó los puntos en las que existe transmisión y recepción de los datos medidos por los sensores, indicados en la Figura 3.35 donde el punto amarillo es la ubicación del *gateway* (meshlium) en el edificio del vicerrectorado de investigaciones.

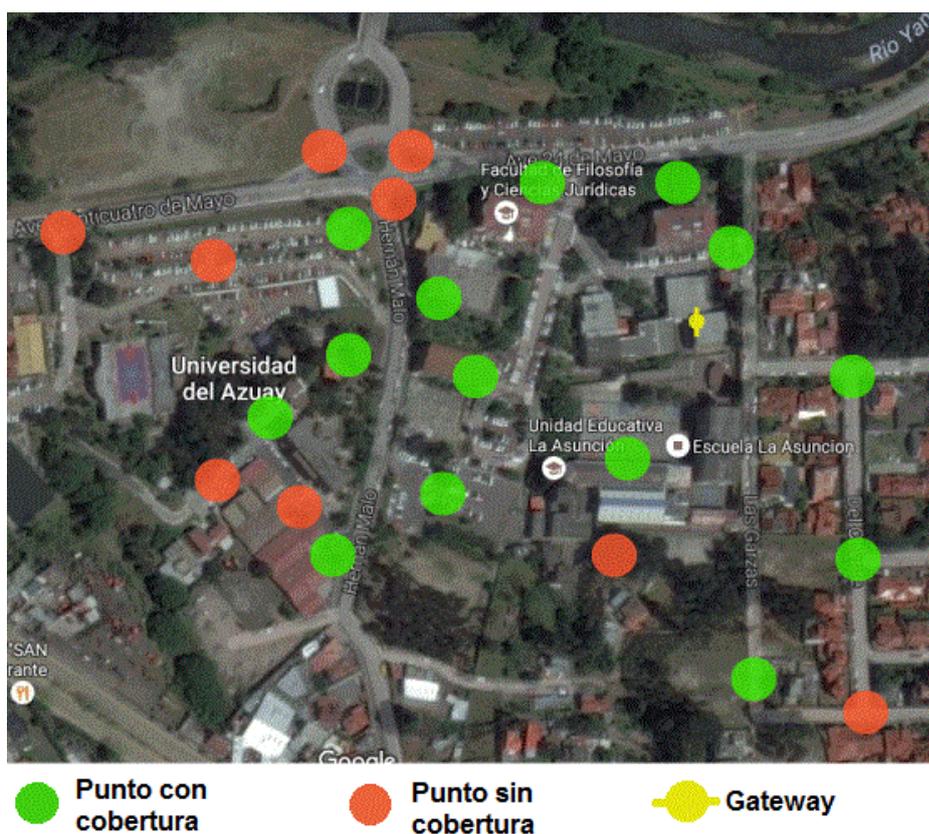


Figura 3.35: Mapa de puntos cobertura en el campus universitario.

3.12.1. Montaje de los equipos

La ubicación que se seleccionó para el gateway, fue en la azotea del edificio del Vicerrectorado de Investigaciones. Debido a que es un punto al alcance del monitoreo y seguimiento del IERSE, y por la facilidad de conexión a la subred de la Universidad. Su colocación se la realizó construyendo un cobertizo pequeño para dotar de mayor protección al equipo, como se observa en la Figura 3.36.



Figura 3.36: Montaje de *gateway* meshlium.

Sobre la base del mapa de cobertura, se resolvió que ambos nodos con los sensores sean ubicados en el mismo punto, y fueron colocados en el poste cercano a la puerta principal de la Universidad luego de hacer las respectivas conexiones eléctricas, como se enseña en la Figura 3.38.



Figura 3.37: Montaje de los nodos con sensores.



Figura 3.38: Adecuación de nodos en poste (puerta principal Universidad del Azuay).

3.13. Conclusiones del capítulo

De acuerdo a las agencias ambientales consultadas en la literatura, los sensores de calidad de aire portables y de bajo costo están todavía en una etapa temprana de desarrollo, ya que muchos no han sido evaluados para determinar la exactitud de sus mediciones, y pocos de ellos están calibrados. Es por ello que las actividades de monitoreo reguladas por normas nacionales o internacionales, ya sea de contaminantes atmosféricos o de medición de ruido, requieren en la mayoría de los casos, equipos costosos o estaciones sofisticadas para la recolección y análisis de información, mientras que con sensores de bajo costo, al no estar aceptados en su mayoría para fines regulatorios, se aplican en proyectos de concientización o caracterización referencial de los niveles medidos de ruido o calidad del aire, para lo cual este trabajo está orientado.

En este capítulo se presentaron los equipos y sensores a utilizarse; escogidos debido a la literatura y datos técnicos consultados, estando los sensores de contaminantes atmosféricos ya calibrados. Sin embargo, el sensor de ruido no posee certificación, por lo que en el próximo capítulo se realizarán pruebas para determinar la validación de las mediciones de los sensores.

4. CAPÍTULO IV: IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS

"Las pruebas conducen al fracaso, y el fracaso conduce al entendimiento."

Burt Rutan

4.1. Introducción

En el capítulo de Implementación y Pruebas se muestra el comportamiento de los sensores con un registro de la calidad de recepción de datos y transmisión de información nodo – servidor, durabilidad de batería y comportamiento de la carga con efecto de paneles solares, además, se presenta una comparativa entre la información generada por los nodos sensores y equipos certificado.

Las pruebas llevadas a cabo con los sensores se encuentran divididas en base al parámetro a medir, tal como: ruido, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y gases contaminantes: CO, O3, NO2 y SO2.

4.2. Pruebas de recepción de datos

La fiabilidad de la recepción de datos se encuentra directamente relacionada con la cobertura de señal que exista entre los nodos y el *gateway*, tal como se puede apreciar en la Figura 3.27 que presenta el mapa de cobertura de los equipos dentro del campus de la Universidad del Azuay.

Una vez que los equipos se encuentren dentro del rango de cobertura, se envían tramas de información cada cierto tiempo y se monitorea su estado. La Figura 4.1, que se presenta a continuación, muestra el estado de la recepción de información, marcando 1 si existió comunicación y 0 si no existe recepción de datos en el lapso establecido. En esta prueba, llevada a cabo durante un periodo de 24 horas, se incluye intencionalmente un corte en el suministro de energía de los equipos con la intención de visualizar un comportamiento anómalo en la recepción.

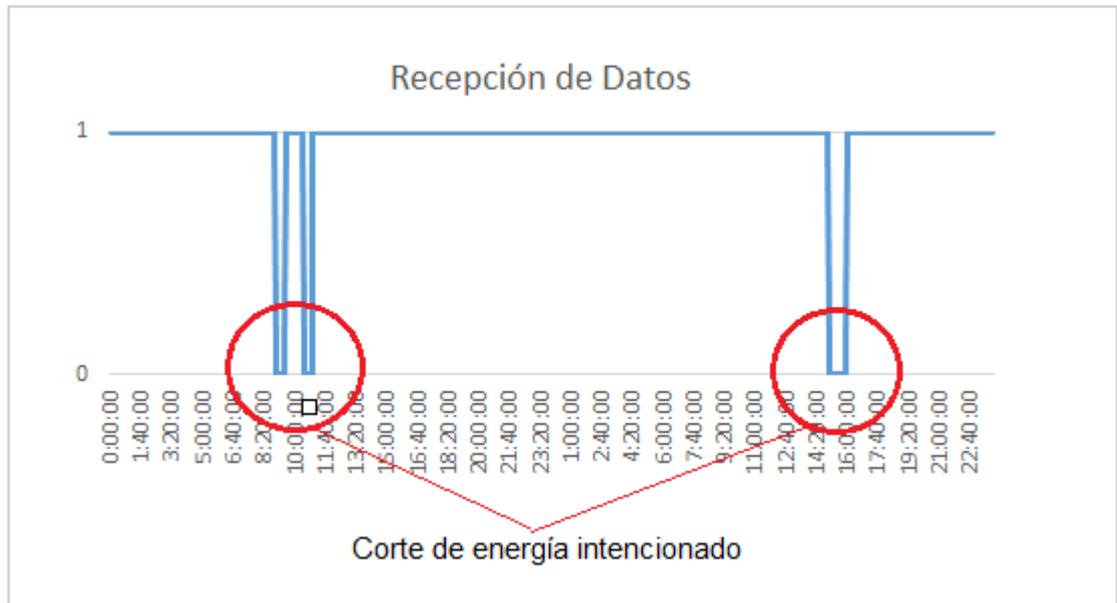


Figura 4.1: Estado de la recepción de datos.

4.3. Consumo de batería y fuentes de suministro de carga

El comportamiento del consumo de batería depende directamente de la frecuencia con la que se ejecuta la transmisión de datos, ya que como se mencionó en el Capítulo II, la unidad de transceptor representa más de la mitad del consumo energético total del nodo.

Las pruebas generadas se llevan a cabo durante 306 horas de las cuales las primeras 140 muestran el comportamiento del consumo de energía de los nodos sin una fuente de carga conectada, Figura 4.4 y 4.5. El siguiente segmento muestra el comportamiento del nivel de batería al conectar un panel solar, de características descritas en el Capítulo III, como se muestra en la Figura 4.2 y 4.3.



Figura 4.2: Implementación de paneles solares, vista inferior.



Figura 4.3: Implementación de paneles solares, vista superior.

En el primer caso, sin una fuente de carga conectada, el nivel de batería tiene un comportamiento como el que se presenta en la Figura 4.4, teniendo presente que la frecuencia de transmisión de información es cada minuto en el caso del nodo SC_NODE y de cada 2 minutos en el caso del nodo SEP_NODE.

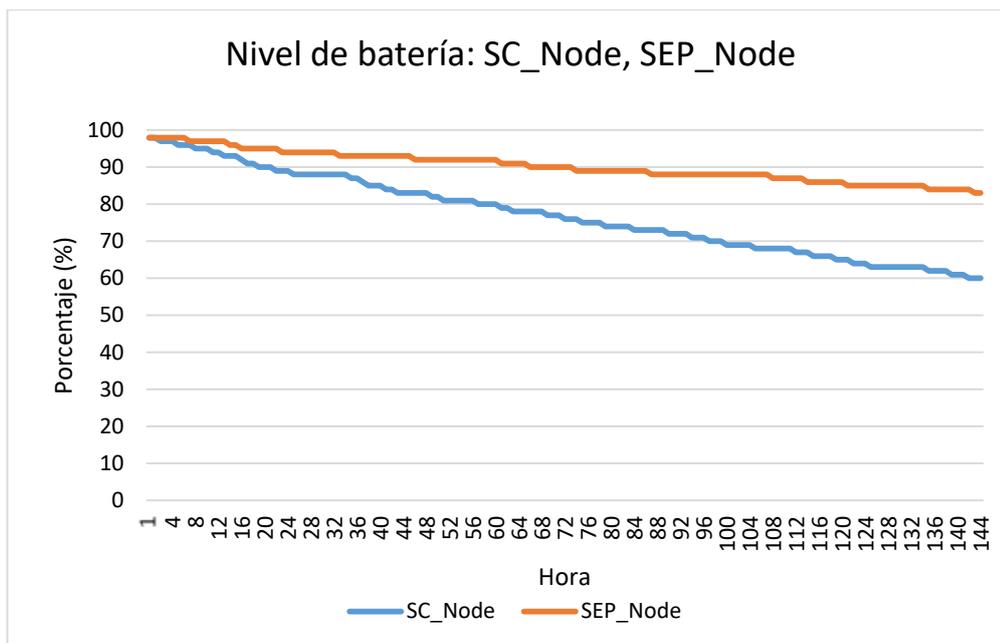


Figura 4.4: Comportamiento de nivel de batería sin fuente de carga conectada, nodo SC_NODE y SEP_NODE.

Durante el periodo designando de 144 horas el nivel de batería del nodo SC_NODE disminuye progresivamente hasta un 60%, mientras que en el mismo periodo para el SEP_NODE, el nivel de batería llega un 83% de la carga total.

Al conectar los paneles a los nodos, la batería de los mismos es recargada en horarios con presencia de radiación solar, la Figura 4.5 muestra la relación entre la presencia de luminosidad y la carga de batería de los equipos. De la información obtenida se puede mencionar que el consumo de energía durante el periodo de reposo de los paneles solares es en promedio del 5% en el caso del SC_NODE y del 2% en el nodo SEP_NODE. Durante la acción de los paneles solares la recarga promedio para el SC_NODE es del 12% por día y del 10% para el nodo SEP_NODE.

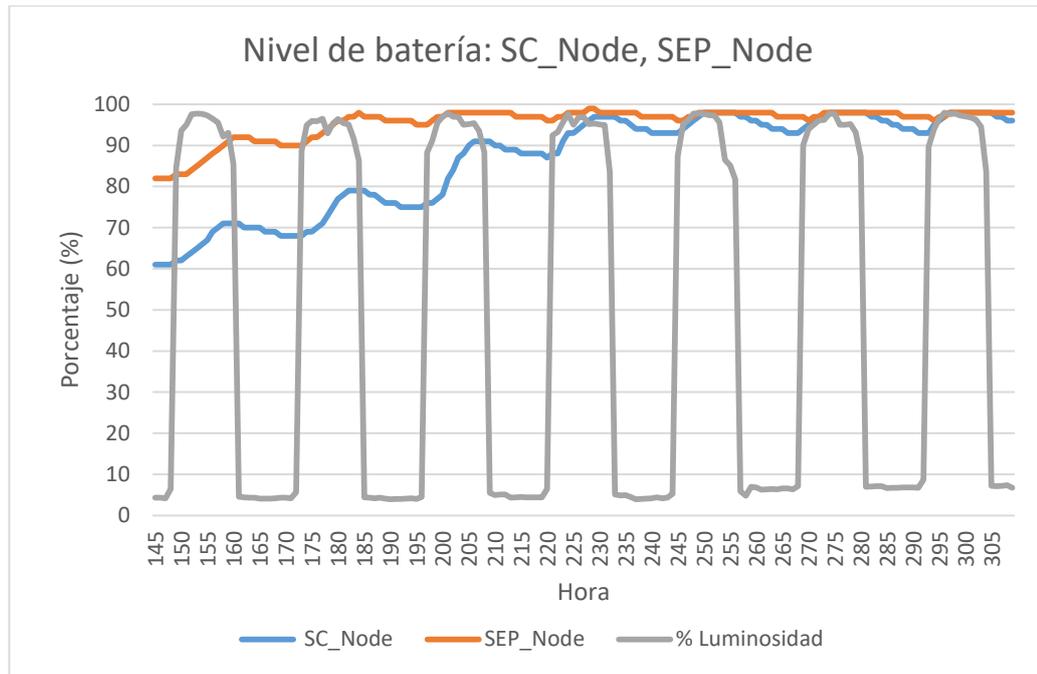


Figura 4.6: Comportamiento de nivel de batería del nodo SC_NODE (Azul), SEP_NODE (Naranja) conectado a una fuente de carga; porcentaje de luminosidad presente (Gris).

4.4. Comparación de valores de temperatura

4.4.1. Comparación de temperatura entre sensores

En cuanto a la temperatura, considerando que cada nodo tiene un sensor de temperatura de un modelo específico, como se describió en el Capítulo III, la primera prueba, ejecutada durante 96 horas, 4 días continuos, pretende dar a conocer si los valores entregados por los sensores de temperatura son similares entre ellos. En esta prueba no se considera un equipo certificado para comparar datos, más bien busca una correlación entre ambos sensores.

En las figuras presentadas se muestran los valores de temperatura adquiridos, en color azul el primer sensor de temperatura ("TCA") y de color naranja, el segundo sensor ("GP_TC"). Estos valores muestran variación entre ellos, especialmente entre las horas de mayor incidencia de sol, presentando un comportamiento anómalo con valores máximos del rango de los 37° C., como se observa en la Figura 4.6.

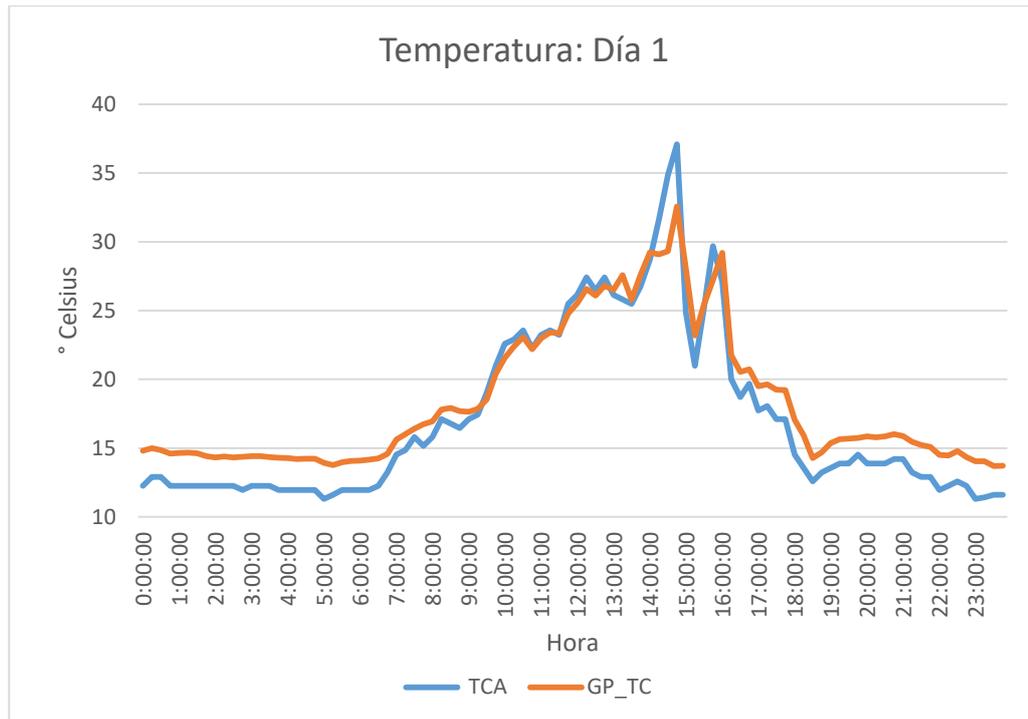


Figura 4.6: Comportamiento de sensores de temperatura en el día 1.

De esta manera, analizando el comportamiento durante 4 días, se puede observar que la variación de comportamiento de los sensores ocurre durante un mismo horario.

Para obtener un ajuste aproximado entre los dos sensores se procede a obtener, mediante la ecuación 4.1, la desviación absoluta media (MAD) de los valores de GP_TC con respecto a TCA y utilizando este valor de ajuste se genera una nueva curva denominada GP_TC Corregida, ilustrada en la Figura 4.7, sin embargo esta tampoco se ajusta en su totalidad.

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - B_t|}{n} \quad (4.1)$$

Donde A_t es el valor real, B_t es el valor de ajuste, y n es el número de muestreos.

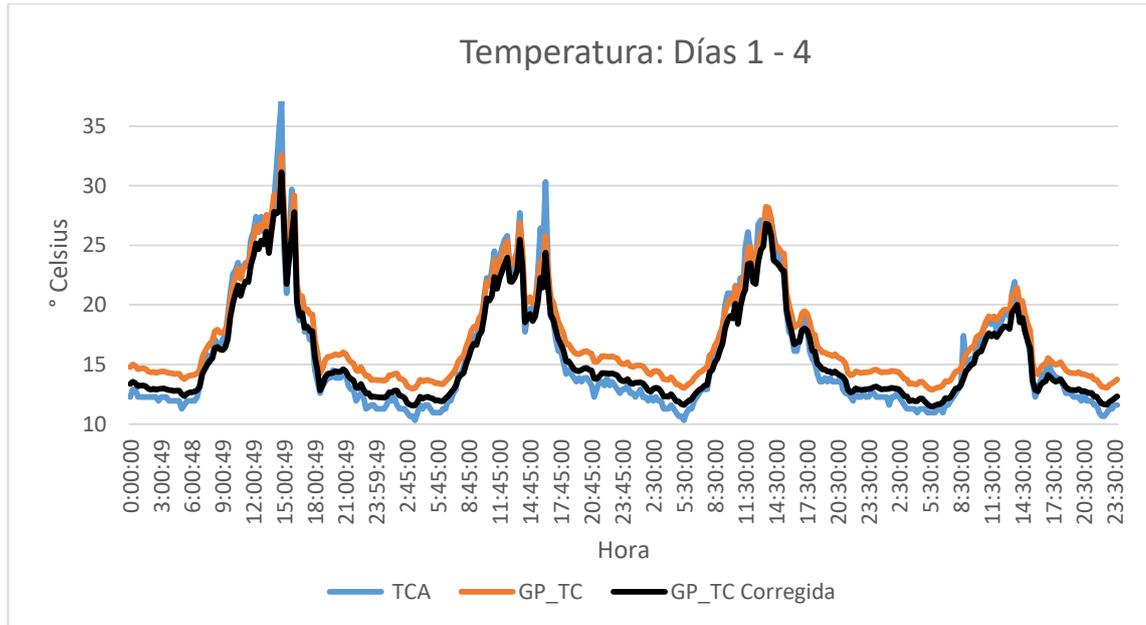


Figura 4.7: Comportamiento de los sensores de temperatura desde día 1 al día 4.

De los valores comparados, la mayor diferencia de temperatura se encuentra en el día 1 con un valor de 5.53° a las 14h45. Al obtener el error porcentual absoluto medio (MAPE) de los valores con la ecuación 4.2, donde A_t es el valor real y B_t el valor de ajuste, GP_TC y TCA respectivamente en este caso; y n , el número de observaciones, el error porcentual promedio es del 17%.

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|A_t - B_t|}{|A_t|}}{n} \quad (4.2)$$

Luego de realizar las correcciones y generar la curva de ajuste, la diferencia máxima de temperatura sube a 7.21° a las 14h30, sin embargo el error porcentual promedio disminuye a un 8%.

4.4.2. Comparaciones de temperatura entre sensores con cobertura aislante

Dadas las variaciones generadas, se implementa una cobertura de poliestireno expandido en los nodos, como se muestra en la Figura 4.8 y 4.9, para evitar la irradiación solar directa hacia los sensores y comprobar si éste aspecto es un factor influyente en las mediciones.



Figura 4.8: Equipos con cobertura de poliestireno expandido, vista frontal.



Figura 4.9: Equipos con cobertura de poliestireno expandido, vista inferior.

Similar al procedimiento empleado anteriormente, se disponen los equipos en el medio y se analiza el comportamiento de los sensores durante 96 horas siguientes, desde el día 5 al día 8.

Análogamente, analizando los valores registrados, se puede observar ahora una mayor similitud en el comportamiento entre sensores, como se aprecia en la Figura 4.10.

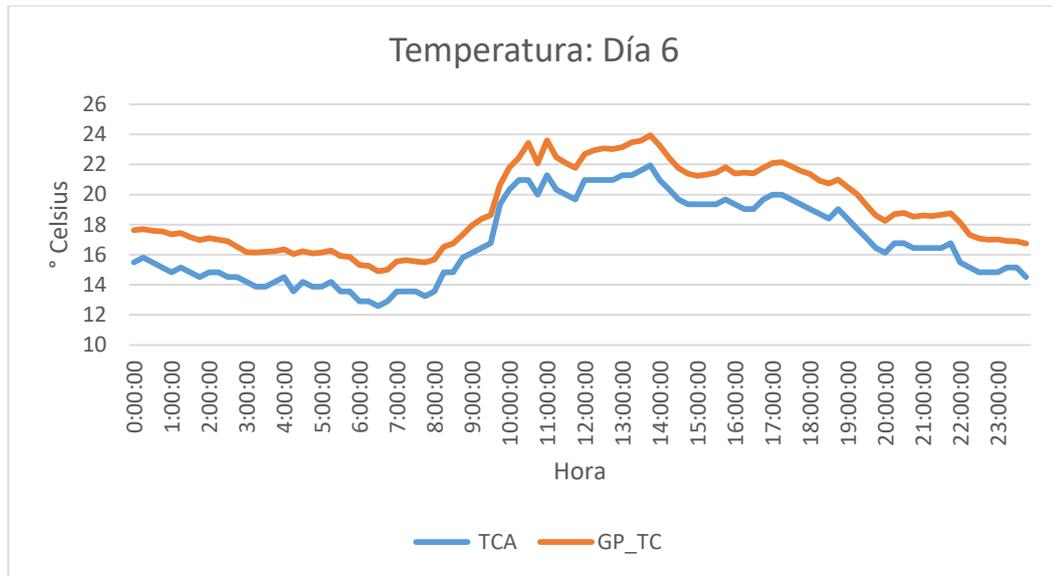


Figura 4.10: Comportamiento de los sensores de temperatura, con cobertura, del día 6.

Al obtener la desviación absoluta media, 2.00° , se puede generar la curva "GP_TC Corregida", la cual muestra que el comportamiento de los sensores se ajusta en una proporción mayor.

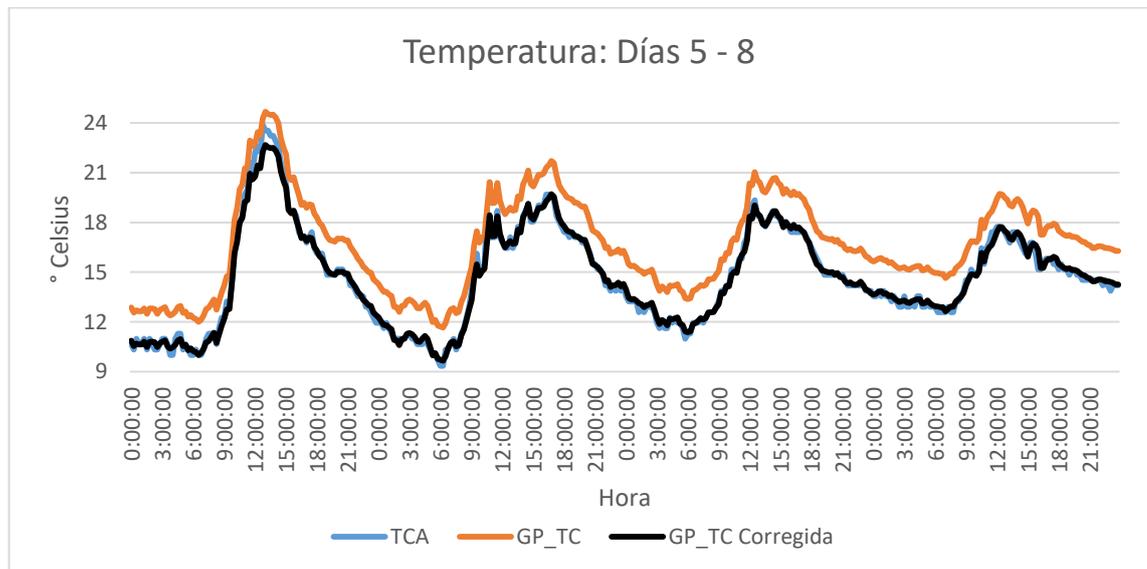


Figura 4.11: Comportamiento de los sensores de temperatura, con cobertura, desde día 5 al día 8.

De esta manera, al analizar la estadística se puede apreciar que el error máximo de temperatura entre sensores es de 3.34° , y el error promedio porcentual (MAPE) es del 12%.

Al generar la curva de ajuste con la diferencia promedio obtenida, el valor máximo de error es de 1.87° y el error promedio porcentual disminuye a un 1%, como se ilustra en la Figura 4.11.

4.4.3. Comparación de valores de temperatura con estación meteorológica AWOS

Tras obtener un comportamiento similar entre los sensores de temperatura de los nodos, se puede comparar la información obtenida con una fuente certificada. En este caso la comparación de datos se la realiza con los datos entregados por el Sistema de Observación Meteorológica Automatizado, AWOS por sus siglas en inglés, de la Dirección General de Aviación Civil situada en el Aeropuerto Mariscal Lamar en la Ciudad de Cuenca.



Figura 4.12: Estación AWOS ubicada en el Aeropuerto Mariscal Lamar.



Figura 4.13: Disposición de los nodos sensores junto a la estación AWOS.

Para la comparación de datos, los nodos sensores se ubican próximos a la estación existente y se los monitorea por 4 días en los que los resultados, se muestran a continuación:

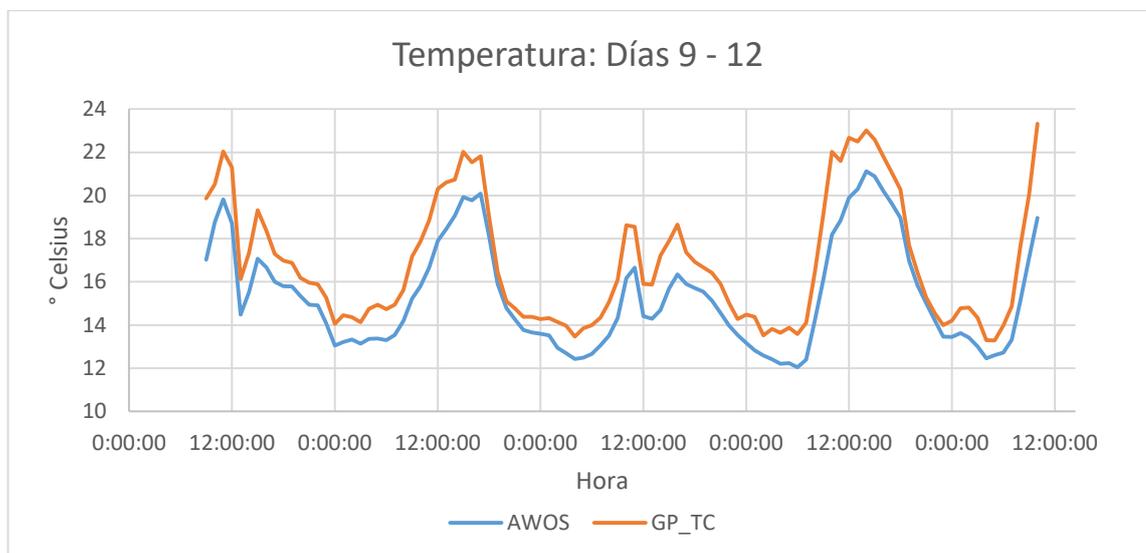


Figura 4.14: Comparación de resultados de temperatura.

Como se aprecia en la Figura 4.14 los valores obtenidos por el sensor GP_TC siguen la tendencia del comportamiento de la estación AWOS con un desfase notable y un error porcentual absoluto medio de 17%, por lo que al generar una nueva curva corregida, aplicando la desviación absoluta media obtenida de -1.53°C , el error

porcentual resulta del 8% y se puede visualizar un comportamiento más ajustado al real, Figura 4.15.

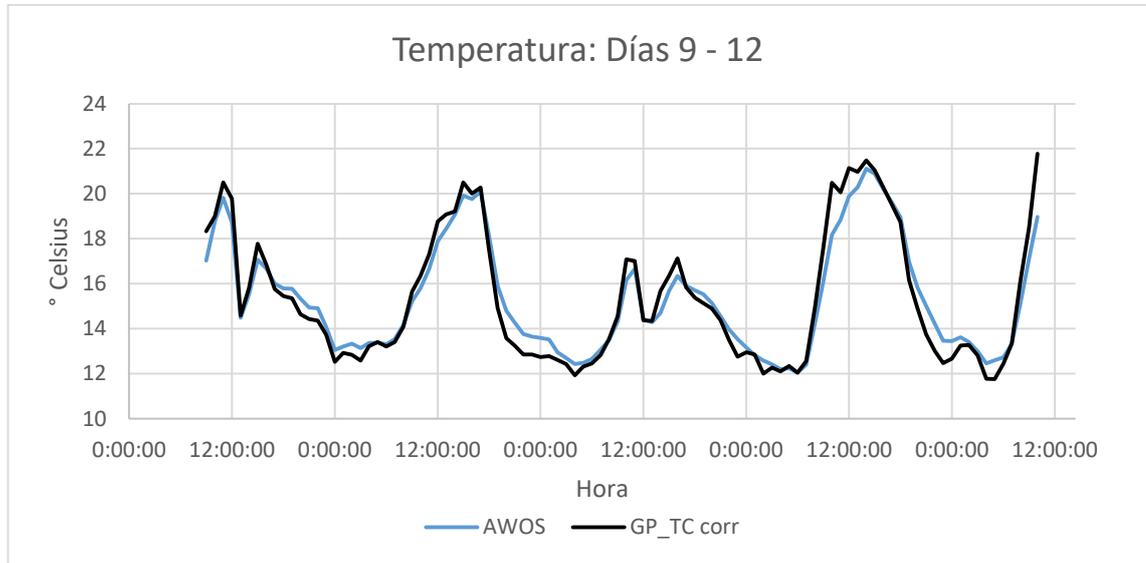


Figura 4.15: Curva GP_TC corregida en contraste con mediciones de estación AWOS.

4.5. Comparación de valores de humedad

4.5.1. Comparación de humedad entre sensores

Similar a las mediciones de temperatura, para el parámetro de humedad existen sensores distintos, de un modelo diferente en cada nodo, denominados para el éste análisis como "HUMA" y "GP_HUM" respectivamente, por lo que la primera fase de experimentación compara los valores registrados por ambos sensores.

Durante un periodo de 4 días, al exponer los sensores al ambiente, se aprecia un desfase considerable entre las mediciones de ambos sensores, con un comportamiento que presenta humedad alta en horas de la noche y madrugada, y disminuye a medida que avanza el día como se aprecia en la Figura 4.16.

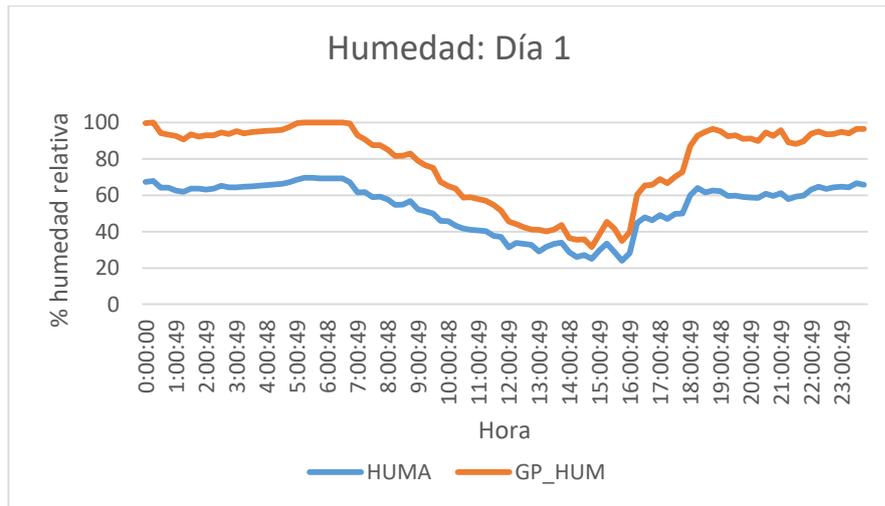


Figura 4.16: Comparación entre sensores de humedad.

Se ilustra en la Figura 4.17 la curva de ajuste, denominada "HUMA Corregida", que adiciona el valor de ajuste de la desviación absoluta media obtenida del porcentaje de humedad relativa, 25.5, a la curva HUMA. De esta manera el error porcentual promedio pasa de un 31% a un 8% con valores máximos de error de 39.1 a 20.17 respectivamente. Sin embargo, esta desviación no es constante por lo que la curva corregida no se ajusta en su totalidad.

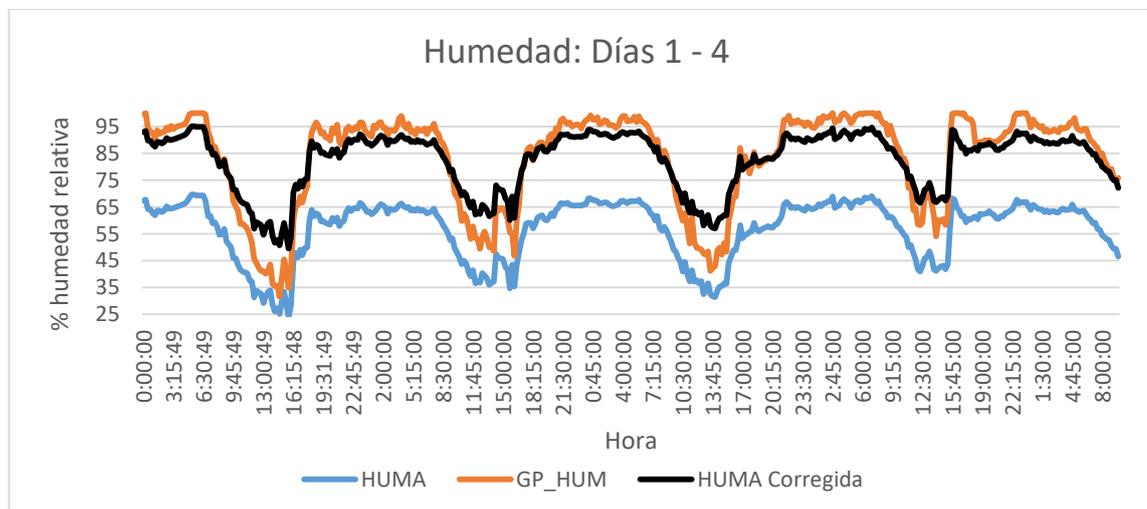


Figura 4.17: Comportamiento de los sensores de humedad, días 1-4.

4.5.2. Comparación de valores de humedad con cobertura de equipos

En este caso, el muestreo es realizado durante 4 días con la implementación de una cobertura de poliestireno expandido, se muestra en la Figura 4.18.

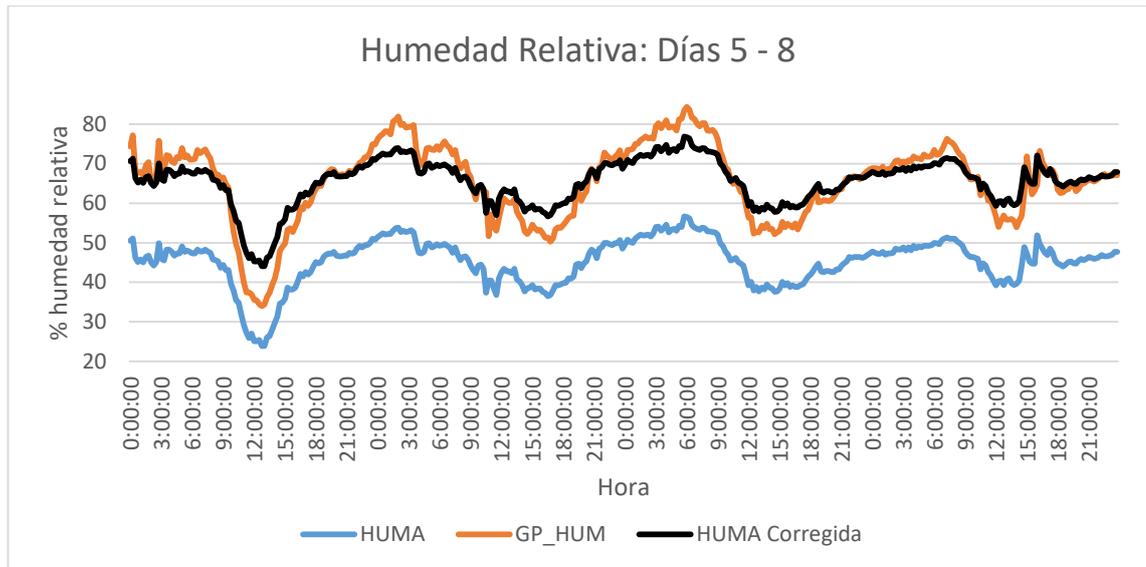


Figura 4.18: Comportamiento de los sensores de humedad, con cobertura, desde día 5 al día 8.

El error porcentual absoluto medio entre los sensores es del 31%, similar al error obtenido previamente cuando no considera una cobertura. También, el comportamiento de la curva de ajuste es similar al obtenido anteriormente, con un MAPE de 5%, y valores de diferencia máximos de 11.1% de humedad relativa.

4.5.3. Comparación de valores de humedad con estación meteorológica AWOS

Al comparar los valores obtenidos por el sensor "HUMA" podemos notar su similitud con la información obtenida por la estación AWOS, Figura 4.19.

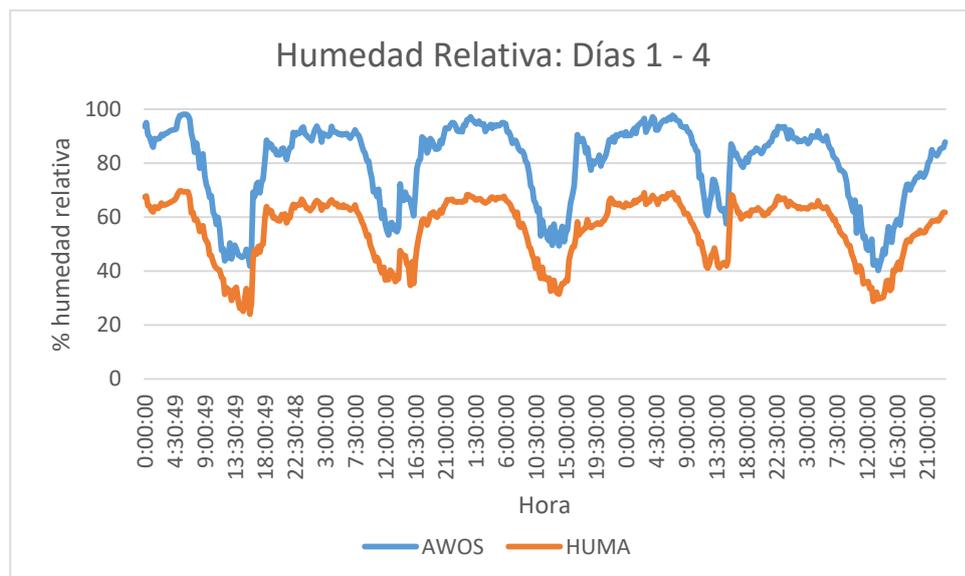


Figura 4.19: Comparación de valores de humedad con equipo certificado.

Así, al obtener la desviación absoluta media de 23.9% de humedad relativa, e incluir este valor a una curva de ajuste, Figura 4.20, el error porcentual que se obtiene es de 5.2%, curva que se asemeja a la del equipo certificado.

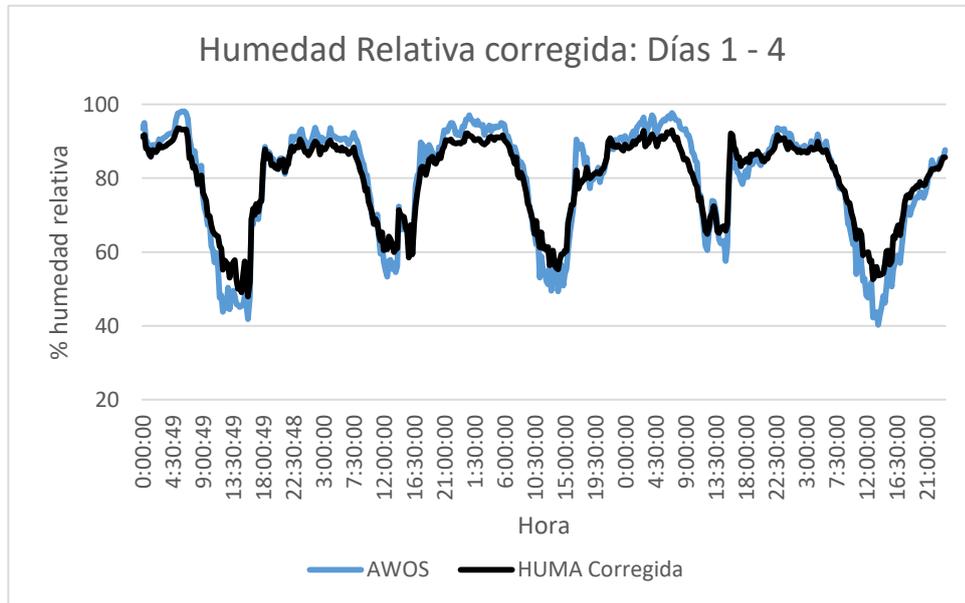


Figura 4.20: Curva corregida del sensor de humedad.

4.6. Medición de presión atmosférica

En la medición de presión atmosférica, la comparación se la realiza con los datos registrados por la estación AWOS, y presentan una MAD de 2.04 mbar, y una MAPE de 0.27%.

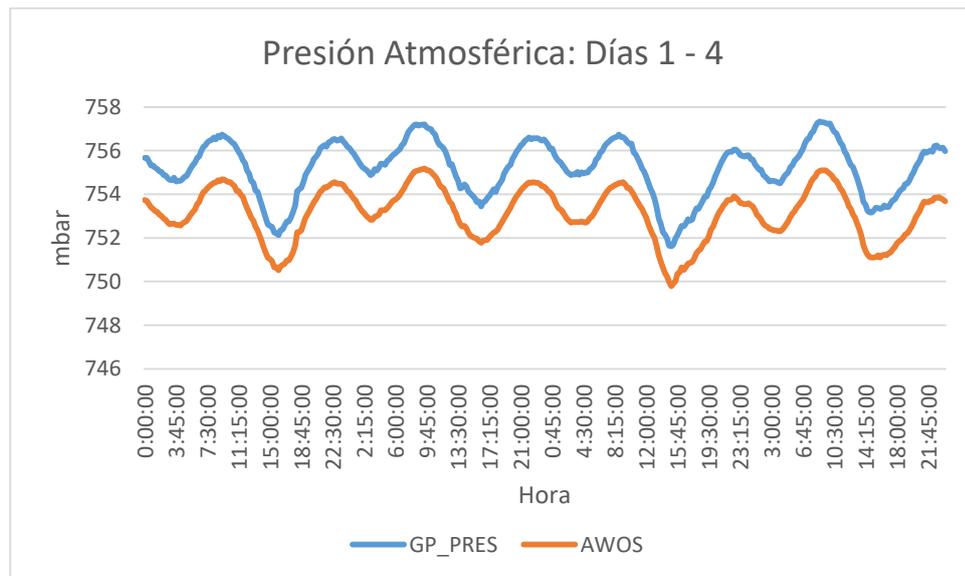


Figura 4.21: Comparación de niveles de presión atmosférica: Nodo sensor GP_PRES (Azul), Estación AWOS (Naranja), desde día 1 al día 4.

Adicional, la desviación cuadrática media (MSD), ecuación 4.3, es de 4.21 mbar.

$$MSD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - B_t|^2}{n} \quad (4.3)$$

Los valores obtenidos, están apegados a los valores reales y no presentan un gran porcentaje de error, sin embargo al ser una desviación constante la MAD obtenida, se puede generar una curva "GP_PRES Corregida" que muestre este ajuste. De esta manera el nuevo error porcentual absoluto medio disminuye al 0.02% y la MSD a 0.031mbar.

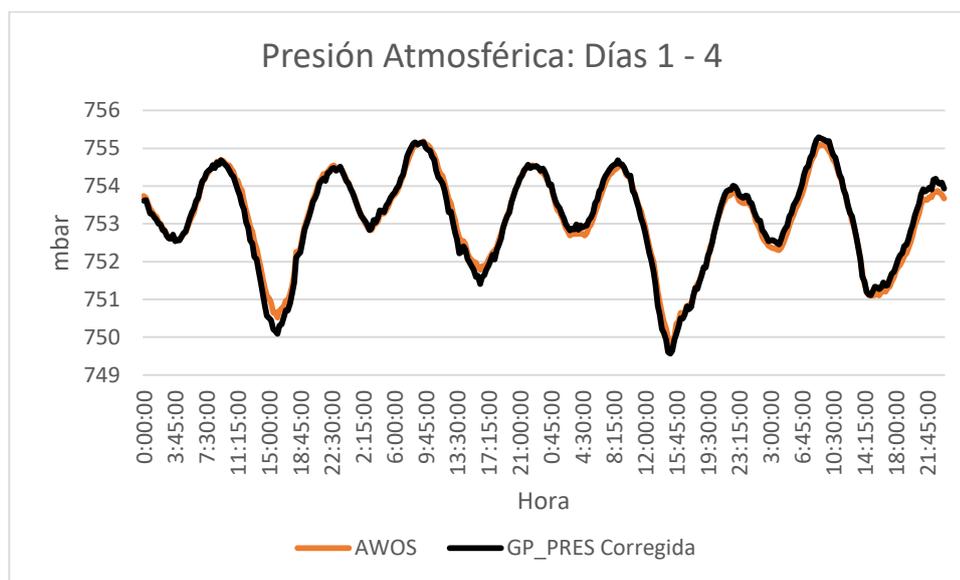


Figura 4.22: Curva GP_PRES Corregida en contraste con curva de respuesta de AWOS.

4.7. Comparación de valores de ruido

Las comparaciones de ruido de los equipos se las realiza en conjunto con un sonómetro calibrado de tipo 2, éste es configurado para que entregue valores en la escala Leq, conocido también como ruido de impacto.

El muestreo es realizado conjuntamente con ambos equipos durante una hora en ambientes de ruido bajos, que no superen los 50dB; en ambientes de ruido medio que rondan los 70dB en promedio; y ambientes con constante ruido alto. De manera que estas pruebas permitan analizar el comportamiento y respuesta de los nodos en diferentes rangos.

El rango de funcionamiento del sensor de ruido de los equipos se encuentra entre los 50dB y los 100dB, como se describió en la sección 3.6.2.

En el primer segmento, ruido bajo, el sonómetro muestra un comportamiento y mediciones que no superan los 50dB. Al ser este valor el umbral inferior de percepción del sensor de ruido del equipo Libelium, el ruido existente no es suficiente para ser detectado por el sensor, por lo que las mediciones son representadas por un valor casi constante de 52dB, como se aprecia en la Figura 4.23.

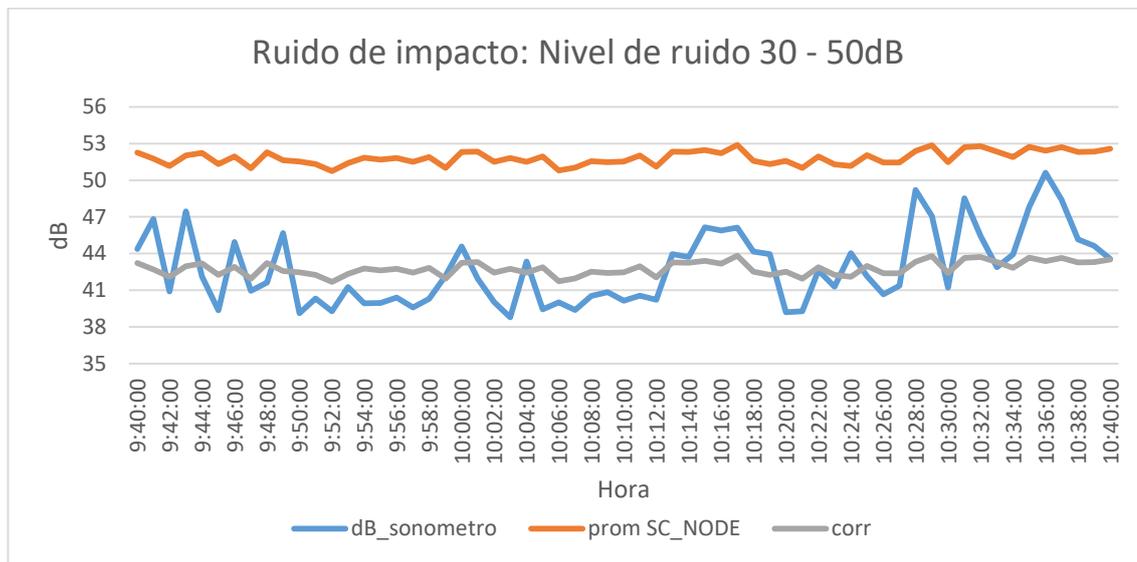


Figura 4.23: Ruido de impacto: Nivel de ruido 30 – 50dB.

Los valores obtenidos, en éste primer segmento, al estar por debajo del rango de medición no permiten generar una curva de corrección.

En cuanto al comportamiento del sensor de ruido del nodo SC_NODE entre niveles de ruido comprendidos en el rango de 50 a 70dB, Figura 4.24, podemos calcular que el Error Porcentual Medio es del 4%, y la Desviación Absoluta Media es de 2.69dB. Al aplicar la desviación obtenida, se genera una nueva curva denominada "SC_Corregida", de esta manera el Error Porcentual Medio disminuye a un 2%, mostrando la curva un comportamiento similar al del equipo certificado de comparación.

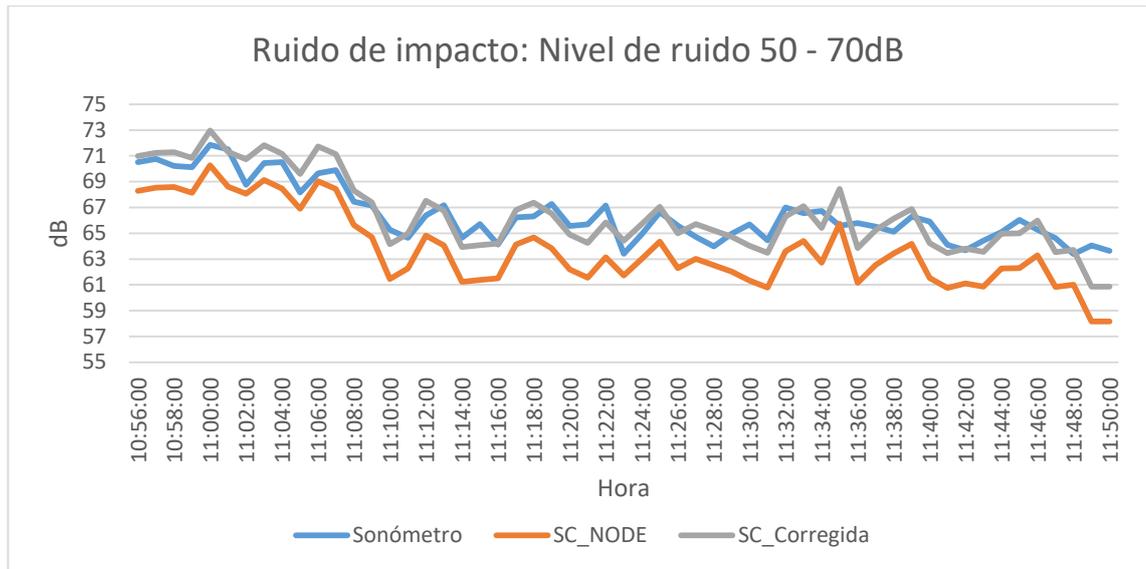


Figura 4.24: Ruido de impacto: Nivel de ruido 50 – 70dB.

En las mediciones que presentan niveles de ruido mayores a 70dB la MAPE tiene un valor de 6%, con una desviación absoluta media de 4.5dB, diferente a la del rango comprendido entre 50 – 70dB. Al aplicar esta corrección para generar una nueva curva, Figura 4.25, el Error Porcentual Medio disminuye al 3%.

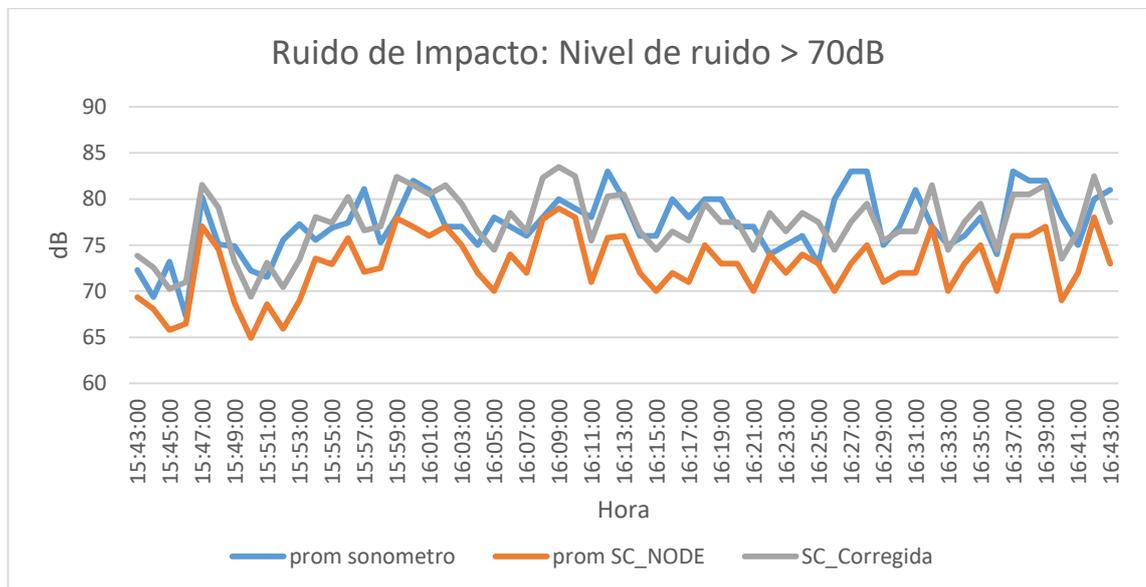


Figura 4.25: Ruido de impacto: Nivel de ruido mayor a 70dB.

4.8. Corrección de variables meteorológicas y ruido

Luego de haber generado una corrección en las variables meteorológicas y ruido acorde a la comparación con la estación AWOS y un sonómetro calibrado

respectivamente, las mejoras obtenidas son considerables y favorables, como se aprecia en la Figura 4.26.

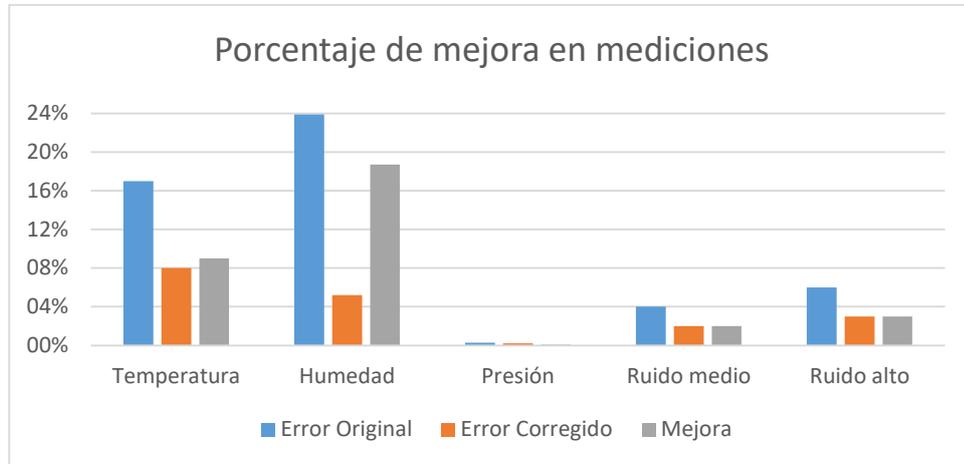


Figura 4.26: Porcentaje de mejora en mediciones.

De esta manera, los porcentajes de precisión de la información obtenida por los sensores de Libelium aumentan considerablemente, como se aprecia en la Figura 4.27.

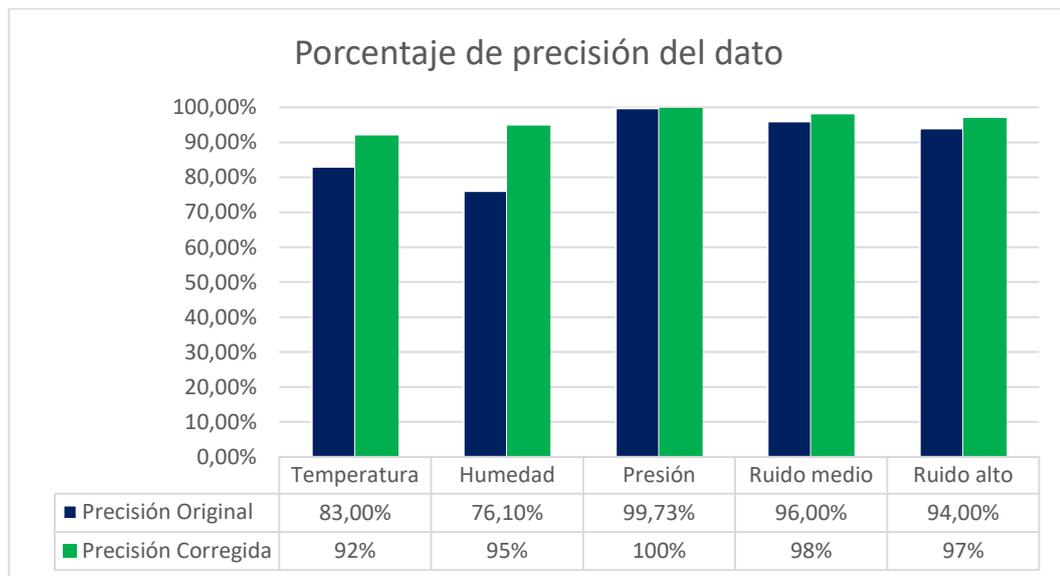


Figura 4.27: Porcentaje de precisión del dato.

4.9. Comparación de valores de contaminantes gaseosos

Para la comparación de información de los datos de contaminantes gaseosos generados por los sensores de Libelium, se instalaron los equipos junto a la Estación Automática de Monitoreo de Calidad de Aire de la EMOV, estación certificada y calibrada, como se menciona en el Capítulo I.



Figura 4.28: Instalación de nodos sensores junto a Estación Automática.



Figura 4.29: Disposición de los nodos sensores.

Una vez realizada la instalación de los nodos sensores, se procede a recolectar información de la calidad del aire de forma continua, más tarde, estos datos son comparados con los generados por la estación automática proporcionando los resultados que se exponen a continuación.

4.9.1. Monóxido de carbono (CO)

En la Figura 4.30 se compara los niveles registrados de monóxido de carbono (CO) por la estación automática con los medidos por el sensor de Libelium. Se puede

apreciar que el sensor adquirido mantiene un comportamiento similar al de la estación automática. Sin embargo, en las horas en que la estación registra un valor de concentración de 0 ppm, el sensor adquirido no mide por debajo de los 0.5 ppm. No obstante, la tendencia resulta ser la misma entre ambas mediciones.

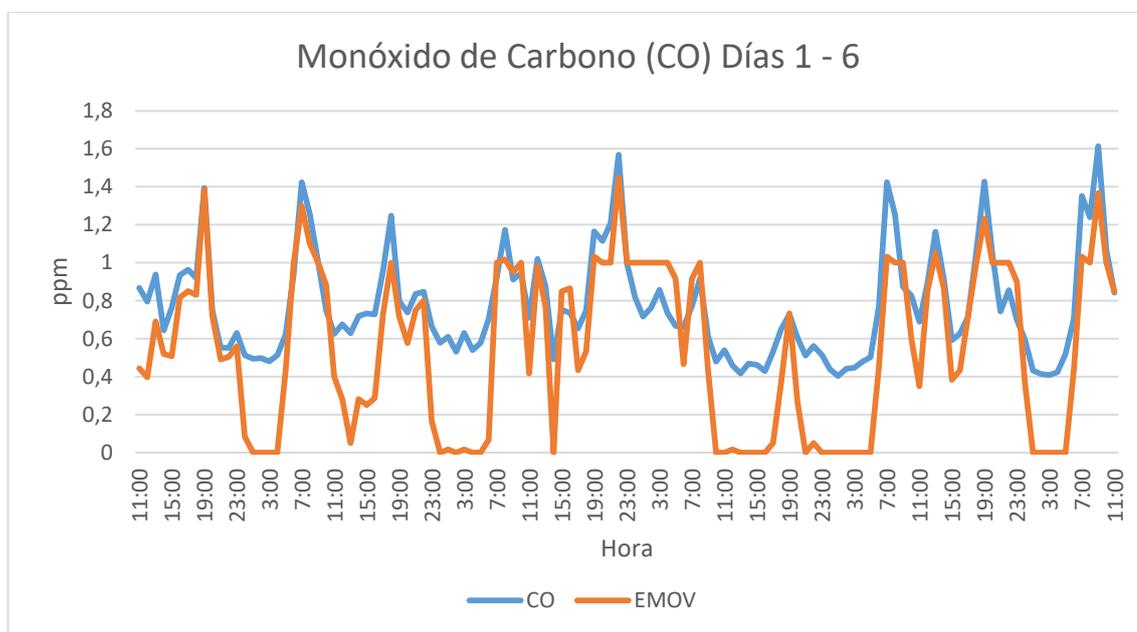


Figura 4.30: Comparación de los niveles de concentración de CO.

Se calculó un error porcentual absoluto medio del 188%. Este alto valor se debe justamente por las comparaciones en los niveles más bajos como se indicó anteriormente.

4.9.2. Dióxido de azufre (SO₂)

En la comparación de valores de dióxido de azufre, con la estación automática de calidad de aire, Figura 4.31, el comportamiento del sensor de Libelium muestra una tendencia similar a la del equipo de referencia, presentando variaciones acorde a la presencia del contaminante. Sin embargo el error porcentual promedio es del 78%, esto debido a las propias limitaciones del sensor empleado, como se mencionó en el Capítulo III.

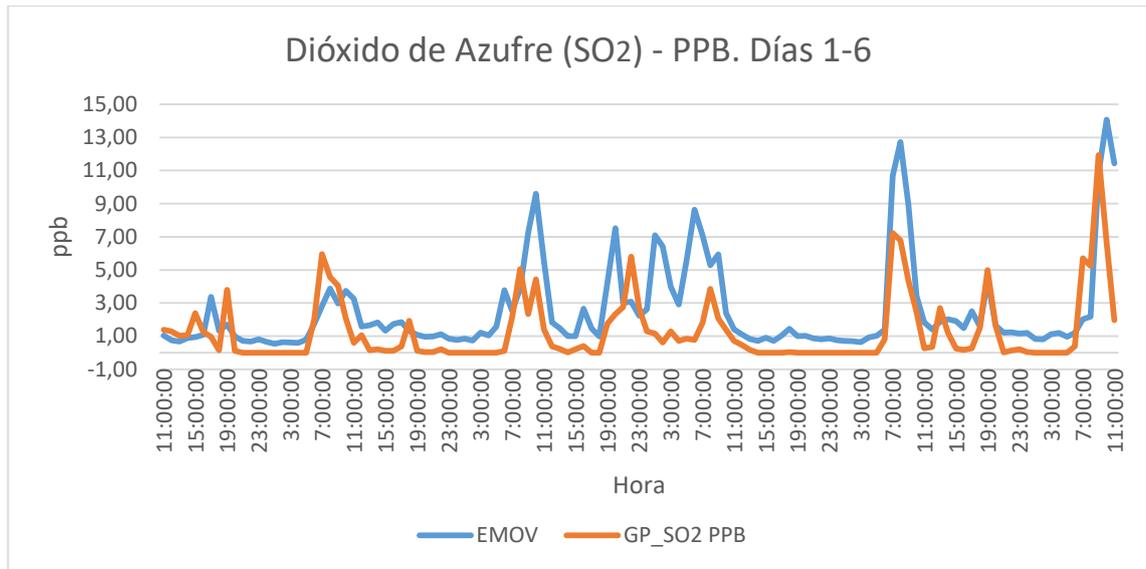


Figura 4.31: Comparación gas contaminante SO₂.

4.9.3. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

Las comparaciones del contaminante dióxido de nitrógeno no presentan similitud entre los valores receptados por el sensor del equipo Libelium y el correspondiente de la estación automática, Figura 4.32. De esta manera el error porcentual promedio es del 102% y al no existir relación entre los datos no es conveniente generar una curva de ajuste.

Cabe mencionar que durante los 6 días de comparación de datos, los valores máximos obtenidos por el sensor "GP_NO2" no superan los valores máximos del sensor de la estación.

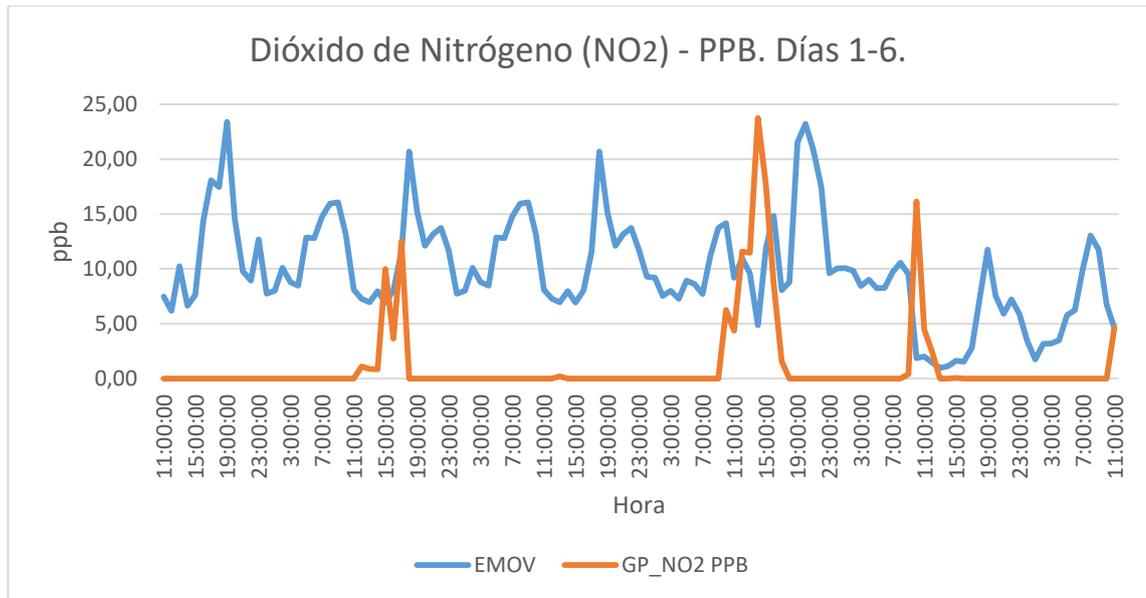


Figura 4.32: Comparación gas contaminante NO2.

4.9.4. Ozono (O3)

En la Figura 4.33 se comparan los niveles registrados de ozono (O3) por la estación automática con los medidos por el sensor de Libelium. Es notable su total diferencia pues el sensor adquirido detecta una concentración mucho mayor a la medida por la estación automática presentando un error porcentual absoluto medio del 1700%.

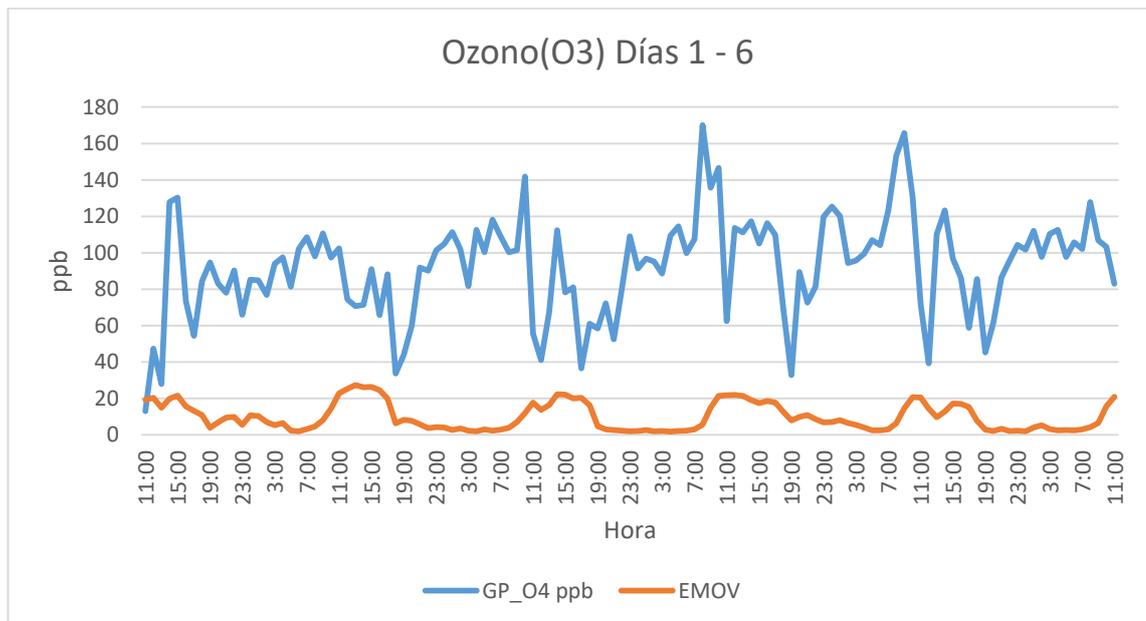


Figura 4.33: Comparación gas contaminante O3.

Dado esta variación se procede a comparar con valores recolectados previa a la fecha de comparación con la estación automática de la EMOV en busca de anomalías, y se identifica un cambio drástico en los valores medidos luego de que los nodos sensores fueron trasladados a la estación AWOS para su correspondiente comparación con variables meteorológicas. Es así que al graficar el comportamiento del sensor días antes del traslado de los nodos y días después, se puede notar un cambio, Figura 4.34. Puede inferirse que durante este lapso ocurrió un problema de carácter técnico funcional del nodo, el cual persiste hasta la fecha, por lo tanto no es posible validar la información generada por este componente.

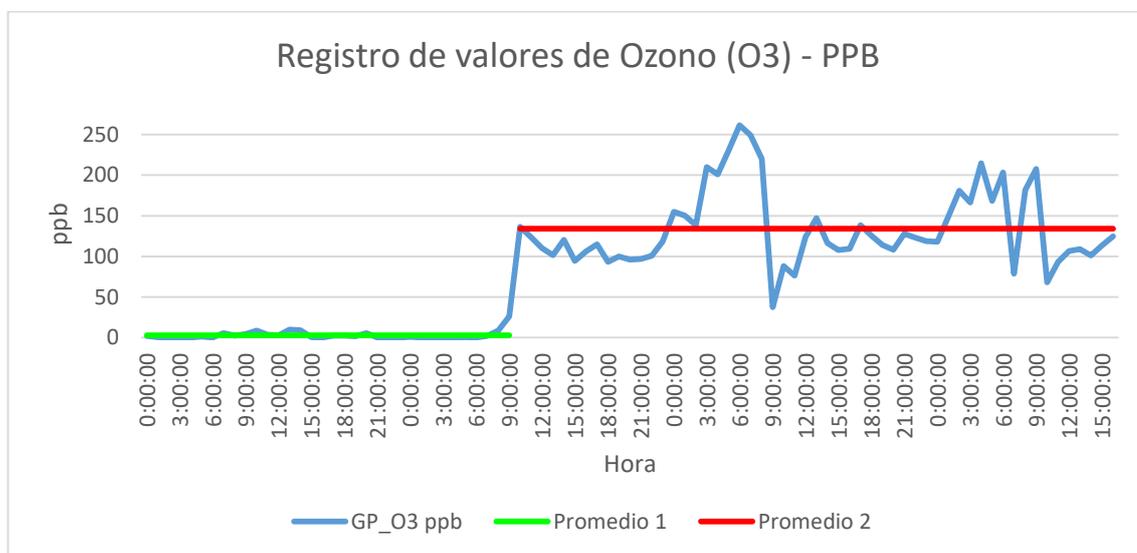


Figura 4.34: Registro de valores de O₃, variación del funcionamiento del sensor.

En la figura se ilustra, en color verde, el promedio de los valores días antes de la movilización de los nodos y, en color rojo, el promedio de días posteriores.

4.10. Conclusiones del capítulo

Las pruebas llevadas a cabo en este capítulo permitieron conocer el comportamiento de los sensores y comparar su desempeño con equipos certificados especializados de cada variable.

Tras realizar las pruebas correspondientes se pudo constatar que en cuanto a la fiabilidad de la recepción de datos, ésta comunicación no se vio interrumpida en ningún momento durante la duración de las pruebas, excepto cuando se cortó la energía intencionalmente en el *gateway*.

En cuanto al consumo de energía de los nodos sensores, se pudo confirmar la relación existente entre la frecuencia de transmisión de información con el consumo de batería, así, se consume en mayor proporción la carga de la batería cuando se aumenta la frecuencia de transmisión de datos, asimismo, la recarga de batería es más lenta. Adicionalmente en este tema se pudo observar que la energía utilizada por el nodo sensor en un día común de funcionamiento es menor que la energía obtenida por la acción de los paneles solares, por lo tanto se puede mencionar que los nodos pueden trabajar de forma autónoma al contar con una batería y un panel solar.

Los valores de temperatura que se registraron en primera instancia con los nodos sensores mostraron ciertas inconsistencias entre ellos; luego de las pruebas realizadas se pudo definir que la radiación solar directa sobre los equipos influye en las mediciones al calentar la carcasa plástica de los sensores y retener ésta temperatura. Es así que al implementar una cobertura de poliestireno expandido, los valores de temperatura mostraron relación entre sensores y al compararlos con un equipo meteorológico certificado, se obtuvieron resultados favorables.

Las pruebas realizadas sobre los valores de humedad, permitieron conocer que los sensores utilizados: "HUMA" y "GP_HUM" siguen una misma tendencia entre ellos sin embargo no es posible realizar una corrección óptima entre ellos dado que el error existente entre valores no es constante. En comparación con un equipo certificado, luego de que los valores del sensor "HUMA" hayan sido corregidos, éste presenta un comportamiento similar al de la estación AWOS, con un 5.2% de error medio.

En cuanto a la comparación entre las mediciones de presión atmosférica obtenidas por los nodos sensores y la estación AWOS, la diferencia entre estos es de 2.04 mBar los cuales al ser corregidos en una nueva curva presentan una relación entre medidas de casi el 100%.

El sensor de ruido presenta una tendencia similar al compararlo con un sonómetro certificado, y al realizar las correcciones pertinentes de los valores, éstos se asemejan a las del equipo de referencia, sin embargo, por las mismas limitaciones y características de construcción su aplicación se reduce al de carácter indicativo y actualmente no puede reemplazar, en aplicaciones de carácter regulatorio, a un sonómetro calibrado.

En cuanto a los gases contaminantes, no es posible generar una corrección, ya que en el caso del NO₂, pese a que los valores generados se encuentran dentro de rangos admisibles, no se asemejan a los del equipo certificado. En el caso del SO₂ la tendencia es similar a la presentada por el sensor de la estación automática, presentando un comportamiento similar al existir baja concentración de contaminante y una sensibilidad notable al existir presencia del mismo. Un comportamiento semejante sucede en la medición de CO en la que las mediciones en presencia del contaminante presentan gran similitud. Por tal motivo, estas pruebas permiten conocer que los sensores de Libelium pueden servir para generar indicadores referenciales de calidad de aire. El parámetro O₃, sin embargo, dadas las fallas funcionales descritas, no puede ser comparado con un equipo de referencia y actualmente no puede validarse su información.

5. CAPÍTULO V: RESULTADOS

"Grandes resultados requieren grandes ambiciones."

Heráclito

5.1. Introducción

Este capítulo comprende los resultados en base a la información levantada en las pruebas descritas en el capítulo anterior, así como también se incluyen las conclusiones y recomendaciones del estudio en cuanto al empleo y comportamiento de sensores de bajo costo. Finalmente, se presenta el funcionamiento final del sistema para la presentación del índice de calidad del aire, mediciones de gases contaminantes, ruido y variables atmosféricas.

5.2. Cálculo del ICA

En base a la información proporcionada por la EMOV de las pruebas realizadas en la estación automática de monitoreo de calidad de aire, descritas en el Capítulo IV, se calculó el ICA para la primera semana del mes de marzo del 2017. En las Tabla 5.1 a 5.4 se presentan los índices de cada gas contaminante, obtenidos con los datos de la estación y lo registrado por los sensores empleados.

Tabla 5.1: Promedios de concentración e ICA diario del Dióxido de Nitrógeno.

Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)				
Día	Promedio EMOV [ppb]	Promedio Sensor [ppb]	ICA EMOV	ICA Sensor
1	12.105	0.000	Bueno n/a	Bueno n/a
2	11.330	1.204	Bueno n/a	Bueno n/a
3	11.330	0.008	Bueno n/a	Bueno n/a
4	11.523	3.552	Bueno n/a	Bueno n/a
5	6.366	0.980	Bueno n/a	Bueno n/a
6	6.102	0.385	Bueno n/a	Bueno n/a

En la Tabla 5.1, los promedios diarios de concentración del NO₂ varían en gran proporción entre los datos de la EMOV con los datos medidos. Sin embargo, todos los

valores se mantienen en el rango de un índice de calidad BUENO; sin índice numérico pues como se indicaba en la Tabla 1.5, el NO₂ se mantiene en verde hasta llegar a muy altas concentraciones (mayores o iguales a 650 ppb).

Tabla 5.2: Promedios de concentración e ICA diario del Dióxido de Azufre.

Dióxido de Azufre (SO ₂)				
Día	Promedio EMOV [ppb]	Promedio Sensor [ppb]	ICA EMOV	ICA Sensor
1	1.152	1.038	1.69	1.53
2	1.610	0.988	2.37	1.45
3	2.886	1.338	4.24	1.97
4	2.948	0.717	4.33	1.05
5	2.761	1.473	4.06	2.17
6	3.988	2.661	5.87	3.91

En la Tabla 5.2, los promedios diarios de concentración del SO₂ varían entre los datos de la EMOV con los datos medidos en proporción de 1 ppb aproximadamente. Sin embargo, todos los valores se mantienen en el rango de un índice de calidad BUENO.

Tabla 5.3: Promedios de concentración e ICA diario del Monóxido de Carbono.

Monóxido de Carbono (CO)				
Día	Promedio EMOV [ppm]	Promedio Sensor [ppm]	ICA EMOV	ICA Sensor
1	0.671	0.824	8.39	10.30
2	0.504	0.779	6.30	9.74
3	0.600	0.840	7.50	10.50
4	0.426	0.620	5.32	7.75
5	0.619	0.804	7.74	10.04
6	0.504	0.801	6.30	10.02

En la Tabla 5.3, los promedios diarios de concentración del CO varían entre los datos de la EMOV con los datos medidos en proporción de 0.2 ppm aproximadamente. Sin embargo, todos los valores se mantienen en el rango de un índice de calidad BUENO.

Tabla 5.4: Promedios de concentración e ICA diario del Ozono.

Ozono (O ₃)				
Día	Promedio EMOV [ppb]	Promedio Sensor [ppb]	ICA EMOV	ICA SENSOR
1	13.177	74.657	11.17	98.88
2	11.811	84.235	10.01	122.24
3	8.719	87.048	7.39	129.49
4	10.639	102.360	9.02	169.03
5	8.701	99.345	7.37	161.65
6	6.039	105.057	5.12	175.64

En la Tabla 5.4, los promedios diarios de concentración del O₃ varían ampliamente entre los datos de la EMOV con los datos medidos sin relación alguna; comenzando el primer en un nivel amarillo, pasando por el naranja hasta llegar a rojo, mientras que el índice de la EMOV siempre se mantuvo en verde durante este periodo. La causas de estos resultados puede ser debido a una descalibración del sensor de O₃, a algún daño físico, al método de medición de concentración de este gas en la estación automática, y/o por el largo radio de medición de la estación comparado con la medición local del sensor empleado.

5.3. Plataforma desarrollada

La Figura 5.1 muestra la interfaz completa de la plataforma desarrollada indicando a su izquierda el menú de consultas y visualizaciones.

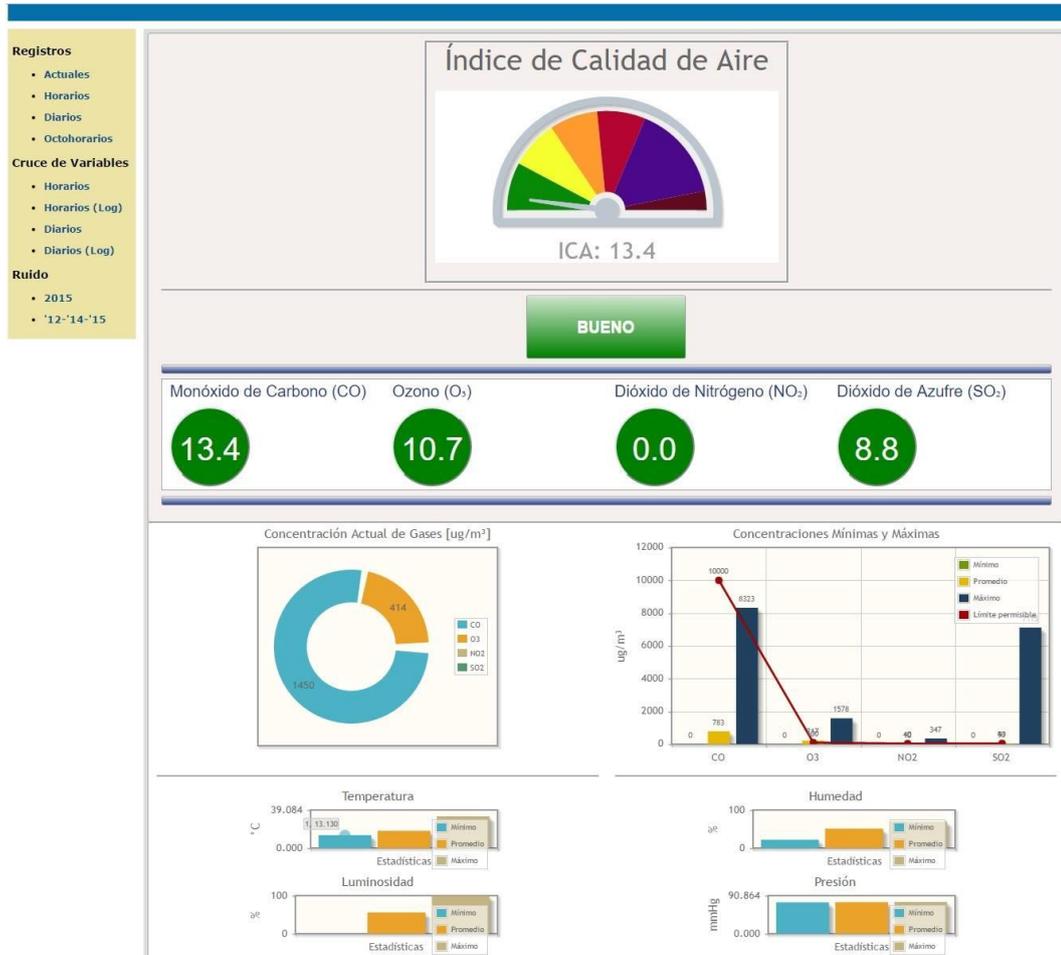


Figura 5.1: Interfaz completa de visualización.

Aplicando la fórmula descrita anteriormente, la plataforma desarrollada calcula el índice de calidad del aire y en la interfaz se lo visualiza como se muestra en el ejemplo de la Figura 5.2. Siendo este ICA determinado por el índice más alto de los gases contaminantes, y en este ejemplo, el monóxido de carbono (CO) con un índice de 13.4.



Figura 5.2: Visualización del ICA en la plataforma web.

Al hacer clic en el botón de la Figura, se despliega el mensaje descriptivo del ICA actual. En el caso de la Figura 5.2., el mensaje que se muestra es "La calidad del aire en Cuenca es BUENA y la contaminación no representa peligro para la salud". Como se menciona en la Tabla 1.4.

Se muestran además las concentraciones actuales de los gases contaminantes (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) medidos por los sensores, como se indica en la Figura 5.3.

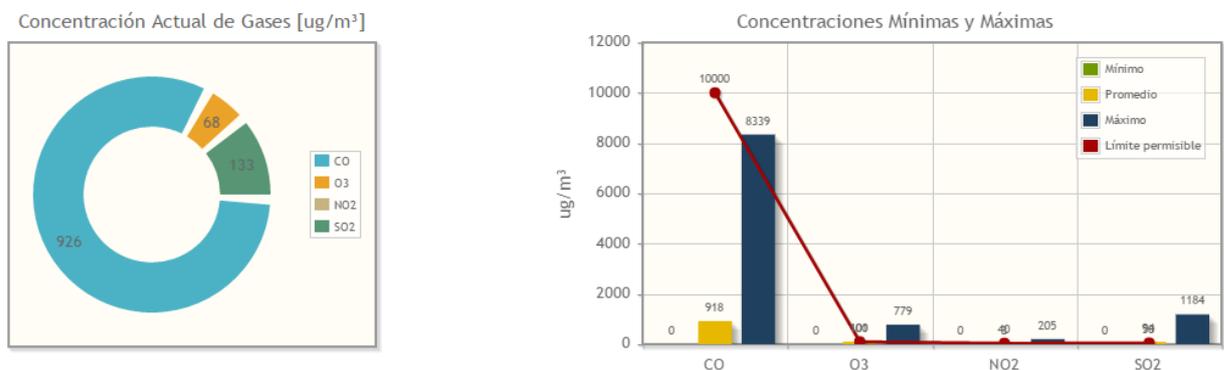


Figura 5.3: Tipos de visualización de la concentración de gases contaminantes en la plataforma web.

Adicionalmente, se indica el nivel de batería de ambos nodos y el comportamiento de carga de las últimas 8 horas, como se muestra en la Figura 5.4.



Figura 5.4: Niveles de carga de los nodos en la plataforma web.

5.3.1. Consultas de registros

Dentro de la plataforma es posible consultar gráficamente los niveles de gases contaminantes, ruido y variables atmosféricas por hora, día, y valores de concentración actuales (ICA) como se indicó anteriormente. Además, para los gases contaminantes, existe la opción de buscar por octohorarios en un día específico.

5.3.2. Consulta horaria

En esta consulta, se elige una fecha y hora específicas para visualizar los niveles del parámetro seleccionado. Dependiendo del nodo al cual una variable pertenece, se obtendrá mayor o menor número de registros. En el caso del nodo SC_NODE, el cual mide datos cada minuto aproximadamente, se muestran 60 datos en 1 hora; en tanto que para el nodo SEP_NODE, midiendo cada 2 minutos, se mostrarían cerca de 30 datos por hora. En la Figura 5.5 se ejemplifica una consulta de los niveles de CO para el 21 de febrero del 2017 a las 12H00. Indicando, además, los niveles máximo, mínimo y promedio de esta hora.

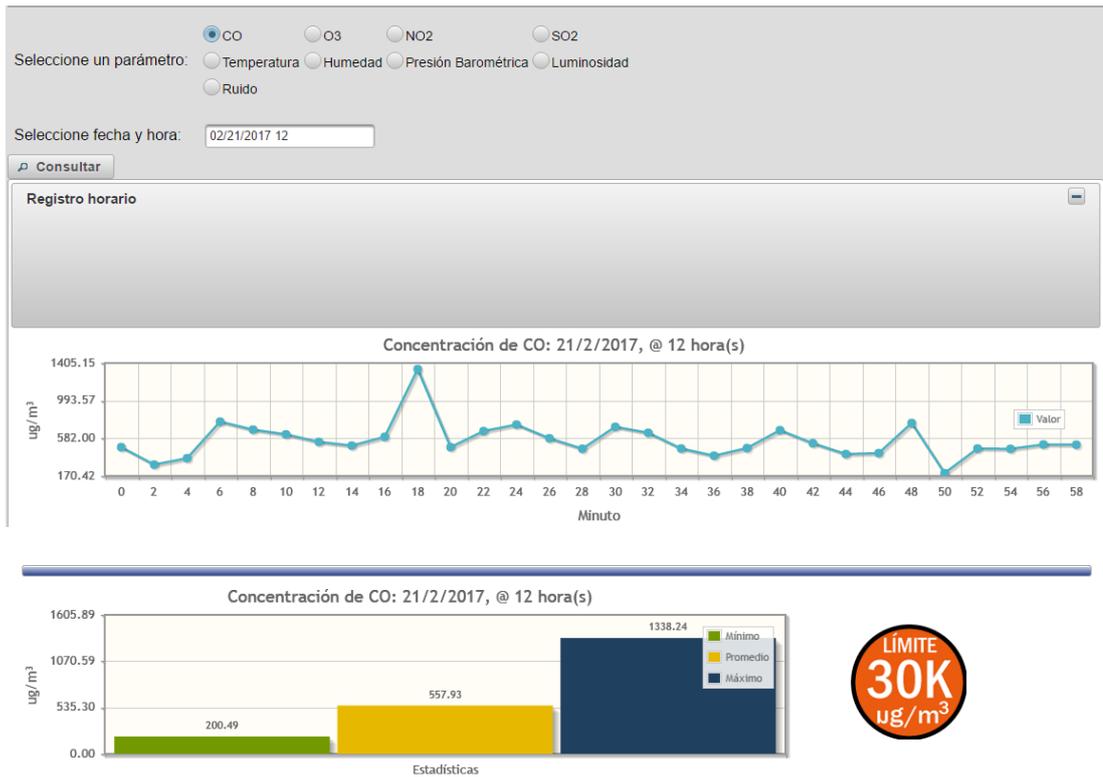


Figura 5.5: Interfaz para la consulta por fecha y hora de los diferentes parámetros.

5.3.3. Consulta diaria

En esta consulta, se elige una fecha para visualizar los niveles del parámetro seleccionado. Se muestran 24 datos en día dado, uno por cada hora; el cual es el promedio de registros en esa hora. En la Figura 5.6 se ejemplifica una consulta de los niveles de CO para el 21 de febrero del 2017 Indicando, además, los niveles máximo, mínimo y promedio de este día.

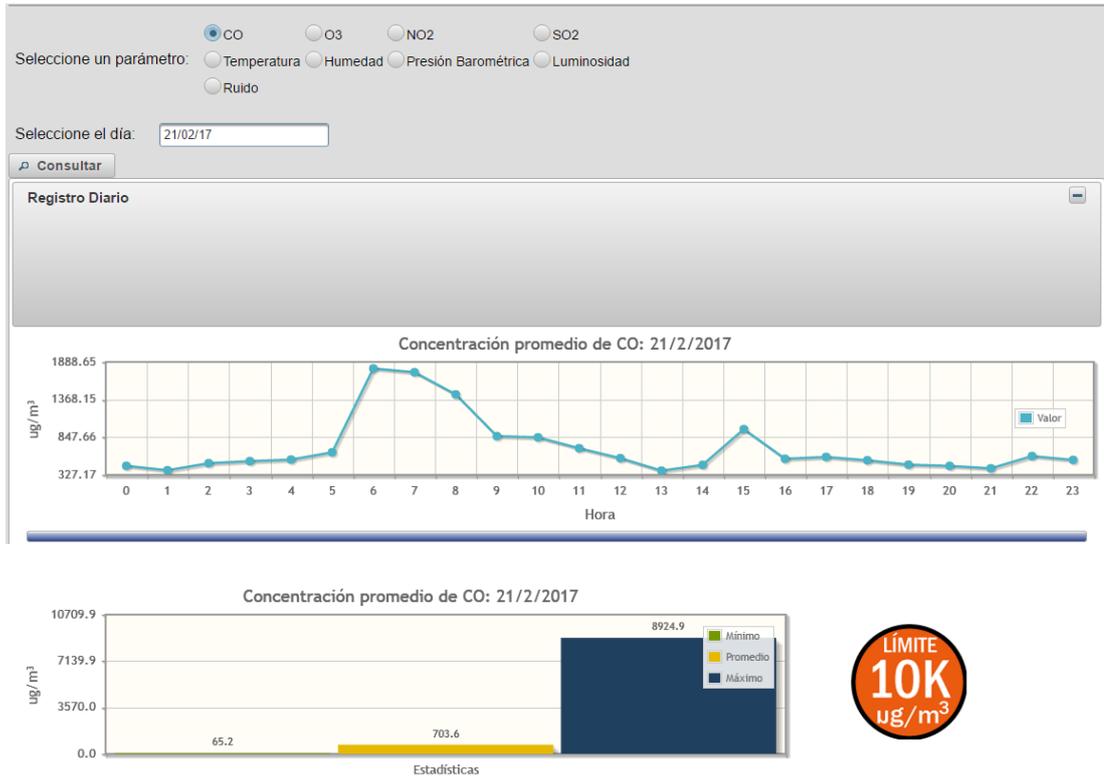


Figura 5.6: Interfaz para la consulta por fecha de los diferentes parámetros.

5.3.4. Consulta octohoraria

En esta consulta, se elige una fecha y entre 3 periodos de 8 horas cada uno; 00:00 – 07:00, 08:00 – 15:00, y 16:00 -23:00. Se indican solamente los valores de concentración de gases contaminantes en el octohorario seleccionado. En la Figura 5.7 se ejemplifica una consulta de los niveles de gases contaminantes para el 21 de febrero del 2017. Se presentan los niveles máximo, mínimo y promedio de este periodo.



Figura 5.7: Interfaz para la consulta por octohorarios de los gases contaminantes.

5.3.5. Consulta horaria (cruce de variables)

En esta consulta, se elige una fecha y hora específicas para visualizar los niveles de todos los parámetros que se desee a la vez. Sin embargo, la gráfica resultante varía de acuerdo a las unidades en la que cada parámetro es medido. En la Figura 5.8 se ejemplifica una consulta de los niveles de CO, O₃ y NO₂ para el 21 de febrero del 2017 a las 12H00.

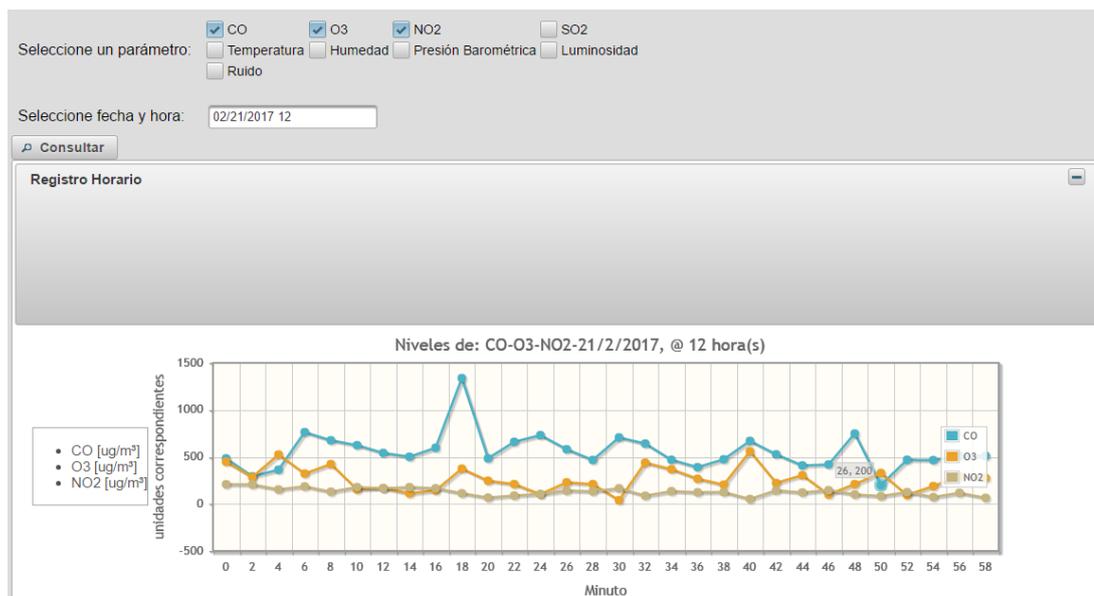


Figura 5.8: Interfaz para la consulta por fecha y hora para el cruce de los diferentes parámetros.

5.3.6. Consulta horaria (cruce de variables en escala logarítmica)

Esta consulta es igual a la anterior con la diferencia de que las variables son presentadas en su valor logarítmico, para que la escala sea más uniforme. En la Figura 5.9 se ejemplifica una consulta de los niveles de CO, O₃ y NO₂ para el 21 de febrero del 2017 a las 12H00.

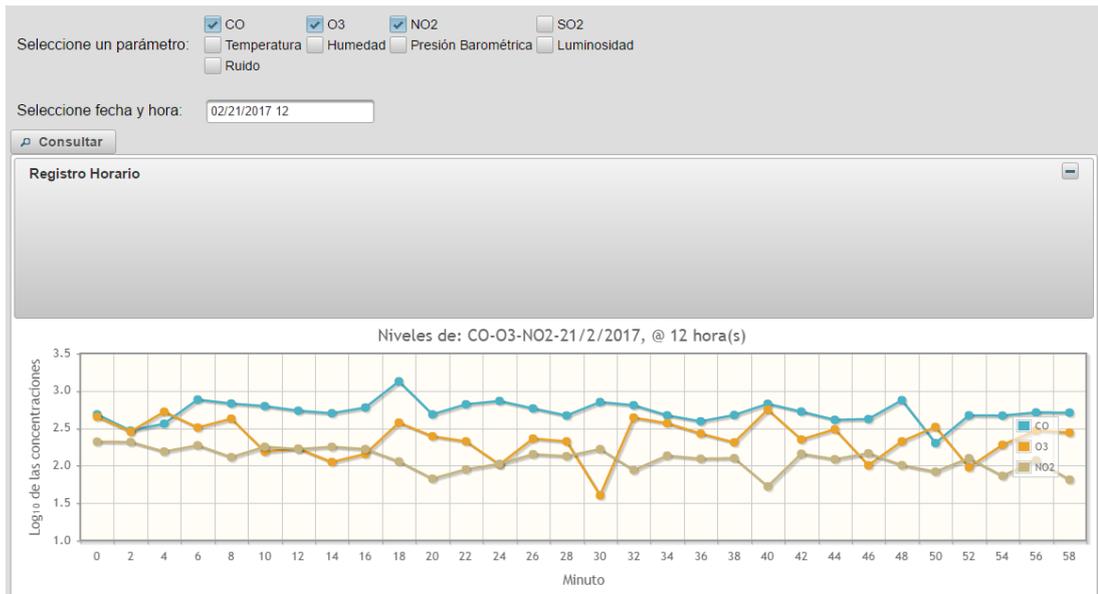


Figura 5.9: Interfaz para la consulta por fecha y hora para el cruce de los diferentes parámetros en escala logarítmica.

5.3.7. Consulta diaria (cruce de variables)

En esta consulta, se elige una fecha para los niveles de todos los parámetros que se deseen a la vez. Sin embargo, la gráfica resultante varía de acuerdo a las unidades en la que cada parámetro es medido. Se muestran 24 datos en un día dado, uno por cada hora; el cual es el promedio de registros en esa hora. En la Figura 5.10 se ejemplifica una consulta de los niveles de temperatura, humedad, luminosidad y ruido para el 21 de febrero del 2017.



Figura 5.10: Interfaz para la consulta por fecha para el cruce de los diferentes parámetros.

5.3.8. Consulta diaria (cruce de variables en escala logarítmica)

Esta consulta es igual a la anterior con la diferencia de que las variables son presentadas en su valor logarítmico, intentando que la escala sea más uniforme. En la Figura 5.11, se ejemplifica una consulta de los niveles de temperatura, humedad, presión barométrica, luminosidad, y ruido para el 21 de febrero del 2017; mientras que en la Figura 5.12, se consultan los niveles de gases contaminantes para la misma fecha.

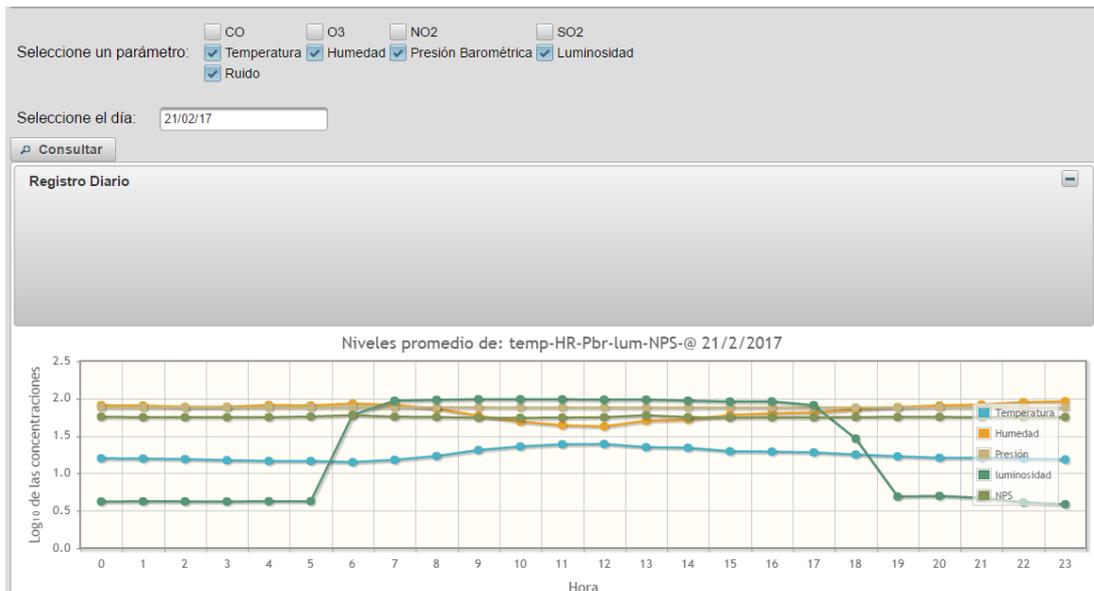


Figura 5.11: Interfaz para la consulta por fecha para el cruce de variables atmosféricas y ruido en escala logarítmica.

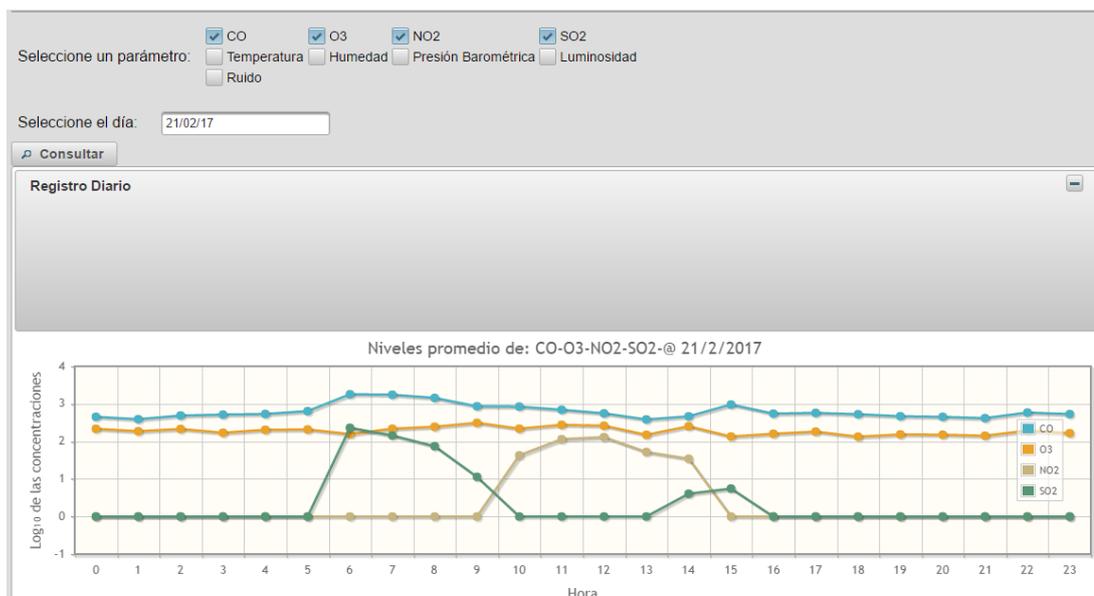


Figura 5.12: Interfaz para la consulta por fecha para el cruce de gases contaminantes en escala logarítmica.

sensor electroquímico, además de que el amplio radio de medición de la estación también son factores que podrían diferenciar los datos entre sus equipos y sensores de gases contaminantes de bajo costo.

Por otro lado, gracias a las pruebas favorables de consumo de energía de los nodos, transmisión, y almacenamiento de datos; la plataforma desarrollada cumple con su propósito de realizar consultas y visualizar gráficamente los niveles registrados de variables atmosféricas, gases contaminantes, y ruido de impacto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones teóricas

Actualmente el aumento de contaminación en las ciudades a medida que estas crecen, es muy notable, y lo correspondiente se aprecia en la ciudad de Cuenca. Afortunadamente a diferencia de otras urbes, en Cuenca la empresa municipal EMOV EP, se ha interesado en el monitoreo de la calidad de aire, y al exponer los resultados, en conjunto con la Universidad del Azuay, muestra la importancia de analizar estos aspectos de forma continua.

El análisis teórico previo a la ejecución de este trabajo fue de gran importancia, ya que al ser un tema de gran impacto en el desarrollo de las futuras ciudades inteligentes, no existe una línea fija que seguir y por lo tanto los métodos para alcanzar resultados son varios. Es por lo tanto, que la revisión del estado del arte sirvió para seleccionar los componentes del proyecto más adecuados, y se obtenga el mayor provecho de los mismos.

Además, se pudo constatar que la arquitectura del modelo de IoT aplicado a las WSN está acorde al producto conseguido en este trabajo de titulación, apreciándose notablemente las capas de: Conectividad de Sensores y Red, *Gateway* y Red, Administración de Servicios, y Aplicación.

Conclusiones metodológicas

El método que se utilizó para este trabajo de titulación consiste en el diseño de un sistema que integra sensores y conceptos en el ámbito del internet de las cosas. Para el efecto, se aplicó un proceso de diseño basado en la identificación de requisitos, la conceptualización del problema, el análisis, la comparación entre alternativas en el caso de sensores, la selección de soluciones y el diseño y la elaboración del trabajo.

Para la conceptualización del problema fue de particular importancia el consejo que se obtuvo de los miembros del tribunal en la fase de la discusión y aprobación del protocolo del trabajo de titulación. Debe destacarse el acompañamiento que nuestro director nos brindó para decidir los elementos fundamentales que formarían parte de nuestro problema de estudio.

Así también, fue de especial ayuda el apoyo del grupo de investigadores de la línea de Geomática de la Universidad del Azuay, en el Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador, IERSE; quienes pretenden, con futuros proyectos y mayor inversión, determinar índices de calidad referenciales empleando sensores de bajo costo, haciendo uso de los conceptos, protocolos de comunicación y tecnología que engloban a las redes inalámbricas de sensores WSN.

El enfoque que se dio a este trabajo en cuanto a la experimentación para la validación de los datos generados por sensores de bajo costo marca un punto de inicio para futuros proyectos que envuelven el monitoreo de la calidad del aire y ruido.

Discusión y recomendaciones

Como se indicó previamente en el Capítulo III, los sensores de bajo costo empleados en la medición de niveles de contaminación ambiental, actualmente no se encuentran validados por entidades de regulación ambiental pues su uso está mayormente orientado a una presentación referencial o caracterización de lo que otros sensores más sofisticados podrían registrar.

Sin embargo, los costos entre equipos certificados y los sensores empleados tampoco son equiparables. Pues como se mencionó en el Capítulo I, una estación de monitoreo continuo de contaminantes y variables atmosféricas, por ejemplo, superaría en cientos de miles de dólares al costo de los sensores sin certificación, pero gracias a las pruebas realizadas, se pudo determinar que las mediciones resultan ser considerablemente aceptables para esta aplicación.

Las pruebas de medición de los sensores de temperatura, humedad y presión conjuntamente con el sistema AWOS del Aeropuerto Mariscal Lamar, determinaron que los registros de temperatura divergen de los datos validados debido al efecto del calentamiento del sensor por acción directa de los rayos solares, por lo que fue necesario insolar los equipos para volver a medir las variables correspondientes, a pesar que los nodos sensores están fabricados para ser dispuestos a la intemperie. Por tal motivo se recomienda que para próximas mediciones, es indispensable colocar los nodos sensores a la sombra o con una cubierta como fue el caso de este trabajo.

Las pruebas de medición de ruido con el sonómetro calibrado y el sensor adquirido, evidenciaron el mismo comportamiento en los registros para diversos niveles de ruido

de impacto, considerando que para ambientes silenciosos, dicho sensor debido a su construcción, no mide por debajo de los 50 dB.

Dado el análisis expuesto en este trabajo, fue posible calcular un valor de corrección de mediciones para las variables atmosféricas y ruido de impacto, las cuales se ajustaron adecuadamente a las mediciones certificadas, no así en el caso de las mediciones de gases contaminantes.

En cuanto a las mediciones de gases contaminantes, como se evidenció en el Capítulo IV, el sensor de ozono (O₃) sufrió un daño físico que ocasionó que este se descalibre alterando ampliamente la exactitud de sus mediciones, durante la instalación de los nodos para las pruebas en el aeropuerto, es así que los índices de calidad del aire indicados en la Tabla 5.4 presentan valores no ligados a la realidad. Sin embargo, no se debe descartar que el método de medición de la concentración de gas que emplea la estación es distinto a la operación de un sensor electroquímico, además de que el amplio radio de medición de la estación (4 Km aproximadamente) también son factores que podrían diferenciar los datos entre sus equipos y sensores de gases contaminantes de bajo costo. Estas observaciones pudieron comprobarse gracias a la colaboración de la EMOV quien permitió colocar los nodos sensores en la estación de monitoreo automático y poder comparar los datos registrados en un mismo periodo de tiempo.

Para futuras aplicaciones de WSN en zonas urbanas o espacios amplios, se recomienda emplear un protocolo de comunicación que utilice la red celular debido a que pese al alcance de protocolos de radiofrecuencia, esta comunicación se ve afectada por obstáculos físicos que interrumpan su línea de vista, limitando el alcance y transferencia de datos.

Debido a la poca cantidad de registros existentes de los nodos sensores en la base de datos creada, actualmente no es posible realizar predicciones en base a la información levantada; por lo que para un futuro trabajo, cuando se determine mayor precisión en las mediciones y se disponga de un mayor volumen de datos, será posible construir modelos de predicción para cada una de estos contaminantes.

Actualmente la empresa Libelium ha lanzado al mercado una nueva versión de los equipos descritos en esta publicación, que permite incluir en un mismo nodo, sensores de gases contaminantes, variables atmosféricas, y ruido; por este motivo, para una

expansión de la red planteada se recomienda utilizar estos equipos que vinculan en uno solo, los sensores de interés de este estudio.

Adicionalmente, este trabajo reflejó un potencial servicio que la Universidad puede brindar a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) mediante la investigación y ejecución de proyectos, generando convenios con empresas municipales, con la finalidad de difundir información de interés público relacionada con el estado de la calidad del aire.

La vinculación con la escuela de Ingeniería Electrónica fue fundamental por la relación existente entre tecnología y herramientas para legislación ambiental. Este estudio abre una línea de investigación relacionado con las WSN e IoT con la finalidad de que a futuro el desarrollo de software e implementación de hardware sean producto de esta escuela. Sin embargo, se debe tomar a consideración que en base al estado del arte, estos equipos servirían únicamente para la generación de índices referenciales de la calidad del aire, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

- Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 393-422.
- Alkhatib, A., & Baicher, G. (2012). Wireless sensor network architecture. *International Conference on Computer networks and Communication Systems* (págs. 11-15). ICNCS.
- All Weather Inc. (2014). *Automated Weather Observing System (AWOS)*. Obtenido de <http://www.allweatherinc.com/international-automated-weather-observation-system/#tabs=754>
- All Weather Inc. (2014). *Barometric Pressure*. Obtenido de Meteorological Sensors: <http://www.allweatherinc.com/meteorological-sensors/barometric-pressure-sensors/#tabs=1128>
- All Weather Inc. (2014). *Temperature & Relative Humidity*. Obtenido de Meteorological Sensors: <http://www.allweatherinc.com/meteorological-sensors/temperature-sensor/#tabs=1151>
- Aziz, A., Sekercioglu, Y., Fitzpatrick, P., & Ivanovich, M. (2013). A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks. *IEEE communications surveys & tutorials*, 121-144.
- Baig, M., & Gholamhosseini, H. (2013). Smart health monitoring systems: an overview of design and modeling. *Journal of medical systems*, Journal of medical systems.
- Balarezo, P., & Tapia, E. (9 de Agosto de 2011). *Nueva estación de monitoreo ambiental*. Obtenido de Sitio web de Diario El Tiempo: <http://www.eltiempo.com.ec/noticias-cuenca/75245-nueva-estacion-de-monitoreo-ambiental/>
- Barsan, N., Koziej, D., & Weimar, U. (2007). Metal oxide-based gas sensor research: How to? *Sensors and Actuators B: Chemical*, 121(1), 18-35.
- Briscoe, N. (2000). Understanding the OSI 7-layer model. *PC Network Advisor*.

- Chokshi, J. (2014). *Gas Sensors*. Obtenido de A. James Clark School of Engineering, University of Maryland: www.eng.umd.edu/~nsw/enpm808b/chokshi.ppt
- Coastal Environmental Systems, Inc. (2015). *Aviación AWOS*. Obtenido de http://www.coastalenvironmental.com/downloads/coastal_aviationbro_5-15-15_spanish-web.pdf
- Diario El Mundo. (2015). *Libelium monitoriza viñas en Suiza con sensores para predecir plagas*. Obtenido de INNOVADORES Internet de las Cosas: <http://www.elmundo.es/economia/2015/10/28/563103fa46163f113d8b45d6.html>
- Diario El Telégrafo. (29 de Abril de 2014). *La contaminación del aire en Cuenca es atribuida a los carros*. Obtenido de Sitio web de Diario El Telégrafo: <http://www.letelegrafo.com.ec/noticias/regional-sur/1/la-contaminacion-del-aire-en-cuenca-es-atribuida-a-los-carros>
- Diario El Tiempo. (2015 de Diciembre de 2015). *Cada año Cuenca tiene más autos*. Obtenido de Sitio web de Diario El Tiempo: <http://www.eltiempo.com.ec/noticias-cuenca/174029-cada-aa-o-cuenca-tiene-ma-s-autos/>
- Diario El Tiempo. (6 de Enero de 2016). *Este año habrá 580.000 habitantes en Cuenca*. Obtenido de Sitio web de Diario El Tiempo: <http://www.eltiempo.com.ec/noticias-cuenca/155505-este-aa-o-habra-580-000-habitantes-en-cuenca/>
- Digi International. (2016). *XBee® 802.15.4 Protocol Comparison*. Obtenido de <https://www.digi.com/pdf/xbee-802-15-4-protocol-comparison>
- Fischione, C. (2016). *An introduction to Wireless Sensor Networks*. Royal Institute of technology.
- Goyal, D., & Tripathy, M. (2012). Routing protocols in wireless sensor networks: a survey. *Second International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies* (págs. 474-480). IEEE.

- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 1645-1660.
- IEEE. (2011). *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*. Obtenido de IEEE STANDARDS ASSOCIATION:
<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2015.pdf>
- IERSE. (2016). *INSTITUTO DE ESTUDIOS DE RÉGIMEN SECCIONAL DEL ECUADOR*. Obtenido de Sitio Web del IERSE:
<http://gis.uazuay.edu.ec/ide2015/>
- IERSE. (2016). *Sistema de Monitoreo de Rudo Ambiente en Cuenca*. Obtenido de <http://gis.uazuay.edu.ec/ide2015/ruido.php>
- Ising, H., & Kruppa, B. (2004). Health effects caused by noise : Evidence in the literature from the past 25 years. *Noise Health*, 6:5-13.
- Jovanov, E., Milenkovic, A., Otto, C., & De Groen, P. (2005). A wireless body area network of intelligent motion sensors for computer assisted physical rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2(1).
- Kumar, V., Jain, A., & Barwal, P. (2014). Wireless sensor networks: security issues, challenges and solutions. *International Journal of Information and Computation Technology*, 859-868.
- Kumbhar, M. (2012). Wireless sensor networks: A solution for smart transportation. *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, 3(4).
- Kurniawan, A. (2014). *XBee IEEE 802.15.4 Programming*. PE Press.
- Kyusakov, R., Eliasson, J., Delsing, J., Van Deventer, J., & Gustafsson, J. (2013). Integration of wireless sensor and actuator nodes with IT infrastructure using service-oriented architecture. *Transactions on industrial informatics* (págs. 43-51). IEEE .
- Latré, B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C., & Demeester, P. (2011). A survey on wireless body area networks. *Wireless Networks* 17, 1-18.

Libelium. (Noviembre de 2014). *Meshlium Xtreme - Datasheet*. Obtenido de Meshlium v3.8 Documentation:
http://www.libelium.com/downloads/documentation/v12/meshlium_datasheet.pdf

Libelium. (Enero de 2014). *Waspnote IDE User Guide*. Obtenido de Development v12 documentation:
http://www.libelium.com/downloads/documentation/v12/waspnote_ide_user_guide.pdf

Libelium. (Abril de 2015). *Waspnote Plug & Sense! Case Studies*. Obtenido de Smart Farming: Monitoring Horses and Equine Facility Management with Waspnote: <http://www.libelium.com/smart-farming-monitoring-horses-equine-facility-management-waspnote/#!prettyPhoto>

Libelium. (Marzo de 2015). *Waspnote Plug & Sense! Case Studies*. Obtenido de Smart Factory: Reducing Maintenance Costs and Ensuring Quality in the Manufacturing Process: <http://www.libelium.com/smart-factory-reducing-maintenance-costs-ensuring-quality-manufacturing-process/>

Libelium. (Enero de 2016). *Waspnote Plug & Sense! Case Studies*. Obtenido de Monitoring weather conditions to prevent pest in olives:
<http://www.libelium.com/monitoring-weather-conditions-to-prevent-pest-in-olives/>

Libelium. (Febrero de 2016). *Waspnote Plug & Sense! Sensor Guide*. Obtenido de Development v12 documentation:
http://www.libelium.com/downloads/documentation/v12/waspnote_plug_and_sense_sensors_guide.pdf

Libelium. (Julio de 2016). *Waspnote Plug & Sense! Technical Guide*. Obtenido de Development v12 documentation:
http://www.libelium.com/downloads/documentation/v12/waspnote_technical_guide.pdf

Libelium. (Julio de 2016). *Waspnote Plug & Sense! Technical Guide*. Obtenido de Development v12 documentation:

http://www.libelium.com/downloads/documentation/v12/waspmote_plug_and_sense_technical_guide.pdf

- Mahgoub, I., & Ilyas, M. (2016). *Sensor network protocols*. CRC press.
- Mahmood, A., Javaid, N., & Razzaq, S. (2015). A review of wireless communications for smart grid. *Renewable and sustainable energy reviews*, 248-260.
- Maksimović, M., Vujović, V., Davidović, N., Milošević, V., & Perišić, B. (2014). Raspberry Pi as Internet of things hardware: performances and constraints. *Design issues*, 3-8.
- Malchaire, J. (Junio de 2006). *SOUND MEASURING INSTRUMENTS*. (U. C. (UCL), Ed.) Obtenido de World Health Organization: http://www.who.int/occupational_health/publications/noise6.pdf
- Manzoor, R. (2010). Energy efficient localization in wireless sensor networks using noisy measurements. *ICUPC'96*, 827-831.
- Martínez G., J., & Delgado I., O. (2015). *Registro de Ruido Ambiente 2015, en los 30 sitios de monitoreo de la ciudad de Cuenca*. Obtenido de IERSE: PROGRAMAS Y PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN: http://gis.uazuay.edu.ec/ide2015/monitoreo_ruido.php
- Martinez Gavilanes, J. (2017). Evaluación de ruido en Cuenca a 2015. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 9(15).
- Ministerio del Ambiente. (10 de Septiembre de 2004). Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. *Registro Oficial Suplemento # 418*. Ecuador.
- Ministerio del Ambiente. (4 de Noviembre de 2015). Registro Oficial N° 387. Quito, Ecuador.
- Mitchell, W. J. (2007). Ciudades inteligentes. *La Sociedad del Conocimiento*(5), 4-9. Obtenido de <http://www.uoc.edu/uocpapers/5/dt/esp/mitchell.pdf>
- Municipalidad de Cuenca. (2015). *Informe de Calidad Aire Cuenca- 2015*. Obtenido de Sitio web de la EMOV:

http://www.emov.gob.ec/sites/default/files/Calidad%20del%20Aire%20final%202015_0.pdf

OMM. (1992). *International Meteorological Vocabulary*. (182).

OMM. (2010). *Guide to the Global Observing System*. (488).

OMM. (2014). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*.

Obtenido de http://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3121

Pachecho, D., & Samaniego, P. (2014). *Publicación en IDE de los registros de medición de ruido ambiente a través de dispositivos móviles*. Obtenido de

IERSE: PROGRAMAS Y PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN:

http://gis.uazuay.edu.ec/ide2015/fortalecimiento_infraestructura.php

Padmavathi, G., Shanmugapriya, D., & Kalaivani, M. (2010). A study on vehicle detection and tracking using wireless sensor networks. *Wireless Sensor Network*, 173.

Parai, M., Das, B., & Das, G. (2013). An overview of microcontroller unit: From proper selection to specific application. *International Journal of Soft Computing*, 2.

Paredes, K. (31 de Enero de 2015). *Cuenca constituye la ciudad que más cautiva a los jubilados extranjeros*. Obtenido de Sitio web de Diario El Telégrafo: <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/palabra-mayor/17/cuenca-constituye-la-ciudad-que-mas-cautiva-a-los-jubilados-extranjeros>

Rinner, B., & Wolf, W. (2008). An introduction to distributed smart cameras. *Proceedings of the IEEE*, 1565-1575.

Sanchez, L., Muñoz, L., Galache, J., Sotres, P., Santana, J., Gutierrez, V., & Pfisterer, D. (2014). SmartSantander: IoT experimentation over a smart city testbed. *Computer Networks*, 217-238.

Sellers W., C., Pachecho, D., & Delgado I., O. (2015). *Patrones de distribución espacial de contaminantes atmosféricos en el perímetro urbano de la ciudad de Cuenca*. . Obtenido de IERSE: PROGRAMAS Y PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN:

http://gis.uazuay.edu.ec/ide2015/patrones_distribucion.php

- Sellers, C. A. (2013). *Publicación de los contaminantes atmosféricos de la estación de monitoreo en tiempo real de la ciudad de Cuenca, utilizando servicios estándares OGC*. Cuenca: Universidad del Azuay.
- Shin, T., Chin, S., Yoon, S., & Kwon, S. (2011). A service-oriented integrated information framework for RFID/WSN-based intelligent construction supply chain management. *Automation in Construction*, 706-715.
- Simon, G., Maróti, M., Lédeczi, Á., Balogh, G., Kusy, B., Nádas, A., & Frampton, K. (2004). Sensor network-based countersniper system. *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems* (págs. 1-12). ACM.
- Suryadevara, N., Mukhopadhyay, S., Kelly, S., & Gill, S. (2015). WSN-based smart sensors and actuator for power management in intelligent buildings. *Transactions On Mechatronics* (págs. 564-571). IEEE/ASME.
- The Huffington Post. (7 de Mayo de 2014). 37 ciudades españolas superan los niveles recomendados de contaminación. *The Huffington Post*.
- U.S. Environmental Protection Agency. (Junio de 2014). *Air Sensor Guidebook*. Obtenido de Air Quality Sensors: <https://developer.epa.gov/air-quality-sensors/>
- U.S. Environmental Protection Agency. (Julio de 2016). *Air Quality Index (AQI) Basics*. Obtenido de Sitio Web AirNow: <https://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>
- Universidad del Azuay. (s.f.). *IERSE: Asistencia técnica y consultoría*. Recuperado el Agosto de 2016, de <http://www.uazuay.edu.ec/ierse/consultoria.htm>
- Vujović, V., & Maksimović, M. (2014). Raspberry Pi as a wireless sensor node: performances and constraints. *37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics* (págs. 1013-1018). IEEE.
- Weber, V. (2009). Smart sensor networks: Technologies and applications for green growth. *The Organization for Economic Cooperation and Development*.

- Werner-Allen, G., Lorincz, K., Ruiz, M., Marcillo, O., Johnson, J., Lees, J., & Welsh, M. (2006). Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE internet computing*, 18-25.
- Yamazoe, N. (2005). Toward innovations of gas sensor technology. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 108(1), 2-14.
- Zhang, P., Sadler, C., Lyon, M., & Martonosi, M. (2004). Hardware design experiences in ZebraNet. *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems* (págs. 227-238). ACM.