



1859

**UNL**

Universidad  
Nacional  
de Loja

**FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS  
NATURALES NO RENOVABLES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**“ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE  
SENSORES PARA EL MONITOREO DEL CO<sub>2</sub> EN EL  
AIRE Y NIVELES DE RUIDO EN EL CASCO URBANO  
DE LA CIUDAD DE LOJA.”**

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

**AUTOR:**

*Angel Paul Garrochamba Alulima*

**DIRECTOR:**

*Ing. Ángel José Ordóñez Mendieta Mg. Sc.*

*Loja, Ecuador*

*2019*

## CERTIFICACIÓN

Ing. Ángel José Ordóñez Mendieta, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

### CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en **“ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA EL MONITOREO DEL CO2 EN EL AIRE Y NIVELES DE RUIDO EN EL CASCO URBANO DE LA CIUDAD DE LOJA.”**, previo a la obtención del título de Ingeniero (a) en **Electrónica y Telecomunicaciones**, realizado por el señor egresado: **Angel Paul Garrochamba Alulima**, mismo que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 07 de agosto de 2019



Ing. Ángel José Ordóñez Mendieta, Mg. Sc

DIRECTOR DE TESIS

## AUTORÍA

Yo **ANGEL PAUL GARROCHAMBA ALULIMA** declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional - Biblioteca Virtual.

**Firma:**



**Cédula:** 1105886707

**Fecha:** 19/08/2019

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.**

Yo, **ANGEL PAUL GARROCHAMBA ALULIMA**, declaro ser autor de la tesis titulada: **“ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA EL MONITOREO DEL CO2 EN EL AIRE Y NIVELES DE RUIDO EN EL CASCO URBANO DE LA CIUDAD DE LOJA”**, como requisito para optar al grado de: **INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la reproducción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los diecinueve días del mes de agosto del dos mil diecinueve.



**Firma:**

**Autor:** Angel Paul Garrochamba Alulima.

**Cédula:** 1105886707

**Dirección:** Loja (Barrio Turupamba)

**Correo Electrónico:** [apgarrochambaa@unl.edu.ec](mailto:apgarrochambaa@unl.edu.ec)

**Teléfono:** 072724479

**Celular:** 0980907857

**DATOS COMPLEMENTARIOS**

**Director de Tesis:** Ing. Ángel José Ordóñez Mendieta, Mg. Sc.

**Tribunal de Grado:** Ing. John Jossimar Tucker Yépez, Mg. Sc,

Ing. Santiago Abraham Medina León, Mg. Sc.

Ing. Marcelo Fernando Valdivieso Condolo, Mg. Sc.



## **DEDICATORIA**

*A mis padres Saúl y Gloria, quienes han sido mi motivación permanente y mis mayores referentes de vida, y gracias a su ejemplo de constancia, responsabilidad, dedicación y trabajo duro, ha sido posible cumplir esta meta.*

*A mis hermanos, quienes me han apoyado y han estado siempre conmigo en cada etapa de mi vida.*

*A mis amigos, que siempre estuvieron allí presentes en esta etapa de mi vida.*

***Angel Paul Garrochamba Alulima***

## AGRADECIMIENTO

*Quiero expresar mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Loja, a sus autoridades y docentes de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, por la formación académica y profesional recibidas en las aulas universitarias.*

*Agradezco profundamente a mis padres y hermanos por el apoyo incondicional en mi formación académica.*

*Un agradecimiento especial al Ing. Ángel José Ordóñez Mendieta, por ser un excelente tutor y por su compromiso y su excelente trabajo como guía hasta su finalización.*

*Finalmente, hago extensivo este agradecimiento a mi familia y a cada una de las personas que de alguna u otra manera me orientaron en forma oportuna y desinteresada.*

***Angel Paul Garrochamba Alulima***

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	I
AUTORÍA .....	II
CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	VI
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
1. TÍTULO.....	1
2. RESUMEN .....	2
ABSTRACT.....	3
3. INTRODUCCIÓN.....	4
4. REVISIÓN DE LITERATURA .....	6
4.1. REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES .....	6
4.1.1. Introducción a las Redes Inalámbricas de Sensores .....	6
4.1.2. Elementos de las Redes Inalámbricas de Sensores .....	9
4.1.3. Características de las Redes Inalámbricas de Sensores .....	11
4.1.4. Arquitectura y Topología de las Redes Inalámbricas de Sensores .....	12
4.1.5. Aplicaciones de las Redes Inalámbricas de Sensores .....	15
4.1.6. Protocolos de la Redes Inalámbricas de Sensores .....	18
4.1.6.1. Protocolos de la Capa Física .....	19
4.1.6.2. Protocolos de la Subcapa MAC .....	19
4.1.6.3. Protocolos de la Capa de Red .....	20

4.1.6.4.	Protocolos de Soporte de Aplicación.....	21
4.1.7.	Estándares de las Redes Inalámbricas de Sensores.....	21
4.1.7.1.	Bluetooth – IEEE 802.15.1 .....	23
4.1.7.2.	Wifi - IEE 802.11 (Wireless Fidelity).....	23
4.1.7.3.	Zigbee – IEE 802.15.4 .....	24
4.1.7.4.	Wimax – IEEE 802.16 (Worldwide Interoperability for Microwave Access) 24	
4.1.7.5.	Tecnología LoRa.....	25
4.1.7.6.	Análisis comparativo de las Tecnologías Inalámbricas .....	25
4.2.	REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES PARA EL MONITOREO AMBIENTAL .....	27
4.2.1.	Características Generales .....	27
4.2.2.	Escenarios de Aplicación.....	28
4.2.3.	Monitoreo de la Contaminación Ambiental.....	29
4.2.3.1.	Monitoreo de la calidad del aire.....	30
4.2.3.2.	Monitoreo de la contaminación acústica.....	38
4.2.3.3.	Monitoreo ambiental en América Latina .....	43
4.2.3.4.	Monitoreo ambiental en Ecuador y la Ciudad de Loja .....	44
4.2.4.	Simuladores de Redes Inalámbricas .....	46
4.2.4.1.	Comparación de Simuladores de Redes Inalámbricas de Sensores	47
4.2.4.2.	Simulador RIVERBED MODELER.....	48
4.2.4.3.	Parámetros de evaluación en la simulación de red .....	49
4.2.5.	Estándar ZIGBEE (IEEE 802.15.4).....	50
4.2.5.1.	Definición .....	50
4.2.5.2.	Capas del protocolo Zigbee .....	52
4.2.5.3.	Módulos XBee – Zigbee .....	54
4.3.	ÁREA DE ESTUDIO.....	57

4.3.1.	Aspectos Generales.....	57
4.3.2.	Aspectos Socioeconómicos.....	58
4.3.2.1.	Demografía .....	58
4.3.2.2.	Principales Actividades Económicas .....	58
4.3.2.3.	Infraestructura.....	59
4.3.2.4.	Transporte y Vialidad .....	60
4.3.3.	Avances Tecnológicos .....	60
4.3.3.1.	Indicadores estadísticos de tecnología en el Cantón Loja .....	60
4.3.3.2.	Empresas tecnológicas en la ciudad.....	61
5.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	63
5.1.	Materiales.....	63
5.1.1.	Software utilizado .....	63
5.1.1.1.	Software de simulación.....	63
5.1.1.2.	Software para la configuración del nodo .....	64
5.1.1.3.	Software para la recolección de datos.....	65
5.1.1.4.	Software para la interfaz de monitoreo .....	66
5.2.	Métodos.....	66
5.2.1.	Método Científico .....	67
5.2.2.	Método Deductivo .....	67
5.2.3.	Método Analítico .....	67
5.2.4.	Método Inductivo.....	67
5.3.	Plan de Trabajo y Desarrollo.....	67
6.	RESULTADOS .....	71
6.1.	Planificación y Diseño de la Red .....	71
6.1.1.	Análisis y delimitación geográfica.....	71
6.1.2.	Diseño de la red .....	77
6.1.2.1.	Análisis del ambiente de operación de la red.....	78

6.1.2.2.	Diseño del nodo sensor .....	81
6.1.2.3.	Diseño del nodo coordinador .....	84
6.1.2.4.	Análisis matemático de los enlaces entre nodos .....	85
6.1.3.	Componentes de la red.....	88
6.1.3.1.	Nodo sensor .....	88
6.1.3.2.	Nodo coordinador .....	93
6.2.	Desarrollo y configuración de la red.....	94
6.2.1.	Configuración de los nodos .....	94
6.2.1.1.	Configuración del nodo sensor .....	95
6.2.1.2.	Configuración del nodo coordinador .....	98
6.2.2.	Sistema de adquisición de datos .....	99
6.2.2.1.	Elaboración de la interfaz de monitoreo .....	99
6.2.2.2.	Funcionamiento general de la interfaz.....	101
6.2.2.3.	Almacenamiento de datos.....	105
6.2.2.4.	Seguridad .....	106
6.3.	Simulación y Evaluación.....	106
6.3.1.	Simulación de la red inalámbrica de sensores .....	106
6.3.2.	Evaluación del funcionamiento de la red.....	113
6.3.2.1.	Pruebas de recepción de la señal.....	114
6.3.2.2.	Validación del diseño de los nodos sensores .....	117
6.3.2.3.	Pruebas del diseño de la red.....	120
6.3.2.4.	Interpretación de la información obtenida .....	126
6.3.2.5.	Análisis económico de la implementación del sistema.....	129
7.	DISCUSIÓN.....	131
8.	CONCLUSIONES.....	135
9.	RECOMENDACIONES .....	137
10.	BIBLIOGRAFÍA .....	138

11. ANEXOS .....	146
ANEXO I: GLOSARIO DE ACRÓNIMOS.....	146
ANEXO II: INSTALACIÓN DEL SIMULADOR DE REDES.....	149
ANEXO III: PRUEBAS DE RECEPCIÓN DE SEÑAL .....	151
ANEXO IV: CONSTRUCCIÓN DEL NODO SENSOR PARA LA EVALUACIÓN PRÁCTICA .....	152
ANEXO V: CONSTRUCCIÓN DEL NODO COORDINADOR PARA LA EVALUACIÓN PRÁCTICA.....	154
ANEXO VI: EVALUACIÓN PRÁCTICA.....	155
ANEXO VII: CONDICIONES TÉCNICAS PARA EL MONITOREO EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	157
ANEXO VII: HOJAS DE DATOS .....	159

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1:</b> Las Redes Inalámbricas de Sensores y el Internet de las cosas.....	6
<b>Ilustración 2:</b> Sistema de Vigilancia Sónica, SOSUS.....	8
<b>Ilustración 3:</b> Dispositivo autónomo de una red inalámbrica de sensores.....	9
<b>Ilustración 4:</b> Arquitectura de una Red Inalámbrica de Sensores.....	13
<b>Ilustración 5:</b> Topologías de las Redes Inalámbricas de Sensores: a) Topología Estrella, b) Topología Malla, c) Topología Árbol y d) Topología Híbrida .....	14
<b>Ilustración 6:</b> Aplicaciones de las Redes Inalámbricas de Sensores.....	16
<b>Ilustración 7:</b> Comparación Modelo OSI vs Modelo de las Redes Inalámbricas de Sensores.....	18
<b>Ilustración 8:</b> Tecnologías Inalámbricas .....	22
<b>Ilustración 9:</b> Tipos de contaminación del aire: a) Fuentes fijas, b) Fuentes móviles y c) Fuentes Naturales .....	30
<b>Ilustración 10:</b> Crecimiento de la concentración de CO <sub>2</sub> en el planeta.....	32
<b>Ilustración 11:</b> Efectos en el ser humano de los distintos niveles de CO <sub>2</sub> en el aire....	33
<b>Ilustración 12:</b> Sensor de CO <sub>2</sub> : MQ135 .....	34
<b>Ilustración 13:</b> Sensor de CO <sub>2</sub> : TGS4161 .....	35
<b>Ilustración 14:</b> Sensor de CO <sub>2</sub> : MG 811 .....	35
<b>Ilustración 15:</b> Sensor de CO <sub>2</sub> : CCS811 .....	36
<b>Ilustración 16:</b> Contaminación acústica.....	38
<b>Ilustración 17:</b> Sensor de niveles de ruido: KY-038.....	41
<b>Ilustración 18:</b> Sensor de niveles de ruido: Detector de sonido Sparkfun.....	41
<b>Ilustración 19:</b> Sensor de niveles de ruido: U-Sound .....	42
<b>Ilustración 20:</b> Ciudades más contaminadas de Latinoamérica.....	43
<b>Ilustración 21:</b> Proyectos de monitoreo ambiental en América Latina.....	44
<b>Ilustración 22:</b> Niveles de Contaminación atmosférica en Ecuador .....	45
<b>Ilustración 23:</b> Proyectos de monitorización ambiental en Ecuador.....	45
<b>Ilustración 24:</b> Software de Riverbed Modeler.....	48
<b>Ilustración 25:</b> Canales disponibles para el protocolo IEEE 802.15.4.....	51
<b>Ilustración 26:</b> Capas de operación de Zigbee en el modelo OSI.....	52
<b>Ilustración 27:</b> Módulo XBee .....	54
<b>Ilustración 28:</b> Tipos de antenas XBee .....	56
<b>Ilustración 29:</b> Ubicación del área de estudio.....	58



<b>Ilustración 30:</b> Polos de mayor actividad en la ciudad de Loja .....	59
<b>Ilustración 31:</b> Interfaz gráfica del software Riverbed Modeler Academic.....	63
<b>Ilustración 32:</b> Interfaz gráfica del software XCTU .....	64
<b>Ilustración 33:</b> Interfaz gráfica del software Aduino IDE .....	65
<b>Ilustración 34:</b> Interfaz gráfica del software VS Express 2017 .....	66
<b>Ilustración 35:</b> Planificación y desarrollo del proyecto .....	68
<b>Ilustración 36:</b> Escenario de estudio para la Red Inalámbrica de Sensores.....	72
<b>Ilustración 37:</b> Disposición de los puntos de muestreo para la Red de Sensores para el monitoreo de ruido sobre el escenario de estudio.....	75
<b>Ilustración 38:</b> Disposición de los puntos de muestreo de la Red de Sensores para el monitoreo del CO2 en el aire sobre el escenario de estudio.....	76
<b>Ilustración 39:</b> Esquema general de los puntos de muestreo de la Red Inalámbrica de Sensores .....	77
<b>Ilustración 40:</b> Número de nodos de la Red Inalámbrica de Sensores.....	78
<b>Ilustración 41:</b> Ubicación de elementos en la red diseñada.....	80
<b>Ilustración 42:</b> Diagrama de bloques del nodo sensor de CO2.....	82
<b>Ilustración 43:</b> Diagrama de bloques del nodo sensor de niveles de ruido.....	82
<b>Ilustración 44:</b> Diagrama de bloques del nodo sensor con ambos tipos de sensores....	83
<b>Ilustración 45:</b> Diagrama de flujo para el funcionamiento del nodo sensor .....	83
<b>Ilustración 46:</b> Diagrama de bloques del nodo coordinador .....	84
<b>Ilustración 47:</b> Diagrama de flujo para el funcionamiento del nodo coordinador .....	85
<b>Ilustración 48:</b> Componentes del Nodo Sensor.....	88
<b>Ilustración 49:</b> Arduino Uno, elemento de procesamiento .....	89
<b>Ilustración 50:</b> Tarjeta Shield Xbee pro v1.1.....	90
<b>Ilustración 51:</b> Módulo Xbee Pro S2B.....	90
<b>Ilustración 52:</b> a) Bateria First Power, b) Batería UitraFlrc c) Batería Super .....	92
<b>Ilustración 53:</b> Elementos que conforman el Nodo Coordinador .....	93
<b>Ilustración 54:</b> Módulo USB Explorer.....	94
<b>Ilustración 55:</b> Configuración del bus serial USB .....	95
<b>Ilustración 56:</b> Pantalla de configuración del nodo sensor .....	96
<b>Ilustración 57:</b> Configuración para el procesamiento realizado en uno de los nodos sensores.....	97

<b>Ilustración 58:</b> Diagrama de flujo del procesamiento realizado por el elemento de procesamiento.....	97
<b>Ilustración 59:</b> Pantalla de configuración del nodo coordinador .....	98
<b>Ilustración 60:</b> Recurso de puerto serie SerialPort en VS Express 2017 .....	100
<b>Ilustración 61:</b> Programación para el uso de SerialPort en VS Express 2017 .....	100
<b>Ilustración 62:</b> Programación para la lectura de datos en la interfaz gráfica .....	100
<b>Ilustración 63:</b> Interfaz gráfica de usuario - Ventana de Inicio .....	101
<b>Ilustración 64:</b> Interfaz gráfica de usuario – Ventana Iniciar Sesión.....	102
<b>Ilustración 65:</b> Interfaz gráfica de usuario - Ventana de Selección de zonas del área de estudio.....	102
<b>Ilustración 66:</b> Interfaz gráfica de usuario - Ventana Adquisición de datos WSN ..	103
<b>Ilustración 67:</b> Ingreso de datos del nodo coordinador.....	104
<b>Ilustración 68:</b> Interfaz gráfica de usuario - Ventana Registro .....	105
<b>Ilustración 69:</b> Almacenamiento de información en la base de datos.....	105
<b>Ilustración 70:</b> Inicio para simulación de la Red Inalámbrica de Sensores: a) Crear nuevo proyecto, b) Nombre del proyecto .....	107
<b>Ilustración 71:</b> Selección del área de trabajo para la simulación de la Red Inalámbrica de Sensores .....	107
<b>Ilustración 72:</b> Habilitación del protocolo Zigbee en el simulador para la Red Inalámbrica de Sensores .....	108
<b>Ilustración 73:</b> Paleta de componentes en el simulador Riverbed .....	108
<b>Ilustración 74:</b> Esquema de la Red Inalámbrica de Sensores en el simulador Riverbed .....	109
<b>Ilustración 75:</b> Visualización de la topología de red configurada en el simulador Riverbed.....	109
<b>Ilustración 76:</b> Parámetros de evaluación en la simulación de red, software Riverbed Modeler.....	110
<b>Ilustración 77:</b> Simulación de la topología Mesh de la red.....	111
<b>Ilustración 78:</b> Delay existente en la simulación de la red .....	111
<b>Ilustración 79:</b> Troughput o velocidad efectiva existente en la simulación de red.....	112
<b>Ilustración 80:</b> Tráfico recibido vs tráfico enviado en bits/segundo en la simulación de red .....	112

<b>Ilustración 81:</b> Tráfico recibido vs tráfico enviado en paquetes/segundo en la simulación de red .....	112
<b>Ilustración 82:</b> Interfaz gráfica del modo Range Test del software X-CTU.....	114
<b>Ilustración 83:</b> Pruebas de Recepción de Señal: a) Prueba a 100m, b) Prueba a 200m y c) Prueba a 300m.....	116
<b>Ilustración 84:</b> Validación de datos obtenidos a) Por el detector de sonido Sparkfun b) Por la app Sound Analyzer .....	118
<b>Ilustración 85:</b> Validación de datos obtenidos por el sensor CCS811 .....	119
<b>Ilustración 86:</b> Validación de datos obtenidos por el observatorio Mauna Loa .....	120
<b>Ilustración 87:</b> Prueba de diseño - Topología lógica y características.....	121
<b>Ilustración 88:</b> Pruebas de diseño - Topología física.....	121
<b>Ilustración 89:</b> Infraestructura física del casco urbano de la ciudad de Loja.....	122
<b>Ilustración 90:</b> Selección del puerto COM serie en la interfaz gráfica de monitoreo.	123
<b>Ilustración 91:</b> Mediciones de CO2 y ruido realizadas en el nodo sensor 1, Fecha: 28/07/2019 .....	124
<b>Ilustración 92:</b> Mediciones de CO2 y ruido realizadas en el nodo sensor 1, Fecha: 29/07/2019 .....	124
<b>Ilustración 93:</b> Mediciones de ruido realizadas en el nodo sensor 2, Fecha: 28/07/2019 .....	125
<b>Ilustración 94:</b> Mediciones de ruido realizadas en el nodo sensor 2, Fecha: 29/07/2019 .....	125
<b>Ilustración 95:</b> Medición de niveles de CO2 a) Fecha 28/07/2019 y b) Fecha 29/07/2019 .....	127
<b>Ilustración 96:</b> Medición de niveles de Ruido a) Fecha 28/07/2019 y b) Fecha 29/07/2019 .....	128
<b>Ilustración 97:</b> Página de descarga del Software Riverbed.....	149
<b>Ilustración 98:</b> Pantalla de instalación del software Riverbed .....	149
<b>Ilustración 99:</b> Activación del software Riverbed .....	150
<b>Ilustración 100:</b> Confirmación de activación del software Riverbed .....	150
<b>Ilustración 101:</b> Prueba de recepción de señal.....	151
<b>Ilustración 102:</b> Dispositivos utilizados en el nodo sensor 1 para el monitoreo de CO2 .....	152

<b>Ilustración 103:</b> Dispositivos utilizados en el nodo sensor 2 para el monitoreo de Ruido .....	152
<b>Ilustración 104:</b> Montaje del nodo sensor 1 para el monitoreo de CO2 .....	153
<b>Ilustración 105:</b> Montaje del nodo sensor 2 para el monitoreo de Ruido .....	153
<b>Ilustración 106:</b> Dispositivos utilizados en el nodo coordinador.....	154
<b>Ilustración 107:</b> Montaje del nodo coordinador.....	154
<b>Ilustración 108:</b> Pruebas de funcionamiento del diseño de red .....	155
<b>Ilustración 109:</b> Pruebas de funcionamiento del domingo 28/07/2019 .....	155
<b>Ilustración 110:</b> Pruebas de funcionamiento del lunes 29/07/2019 .....	156
<b>Ilustración 111:</b> Consideraciones técnicas de distancia para la implementación .....	158
<b>Ilustración 112:</b> Consideraciones técnicas de altura para la implementación .....	158

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Características que definen una Red Inalámbrica de Sensores .....	11
<b>Tabla 2:</b> Ventajas y desventajas del modo centralizado en la subcapa MAC .....	19
<b>Tabla 3:</b> Comparación de características de estándares para Redes Inalámbricas de Sensores .....	25
<b>Tabla 4:</b> Escala de valoración.....	26
<b>Tabla 5:</b> Ponderación de eficiencia de las tecnologías de comunicación inalámbrica ..	26
<b>Tabla 6:</b> Fuentes de generación de CO2 en el aire en zonas urbanas.....	33
<b>Tabla 7:</b> Comparación de las características técnicas de los Sensores de CO2.....	37
<b>Tabla 8:</b> Ponderación de eficiencia de los sensores de CO2 .....	37
<b>Tabla 9:</b> Fuentes de generación de ruido urbano.....	39
<b>Tabla 10:</b> Niveles de ruido permitidos según la OMS .....	39
<b>Tabla 11:</b> Ejemplos de percepción sonora en actividades cotidianas.....	40
<b>Tabla 12:</b> Comparación de características técnicas de los sensores de niveles de ruido	42
<b>Tabla 13:</b> Ponderación de eficiencia de los Sensores de Ruido .....	42
<b>Tabla 14:</b> Comparación entre plataformas de simulación para Redes Inalámbricas de Sensores .....	47
<b>Tabla 15:</b> Ponderación de eficiencia de los simuladores de red.....	47
<b>Tabla 16:</b> Parámetros de evaluación en la simulación de una red Redes Inalámbricas de Sensores .....	49
<b>Tabla 17:</b> Frecuencias IEEE 802.15.4 .....	51
<b>Tabla 18:</b> Frecuencias de canales IEEE 802.15.4.....	52
<b>Tabla 19:</b> Características de seguridad del protocolo Zigbee.....	53
<b>Tabla 20:</b> Selección de zonas con mayor generación de ruido sobre la urbe lojana. ....	73
<b>Tabla 21:</b> Lista de intersecciones más congestionadas en la ciudad de Loja .....	74
<b>Tabla 22:</b> Selección de zonas con mayor generación de CO2 en la ciudad de Loja .....	75
<b>Tabla 23:</b> Organización de los nodos en la zona de estudio.....	79
<b>Tabla 24:</b> Características técnicas de la placa Arduino Uno .....	89
<b>Tabla 25:</b> Características técnicas de la tarjeta Shield Xbee Pro v1.1.....	90
<b>Tabla 26:</b> Características técnicas del módulo Xbee Pro S2B .....	90
<b>Tabla 27:</b> Consumo de energía por elementos de la Red Inalámbrica de Sensores .....	91
<b>Tabla 28:</b> Características técnicas de algunas baterías que se encuentran en el mercado .....	92

<b>Tabla 29:</b> Ponderación de eficiencia de las baterías.....	92
<b>Tabla 30:</b> Configuraciones del nodo sensor .....	96
<b>Tabla 31:</b> Configuraciones del nodo coordinador .....	98
<b>Tabla 32:</b> Descripción de las pestañas en la ventana Adquisición de datos WSN de la interfaz gráfica de usuario .....	103
<b>Tabla 33:</b> Resumen de los resultados obtenidos en la simulación de red.....	113
<b>Tabla 34:</b> Resultados de las pruebas de recepción de señal .....	116
<b>Tabla 35:</b> Horario para las mediciones de prueba del diseño .....	126
<b>Tabla 36:</b> Análisis presupuestario de los dispositivos del proyecto .....	129
<b>Tabla 37:</b> Análisis presupuestario de equipos y herramientas del proyecto.....	129
<b>Tabla 38:</b> Análisis económico del proyecto .....	130

## **1. TÍTULO**

**“ESTUDIO Y DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA  
EL MONITOREO DEL CO<sub>2</sub> EN EL AIRE Y NIVELES DE RUIDO EN EL  
CASCO URBANO DE LA CIUDAD DE LOJA.”**

## 2. RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el estudio y diseño de una red inalámbrica de sensores con el objetivo de monitorear las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el aire y los niveles de ruido del casco urbano de la ciudad de Loja. La investigación comenzó con el estudio de las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN), para determinar sus principales características, definir su funcionamiento, describir sus áreas de aplicación y establecer los requerimientos mínimos para una adecuada selección de dispositivos, tales como: velocidad de transmisión, número de nodos aceptados, la eficiencia energética y la seguridad de la red. De la misma manera, se analizó las diferentes tecnologías de soporte en base a varios estándares de comunicación, como: Bluetooth, Wifi, WiMAX, Zigbee y LoRa, de las cuales se seleccionó Zigbee por su costo y especificaciones técnicas que presenta, haciéndolo apto para este tipo de aplicación. Para determinar el escenario de monitoreo, se tomó en cuenta cinco escenarios del casco urbano lojano, los cuales presentan el mayor porcentaje de actividad socioeconómica, y de entre estos escenarios se eligió el centro de la ciudad, a partir de un análisis de factores que contribuyan a un correcto desarrollo del proyecto.

Para el diseño de la red inalámbrica, se realizó la simulación en el software Riverbed Modeler, con el objetivo de encontrar los parámetros de evaluación, como: la velocidad de transmisión, el retardo y los paquetes recibidos. Además, se diseñó los nodos sensores y el nodo coordinador, que permite el establecimiento y comunicación de la red, a través del módulo XBee PRO S2B, de la tecnología Zigbee.

Para evaluar la red diseñada, se realizó dos tipos de prueba: una prueba de nivel de potencia de recepción entre los nodos a diferentes distancias: 100, 200 y 300 metros de alcance, y la segunda prueba se realizó en base al funcionamiento de la red con el establecimiento de un nodo coordinador y dos nodos sensores, un nodo para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y el otro para el ruido. Para la visualización de los datos se ha desarrollado una interfaz gráfica de usuario HMI que hace posible la obtención de información en tiempo real acerca de las condiciones en la zona, a través del software VS Express 2017.



## ABSTRACT

In the present work, the study and design of a wireless sensors network work was carried out with the aim of monitoring CO<sub>2</sub> concentrations in the air and noise levels in the town center of the Loja city. The research began with the study of wireless sensors networks (WSN), to determinate their main characteristics, define their operation, describe their application areas and set minimum for an appropriate selection of devices, such as: transmission speed, number of nodes accepted, energy efficiency and network security. In the same way, different support technologies were analyzed in based on several communication standards such as: Bluetooth, WiFi, WiMAX, Zigbee and Lora, of which Zigbee was chosen for its cost and technical specifications it presents, making its fit for this type of application. To determinate the monitoring scenario, five scenarios in the town center of Loja was taken into account, which have the highest percentage of socio-economic activity, and among these scenarios was chosen the center of the city, based on an analysis of features that contribute to the correct development of the project. For the design of the wireless network, the simulation was carried out in the Riverbeb Modeler software, with the aim of finding the evaluation parameters such as: transmission speed, delay, and received packets. In addition, the coordinator node and the sensor nodes were designed, which allows the establishment and communication of the network, through the XBee PRO S2B module of the Zigbee technology.

To evaluated the designed network, two kinds of tests were performed: a receive power level test between nodes at different distances: 100, 200, 300 meters of range, the second test was performed based on the operation of the network with the establishment of a coordinator node and two sensors nodes, one node for CO<sub>2</sub> monitoring, and the other for noise. For the visualization of the data a Human-Machine Interface (HMI) has been developed that makes it possible to obtain real-time information about the conditions in the area, through the VS Express 2017 software.

### 3. INTRODUCCIÓN

El desarrollo y los avances de las Tecnologías de Información y Comunicación - TIC's, han permitido a la mayoría de personas e industrias realizar la automatización de procesos y optimización en el tiempo de ejecución de los mismos, para solucionar problemas de interés común que mejoren la calidad de vida de quienes las usan, constituyéndose un pilar fundamental para el desarrollo tecnológico de muchas áreas industriales y de interés social.

En los últimos años, la tecnología ha dado un gran salto con la creación de nuevos dispositivos y nuevos métodos de procesamiento de la información, de esto, no están exentas las comunicaciones inalámbricas, en donde las Redes Inalámbricas de Sensores, han desarrollado un amplio campo de estudio, permitiendo desde aplicaciones simples como monitoreo de variables en un invernadero, hasta complejas redes que monitorean estructuras en una ciudad y de manera autónoma.

Así mismo, los sistemas avanzados utilizados para mejorar y automatizar los procesos dentro de una ciudad juegan un papel de liderazgo esencial en el desarrollo, esto se refiere a la inclusión de nuevas tecnologías, ejemplo de este tipo son sistemas inteligentes de parqueo, control de tráfico, control de alumbrado público y otros, que permiten una aplicación amplia de las tecnologías de detección. Parte de estas tecnologías de detección, son las redes inalámbricas de sensores, consideradas como una tecnología en plena evolución, que tiene y prevé grandes investigaciones para su desarrollo y aplicación. Indiscutiblemente, son una tecnología nueva y revolucionaria, que cada día se perfecciona y crece a pasos agigantados, consta de altas capacidades en una infinidad de campos como: domótica, medicina, aplicaciones militares, aplicaciones ambientales, aplicaciones en estructuras, entre otras (Prensa CRC, 2016).

Gracias al gran aporte que realizan las redes inalámbricas de sensores y sumado a los avances tecnológicos existentes, el estudio y la implementación de redes inalámbricas de sensores especializados en el monitoreo de CO<sub>2</sub> y niveles de ruido en áreas ambientales y urbanas, representan una estrategia clave para contribuir con el medio ambiente y principalmente en el cuidado de la salud de las personas, ya que este tipo de redes se implementan con la única finalidad de monitorear y controlar estas variables ambientales,

que constituye prioridad a la cual se le debe poner una especial atención, que gracias a los avances tecnológicos y al estudio de proyectos de este tipo es posible hacerlo.

Por lo tanto, se estudió y diseñó una red inalámbrica de sensores para el monitoreo de las emisiones de CO<sub>2</sub> y contaminación auditiva, producida en la ciudad de Loja. Ante todo, se buscó obtener un diseño adaptable a la mayoría de los sectores en la ciudad, sin la necesidad de instalar grandes infraestructuras. De este modo, podemos monitorear y pre alertar de estas condiciones ambientales a los ciudadanos, que se emanan en los distintos sectores de la ciudad.

Para el desarrollo de todas las actividades planificadas para esta investigación se estructuraron los siguientes objetivos:

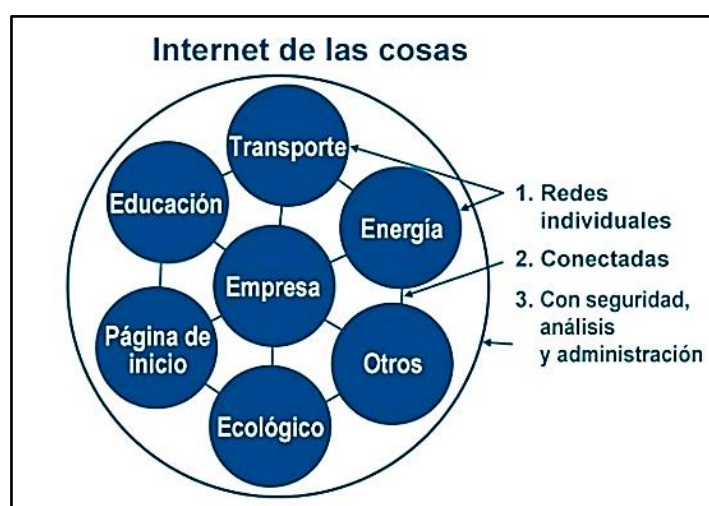
- Analizar el funcionamiento de las redes de sensores inalámbricos aplicados a la monitorización del CO<sub>2</sub> en el aire y niveles de ruido en ciudades.
- Realizar un análisis comparativo de tecnologías inalámbricas para los sensores inalámbricos usados en la monitorización de campos medioambientales para medir los niveles de concentración de CO<sub>2</sub> en el aire y contaminación acústica.
- Diseñar un sistema de sensores inalámbricos para el monitoreo de CO<sub>2</sub> en el aire y contaminación acústica en el casco urbano de la ciudad de Loja.

## 4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1. REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

#### 4.1.1. Introducción a las Redes Inalámbricas de Sensores

Con el surgimiento de las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), las Redes Inalámbricas de Sensores han tomado una importancia representativa dentro del campo tecnológico. Este tipo de redes abren la puerta para implementar miles de dispositivos pequeños, de bajos costos, sin cables y de bajo consumo energético, capaces de obtener información del entorno que los rodea y de poderla transmitir a un nodo central, formando así, redes semánticas de información.



**Ilustración 1:** Las Redes Inalámbricas de Sensores y el Internet de las cosas  
**Fuente:** (Evans, 2011)

Así mismo, una noción importante dentro de las Redes Inalámbricas de Sensores, es el Internet de las Cosas (IoT), debido a que, bajo este concepto se distingue al mundo de tal manera que los dispositivos, comúnmente usados por el ser humano, pueden ser identificados en la red; con el afán de mejorar y automatizar los procesos dentro de la ciudad a través de redes pequeñas y de bajo consumo. El crecimiento del Internet de las Cosas (IoT) y de las redes inalámbricas de sensores es acelerado y a través de nuevos dispositivos estandarizados, crean nuevas experiencias para el ser humano (Atzori, Iera, & Morabito, 2015), como por ejemplo en aplicaciones para hogares, y oficinas confortables, salud, vigilancia del medio ambiente y ciudades inteligentes, como se puede apreciar en la ilustración 1. El Internet de las Cosas (IoT) está formado por multitud de redes, por ello, puede considerarse una red de redes, de esta forma, a medida que

evoluciona, las redes estarán conectadas con la incorporación de funciones de análisis, seguridad y administración, para permitir que sea una herramienta aún más poderosa en el futuro (Kopetz, 2011) (Zanella, Bui, Castellani, Vangelista, & Zorzi, 2014).

### **Definición de Redes Inalámbricas de Sensores**

Las Redes Inalámbricas de Sensores o WSN (por sus siglas en inglés Wireless Sensor Network) son redes de cuantiosos dispositivos, conocidos como nodos sensores o motas (en inglés mote), que se comunican de manera inalámbrica a través de radiofrecuencia, es decir, no necesita un medio cableado para su comunicación, por lo que una de sus mayores ventajas es su extensión en lugares inaccesibles, topológicamente están distribuidos espacialmente en una determinada zona geográfica para un determinado fin, con el objetivo de controlar diversas condiciones o variables en distintos puntos de la zona, entre ellas tenemos la temperatura, el sonido, la vibración, la presión, el movimiento, los contaminantes y muchos más. Además, de ser redes autónomas, capaces de comunicarse entre sí, recoger y distribuir datos (Akyildiz & Vuran, 2010).

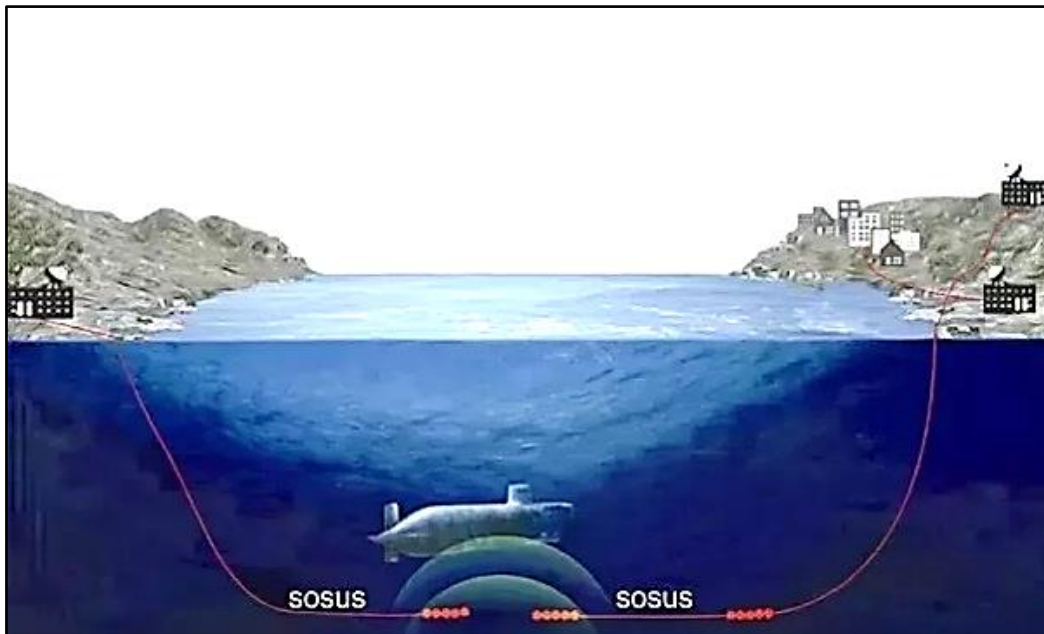
Una de las características particulares de las Redes Inalámbricas de Sensores, es el uso de una batería como fuente energética, por lo tanto, los nodos se construyen teniendo presente la conservación de energía y generalmente pasan mucho tiempo en modo “*sleep*” o de bajo consumo de potencia.

Hay que hacer notar, que los nodos se auto organizan construyendo sus redes en una forma ad-hoc. La expresión ad-hoc hace referencia a una red en la que no hay un nodo central, sino que todos los dispositivos están en igualdad de condiciones, esto quiere decir, que cualquiera de sus elementos puede enviar y recibir la información generada dentro de la red. Además, las Redes Inalámbricas de Sensores, tienen la capacidad de auto restauración, es decir, si se avería un nodo, la red encontrará nuevas vías para encaminar los paquetes de datos. De esta forma, la red permanecerá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan (Valdez Cervantes, 2014).

### **Antecedentes a las Redes Inalámbricas de Sensores**

Las Redes Inalámbricas de Sensores surgen a raíz de problemas militares. La idea era detectar obstáculos vía marítima a través de una red que se basaba en los sonidos para así monitorear y vigilar los eventos suscitados en el océano. Este sistema es conocido como

SOSUS (Sound Surveillance System), desarrollada por Estados Unidos durante la guerra fría (1950) y se trataba de una red de sensores acústicos desplegados alrededor del fondo del mar, cuyo objetivo era descubrir la posición de los silenciosos submarinos soviéticos (Towsend & Arms, 2004). De acuerdo con la ilustración 2, el sistema se desplazaba por el fondo submarino conectándose a través de varios sensores.



**Ilustración 2:** Sistema de Vigilancia Sónica, SOSUS.  
**Fuente:** (Wooldridge, 2017)

Paralelamente a ésta, también en Estados Unidos, se expandió una red de radares aéreos a modo de sensores que han ido evolucionando hasta dar lugar a los famosos aviones AWACS, que no son más que sensores aéreos. Mientras que SOSUS se ha desarrollado hacia aplicaciones civiles, como control sísmico y biológico, AWACS sigue conservando un papel activo en las campañas de guerra (Wooldridge, 2017).

Luego se desplegó una red similar a la desarrollada anteriormente, pero con considerables mejoras, las cuales se identificaron como sensores aéreos, pues se utilizaban en este ambiente, estas redes acogían una estructura jerárquica conformada por grandes estaciones y estaba manipulada por estructura cableada para su comunicación.

A partir de estas creaciones se han investigado muchas formas para el diseño de las redes de sensores inalámbricos y las heterogéneas áreas en las que se las puede utilizar, pudiendo autoconfigurarse en el caso de que cierto deje de funcionar.

Gracias al nacimiento de la investigación moderna, surge un nuevo programa denominado Redes de Sensores Distribuidos (DSN) en el año 1980, que estaba compuesta por muchos nodos sensores de bajo coste distribuidos espacialmente. Los nodos colaboraban unos con otros, pero operaban de forma autónoma, y la información se enrutaba hacia cualquier nodo que consiguiese hacer el mejor uso de la información. Del programa DSN surgieron los primeros sistemas operativos para esta red de sensores como Accent y lenguajes de programación como SPLICE que básicamente eran para crear un mapa común con una mayor exactitud y precisión.

En la actualidad, los avances recientes en computación y comunicaciones han causado un cambio significativo en la investigación en redes de sensores, acercándola hacia la consecución de la visión original: “baratos y diminutos”, basados en la tecnología de sistemas micro electromecánicos (MEMS), la comunicación inalámbrica y procesadores baratos de bajo consumo, permitiendo el despliegue de redes inalámbricas para multitud de aplicaciones, ya sea para la monitorización del entorno, monitorización de seguridad o tracking.

#### **4.1.2. Elementos de las Redes Inalámbricas de Sensores**

En su forma más simple, una Red Inalámbrica de Sensores, está compuesta de una estación base en la que se realiza la obtención de datos que se han sentido en todos los otros dispositivos (nodos) de una manera sincronizada y estructurada, que constan de un microcontrolador, una fuente de energía, un radio transceptor y un elemento sensor, como se puede apreciar en la ilustración 3. La funcionalidad de la red, es decir, las rutas y protocolos de comunicación se implementan en software y se ejecuta generalmente en microcontroladores de gama baja.



**Ilustración 3:** Dispositivo autónomo de una red inalámbrica de sensores

**Fuente:** Autor

A continuación, se describe los elementos que conforman las Redes Inalámbricas de Sensores:

- a) **Actuadores:** son elementos de que, de una señal eléctrica, la convierte en una acción física para actuar sobre el medio en el que se encuentra.
- b) **Sensores:** son dispositivos físicos, que detectan y miden propiedades físicas, biológicas, químicas de su ambiente y estas las transforma en una señal eléctrica, la misma que puede ser leída e interpretada con la ayuda de un microprocesador. (Prensa CRC, 2016). Generalmente, los sensores se pueden clasificar en dos categorías, que se detallan a continuación.
  - **Sensores Analógicos:** estos sensores producen una señal continua que es proporcional al parámetro medido; diversos parámetros físicos como la temperatura, presión, entre otros, se expresan como cantidades analógicas y son medidos como señales continuas.
  - **Sensores Digitales:** este tipo de sensores producen señales discretas, que se representan de manera digital de los parámetros antes medidos, estos valores discretos se expresan como un grupo de bits que representan una cantidad.

Hay que hacer notar que, la elección de un sensor utilizado para una aplicación en particular, se deberá analizar la propiedad física a monitorear o controlar, por ejemplo, la temperatura, la presión, la luz o la humedad. Con estos sensores podemos construir numerosos dispositivos y máquinas, proporcionando un tremendo beneficio social.

- c) **Transceptor:** se refiere a cada uno de los nodos de un sistema de redes de sensores inalámbricos, que está a cargo de la comunicación inalámbrica entre sus compañeros.
- d) **Microcontrolador:** es un ordenador en un chip, autosuficiente, con determinada capacidad de almacenamiento y de bajo costo que se utiliza para controlar la funcionalidad y el flujo de datos de dispositivos electrónicos para almacenar y/o procesar datos.
- e) **Nodo Sensor:** se compone de un procesador, los dispositivos de radio y una placa de sensores que se encarga de la adquisición de datos.
- f) **Gateway:** son los elementos destinados a la interconexión entre la red de sensores y una red de datos.



- g) Estación Base:** actúa como recolector de datos basado en un ordenador común o un sistema integrado.
- h) Fuente de Energía:** es uno de los factores más importantes a considerar en el diseño, debido a que la red debe permanecer operativa todo el tiempo; frecuentemente el consumo de energía se convierte en una limitación, debido a que se debe encontrar la alternativa más adecuada para evitar fallos en la red. Existen técnicas para hacer buen uso de la energía y obtenerla a través de diferentes fuentes además de las baterías. La primera es la transformación de las vibraciones en electricidad a través de efectos piezoeléctricos, electrostáticos y magnéticos, con la cual se puede proporcionar hasta  $300\mu\text{W}/\text{cm}^3$ . La segunda es la transformación de un flujo de calor en electricidad y puede proporcionar hasta  $40\mu\text{W}/\text{cm}^3$ . Y la tercera recupera la energía de la luz, hasta  $15000\mu\text{W}/\text{cm}^3$ , o de la radiación de RF de hasta decenas de mili vatios en el caso de una fuerte fuente como un lector de etiquetas RFID (Akyildiz & Vuran, 2010) (Lajara Vizcaíno, 2014). En el mercado existen diferentes soluciones de baterías recargables, tales como: baterías de litio, baterías secas, entre otras, las mismas que pueden ser recargadas mediante la ayuda de paneles solares o de cargadores apropiados.

#### 4.1.3. Características de las Redes Inalámbricas de Sensores

Cuando se desea diseñar una Red Inalámbrica de Sensores, es fundamental tener en cuenta diferentes factores y retos de diseño que deben cumplirse, por tal motivo, se ha determinado algunas características fundamentales en el listado siguiente:

**Tabla 1:** Características que definen una Red Inalámbrica de Sensores

Característica	Descripción
Auto organización	El despliegue de los nodos debe tener una topología que permita establecer rutas por las que mandar datos obtenidos. Los nodos necesitan conocer su lugar en esta topología por lo que son capaces de formar una topología por sí mismos. Realizándose esto por primera vez y teniendo la capacidad de reconfigurarse ante cambios o fallos en el sistema.
Heterogeneidad	Los dispositivos desarrollados pueden ser de distinto tipo y aun así ser capaces de colaborar entre ellos. Deben utilizarse los protocolos y mecanismos adecuados para lograr que la comunicación sea exitosa, aunque los dispositivos no sean iguales.
Procesamiento distribuido	Los algoritmos utilizados deben ser centralizados, así como el procesamiento debe estar distribuido en diferentes nodos. Además, deben utilizarse técnicas de compresión y agregación de datos, a fin de ahorrar costes de transmisión. El uso de una estrategia de comunicación, petición y análisis de datos distribuida es un factor muy importante en una Red Inalámbrica de Sensores.
Coordinación a gran escala	Cuando las redes están formadas por un gran número de nodos, resulta muy complicado y, en algunos casos imposible, llevar a cabo las tareas de

	mantenimiento y configuración. Por este motivo la escalabilidad es un objetivo fundamental que debe cumplir toda red de sensores.
Eficiencia energética	Se usa sensores de manera que produzcan el mayor resultado con la menor energía posible. Por un lado, se optimiza tanto el hardware como el software embebido, incluyendo los algoritmos de enrutamiento para minimizar el consumo. Por otro lado, se reduce el consumo de energía optimizando la administración de la misma, tanto a nivel de componentes hardware como a nivel de red.
Comunicación de bajo ancho de banda	Los datos deben ser transferidos eficientemente entre los distintos sensores que compongan la red.
Comunicación segura	Los riesgos de seguridad son inevitables en una red de sensores, debido a su naturaleza inalámbrica. Por ello es necesario proporcionar los mecanismos adecuados para proteger a la red de ataques o pérdida de datos. Normalmente los datos viajan encriptados por esta razón.
Evitar interferencias	La red coexiste con otras redes que trabajen en bandas de frecuencia similares. Además, cuenta con mecanismos para evitar interferencias para lograr una comunicación satisfactoria
Computación en tiempo real	Realizada de manera rápida cada vez que se genera un nuevo dato.

**Fuente:** (Faludi, 2010) & (Sarangapani, 2017)

A partir de las características presentadas en la tabla anterior se generan algunas ventajas en el trabajo conjunto de los nodos frente a las medidas proporcionadas por un sensor individual y frente a las redes cableadas, las cuales podemos nombrar a continuación:

- El rango de sensibilidad crece logrando abarcar una mayor superficie.
- La redundancia es importante en múltiples nodos cercanos unos a otros pueden incrementar la tolerancia a fallos.
- La precisión en los nodos debe colaborar entre sí y combinar sus datos obtenidos para mejorar la precisión de los datos medidos.
- Cada uno de estos nodos sensores esparcidos por la red inalámbrica tiene capacidad tanto para recolectar datos, como para enrutarlos hacia el nodo recolector, mediante una arquitectura ad-hoc de múltiples saltos.

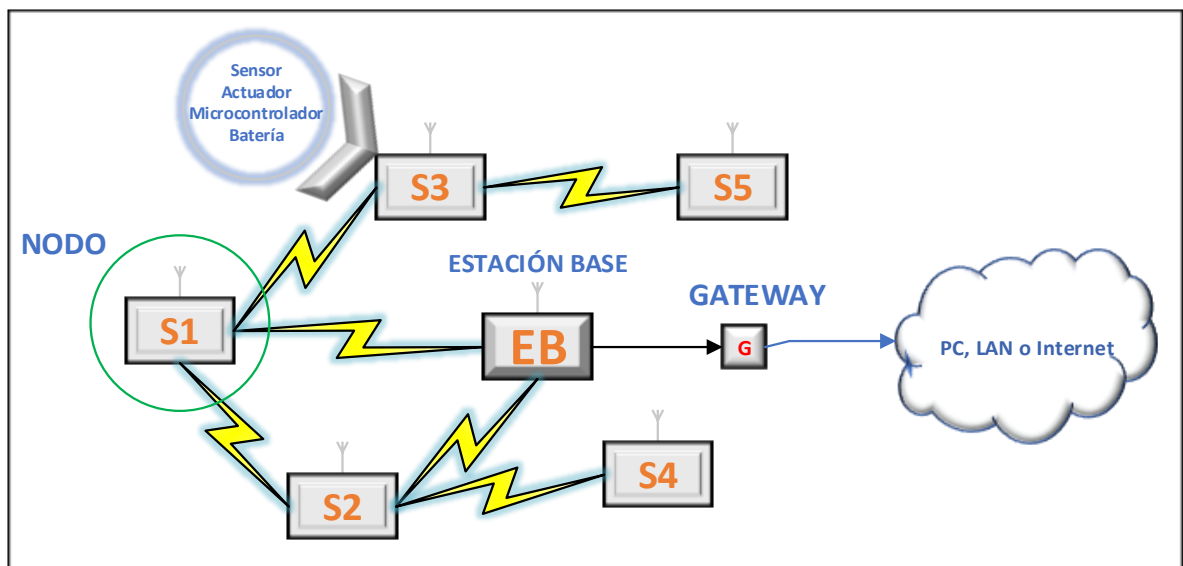
#### **4.1.4. Arquitectura y Topología de las Redes Inalámbricas de Sensores**

Lo primero que tenemos que saber es, a que nos referimos cuando hablamos de arquitectura de red o topología de red, con respecto al primer término nos referimos a las tecnologías que admiten la infraestructura, servicios y protocolos que transmiten los mensajes a través de la red, para que esta sea fiable y funcione perfectamente. A diferencia de topología de red, que es la representación de comunicación entre los nodos y la usan para comunicarse entre sí, es decir, la distribución geométrica de los equipos conectados.

A continuación, se describe cada uno de estos conceptos aplicados a las Redes Inalámbricas de Sensores.

- **Arquitectura**

La arquitectura de las Redes Inalámbricas de Sensores, parte de distintos procesos que realiza la red para entablar la comunicación inalámbrica: el proceso inicia en la captación de la información recogida por los sensores, cuando el fenómeno en cuestión se haya suscitado, esta información se procesa a través de un microcontrolador en el denominado nodo sensor, el nodo toma la medida y la transforma a manera digital, para luego ser transmitida hacia otro nodo hasta llegar a una estación base, que posteriormente vía Gateway, la información será almacenada y tratada temporalmente para acabar finalmente en un servidor con mayor capacidad, que permita componer una secuencia histórica o realizar un análisis de datos, tal y como lo representa en el siguiente esquema.

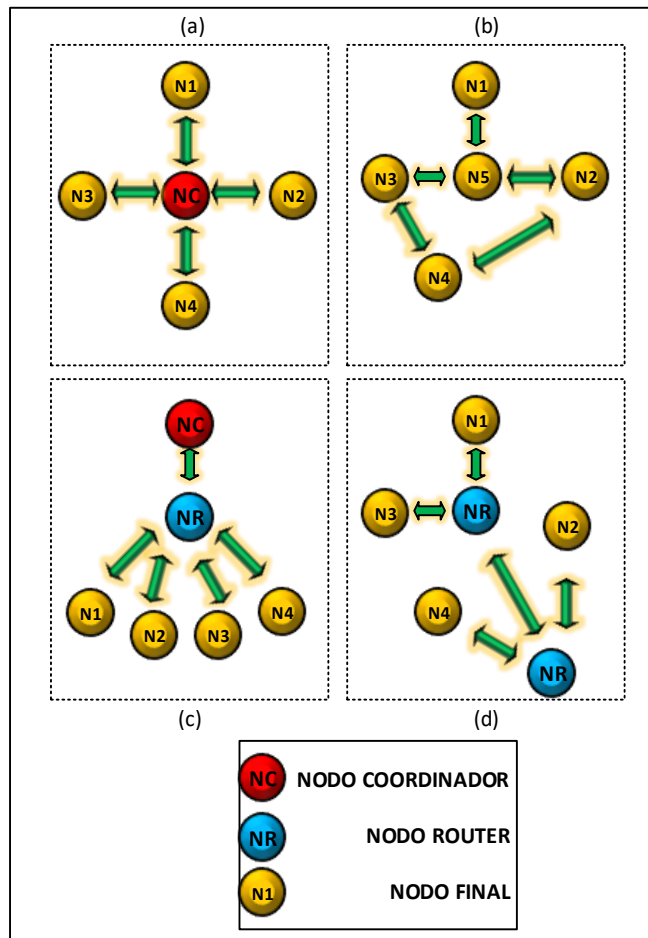


**Ilustración 4:** Arquitectura de una Red Inalámbrica de Sensores

**Fuente:** Autor

- **Topología**

En cuanto a la topología de las Redes Inalámbricas de Sensores, se refiere a la forma de unir los nodos de la red por medio del uso de los enlaces, que puede ser física como lógica. Hablamos de una topología física cuando se configura cada uno de los dispositivos de red, mientras que una topología lógica son los métodos y flujo de data que se envía a través de los nodos.



**Ilustración 5:** Topologías de las Redes Inalámbricas de Sensores: a) Topología Estrella, b) Topología Malla, c) Topología Árbol y d) Topología Híbrida  
**Fuente:** Autor

La topología que suele usarse en las Redes Inalámbricas de Sensores, depende específicamente de los nodos que existen, la tasa de datos que se envíe, la distancia de transmisión y los requerimientos de energía. Entonces, podemos diferenciar las siguientes topologías:

**Topología Estrella**, es la topología más sencilla porque solo existe un nodo coordinador que envía o recibe la información del resto de nodos (ver ilustración 5a). Su ventaja está en que los nodos remotos tienen un bajo consumo de energía. Y su desventaja radica en la dependencia de los nodos remotos para la gestión de red y el rango en que puede llegar (Hasan, Hussain, & Singh, 2013) (Hasan, Hussain, & Singh, 2013).

**Topología Malla o Mesh**, esta topología permita que cualquiera de los nodos que conforman la red se pueda comunicar con otro nodo de la misma red, admitiendo retransmitir los mensajes hacia el nodo de destino (ver ilustración 5b). Es decir, se conforma por nodos multi - trayecto y de bajo consumo de energía. La principal ventaja

de esta topología es su estabilidad mientras su desventaja es el consumo de energía ligado al número de saltos hasta la entrega de mensajes (Hasan, Hussain, & Singh, 2013) (Tan, y otros, 2015).

**Topología Árbol**, es similar a una configuración de malla, en donde los enrutadores forman una especie de enlace troncal con los dispositivos finales agrupados alrededor de cada enrutador (ver ilustración 5c) (Hasan, Hussain, & Singh, 2013).

**Topología Híbrida**, las redes más usadas cuando de diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores son las redes malladas tipo ad-hoc o denominadas híbridas, cuya característica particular es que carecen de infraestructura, poseen una flexibilidad relativa, que ofrece que los nodos terminales, den un servicio para el encaminamiento y permitan la comunicación de nodos que no tienen conexión inalámbrica directa (ver ilustración 5d). La principal característica por la que sobresale esta topología es que todos los dispositivos que forman parte de la red, además de funcionar como terminales finales, realizan también funciones de retransmisión de paquetes típicamente asociados a routers, también llamadas Redes ad hoc móviles de múltiples saltos al no poseer un control centralizado. Esta forma de transmitir los datos nos ayuda a enviar los paquetes a destinos sin cobertura directa a través de otros nodos intermedios que se encuentran en la red, aumentando la movilidad (Hasan, Hussain, & Singh, 2013).

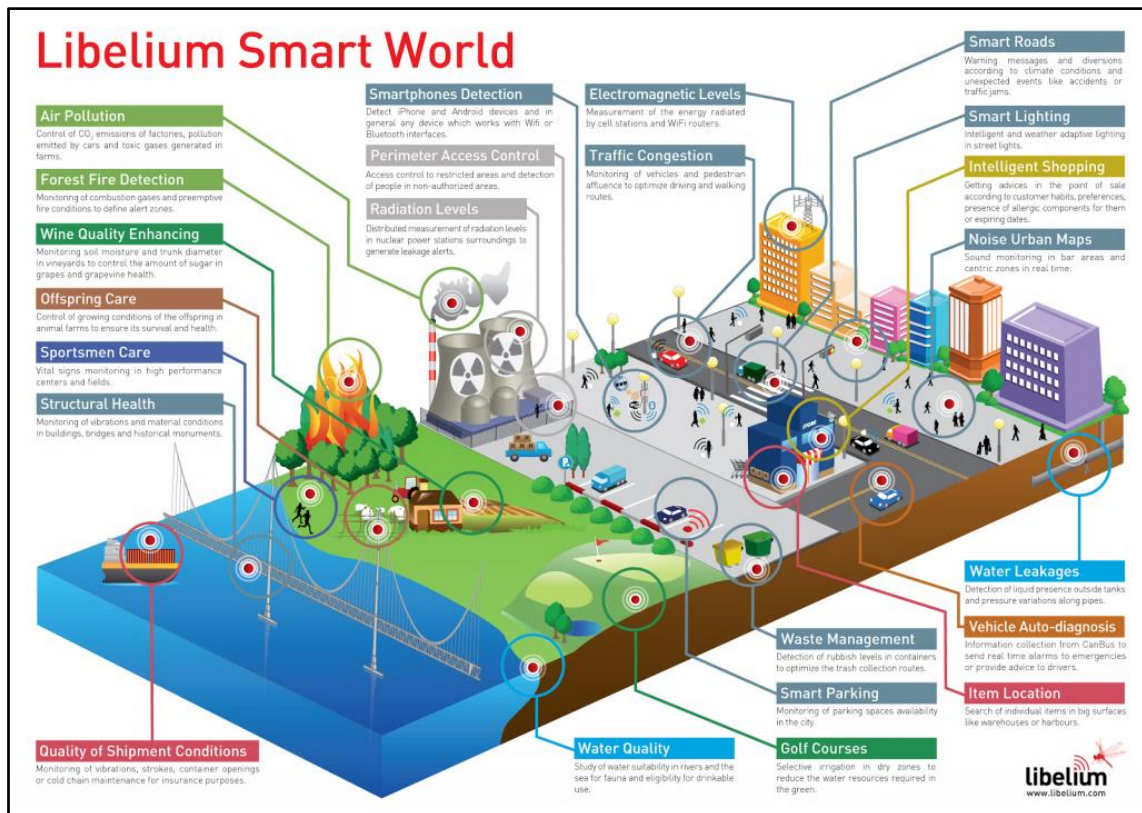
#### **4.1.5. Aplicaciones de las Redes Inalámbricas de Sensores**

A medida que la tecnología avanza, hay una creciente popularidad para el uso de las Redes Inalámbricas de Sensores sobre el paisaje del Internet de las Cosas (IoT). Según la empresa “Libelium” (Libelium, 2015), más de 50 mil millones de dispositivos estarán conectados a Internet para 2020, pero esta nueva sublevación de conectividad ya ha comenzado.

Por lo tanto, bajo este entorno, las aplicaciones de las Redes Inalámbricas de Sensores pueden ser muy útiles y diversas, y pueden ser clasificadas en dos categorías: monitorización remota y localización de objetos móviles. Ambas pueden dividirse en multitud de aplicaciones, tanto para entornos cerrados como abiertos.

Su aplicación es en diferentes áreas o sectores como: monitorización de volcanes activos, vigilancia del medio ambiente, vigilancia de la salud estructural, agricultura de precisión,

atención de la salud, el transporte, o la supervisión de la actividad humana entre otros. En la ilustración 6 se denota como en una ciudad, se puede integrar las Redes Inalámbricas de Sensores, logrando un alto potencial en diferentes entornos como: industrias, la manufactura, la agricultura, la cadena de suministro, la infraestructura y muchos otros entornos.



**Ilustración 6:** Aplicaciones de las Redes Inalámbricas de Sensores  
**Fuente:** (Libelium, 2015)

A medida que se introducen nuevas tecnologías como *blockchain* para combatir problemas clave como la seguridad, la confianza en estas redes de sensores continuará desarrollándose.

Como ya se ha mencionado, existen multiplicidad de aplicaciones para las redes inalámbricas de sensores, para lo cual se ha creído conveniente realizar un estudio de varias de las aplicaciones más destacadas.

- **Industria:** Dentro de fábricas existen complejos sistemas de control de calidad, el tamaño de estos sensores les permite estar allí donde se requiera. Pueden ser usados para monitorizar zonas donde no podemos usar cableado. Aplicaciones como telemetría en plantas, pérdidas de calidad, diagnóstico de maquinaria, etc. Uno de los

proyectos que vale mencionar es el Control de los tanques de petróleo en la plataforma petrolífera (BP); el proyecto de BP desarrolló un sistema de mantenimiento predictivo capaz de monitorizar maquinaria rotativa crítica como bombas y motores dentro de la plataforma Loch Rannoch, captando datos vibratorios para evaluar las condiciones de operación y enviando los datos mediante comunicación inalámbrica.

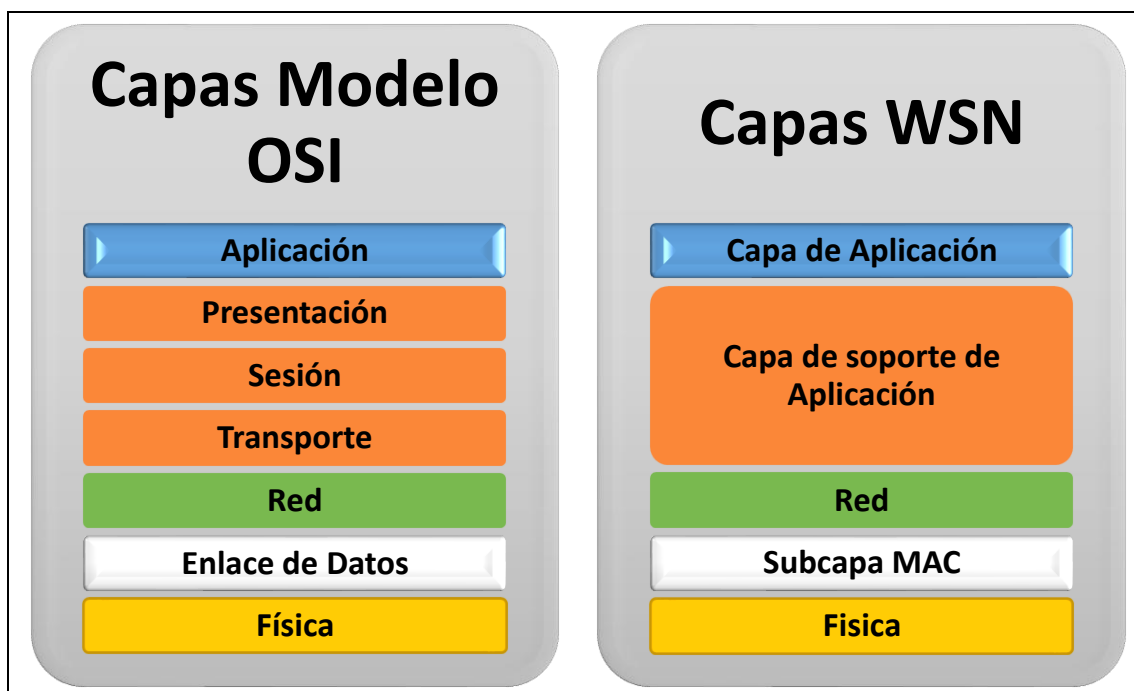
- **Automoción:** Las redes inalámbricas de sensores son el complemento ideal para las cámaras de tráfico, a razón de que estas redes, pueden informar de la situación del tráfico en ángulos muertos, que no cubren las cámaras, y también pueden informar a conductores de la situación actual de las vías, por ejemplo, en caso de atasco o accidente, permitiendo la reacción oportuna para tomar rutas alternativas. El Proyecto Capstone, fue uno de los pioneros en aplicaciones de automoción, este proyecto fue llevado a cabo por un equipo de la Universidad de Michigan, junto con Ford, está diseñado y desarrollado de tal manera para identificar cuantas veces un vehículo es inspeccionado por un comprador potencial. Los eventos estudiados podrían extenderse también a cuando una persona ocupó un asiento y cuánto tiempo perduró en él. (Grupo de Investigación EDMANS, 2009)
- **Medicina:** La medicina es otro campo bastante prometedor para las Redes Inalámbricas de Sensores, debido a que con la reducción de tamaño que están sufriendo los nodos sensores, se puede acoplar a monitorear la calidad de vida de pacientes que deban tener controlada sus constantes vitales (pulsaciones, presión, nivel de azúcar en sangre, etc.), mejorando sustancialmente la necesidad de estar un médico presente. En estos entornos, las posibles aplicaciones están limitadas por la compatibilidad electromagnética con el material hospitalario. Sin embargo, se han desarrollado algunos proyectos como el cuidado de ancianos con Alzheimer llevado a cabo por Intel Proactive Health e Intel Research Seattle junto con la Universidad de Washington, en la que trata de controlar el ambiente de la persona a través de las tecnologías inalámbricas, monitoreando los movimientos del paciente por medio de tecnología de transmisión de imágenes, reduciendo los gastos que requieren estas personas (Campaña & Jorge, 2013).
- **Domótica:** Dadas las características como el tamaño, economía y velocidad de despliegue de las Redes Inalámbricas de Sensores, la hacen una tecnología ideal para domotizar el hogar a un precio asequible, un ejemplo de ello es el Sistema inteligente de control de luz, cuyo objetivo es un control óptimo de la energía dedicada al

alumbrado de hogares, logrando ahorrar un porcentaje alto de consumo de energía. La meta de esta investigación es reducir el consumo de energía, así como crear un entorno de luminosidad ante las preferencias del usuario. Se opta por usar las tecnologías de las Redes Inalámbricas de Sensores debido al precio y flexibilidad frente a un sistema cableado (Villalba & Madero, 2015).

- **Monitoreo Ambiental:** Las Redes Inalámbricas de Sensores pueden ser de gran utilidad para monitorear algunas condiciones ambientales, evitando que la fauna y la flora salgan perjudicados. Esto se puede evidenciar en la Isla Great Duck en la costa del estado de Maine en el noreste de los Estados Unidos, en la que un equipo de ingenieros de la Universidad de Berkeley en colaboración con el College of the Atlantic en Bar Harbor y el laboratorio de investigación de Intel, tratan de mantener y conservar la fauna mediante la detección de intrusos, ya sean humanos o algún otro tipo de depredador (COLLEGE OF THE ATLANTIC, 2015). También se puede implementar aplicaciones para el monitoreo de contaminación que emanan algunos gases tóxicos.

#### 4.1.6. Protocolos de la Redes Inalámbricas de Sensores

En la ilustración 7, se muestra una comparación entre el modelo OSI y el modelo de las Redes Inalámbricas de Sensores usado en varias aplicaciones.



**Ilustración 7:** Comparación Modelo OSI vs Modelo de las Redes Inalámbricas de Sensores

**Fuente:** (Guaña & Escuntar, 2016)



En fin, para todas las redes de comunicación inalámbrica es necesario protocolos de comunicación, los cuales, permiten que la red sea eficiente si existen varias rutas para llevar la información hacia el nodo final. Por lo tanto, las Redes Inalámbricas de Sensores pueden contar con infinidad de nodos y cada uno de ellos usa protocolos para la comunicación entre sí, es por ello, que se utiliza el modelo OSI como modelo estándar para estas redes (Guaña Moña, 2016).

A partir del modelo OSI, se define el modelo de las redes inalámbricos sensores, a continuación, se realiza una descripción de los protocolos utilizados en este tipo de tecnología, basados en cada una de las capas del modelo OSI:

#### 4.1.6.1. Protocolos de la Capa Física

Esta capa corresponde al hardware, que permite la comunicación con la siguiente capa (MAC), busca canales de comunicación, activa y desactiva el transceptor de radio, descubre la energía a utilizar, muestra la calidad de conexión, transmite y recepta información y ajusta los canales libres (Han, Jiang, Bao, Wan, & Guizani, 2015).

#### 4.1.6.2. Protocolos de la Subcapa MAC

La responsabilidad de la subcapa MAC es establecer un enlace fiable o una infraestructura de red sobre la que los datos pueden ser encaminados, proporciona un alto rendimiento con baja latencia, considerando el ahorro de energía y alargando su vida útil, también gestionan el canal compartido, la sincronización, localización y acceso al medio.

Cuando el funcionamiento de las Redes Inalámbricas de Sensores es en forma centralizada se encuentran las siguientes ventajas y desventajas en la subcapa MAC:

**Tabla 2:** Ventajas y desventajas del modo centralizado en la subcapa MAC

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Proporciona prioridades, rechazos y capacidad garantizada.	Si el nodo central o coordinador falla, se daña la red o presenta problemas.
Lógica de acceso fácil.	El nodo coordinador puede ocasionar cuellos de botella.
Resuelve conflictos entre estaciones de igual prioridad.	

**Fuente:** (Gascón, 2010)

### 4.1.6.3. Protocolos de la Capa de Red

Su objetivo es la gestión de la topología (soportando diferentes topologías), el encaminamiento, recibe los datos y envía los datos a las capas superiores.

Dentro de esta capa se utilizan los siguientes protocolos:

#### a. Según el enrutamiento

Los nodos descubren la topología a usarse en la red, a través de un broadcast anuncia el ingreso de un nuevo nodo a la red, informándose que cuenta con su presencia y que pueden acceder a él y viceversa, conforme pasa el tiempo los nodos son capaces de conocer toda la red y la manera de acceder a cada uno de los nodos de diferentes maneras (Guaña Moña, 2016).

#### b. Según la estructura de red

**Encaminamiento plano:** cuando los protocolos asumen las mismas características al considerarse todo iguales.

**Enrutamiento jerárquico:** los protocolos tienen diferentes funciones en la red, diferenciándose entre nodos coordinador, recolectores de información, transmisores, y procesadores de la información. Es la forma más eficiente para la agregación de datos y la transmisión de información.

**Encaminamiento basado en la localización:** se basa en la localización de cada uno de los dispositivos pertenecientes a la red, calculando la distancia entre ellos a través del nivel de potencia recibida de los nodos cercanos.

**Basado en QoS:** implementa la calidad de servicio, para mantener la equidad entre la energía consumida y la calidad de transmisión.

**Basado en consultas:** se envía una consulta a la red de modo que el nodo sensor que la recibe y tiene la información que se pidió, la envía por medio de la red hasta donde se originó la consulta.

**Basado en negociación:** elimina la información redundante a través de una negociación con el nodo que va a transmitir de modo que solo envíe la información necesaria (Guaña Moña, 2016).

#### **4.1.6.4. Protocolos de Soporte de Aplicación**

Esta capa minimiza los datos del caché, su función es el almacenamiento y la acumulación de los datos además de administrar la conservación de la energía (Han, Jiang, Bao, Wan, & Guizani, 2015). Tienes dos tipos:

**a. Protocolos no basados en TCP:** desarrollados para complementar las restrictivas TCP. Se agrupan en:

- **CODA (Congestion Detection and Avoidance / Detección de congestión y evitación)**
- **SenTCP**
- **PSFQ (Pump Slowly Fetch Quickly / Bomba de recuperación rápido y despacio)**
- **RMST (Reliable Multi-Segment Transport / Transporte fiable de varios segmentos)**
- **GARUDA**

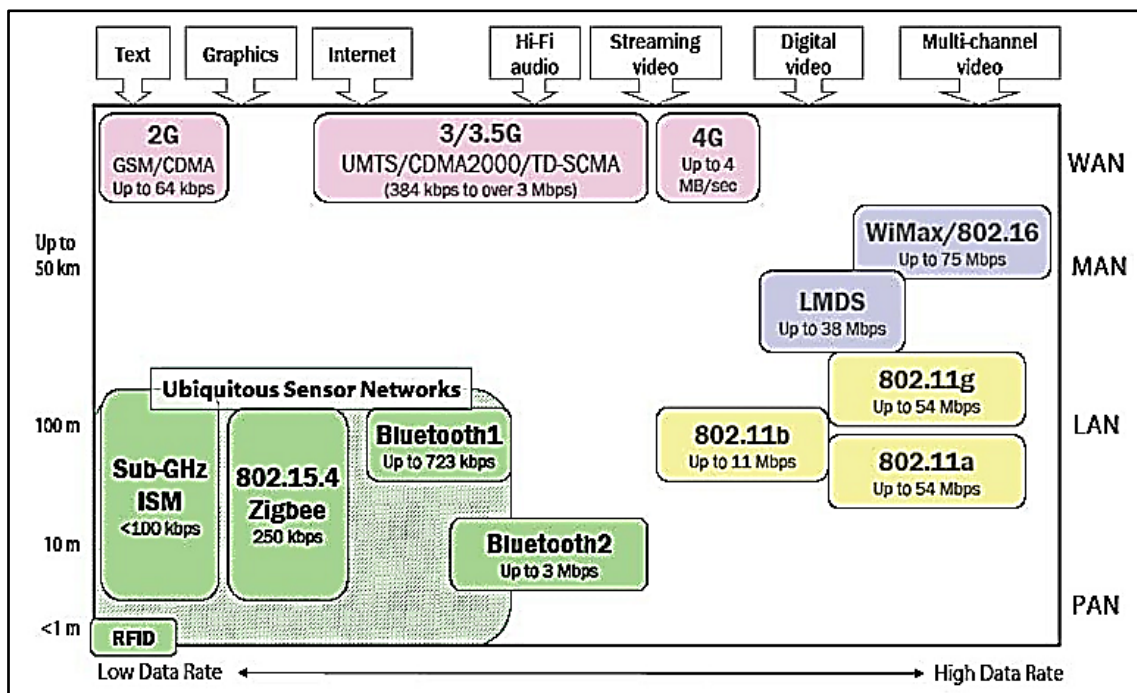
**b. Protocolos basados en TCP:** estos trabajan para reconocer el almacenamiento de segmentos TCP en los nodos intermedios, logran reducir la retransmisión de los paquetes. Se integran por DTC (Distributed TCP Caching / Almacenamiento en caché distribuido TCP) y TSS (TCP Support for Sensor Networks / Soporte para redes de sensores) (Guaña & Escuntar, 2016).

#### **4.1.7. Estándares de las Redes Inalámbricas de Sensores**

Toda red alámbrica e inalámbrica se debe regir bajo normas internacionales que regularicen su funcionamiento y aplicación; las Redes Inalámbricas de Sensores no son la excepción. Este tipo de redes se comunica a través de señales de radio, por lo cual tiene asignado un espectro de la señal electromagnética para conseguir la comunicación entre los dispositivos de la red, sobre el cual se desarrollan diferentes tecnologías de aplicación, que dependen de la aplicación a desarrollar y a estos se les llama estándares de comunicación. En la ilustración 8 se puede observar las diferentes tecnologías

inalámbricas, y sobresalta en color verde las tecnologías que son usadas comúnmente para las Redes Inalámbricas de Sensores, una característica que cabe aclarar en la ilustración 8, es la cobertura o alcance de la tecnología Zigbee, ya que esta tecnología actualmente ha logrado ampliar su área de cobertura hasta 1600 metros (DIGI, XBee®/XBee-PRO® RF Modules datasheet, 2016).

El valor de las Redes Inalámbricas de Sensores se basa en su bajo costo y su distribución a gran escala, esto se realiza a través de la estandarización de sus elementos, de manera que los productos de diferentes fabricantes puedan interoperar, fomentando así su uso. Con este fin, se estandariza las tecnologías, logrando la unificación del mercado y promoviendo el uso de estos dispositivos de red a bajo coste, interoperables y evitando los protocolos incompatibles.



**Ilustración 8:** Tecnologías Inalámbricas  
Fuente: (Maroto Cantillo, 2010)

Por lo tanto, algunos de los estándares o tecnologías de comunicación para las Redes Inalámbricas de Sensores más usados en la actualidad son Wi-Fi, ZigBee y Bluetooth, sin embargo, hoy en día se han desarrollado nuevas tecnologías inalámbricas como Lora y SigFox, que agregan algunas características importantes como la tasa de transmisión y las distancias, a continuación, se describen estas tecnologías que permiten el desarrollo de las redes inalámbricas:

#### **4.1.7.1. Bluetooth – IEEE 802.15.1**

Bluetooth es una tecnología inalámbrica de corto alcance que permite prescindir del sistema cableado, excluyendo los de alimentación, desarrollado para dispositivos, tanto portátiles como fijos, de pequeño tamaño y a muy bajo coste y, por ello, está ampliamente difundida en PDA, ordenadores portátiles y teléfonos móviles, cuyo objetivo es establecer redes de comunicación, llamadas piconets, mediante las cuales cualquier dispositivo puede intercambiar información con otro.

Las características más destacadas de esta tecnología son: robustez, bajo consumo, bajo costo, y además de ser una tecnología muy flexible al permitir distintas topologías de red.

Sus especificaciones técnicas son: permite la transmisión de datos de 720 Kbps en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical radio bands) de los 2,4 GHz, con radios de cobertura de entre 10 y 100 metros, emplea un sistema de salto de frecuencias y división en el tiempo (HP/TTD) que divide a la frecuencia en canales y al tiempo en ranuras (*slots*), con un máximo de consumo de corriente de 40 mA lo que permite alimentarse por baterías. Por todo, la potencia de salida para transmitir a una distancia máxima de 10 metros es de 0 dbm (1 mW), mientras que, en sí, la versión de largo alcance transmite entre los 20 y 30 dBm (entre 100 mW y 1 W) (Arévalo, Prieto, Reina, & Santana, 2011).

#### **4.1.7.2. Wifi - IEE 802.11 (Wireless Fidelity)**

El estándar IEEE 802.11 o más conocido como Wifi (Wireless Fidelity), añade mayor transferencia de datos y robustez con respecto a Bluetooth, y su objetivo es distinto al estándar anteriormente mencionado, debido a que éste estándar, a través de diferentes variantes, conecta distintos dispositivos con distancias relativamente largas a una velocidad elevada que puede llegar hasta los 11 Mbps (IEEE 802.11b) y a 54 Mbps (IEEE 802.11g) y en diferentes bandas de radio 2,4 – 2,5 GHz. Puede ser útil cuando queramos conectar redes en las que es más caro o es un inconveniente el empleo de cables. Si bien fue creado para acceder a cualquier tipo de red local inalámbrica, hoy es muy frecuente que sea utilizado para establecer conexiones a Internet y de hecho se ha convertido en un sinónimo de aquello. De bajo coste que usa la técnica de radio de espectro extendido para que la señal se pueda propagar dentro del intervalo de frecuencias de bandas públicas permitidas (Tanenbaum, 2012).

#### **4.1.7.3. Zigbee – IEE 802.15.4**

Este estándar IEEE fue definido para la tecnología de la información, Telecomunicaciones e intercambio de información entre sistemas locales y redes de área metropolitana, cuyo objetivo es la conectividad inalámbrica de baja tasa de datos con dispositivos fijos, portátiles y móviles sin requisitos de consumo de batería, de bajo costo y complejidad. La tasa de datos mínima y máxima es de 20 a 250 Kbps, respectivamente, con un radio de cobertura de 10 a 1600 metros idealmente y con línea de vista, se encuentra en las bandas de radio de los 2400-2483,5 MHz en todo el mundo y con 16 canales (Hwang & Yu, 2012).

El estándar IEEE 802.15.4 soporta casi una infinita línea de aplicaciones, que varían desde teclados inalámbricos, ratones y joysticks que requieren una alta transferencia de datos, hasta la agricultura inteligente y detección del entorno que requieren una baja tasa de transferencia y son capaces de tolerar una latencia mayor.

El estándar IEEE 802.15.4 soporta conexiones tanto en estrella como punto a punto, por lo que permite una amplia variedad de topologías de red y de algoritmos de enrutamiento. Cuando se utiliza seguridad, el paquete de seguridad AES-128 es obligatorio (Alliance, 2018).

#### **4.1.7.4. Wimax – IEEE 802.16 (Worldwide Interoperability for Microwave Access)**

Es la tecnología para redes inalámbricas de banda ancha, desarrollado en 1998 y cuyo objetivo es la conectividad y el acceso a internet a velocidades considerables, basado en la topología punto multipunto, haciendo uso de múltiples subportadoras y una amplia variedad de canales con diferentes anchos de banda con una transmisión de datos de hasta 70 Mbps, con radios de cobertura de hasta 48 Km y a frecuencias de 2,5 y 3,5 MHz, también utiliza OFDM para transmitir múltiples símbolos usando 256 subportadoras (Ahson & Ilias, 2018).

Consta con dos variantes; el estándar IEEE 802.16-2004 conocido como WiMAX fijo y el estándar IEEE 802.16e-2005 conocido como WiMAX móvil.

#### 4.1.7.5. Tecnología LoRa

Es una tecnología inalámbrica como Wi-Fi, Bluetooth, LTE, SigFox o Zigbee. LoRa utiliza un tipo de modulación de radiofrecuencia, como AM o FM o PSK, pero patentado por Semtech, un importante fabricante de chips de radio. Algunas de sus ventajas más relevantes es alta tolerancia a la interferencia, alta sensibilidad para recibir datos (-168dB), bajo consumo de energía (hasta 10 años con una batería), largo alcance 10 a 20 km., baja transferencia de datos (hasta 255 bytes), conexión punto a punto, frecuencias de trabajo: 868 Mhz en Europa, 915 Mhz en América y 433 Mhz en Asia (LoRaWAN, 2019).

En estas redes, el objetivo es optimizar el rendimiento y el retardo. Los nodos sensores son frecuentemente expuestos a extremas condiciones ambientales, haciéndolos propensos a frecuentes fallos en los nodos. Esto conlleva unas restricciones estrictas en las Redes Inalámbricas de Sensores, no como en las otras redes.

#### 4.1.7.6. Análisis comparativo de las Tecnologías Inalámbricas

Para la elección de una u otra tecnología inalámbrica se debe considerar algunas características como: tiempo de conexión, alcance, consumo de potencia reducido, velocidad de transferencia y cantidad de datos a transmitir/recibir, para ello se ha de realizar un análisis comparativo de cada una de las tecnologías inalámbricas descritas anteriormente y con la ayuda de las hojas de datos, cuyas características se resumen en la tabla 3:

**Tabla 3:** Comparación de características de estándares para Redes Inalámbricas de Sensores

Característica	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee	Wimax	LoRa
Cobertura	50 – 100 m	10 – 100 m	10 – 1600 m	Hasta 48 Km	10 – 20 Km
Topologías	Punto – hub	Ad – hoc	Ad – hoc, punto a punto, estrella o mesh	Punto a punto, estrella o mesh	Punto a punto, estrella o mesh
Velocidad	54 Mbps	1 Mbps	250 kbps	70 Mbps	50 kbps
Frecuencia	2.4 5.8 GHz	2.4 GHz	868 MHz (Europa) y 2.4 GHz	2,5 y 3,5 MHz.	868 Mhz (Europa), 915 Mhz (América) y 433 Mhz (Asia)
Nº de nodos por master	32	7	64.000	2.048	Altamente escalable
Consumo de energía	Alto	Medio	Muy bajo	Medio	Bajo
Seguridad	-	Cifrado de 64 y 128 bits	AES 128	OSA y SKA	AES-128

Costo	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto
-------	------	------	------	------	------

**Fuente:** Autor

Para evaluar cada una de las tecnologías inalámbricas se utiliza la escala Likert, en donde se estima una ponderación de 1-5 para establecer el nivel de eficiencia que tienen las características de cada tecnología de acuerdo con las características que requieren las redes inalámbricas de sensores detalladas en la tabla 1; la escala de valoración que se utiliza se indica en la tabla 4.

**Tabla 4:** Escala de valoración

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Nada eficiente	Ineficiente	Poco eficiente	Eficiente	Muy eficiente
0%	1-25%	26-50%	51-75%	16-100%

**Fuente:** Autor

Por otro lado, para conocer la eficiencia final de cada una de las tecnologías, se calcula la ponderación que tiene cada tecnología evaluada; para el cálculo de la ponderación se utiliza la ecuación 1.

$$P = \frac{\sum N_i}{T_i} * 100\% \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$N_i$ : Nivel de incidencia de la característica evaluada

$T_i$ : Total de incidencias de la tecnología al 100% de eficiencia

En la tabla 5 se indica el nivel de incidencia evaluado de cada una de las características, así como el porcentaje de eficiencia de cada una.

**Tabla 5:** Ponderación de eficiencia de las tecnologías de comunicación inalámbrica

Característica	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee	Wimax	LoRa
Cobertura	2	2	4	5	5
Topologías	2	2	5	5	5
Velocidad	5	3	4	4	5
N° de nodos por master	2	2	5	4	5
Consumo de energía	1	3	5	3	4
Seguridad	4	2	3	3	3
Costo	1	5	5	3	3
<b>Total de incidencias</b>	17	19	31	27	29
<b>Ponderación de eficiencia</b>	<b>48,57%</b>	<b>54,29%</b>	<b>88,57%</b>	<b>77,14%</b>	<b>82,86%</b>

**Fuente:** Autor

De acuerdo con las características de los tecnologías presentes en la tabla 3 y a la ponderación de eficiencia de la tabla 5, se selecciona el estándar Zigbee, debido a su



excelente funcionalidad con respecto a las otras tecnologías, además que permite trabajar establemente sobre una red de sensores para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y contaminación auditiva, características como su alto nivel de desplazamiento, principalmente a muy bajo coste y con un número elevado de nodos, la hace ideal para el desarrollo de esta investigación, además que es de fácil adquisición en el mercado local. El estudio y análisis de esta tecnología se detalla en la sección 4.2.5 del presente documento.

## **4.2. REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES PARA EL MONITOREO AMBIENTAL**

### **4.2.1. Características Generales**

La necesidad del ser humano de pronosticar eventos climatológicos y medioambientales como son erupciones volcánicas, movimientos sísmicos, emanación de contaminantes ambientales entre otros, lo han llevado a diseñar redes inalámbricas de monitorización ambiental implementadas “in situ” que pueden monitorear variables físicas, ambientales o atmosféricas, permitiendo generar alertas tempranas y consecuentemente prevenir catástrofes mayores.

Los sistemas de redes inalámbricas de sensores facilitan la adquisición de datos en aplicaciones en las que la instalación de sistemas tradicionales de adquisición cableados es complicada, bien sea por accesibilidad, espacio o incluso condiciones ambientales.

Gracias a su tecnología de bajo consumo permite monitorizar y controlar magnitudes como vibración, inclinación, temperatura, humedad, etc. durante largos periodos de tiempo, añadiendo la posibilidad de adquirir señales digitales de  $\pm 5V$ ,  $\pm 10V$ , 4-20mA etc. de sensores tradicionales y a través de los módulos de procesado de datos que envían la señal de forma inalámbrica al puesto de control.

Un área de aplicación de las Redes Inalámbricas de Sensores es el monitoreo ambiental. De acuerdo con Nittel (NITTEL, 2009) se han diseñado Redes Inalámbricas de Sensores para construir sistemas de observación terrestre (seguimiento de especies animales o vegetales), sistemas de observación geológica (monitoreo de actividad sísmica, glaciales y maremotos) y sistemas de observación acuática (monitoreo de parámetros químicos, físicos y biológicos en agua dulce o ecosistemas marinos).

El Sistema de Monitorización Ambiental (SIMA) es un sistema, con elementos de hardware y software, que nace del interés y/o necesidad que puede llegar a tener alguna entidad en relación con la monitorización de variables ambientales (luz, presión, humedad, temperatura, campos magnéticos, etc.), usando la tecnología de las Redes inalámbricas de Sensores, en algún entorno determinado.

#### **4.2.2. Escenarios de Aplicación**

**Monitoreo de la calidad del agua:** La calidad del agua es una característica relativa, es en realidad un atributo definido en función de su uso y aplicación. Cada uso requiere, por tanto, un determinado estándar de calidad. Por esta razón, para evaluar la calidad del agua es necesario considerar el contexto del uso probable que tendrá.

La contaminación del agua es uno de los problemas ambientales más graves, y con más peligrosas consecuencias para la salud humana. Por lo tanto, detectar la presencia de contaminantes en el agua es un tema trascendental. Se tiende a realizar calidad de aguas analizando los contaminantes presentes en las mismas, y por lo general, se realiza cuando se aprecian signos evidentes de contaminación.

**Monitoreo de la calidad del aire:** El índice de calidad del aire es una cifra que proporcionan las autoridades de una zona (normalmente urbana) y que refleja las cantidades de contaminantes presentes en el aire. Cuando la calidad del aire es buena, las personas pueden respirarlo indefinidamente sin que su salud se vea afectada. Cuando es mala pueden darse irritaciones oculares, todo tipo de problemas respiratorios e incluso cardíacos.

El monitoreo de la calidad del aire permite formar sistemas de alerta temprana, es decir si la calidad del aire baja (o, por las condiciones atmosféricas, se prevé que pueda bajar) de unos límites (que son distintos en cada país), las autoridades pueden tomar medidas como prohibir la circulación de todos los vehículos que emitan contaminación, de algunos de ellos, prohibir la práctica de deporte al aire libre o recomendar el uso de mascarillas.

**Monitoreo de condiciones atmosféricas:** El monitoreo de condiciones atmosféricas determina el estado del clima en un determinado lugar que lo caracteriza. Conocer los valores promedio de una zona permite predecir alguna alteración a futuro. El clima está

formado por algunos elementos como: radiación solar, humedad, temperatura, nubosidad, precipitación y presión atmosférica y vientos

**Monitoreo de niveles de contaminación acústica:** Según la “European Commission - Environment”, la contaminación acústica ambiental se refiere al ruido causado por carretera, ferrocarril, tráfico del aeropuerto, la industria, la construcción, así como algunas otras actividades al aire libre. “El ruido excesivo perjudica seriamente la salud humana e interfiere con las actividades diarias de las personas en la escuela, en el trabajo, en casa y en el tiempo libre. Se puede perturbar el sueño, causar efectos cardiovasculares y psicofisiológicos, reducir el rendimiento y provocar respuestas molestia y los cambios en el comportamiento social” (WHO, 2015).

En resumen, medir el nivel de ruido es importante, debido a que puede contribuir a convertir las ciudades y edificios en entornos inteligentes, ayudando a ahorrar energía y protegiendo a las personas, mejorando así el bienestar de los usuarios finales.

#### **4.2.3. Monitoreo de la Contaminación Ambiental**

A partir del siglo VIII, nuestro planeta ha experimentado un crecimiento demográfico muy significativo y con tendencia exponencial. Este crecimiento implica la aglomeración poblacional en las áreas urbanas con la formación de grandes zonas metropolitanas e incluso megaciudades. Actualmente, cerca de la mitad de la población mundial vive en las urbes (Perevochtchikova, 2009). Se pronostica que para el año 2030 la población urbana mundial puede llegar a 5000 millones de habitantes y representar así 60% del total (UNFPA, 2010).

Como sabemos el ser humano es el principal causante de la contaminación atmosférica, y dados estos datos si la concentración es mayormente en ciudades se deduce que la concentración de actividades contaminantes es en esta parte del planeta por la concentración de fábricas y el parque automotor existente. Es por ello, que este trabajo se ha enfocado en este particular, para lo cual se ha definido los siguientes parámetros de estudio:

### 4.2.3.1. Monitoreo de la calidad del aire

Varias actividades humanas contaminan el aire. Los contaminantes originados por la actividad humana pueden provenir de fuentes fijas (fábricas, plantas termoeléctricas, viviendas, etc.) como se muestra en la ilustración 9(a) o fuentes móviles (vehículos, aviones, trenes, barcos, etc.) de acuerdo con la ilustración 9(b). Existen además fuentes naturales, como por ejemplo el polen emitido por las flores, el polvo procedente de la erosión eólica y las erupciones volcánicas (ilustración 9(c)).



**Ilustración 9:** Tipos de contaminación del aire: a) Fuentes fijas, b) Fuentes móviles y c) Fuentes Naturales

**Fuente:** Autor

Cuando el aire tiene contaminantes en forma de partículas, gases o agentes biológicos, existe un potencial de efectos nocivos a la salud.

Últimamente, se ha desarrollado mucho la tecnología para el control de la calidad del aire, como resultado de una mayor conciencia, tanto de parte de los gobiernos como del público en general, sobre la importancia de mantener el aire limpio. En consecuencia, la OMS ha desarrollado un Sistema de información para el control de la calidad del aire (Air management information system -AMIS) como parte del programa de Ciudades Saludables. El objetivo del AMIS es actuar como un sistema global de intercambio de información sobre la calidad del aire (OMS, The Air Management Information System (AMIS) and a Global Air Quality Partnership, 1997). Esto ha obligado a instituciones gubernamentales a crear políticas de conservación y prevención, además de obligar a industrias como: a las plantas termoeléctricas, a los fabricantes de automóviles y a la industria en general a tomar medidas para disminuir la descarga de contaminantes a la atmósfera. Una alternativa para el monitoreo de este tipo de aplicación es a través de redes inalámbricas, logrando obtener datos en tiempo real para su respectivo análisis en estaciones base.

Los gases contaminantes más comunes del aire son los clorofluorocarbonos (CFC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido y dióxido de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y metales pesados, como plomo (Pb), cadmio (Cd) y mercurio (Hg) (Enciclopedia, 2019). Se producen por diferentes fuentes, pero la principal fuente artificial es la quema de combustible fósil.

#### **a. Tipos de fuentes emisoras**

**Puntual:** Las emisiones se calculan en forma individualizada para una determinada infraestructura, debido a que su tamaño, producción o grado contaminante, justifica una cuantificación específica. Las fuentes puntuales tienen una posición geográfica bien definida. Se incluyen por ejemplo las chimeneas de centrales térmicas de producción eléctrica y grandes industrias.

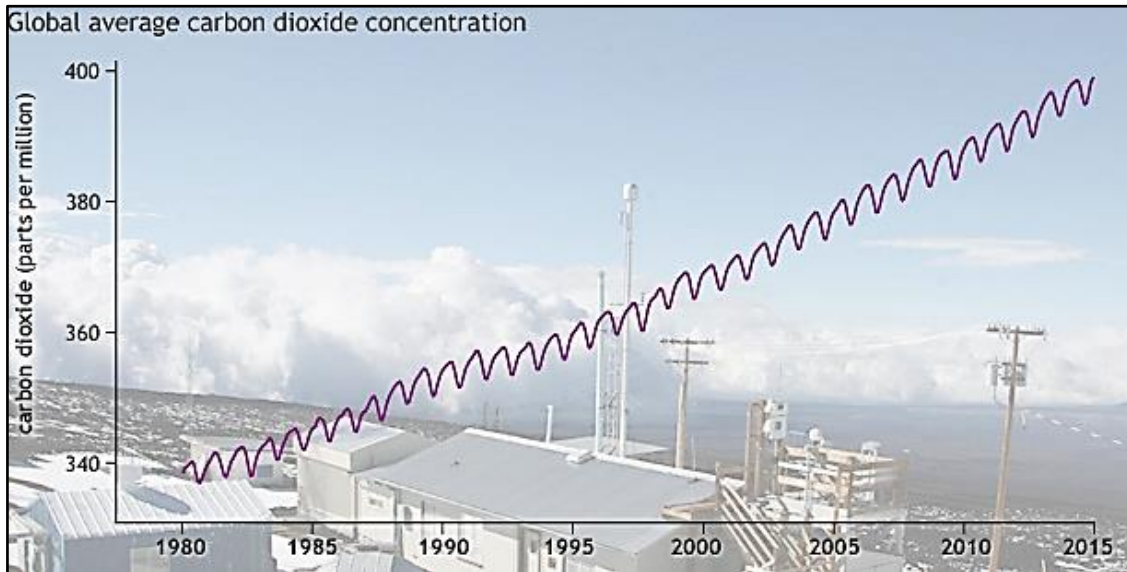
**Superficial:** Las emisiones se calculan para un conjunto de fuentes indefinidas, debido a que, por su pequeño tamaño individual, muy difícilmente pueden ser tratadas como fuentes puntuales. Normalmente se asume que las emisiones están distribuidas dentro de una zona geográfica establecida. Se incluyen por ejemplo las emisiones forestales, las actividades domésticas, las actividades agrícolas y ganaderas.

**Lineal:** Las emisiones se producen desde fuentes móviles a lo largo de ejes longitudinales, como es el caso de autopistas y carreteras, canales o ríos navegables, ferrocarriles y tráfico aéreo.

#### **b. Monitoreo del Dióxido de Carbono – CO<sub>2</sub> en el aire**

El dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero producido por actividades realizadas por el factor antropogénico (seres humanos); desde la Revolución Industrial el nivel de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera aumentó en un 40% (Kennedy, 2015) debido a la quema de combustibles fósiles y a las actividades humanas, generando el calentamiento global y aumentando el nivel de ácido en el pH (potencial hidrógeno) de los océanos.

En la ilustración 10, se muestra el crecimiento anual desde 1980 hasta el año 2015 de la concentración de CO<sub>2</sub> en nuestro planeta, en el que indica un crecimiento notable y alarmante sobre este tipo de contaminación.



**Ilustración 10:** Crecimiento de la concentración de CO<sub>2</sub> en el planeta  
**Fuente:** (Kennedy, 2015)

### c. Medida del dióxido de carbono en condiciones de equilibrio

El dióxido de carbono es un asfixiante simple que actúa básicamente por desplazamiento del oxígeno y que a elevadas concentraciones (>30.000 ppm) puede causar dolor de cabeza, mareos, somnolencia y problemas respiratorios, dependiendo de la concentración y de la duración de la exposición. Es un componente del aire exterior en el que se encuentra habitualmente a niveles entre 300 y 400 ppm, pudiendo alcanzar en zonas urbanas valores de hasta 550 ppm. El valor límite de exposición profesional según el INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo) para exposiciones diarias de 8 horas es de 5.000 ppm con un valor límite para exposiciones cortas de 15 minutos de 15.000 ppm. Estos valores son difíciles de encontrar en ambientes interiores no industriales como son oficinas, escuelas y servicios en general. En la práctica, en estos recintos se encuentran valores de 2.000 y hasta 3.000 ppm. Si se superan estos niveles puede deberse a una combustión incontrolada (Barenguer & Bernal, 2000).

En la siguiente ilustración se puede observar los diferentes efectos en el ser humano de los distintos niveles de CO<sub>2</sub> en el aire:

<b>Efecto de los distintos niveles de CO<sub>2</sub></b>	
CONCENTRACIÓN	EFEECTO
350 - 450 ppm	Concentración atmosférica típica
600 - 800 ppm	Calidad del aire interno aceptable
1.000 ppm	Calidad del aire interno tolerable
5.000 ppm	Límite promedio de exposición en un período de ocho horas
6.000 - 30.000 ppm	Preocupación, solo exposición breve
3 - 8%	Incremento de la frecuencia respiratoria, dolor de cabeza
> 10%	Náuseas, vómitos, pérdida de conocimiento
> 20%	Pérdida de conocimiento repentina, muerte

**Ilustración 11:** Efectos en el ser humano de los distintos niveles de CO<sub>2</sub> en el aire  
**Fuente:** (OMS, 2019)

#### d. Fuentes de Generación de CO<sub>2</sub> en el aire

Las fuentes que originan la disipación de CO<sub>2</sub> tienen algunos criterios que se dividen en sectores (OMS, 2019) los cuales se describe en la tabla 6.

**Tabla 6:** Fuentes de generación de CO<sub>2</sub> en el aire en zonas urbanas

Fuente	Porcentaje de las Emisiones de CO <sub>2</sub>	Ejemplos
Transporte	40%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buses</li> <li>• Automóviles</li> <li>• Motocicletas</li> <li>• Camiones</li> </ul>
Industrias	30%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fábricas de papel</li> <li>• Fábricas de carbón</li> <li>• Gasolineras</li> </ul>
Generación de energía eléctrica	15%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plantas de energía eléctrica</li> </ul>
Otros	15%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Doméstico – Residencial</li> <li>• Incendios Forestales</li> <li>• Agricultura – ganadería</li> <li>• Fuentes Naturales</li> <li>• Residuos</li> </ul>

**Fuente:** (OMS, 2019)

#### e. Contaminación producida por el parque automotor

El parque automotor provoca la mayor cantidad de contaminación ambiental especialmente ante la presencia de tráfico vehicular, las emisiones que se forman influyen directamente en la atmósfera afectando a nivel local, regional y global. Por lo general, la mayoría de los automotores que circulan, utilizan combustibles fósiles, tales como, gasolina y diésel que son los principales agentes contaminantes del medio ambiente,

debido a que están formados por diferentes hidrocarburos que una vez que entran en el proceso de combustión producen vapor de agua y CO<sub>2</sub> principalmente.

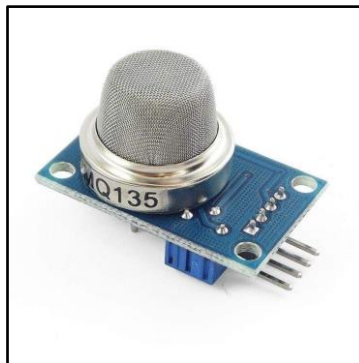
Dentro de una ciudad existe un sin número de aplicaciones que pueden generar información que indiquen condiciones relevantes para las personas que habitan la ciudad, tales es el caso de las estaciones climatológicas y pluviométricas, o los paneles de información de tráfico vehicular. Una manera completa de presentar esta información es a través de las redes inalámbricas de sensores; cuyo concepto engloba las ciudades inteligentes en las que aprovechan la recopilación de datos para disminuir los recursos, incluida la mano de obra o la contaminación causada por los vehículos.

#### **f. Sensores de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)**

Debido a que el CO<sub>2</sub> es inodoro e incoloro, resulta imposible detectar las fugas, con lo cual es necesario utilizar los sensores adecuados para garantizar la seguridad.

A continuación, se detallan los sensores más comunes utilizados en diferentes aplicaciones para la monitorización del nivel de concentración de dióxido de carbono.

- **Sensor MQ-135:** El sensor MQ135 (ver ilustración 12), ofrece un alcance de detección de CO<sub>2</sub> extenso, una respuesta rápida y alta sensibilidad; este tipo de sensor opera en el rango de detección de 10 – 1000ppm. Es muy utilizado en aplicaciones de control de calidad del aire para la detección de concentración de NH<sub>3</sub> (amoníaco), NO<sub>x</sub> (óxido de nitrógeno), alcohol, CO<sub>2</sub>, entre otros gases (SENSORae, 2018).



**Ilustración 12:** Sensor de CO<sub>2</sub>: MQ135

**Fuente:** (SENSORae, 2018)



- **Sensor TGS 4161:** Es un sensor pequeño de electrolito sólido que ofrece un bajo consumo de energía, alta selectividad, baja dependencia de humedad, entre otros; su rango de detección de CO<sub>2</sub> varía entre 350-10000ppm. El sensor TGS 4161 es ideal para aplicaciones de control de calidad del aire interior y para monitorización de CO<sub>2</sub> (FIGARO, 2018).



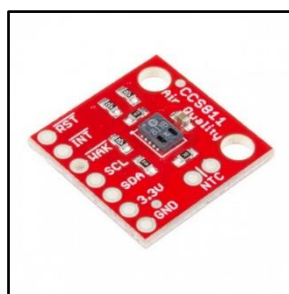
**Ilustración 13:** Sensor de CO<sub>2</sub>: TGS4161  
**Fuente:** (FIGARO, 2018)

- **Sensor MG811:** El sensor MG811 ofrece una buena selectividad y sensibilidad al dióxido de carbono, baja dependencia de humedad y temperatura, entre otros; Este sensor (el gris) junto con el módulo (todo lo demás) contiene un circuito, para amplificar o ajustar la sensibilidad dependiendo del ambiente donde se quiera utilizar y tiene un comparador con umbral ajustable y una salida analógica, la cual el microcontrolador leerá. Este sensor puede leer concentraciones desde 350 a 100000ppm (partes por millón). Este tipo de sensor es utilizado para el control de calidad del aire, control de procesos de fermentación y detección de concentración de CO<sub>2</sub> en temperatura ambiente (MicroJPM, 2019).



**Ilustración 14:** Sensor de CO<sub>2</sub>: MG 811  
**Fuente:** (MicroJPM, 2019)

- **Sensor CCS811 Air Quality Breakout:** Este sensor de control de calidad de aire es usado para la detección de contaminación en el medio ambiente, por lo general es implementado en circuitos de control como alarmas en las casas, sitios donde se desea prevenir altos niveles de contaminación a nivel aeróbico como industrias que manejan compuestos químicos que pueden ser nocivos también para la salud, especialmente en equipos controladores de calidad de aire en edificios/oficinas. Este sensor se encarga de la detección de concentración de gas en diversos porcentajes. La señal de salida que proporciona el CCS811 tiene diferentes pines, de carácter tanto analógico como digital: una señal de reloj (SCL) y datos (SDA), que permiten su configuración. Considerado como una solución de sensor de gas digital que detecta una amplia gama de Compuestos Orgánicos Volátiles Totales (TVOC), incluyendo niveles equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y óxido de metal (MOX). El CCS811 integrado admite múltiples modos de medición que se han optimizado para un bajo consumo de energía durante una medición activa del sensor y el modo inactivo, lo que prolonga la vida útil de la batería en aplicaciones portátiles. Consta también, de pines adicionales para agregar su propio termistor NTC para determinar la temperatura del entorno del CCS811, que puede usarse para ayudar a compensar las lecturas (Sparkfun, SparkFun Air Quality Breakout - CCS811, 2019).



**Ilustración 15:** Sensor de CO<sub>2</sub>: CCS811

**Fuente:** (Sparkfun, SparkFun Air Quality Breakout - CCS811, 2019)

#### **g. Análisis comparativo de Sensores de Dióxido de Carbono**

En el mercado existen múltiples soluciones de sensores de dióxido de carbono que difieren unos de otros debido a las características técnicas que presentan.

En la tabla 7, se puede observar el cuadro comparativo de las principales especificaciones técnicas, de los sensores más comunes, que se utilizan en aplicaciones de monitorización de CO<sub>2</sub>.

**Tabla 7:** Comparación de las características técnicas de los Sensores de CO<sub>2</sub>

Especificación Técnica	Sensor			
	MQ135	TGS 4161	MG811	CCS811
Alimentación	5.0±0.1V (AC o DC)	5.0±0.2V (DC)	6.0±0.1V (AC o DC)	3.3 V ±0.2V (DC)
Rango de detección	10 ~ 1000ppm	350 ~ 10000ppm	350 ~ 10000ppm	400 ~ 10000ppm
Circuito de acondicionamiento y amplificación	Si	Si	Si	Si
Corriente de calentamiento	~150 mA	~50 mA	~200 mA	~30 mA
Temperatura de operación	-20°C +70°C	-10 a +50 °C	-20 a +50 °C	-5 a +50 °C
Dependencia de humedad	Baja	Baja	Baja	Baja
Tiempo de calentamiento	1 minuto	10 minutos	10 minutos	20 minutos
Estabilidad	Baja	Media	Media	Buena
Costo	\$5	\$70	\$77	\$20

**Fuente:** Revisar Anexo VII: Hojas de datos

De manera similar al análisis comparativo de tecnologías, se utiliza la escala de Likert para realizar la evaluación de cada una de las características presentes en los sensores analizados, cuyo resultado se encuentra en la tabla 8.

**Tabla 8:** Ponderación de eficiencia de los sensores de CO<sub>2</sub>

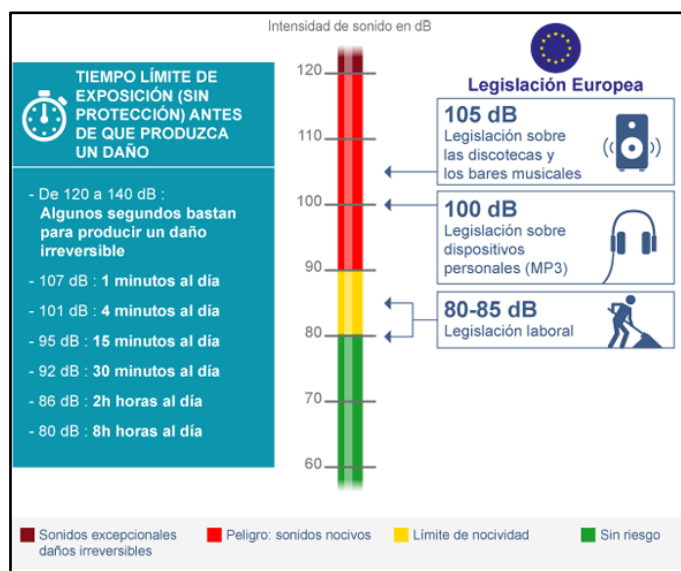
Especificación Técnica	Sensor			
	MQ135	TGS 4161	MG811	CCS811
Rango de detección	3	5	5	5
Corriente de calentamiento	2	4	2	5
Temperatura de operación	5	4	4	3
Dependencia de humedad	5	5	5	5
Tiempo de calentamiento	5	4	4	3
Estabilidad	2	4	4	5
Costo	5	2	2	4
<b>Total de incidencias</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>26</b>	<b>30</b>
<b>Ponderación de eficiencia</b>	<b>77,14%</b>	<b>80%</b>	<b>74,29%</b>	<b>85,71%</b>

**Fuente:** Autor

Como se evidencia en la tabla 7, cada uno de los sensores presenta diferentes características técnicas, sin embargo, a través del análisis y ponderación de eficiencia de los sensores realizado en la tabla 8, se identifica que el sensor CCS811, posee un bajo consumo de corriente, un amplio rango de detección y una alta estabilidad en la lectura de los datos, lo que lo hace ideal para las pruebas de este estudio.

### 4.2.3.2. Monitoreo de la contaminación acústica

En las últimas décadas, el crecimiento vertiginoso de la población en las grandes ciudades, los medios de transporte y el desarrollo científico-técnico e industrial han dado lugar al aumento en los niveles de ruido urbano y, por consiguiente, a la contaminación acústica, las fuentes que lo producen son diversas como se observa en la ilustración 16 y muy perjudiciales para el ser humano.



**Ilustración 16:** Contaminación acústica  
**Fuente:** (Campos Castillo, 2019)

La exposición a elevados niveles de ruido es perjudicial para la salud y gran parte de la población no le da la importancia que esto amerita, dejando pasar de forma desapercibida un contaminante ambiental que ocasiona efectos irreversibles con el paso del tiempo. El ruido y las ondas sonoras con una misma intensidad y frecuencia pueden llegar a dañar estructuralmente una edificación, debido a las vibraciones por la resonancia que produce, ocasionando en algunos casos derrumbes y modificaciones en el paisaje.

#### a. Fuentes de Generación de Ruido Urbano

Entendemos por fuente sonora aquel suceso físico cuya aparición en el lugar de medición eleva 10 dBA el nivel de ruido del fondo que se está evaluando. Las posibles fuentes sonoras que se detectaron en el lugar fueron establecidas a través de un análisis del entorno, al objeto de disponer de un listado de posibles fuentes y poder anotar la aparición de estas en los lugares de medición. Para determinar las fuentes de generación de ruido urbano, se ha investigado sobre estudios de la OMS, obteniendo la tabla 9.

**Tabla 9:** Fuentes de generación de ruido urbano

<b>Fuente</b>	<b>Ejemplo</b>
Tráfico terrestre (Constituyéndose alrededor del 75% del ruido urbano)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Automóviles</li> <li>▪ Camiones</li> <li>▪ Motos</li> <li>▪ Ambulancias</li> </ul>
De origen comunitario (Constituyéndose alrededor del 8% del ruido urbano)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Escuelas</li> <li>▪ Colegios</li> <li>▪ Niños jugando</li> <li>▪ Conversaciones en la calle</li> <li>▪ Hospitales</li> <li>▪ Hoteles y hostales</li> <li>▪ Bancos</li> <li>▪ Gasolineras</li> <li>▪ Municipios</li> </ul>
De origen animal (Constituyéndose alrededor del 1,95 % del ruido urbano)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mascotas</li> <li>▪ Aves</li> </ul>
De origen mecánico (Constituyéndose alrededor del 5% del ruido urbano)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Obras</li> <li>▪ Maquinaria</li> <li>▪ Ventilación/climatización</li> </ul>
Tráfico aéreo (Constituyéndose alrededor del 0.05% del ruido urbano)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aviones</li> <li>▪ Helicópteros</li> </ul>
Actividades comerciales y ocio (Constituyéndose alrededor del 10% del ruido urbano)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Talleres mecánicos</li> <li>▪ Talleres de lavado de autos</li> <li>▪ Mercados</li> <li>▪ Bares</li> <li>▪ Parques y plazas</li> </ul>

**Fuente:** (OMS, 2019)

### **b. Medida de los niveles de ruido en condiciones de equilibrio**

De acuerdo con la OMS, los niveles de ruido adecuados se los puede caracterizar para diferentes ambientes, en la tabla 10 se detalla los niveles permitidos para el ser humano.

**Tabla 10:** Niveles de ruido permitidos según la OMS

<b>FUENTE</b>	<b>AMBIENTE</b>	<b>NIVEL SONORO (dB)</b>
Ruido de Emisión para Fuentes Fijas	Usos de Suelo de Equipamiento, Protección Ecológica, Patrimonio Cultural.	<b>45</b> De 07h00 a 22h00
	Usos de Suelo Residencial	<b>50</b> De 07h00 a 22h00
	Usos de Suelo Múltiple	<b>55</b> De 07h00 a 22h00
	Usos de Suelo de Recursos Naturales (RNR y RNNR), Agrícola Residencial, Industrial 1 y 2.	<b>60</b> De 07h00 a 22h00
	Usos de Suelo e Industrial 3 y 4	<b>70</b> De 07h00 a 22h00
Ruido de Emisión para Fuentes Móviles	Motocicletas o similares	<b>86</b>
	Vehículos livianos	<b>81</b>
	Vehículos para carga mediana y pesada	<b>88</b>
	Buses, busetas, articulados	<b>85</b>

**Fuente:** (Berglund, Lindvall, & Schwela, 2015)

Los estudios en el tema han priorizado medir, a partir de la emisión de decibeles, el nivel de ruido. La intención es conocer, comprender e incidir sobre la contaminación auditiva. La idea se centra en la búsqueda de alternativas para reducir los niveles, las molestias, y sobre todo mitigar las afectaciones en la salud. Lo cierto es que cualquier tipo de actividad genera efectos sonoros en diferente nivel de decibels. En la tabla 11 se presenta algunos ejemplos de actividades cotidianas.

**Tabla 11:** Ejemplos de percepción sonora en actividades cotidianas

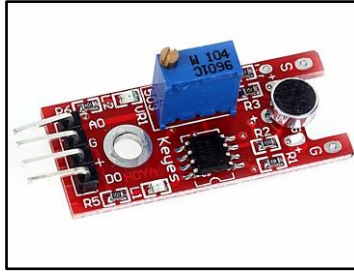
Actividad	Nivel sonoro en decibeles con ponderación A (dBA)	Percepción del ambiente
Pisada	10	Ambiente silencioso
Cámaras del laboratorio	10	
Viento en los árboles	20	
Estudio de grabación	20	
Conversación en voz baja	30	Ambiente poco ruidoso
Dormitorio	30	
Biblioteca	40	
Oficina	50	
Despacho tranquilo	50	
Conversación	60	
Electrodomésticos	70	Ambiente ruidoso
<b>Exposición prolongada a más de 70 dBA causará pérdida de audición y otras afectaciones de la salud</b>		
Calle transitada	80	
Tránsito vehicular congestionado	80	
Transporte de carga pesada	90	Ambiente molesto
Motocicleta	100	
Máquina industrial	100	
Concierto de rock	120	Ambiente insoportable
<b>Límite de umbral del dolor: 120-130 dBA</b>		
Martillo Neumático	130	
Despegue de avión	150	

**Fuente:** (Salinas Castillo & Alfie Cohen, 2016)

### c. Sensores de Niveles de Ruido

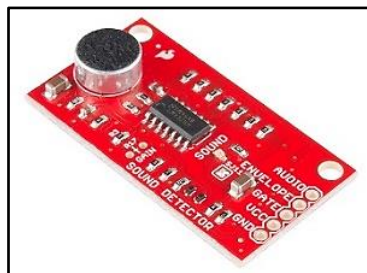
A continuación, se detallan los sensores más comunes utilizados en diferentes aplicaciones para la monitorización de los niveles de ruido.

- **Sensor KY-038:** Este módulo permite detectar de forma fácil, rápida y precisa vibración producida en el lugar en el cual este se encuentre, posee un sensor el cual tiene la capacidad de detectar las diversas vibraciones producidas en un ambiente, este módulo es compatible con Arduino o con cualquier Microcontrolador que posea un pin de 5 Volts (SensorKit, 2016).



**Ilustración 17:** Sensor de niveles de ruido: KY-038  
**Fuente:** (SensorKit, 2016)

- **Detector de Sonido Sparkfun:** El detector de sonido SparkFun es un tablero de detección de audio pequeño y muy fácil de usar con tres salidas diferentes. El detector de sonido no solo proporciona una salida de audio, sino también una indicación binaria de la presencia de sonido y una representación analógica de su amplitud. Las 3 salidas son simultáneas e independientes, por lo que puede usar tantas o tan pocas como quiera a la vez (Microphone - Arduino, 2017). Muy fácil de utilizar que consta de tres salidas diferentes. La primera es una salida de detección de sonido, la segunda es una salida binaria ante la presencia de sonido y la última es una representación analógica de la amplitud. Las tres salidas son simultáneas y cada una puede ser utilizada de forma independiente (Sparkfun, SparkFun Sound Detector, 2019).



**Ilustración 18:** Sensor de niveles de ruido: Detector de sonido Sparkfun  
**Fuente:** (Microphone - Arduino, 2017)

- **U-Sound sensor de ruido:** U-Sound es un sensor acústico autónomo e inalámbrico diseñado para medir el ruido en la ciudad. Realiza medidas de manera continua y transmite cada minuto un nuevo valor de nivel de sonido continuo equivalente a través de la red de comunicación. Esta información está disponible en la nube y se puede consultar en tiempo real de manera remota (Urbiotica, 2016).



**Ilustración 19:** Sensor de niveles de ruido: U-Sound  
**Fuente:** (Urbiotica, 2016)

#### d. Análisis comparativo de Sensores de niveles de ruido

En la tabla 12, se puede observar el cuadro comparativo de las principales características técnicas de los sensores más comunes, que se utilizan en aplicaciones de monitorización de niveles de ruido.

**Tabla 12:** Comparación de características técnicas de los sensores de niveles de ruido

Especificación Técnica	Sensor		
	KY-038	Detector de sonido Sparkfun	U-Sound
<b>Alimentación</b>	5 V DC	3.5 y 5.5 V DC	Dispone de baterías recargables integradas. Se alimenta mediante la red de alumbrado o paneles solares.
<b>Rango de medida</b>	De 40 dB(A) hasta 100 dB(A) $\pm 5$ dB	De 30 dB(A) hasta 120 dB(A) $\pm 2$ dB	De 40 dB(A) hasta 110 dB(A) $\pm 2$ dB
<b>Rango de frecuencia</b>	20 Hz a 20 kHz	20 Hz a 20 kHz	20 Hz a 20 kHz
<b>Temperatura</b>	-20°C a +60°C	-40°C a +125°C	-33°C a 65°C
<b>Sensibilidad</b>	Baja	Buena	Buena
<b>Precio</b>	\$2,50	\$10,95	\$200

**Fuente:** Autor

De igual manera que los análisis anteriores se ha elaborado la tabla 13 de ponderación de eficiencia de las características presentes en los sensores de sonido.

**Tabla 13:** Ponderación de eficiencia de los Sensores de Ruido

Especificación Técnica	Sensor		
	KY-038	Detector de sonido Sparkfun	U-Sound
Rango de medida	3	4	5
Rango de frecuencia	5	5	5
Temperatura	4	5	5
Sensibilidad	3	5	5
Precio	5	4	1
<b>Total de incidencias</b>	20	23	20
<b>Ponderación de eficiencia</b>	<b>80%</b>	<b>92%</b>	<b>84%</b>

**Fuente:** Autor



Con el análisis de la tabla 12, y la ponderación de eficiencia de la tabla 13 se ha determinado que el detector de sonido Sparkfun es el dispositivo más adecuado para la realización de este trabajo presentando excelentes características como rango de medida y a un precio asequible para la evaluación práctica con respecto a los otros sensores.

#### 4.2.3.3. Monitoreo ambiental en América Latina

En la región Latinoamericana existen varios países que han hecho esfuerzos para el monitoreo ambiental y se puede dividir en tres secciones (Korc, 2009): países con buena capacidad de monitoreo: Brasil, Chile y México; países con limitada capacidad de monitoreo: Argentina, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Perú y Venezuela; y países con mínima capacidad de monitoreo: Bolivia, Guatemala, Nicaragua y Uruguay.

A continuación, en la ilustración 20, se identifican países como México, Bolivia, Chile, Perú, Colombia, Uruguay y El Salvador, en América Latina cuyo porcentaje de contaminación es considerable según la revista 2018 WORLD AIR QUALITY REPORT (IQAir, 2018).

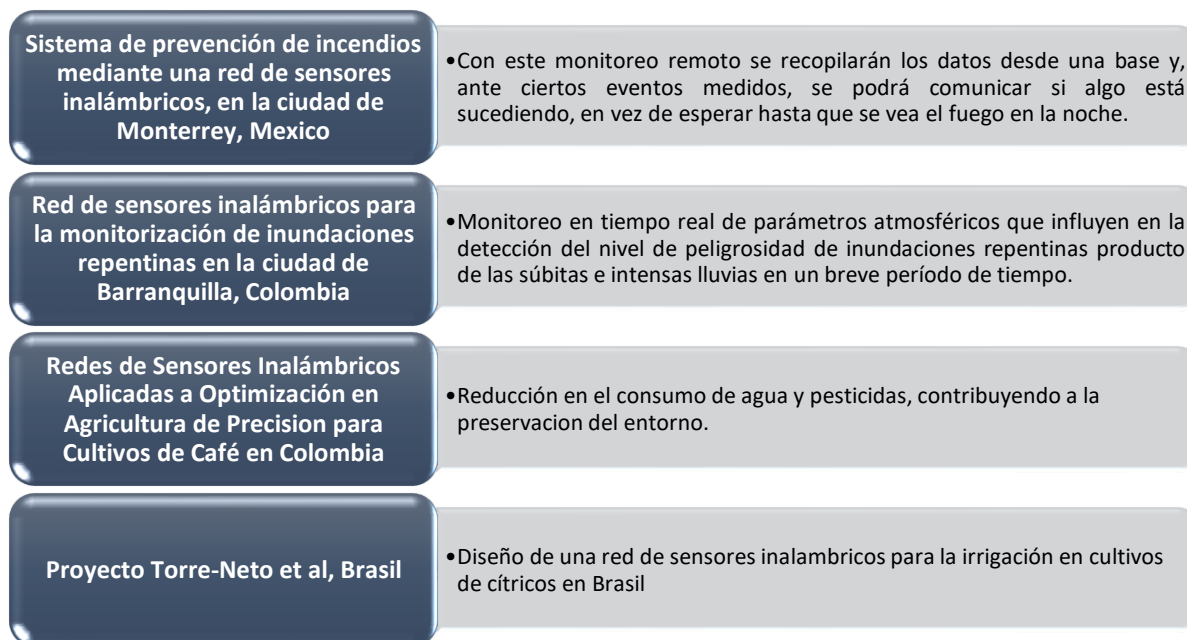


**Ilustración 20:** Ciudades más contaminadas de Latinoamérica  
**Fuente:** (Natura, 2017) (IQAir, 2018)

El medio ambiente se ve afectado principalmente por sustancias tales como, el dióxido de carbono, los hidrocarburos, metales pesados, entre otros, estas sustancias desgastan la

capa de ozono logrando que se agote cada vez más. En América Latina, según datos obtenidos por la OMS se registraron alrededor de 440 mil muertes prematuras a causa de la contaminación ambiental (LaHora, 2013).

La siguiente ilustración muestra algunos proyectos desarrollados en América Latina para reducir la contaminación ambiental, con el objetivo de monitorizar algunos parámetros ambientales:



**Ilustración 21:** Proyectos de monitoreo ambiental en América Latina  
**Fuente:** Autor

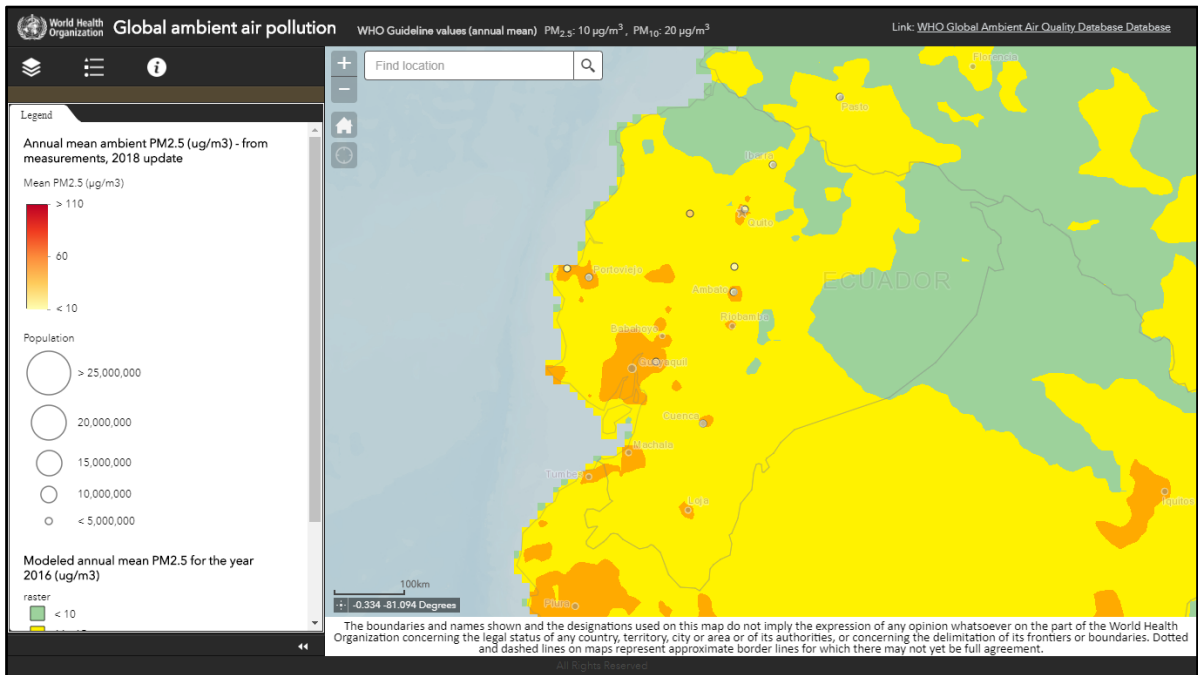
#### 4.2.3.4. Monitoreo ambiental en Ecuador y la Ciudad de Loja

##### Monitoreo ambiental en Ecuador

La contaminación ambiental en las ciudades del país es un problema importante de salud ambiental que afecta a países desarrollados y en desarrollo de todo el mundo. En el Ecuador la situación de la gestión ambiental presenta profundas carencias, de acuerdo con estudios sociales publicados, la gestión ambiental presenta problemas tales como: la falta de seguimiento de convenios suscritos, debilidad institucional y presupuestaria del Ministerio del Ambiente. Adicionalmente, los diferentes entes involucrados en la gestión ambiental del aire mantienen información dispersa, escasa y poco confiable.

En la ilustración 22, se muestra un mapa con los niveles contaminación ambiental en Ecuador, medidos con respecto a la exposición a partículas pequeñas de 2,5 micrones o

menos de diámetro (PM2.5), que causan enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer (OMS, 2019):



**Ilustración 22:** Niveles de Contaminación atmosférica en Ecuador  
**Fuente:** (OMS, 2019)

En el país, se han desarrollado algunos proyectos basados en las redes inalámbricas de sensores con el objetivo de monitorizar algunas condiciones ambientales como:

<p><b>Red de sensores inalámbricos para la monitorización de erupciones volcánicas en el volcán Cotopaxi</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoreo y cuantificación en tiempo real de flujos de lodo producidos por erupciones volcánicas del volcán Cotopaxi.</li> </ul>
<p><b>Gestión de redes de sensores inalámbricos (WSN) para la industria petrolera en Esmeraldas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite la expansión del sistema de una manera rápida debido a que existen múltiples aplicaciones para la obtención y procesamiento de datos.</li> </ul>
<p><b>Diseño de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo del tránsito vehicular y la contaminación CO2 dentro de un sector urbano</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitorización de variables ambientales como el CO2 y ruido en la ciudad de Cuenca.</li> </ul>

**Ilustración 23:** Proyectos de monitorización ambiental en Ecuador  
**Fuente:** Autor

**Monitoreo ambiental en la ciudad de Loja**

En la ciudad de Loja, a partir del último censo poblacional 2010, se ha observado un acelerado crecimiento demográfico, el cual se manifiesta con la creciente demanda de vehículos particulares, unidades de transporte público y taxis. Esta situación ha originado el crecimiento del parque automotor, que causa problemas de congestión y genera incremento de emisiones contaminantes a la atmósfera, que afectan a la población (LojaGOB, 2017).

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas ambientales de Loja; el acelerado incremento del parque automotor y la concentración de las actividades en el centro de la ciudad, han originado el incremento del tráfico que genera una gran cantidad de gases contaminantes, que deterioran la calidad del aire y aumentan la contaminación acústica de la ciudad. El Municipio de Loja con la finalidad de reducir este tipo de contaminantes y junto con la Jefatura de Gestión Ambiental han creado programas que traten de reducir este tipo de contaminantes, tales es el caso de Proyecto Huella de ciudades, cuyo objetivo es minimizar los efectos que dejan los contaminantes en el aire y agua, denominados huella de carbono y huella hídrica en el proyecto (LojaGOB, 2019).

#### **4.2.4. Simuladores de Redes Inalámbricas**

Los simuladores de redes inalámbricas asistidos por ordenador ajustan objetos o actividades hipotéticas o de la vida real, permitiendo estudiar cómo funciona un sistema si se eligen apropiadamente los parámetros que lo caracterizan. Específicamente, los simuladores de red se emplean para diseñar, simular, verificar y analizar el rendimiento de protocolos y algoritmos de una manera controlada y reproducible (Gil Jimenez, 2009).

En el área de las redes de ordenadores, es muy costoso implementar un banco de pruebas completo con varios equipos, encaminadores y enlaces. Afortunadamente, los simuladores de red permiten analizar a bajo coste una gran variedad de escenarios. No obstante, los simuladores de red no son ideales, debido a que no pueden modelar perfectamente todos los detalles reales. Sin embargo, si están bien diseñados serán lo suficientemente precisos para ofrecer una idea del funcionamiento de la red real. Es por ello por lo que conviene estudiar qué características ofrecen los simuladores de red disponibles para conocer cuál es el más conveniente en cada circunstancia.

Existen dos tipos de entornos de simulación de las Redes Inalámbricas de Sensores:

- **Entornos Generales:** obtiene datos de forma muy general de la red.
- **Entornos Específicos:** están preparados para emular y simular el software y el hardware de determinadas Redes Inalámbricas de Sensores, además cuentan con mayor exactitud y realismo de los resultados obtenidos.

#### 4.2.4.1. Comparación de Simuladores de Redes Inalámbricas de Sensores

Uno de los métodos a usar es el desarrollo de la simulación de la red, mediante la cual nos dará una visión holística de la topología de red que se debe usar. Existe una variedad de programas de simuladores de Redes Inalámbricas de Sensores implementados para el estándar IEE 802.15.4 – Zigbee, en la mayoría de los simuladores de redes los módulos que implementan IEEE 802.15.4/ ZigBee, son fruto de contribuciones externas y casi siempre están aún en fase de desarrollo, pero para el estudio se consideran muy sobresalientes. A continuación, en la tabla 14 se compara algunas características de los simuladores.

**Tabla 14:** Comparación entre plataformas de simulación para Redes Inalámbricas de Sensores

<b>Simulador Característica</b>	<b>RIVERBED</b>	<b>OMNET++</b>	<b>NS2</b>
<b>Uso investigativo</b>	Alto	Alto	Alto
<b>Tipo de licencia</b>	Comercial	Libre	Libre
<b>Sistemas Operativos de soporte</b>	Windows/Linux	Windows/Unix	Linux/Windows/Mac/Unix
<b>Interfaz gráfica</b>	Alta	Media	Baja
<b>Curva de aprendizaje</b>	Alta	Alta	Alta
<b>Soporte de tecnologías de nivel dos y tres</b>	Alto	Alto	Alto
<b>Nivel de tráfico que permite modelar</b>	Alto	Alto	Alto
<b>Documentación disponible</b>	Alta	Media	Alta
<b>Complejidad</b>	Media	Alta	Media

Fuente: (Ochoa Azuero, 2016)

Con la descripción de la tabla anterior se realiza la ponderación de eficiencia de las características que presenta cada simulador, las cuales se detalla en la tabla 15.

**Tabla 15:** Ponderación de eficiencia de los simuladores de red

<b>Simulador Característica</b>	<b>RIVERBED</b>	<b>OMNET++</b>	<b>NS2</b>
Uso investigativo	5	5	5
Tipo de licencia	4	5	5
Sistemas Operativos de soporte	5	4	5
Interfaz grafica	5	4	3

Curva de aprendizaje	5	5	5
Soporte de tecnologías de nivel dos y tres	5	5	5
Nivel de tráfico que permite modelar	5	5	5
Documentación disponible	5	4	5
Complejidad	5	3	4
<b>Total de incidencias</b>	<b>44</b>	<b>40</b>	<b>42</b>
<b>Ponderación de eficiencia</b>	<b>97,78%</b>	<b>88,89%</b>	<b>93,33%</b>

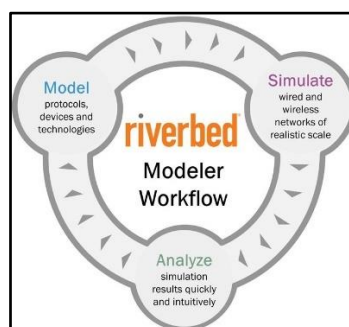
**Fuente:** Autor

Por lo analizado en la tabla 10 y con la ponderación de eficiencia en la tabla 15, se toma la decisión que el simulador que será utilizado en el presente proyecto es RIVERVED MODELER, debido a que provee una interfaz gráfica muy amigable con el usuario, tiene un gran rendimiento en redes inalámbricas, ofrece una amplia visibilidad y control entre dominios de infraestructura, así como la recopilación de datos y análisis profundo para poder hacer un diagnóstico poderoso sobre la raíz del problema, el único inconveniente es el tipo de licencia que maneja que es comercial, sin embargo, este software cuenta con una versión para el uso de estudiantes.

En la siguiente sección se realizará una descripción de este software como simulador de redes de sensores inalámbricos.

#### 4.2.4.2. Simulador RIVERBED MODELER

Riverbed Modeler antes llamado OPNET, se compone de un conjunto de protocolos y tecnologías con un sofisticado entorno de desarrollo. Al modelar todos los tipos y tecnologías de red (incluyendo VoIP, TCP, OSPFv3, MPLS, IPv6, y más), Riverbed Modeler analiza redes para comparar el impacto de diferentes diseños de la tecnología en el comportamiento de extremo a extremo. Riverbed Modeler le permite probar y demostrar diseños de la tecnología antes de la producción; aumentar la productividad de la red de I + D; desarrollar protocolos y tecnologías inalámbricas propietarias; y evaluar mejoras en los protocolos basados en estándares.



**Ilustración 24:** Software de Riverbed Modeler

**Fuente:** (Riverbed, 2019)

## Características:

- Dispone de multitud de librerías, lo que permite simular gran diversidad de redes donde intervenga un amplio número de protocolos y variables específicas que el usuario podrá modificar y estudiar.
- Utiliza distintos niveles de modelado o paradigmas para representar los diferentes componentes de una red. Cada nivel está asociado a un dominio y a un editor.
- Proporciona acceso directo al código fuente siendo esto una gran ventaja para los nuevos programadores.
- Permite simular sistemas de comunicaciones y así evaluar las prestaciones de una red bajo diversas condiciones de simulación como: flujos variables de tráfico, pérdida de paquetes o de conexiones entre terminales y la estación base, caídas de enlaces, etc.

La instalación de este simulador de redes es muy sencilla, lo que podemos verificar en el anexo 2 de este trabajo.

### 4.2.4.3. Parámetros de evaluación en la simulación de red

En una simulación de una Redes Inalámbricas de Sensores se evalúan los siguientes parámetros de acuerdo con la tabla 16.

**Tabla 16:** Parámetros de evaluación en la simulación de una red Redes Inalámbricas de Sensores

Parámetro	Descripción	Ecuación
Velocidad efectiva o Throughput	Se define como la velocidad final con la que cada uno de los nodos que componen la red enviarán la información hacia su nodo coordinador. Esta velocidad normalmente es inferior a la velocidad pico de la red.	$\text{Throughput} = \frac{\sum \text{Bits de información}}{\text{Tiempo total}}$ <i>Ecuación 2.</i>
Retardo o End to End Delay	Se define como el tiempo en que tarda un paquete en llegar desde un nodo final hasta el nodo coordinador.	$\text{Delay} = \frac{\sum \text{Tiempo de Rx} - \text{Tiempo de envío}}{\# \text{ de conexiones}}$ <i>Ecuación 3.</i>
Números de saltos o Hops	Se refiere al número de nodos que un paquete de información deberá atravesar hasta llegar a su destino.	Sin ecuación.
Consumo de energía	Se realiza con una simple resta del total de energía inicial en cada nodo y el consumo de energía en cada suceso de la red.	Sin ecuación.

**Fuente:** (Quinde, 2016)

## 4.2.5. Estándar ZIGBEE (IEEE 802.15.4)

### 4.2.5.1. Definición

ZigBee es una tecnología propia de Redes Inalámbricas de Área Personal - WPAN delineada por la ZigBee Alliance; establece una solución de comunicación de corto alcance y de bajo consumo energético, basado principalmente en el estándar IEEE 802.15.4, su objetivo principal es manejar un conjunto de dispositivos llamados sensores, que funcionan a bajos niveles de energía y bajas transferencias de datos en comparación con otras tecnologías inalámbricas de corto alcance (LH & WT, 2010).

Proporciona gran ventaja en cuanto a ahorro energético, debido a que usa tramas *Beacon* cuya capacidad de información es de 16 bits, tramas que admiten sincronizar los dispositivos de la red para que puedan subsistir en modo ahorro de energía el mayor tiempo posible.

### Características

- Trabaja en la especificación IEEE 802.15.4.
- El rango de cobertura va desde 10 a 100 metros en interiores y hasta 1600 metros en exteriores por dispositivo.
- Soporta diferentes tipos de topologías como estrella, punto a punto, malla o árbol.
- Puede trabajar tanto en las bandas ISM de 2.4 GHz como en la de 868 MHz (Europa) y 915 MHz (Estados Unidos).
- Tiene una velocidad de transmisión de hasta 250 kbps en la frecuencia de 2.4 GHz, 40 kbps en la frecuencia de 915 MHz y 20 kbps en la frecuencia de 868 MHz, útil para aplicaciones que no requieren alta transmisión de datos.
- Usa CSMA-CA para acceso al canal.
- Tiene un consumo de energía reducido, Zigbee consume 30 mA para la transmisión y en modo reposo 3μA.
- Permite que las redes manejen hasta  $2^{16} \approx 65536$  dispositivos.
- Mantiene un alto rendimiento y baja latencia para dispositivos de bajo ciclo de trabajo, muy conveniente para sensores y controles.
- Protocolo con *handshake* (diálogo) para mejorar la seguridad en las transferencias.



- Bajo coste en dispositivos, instalación y mantenimiento.
- Puede funcionar en un modo de bajo consumo, lo que supone años de duración de sus baterías.
- Puede coexistir con redes de la misma frecuencia como Wifi o bluetooth sin ninguna alteración, esto es gracias a su tasa de transmisión.
- Comunicación inalámbrica confiable.

## Frecuencias de trabajo

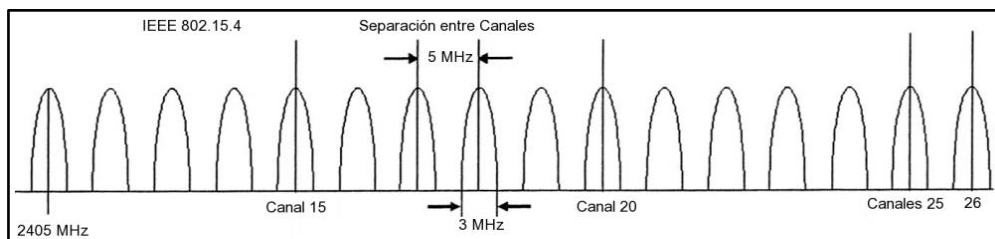
Las frecuencias definidas por el estándar IEEE 802.15.4 se reparten entre los 27 canales disponibles y se muestran en la tabla 17.

**Tabla 17:** Frecuencias IEEE 802.15.4

Frecuencia	Número de Canales	Cobertura	Velocidad (Mbps)
869.0-868.6 MHz	1	Europa	20/100/250
903.0-928.0 MHz	10	Estados Unidos	40/250
2.40-2.48 GHz	16	Mundial	250

**Fuente:** (Grupo de Investigación EDMANS, 2009)

Este estándar indica que, entre cada canal, deben existir 5 MHz de diferencia, partiendo de la frecuencia base 2.405 GHz, se llegan hasta los 2.480 GHz, como lo indica la ilustración 25.



**Ilustración 25:** Canales disponibles para el protocolo IEEE 802.15.4

**Fuente:** (Oyarce, 2015)

Se observa que hay 16 canales disponibles, sin embargo, los valores se asignan desde el 11 hasta el 26. Para calcular la frecuencia central se utiliza la siguiente fórmula:

$$Canal = 2.405 + (CH - 11) \times 0.005 [GHz] \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde CH equivale al número del canal entre 11 y 26.

En la tabla 18 se identifica la frecuencia central de cada canal, así como su límite inferior y superior:

**Tabla 18:** Frecuencias de canales IEEE 802.15.4

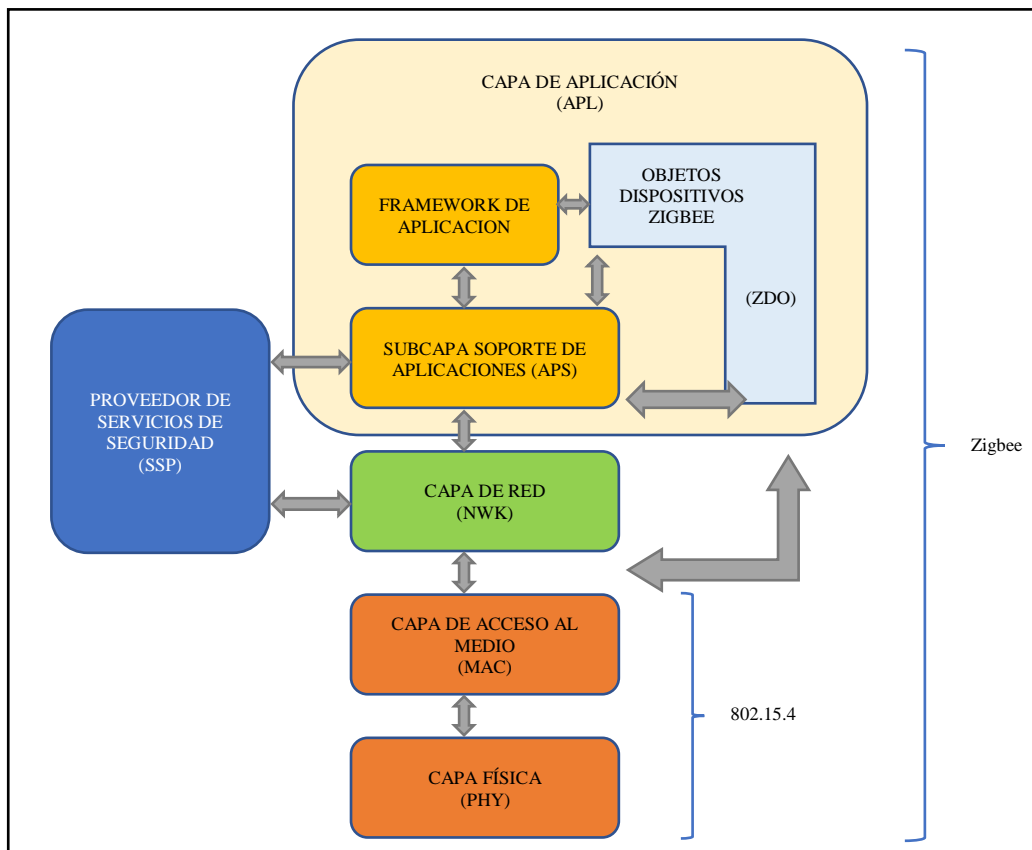
Canal	Frecuencia			Canal	Frecuencia		
	Inferior	Central	Superior		Inferior	Central	Superior
11	2,4025	2,4050	2,4075	19	2,4425	2,4450	2,4475
12	2,4075	2,4100	2,4125	20	2,4475	2,4500	2,4525
13	2,4125	2,4150	2,4175	21	2,4525	2,4550	2,4575
14	2,4175	2,4200	2,4225	22	2,4575	2,4600	2,4625
15	2,4225	2,4250	2,4275	23	2,4625	2,4650	2,4675
16	2,4225	2,4250	2,4275	24	2,4675	2,4700	2,4725
17	2,4325	2,4350	2,4375	25	2,4725	2,4750	2,4775
18	2,4375	2,4400	2,4425	24	2,4775	2,4800	2,4825

Fuente: (Oyarce, 2015)

#### 4.2.5.2. Capas del protocolo Zigbee

Este estándar se encuentra en el nivel 2 (Enlace de datos) del modelo OSI. Aquí las unidades de la información digital (bits) son gestionados y organizados para convertirse en impulsos electromagnéticos (ondas) en el nivel inferior, el físico.

En la siguiente ilustración se muestra las capas por las que se encuentra distribuido el protocolo 802.15.4 Zigbee:



**Ilustración 26:** Capas de operación de Zigbee en el modelo OSI

Fuente: (Acosta, 2006)

La tecnología Zigbee se encuentra dentro de 4 capas en referencia al modelo OSI; en el nivel inferior se encuentra la capa física y control de acceso al medio que permiten la transmisión de datos por aire, en la siguiente capa, la capa de red brinda los medios para iniciar red, unirse a la red, enrutar la información, garantizar la entrega de paquetes, filtrar paquetes, cifrarlos y autenticarlos.

Una de las características más sobresalientes del estándar Zigbee es el enrutamiento de malla, que usa el protocolo *AODV*, que se basa en solicitudes que crea constantemente los caminos disponibles en su base de datos reduciendo de esta manera el consumo de energía.

Finalmente, la última capa, la de aplicación es responsable de mantener al nodo en la red, filtra paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red.

### **Seguridad en Zigbee**

La pérdida de información es algo que el protocolo Zigbee se toma en serio para lo cual implementa las siguientes características a nivel de capa MAC, para evitar este tipo de pérdida, que se detalla en la tabla 19.

**Tabla 19:** Características de seguridad del protocolo Zigbee

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
Datos encriptados	Datos que usan de 128 bits de encriptación.
Secuencia de refresco	Admite comprobar que las tramas no han sido reemplazadas por otras.
Control de accesos	Mantiene una lista de dispositivos conectados a la red.
Integración de tramas	Protege la información a fin de evitar su modificación.

**Fuente:** (Soleimany, 2015)

En una red inalámbrica, los mensajes transmitidos pueden ser recibidos por cualquier dispositivo cercano, incluido un intruso. Hay dos preocupaciones principales de seguridad en una red inalámbrica. El primero es la confidencialidad de los datos. El dispositivo intruso puede obtener información confidencial simplemente escuchando los mensajes transmitidos. Cifrar los mensajes antes de la transmisión resolverá el problema de confidencialidad. Un algoritmo de cifrado modifica un mensaje utilizando una cadena de bits conocida como la clave de seguridad, y solo el destinatario podrá recuperar el mensaje

original. El estándar IEEE 802.15.4 admite el uso del Estándar de cifrado avanzado (AES) para cifrar sus mensajes salientes.

La segunda preocupación es que el dispositivo intruso puede modificar y reenviar uno de los mensajes anteriores, incluso si los mensajes están cifrados. Incluir un código de integridad del mensaje (MIC) con cada trama saliente permitirá al destinatario saber si el mensaje ha sido cambiado en tránsito. Este proceso se conoce como autenticación de datos.

Una de las principales limitaciones en la implementación de funciones de seguridad en una red inalámbrica ZigBee son los recursos limitados. Los nodos son principalmente alimentados por batería y tienen una potencia de cálculo y un tamaño de memoria limitados. ZigBee está dirigido a aplicaciones de bajo costo y es posible que el hardware en los nodos no sea resistente a la manipulación. Si un intruso adquiere un nodo de una red operativa que no tiene resistencia a la manipulación indebida, la clave real podría obtenerse simplemente desde la memoria del dispositivo. Un nodo resistente a la manipulación puede borrar la información confidencial, incluidas las claves de seguridad, si se detecta una manipulación indebida.

#### 4.2.5.3. Módulos XBee – Zigbee

Los módulos XBee son soluciones desarrolladas por la empresa DIGI, que ofrecen un medio inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos, basados en el protocolo IEEE 802.15.4 creando así una singularidad de redes.

Los módulos XBee son dispositivos de radiofrecuencia que integran un transmisor y receptor de ZigBee, un procesador en un mismo módulo, lo que permite a los usuarios desarrollar sus aplicaciones programando directamente en el módulo, eliminando la necesidad de configuración de un procesador independiente (Oyarce, 2015).

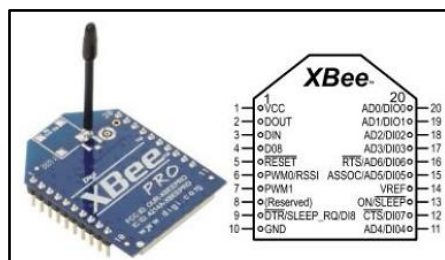


Ilustración 27: Módulo XBee

Fuente: (DIGI, XBee®/XBee-PRO® RF Modules datasheet, 2016)

## Características

Las principales características de estos módulos son:

- Escalabilidad, puede contener 65000 nodos para cada uno de los 16 canales disponibles.
- Alcance de hasta 100 metros en módulos XBee y hasta 1.6 Km en módulos XBee Pro.
- Interoperabilidad, compatibles con otros dispositivos Zigbee y de integración fácil.
- Permiten la configuración de diferentes topologías de red.
- De bajo consumo y costo.

## Series

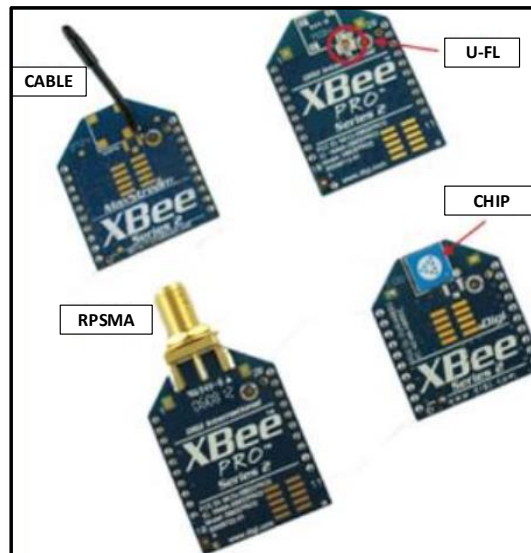
- **XBee series 1:** es la serie más fácil de usar debido a que no necesitan ser configurados y tienen dos modos de operación; AT o API. En hardware no son compatibles con las series 2/2.5/ZB.
- **Xbee Znet 2.5 o serie 2:** necesitan ser configurados antes de usar, dependiendo del firmware configurado este puede trabajar en modo Transparente o por modo API a través de comandos.
- **ZB o serie 2.5 mejorada:** se usa muy bien en redes *mesh* por su nuevo firmware incorporado. En esta serie se debe trabajar en un solo modo para toda la debido a que no son compatibles.
- **2B:** es la versión más actual de los módulos XBee, una notable diferencia con los anteriores es su nivel de potencia.

Finalmente, de este tipo de series existen 2 variantes: Regular y Pro. Estas 2 difieren entre ellas en el consumo de potencia, debido a que el dispositivo XBEE PRO alcanza una distancia de hasta 1.6Km consumiendo mayor potencia, mientras en su contra parte el XBEE REGULAR tiene un alcance de 100 m teniendo un ahorro en cuanto al consumo de energía. Estas 2 versiones son ampliamente compatibles entre sí.

## Antenas

Existen varios tipos de antenas para los módulos XBee, como se muestra en la ilustración 28 y como se describe a continuación:

- **Chip antena:** formado por un pequeño chip, rápido, sencillo y barato.
- **Wire antena:** es un pequeño cable que sobresale del módulo.
- **u.FL antena:** conector que se adhiere a una antena externa.
- **RPSMA antena:** conector grande para conectarla a una antena externa.



**Ilustración 28:** Tipos de antenas XBee  
**Fuente:** (INVESPRO MX, 2014)

## Modos de operación

Los módulos XBee trabajan en cinco modos como se detalla a continuación:

- Modo TX/RX:** en este modo los paquetes pueden ser recibidos o transmitidos en el módulo, cuando se transmite estos paquetes son enviados a través del pin 3 del módulo, consumiendo unos 30mA.
- Modo Comando:** a través de este modo se puede ingresar comandos AT al módulo para configurar, ajustar o modificar distintos parámetros. Para poder ingresar los comandos AT es necesario utilizar el Hyperterminal de Windows, el programa X-CTU o algún microcontrolador que maneje UART y tenga los comandos guardados en memoria o los adquiera de alguna otra forma.

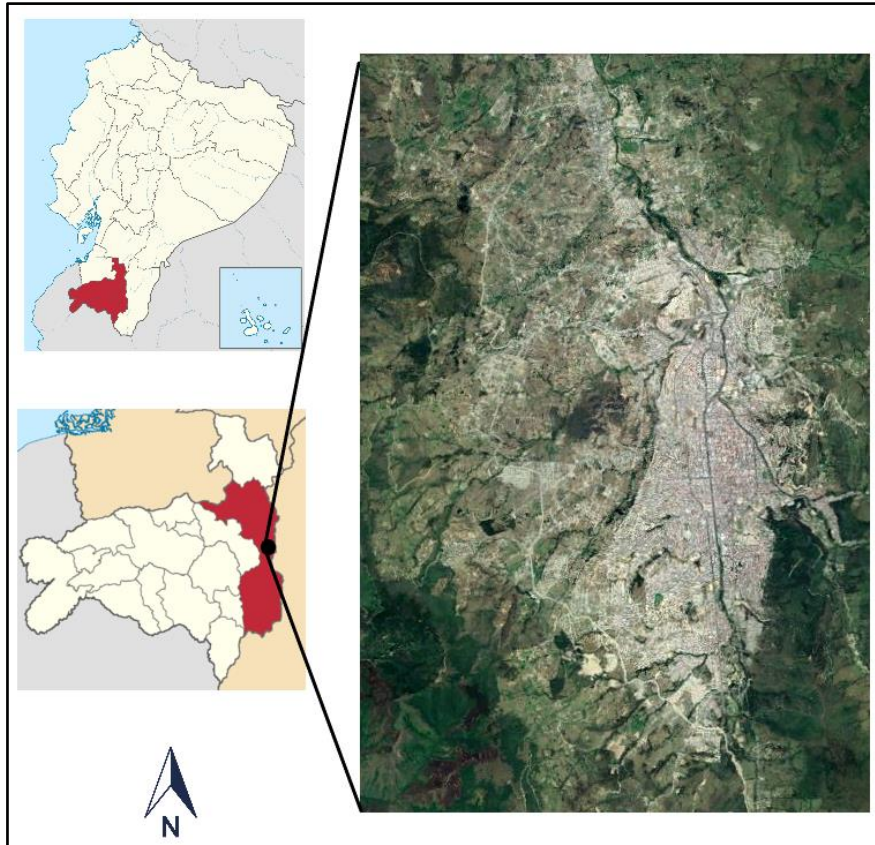
- c. **Modo de bajo consumo o modo sleep:** se da cuando el módulo entra estado de bajo consumo de energía, dependiendo del voltaje de alimentación. Por defecto, los ciclos de sueño están deshabilitados; Mediante el pin de hibernación Sleep\_RQ (pin 9) de los dispositivos XBee en estado alto, el módulo termina cualquier transmisión, recepción o procedimiento de asociación y entra en modo reposo y luego en modo sueño. En este estado no responde a comandos entrantes de ningún tipo.
- d. **Modo Transparente:** Los datos que ingresan al módulo son almacenados en el buffer de entrada para luego ser enviados en la misma forma en que se recibieron. Este modo viene configurado por defecto en los módulos XBee.
- e. **Modo API:** Cuando se encuentra en este modo, el módulo empaqueta en tramas toda la información que entra y sale, asegurando la entrega de datos a través de la encriptación. En este modo se tiene las siguientes características:
  - Transmitir datos a varios destinatarios, sin entrar al modo de Comandos.
  - Recibir estado de éxito/falla de cada paquete RF transmitido.
  - Identificar la dirección de origen de cada paquete recibido.

### 4.3. ÁREA DE ESTUDIO

Para tener una amplia visión sobre el trabajo realizado se realiza una breve descripción de la ciudad y así poder establecer los requerimientos mínimos de la red inalámbrica de sensores.

#### 4.3.1. Aspectos Generales

La ciudad de Loja se encuentra ubicada en la parte sur del Ecuador como se muestra en la ilustración 29, en el cantón Loja, provincia Loja, con una altura de 2100 m. s. n. m. y cuenta con una extensión total de alrededor 51.8 Km<sup>2</sup>.



**Ilustración 29:** Ubicación del área de estudio  
**Fuente:** Autor

Tiene una temperatura que oscila entre 16°C a 24°C con un promedio anual de 17°C (EcuRed, 2019).

### **4.3.2. Aspectos Socioeconómicos**

#### **4.3.2.1. Demografía**

La ciudad de Loja cuenta con una población de 214 855 habitantes, según el último censo realizado en el año 2010 por el INEC (INEC, 2010) y con tendencias a aumentar. El crecimiento demográfico de la ciudad de Loja es debido a la migración interna proveniente de las zonas rurales.

#### **4.3.2.2. Principales Actividades Económicas**

El comercio es considerado como la principal actividad económica de la ciudad. Es importante recalcar que también un importante flujo de efectivo es proveniente de las remesas de los migrantes, aunque está destinado para el consumo antes que de inversión. La actividad industrial en la ciudad es reducida. La actividad agrícola y agropecuaria se





#### **4.3.2.4. Transporte y Vialidad**

La ampliación del perímetro urbano en los últimos años y el desarrollo demográfico acelerado provocan un crecimiento del parque automotor muy considerable en la ciudad.

#### **4.3.3. Avances Tecnológicos**

El uso y la aplicación de las nuevas tecnologías, además de contribuir a cerrar la brecha tecnológica comunicacional, han logrado convertirse en valiosas herramientas para el fomento de procesos sociales y educativos.

Muestra de ellos es que en la actualidad cerca del 86% de la población ecuatoriana tiene acceso a las TIC's (SENESCYT, 2018).

Ahora bien, la ciudad de Loja, a lo largo de estos años ha evidenciado un crecimiento exponencial tanto a nivel comercial, de educación y tecnológico, siendo este último uno con mayor impacto dentro de la urbe, esto se puede evidenciar con las estadísticas presentadas por el ARCOTEL y que a continuación se detalla.

##### **4.3.3.1. Indicadores estadísticos de tecnología en el Cantón Loja**

El MINTEL no tiene provisto datos de acceso a las TICs a nivel cantonal, sin embargo, si existe un análisis a nivel provincial, es por lo tanto que se ha tomado en consideración estos datos.

La provincia de Loja en los últimos años ha desarrollado la infraestructura troncal y aumentado la penetración de los servicios básicos de telecomunicaciones, los resultados obtenidos de la ARCOTEL, del año 2016, reflejan datos a nivel tecnológico en la provincia de Loja, los cuales apuntan que el 53,4 % población usan una computadora y el 58,8 % dispone de teléfono celular. A nivel nacional es el 52,3% y el 57,74%, respectivamente (ARCOTEL, 2019).

Con respecto a la cobertura poblacional de servicios móviles, en el 2017, la provincia de Loja contaba con 44 radio bases correspondientes a la operadora CNT.EP, 73 radio bases de OTECEL (Movistar) y 199 radio bases correspondientes a OTECEL (Claro), en la Tabla 18, se puede observar la distribución del número de radio bases por tipo de tecnología de cada una de estas operadoras.

Respecto a la penetración de fibra óptica un ejemplo de esto es que la provincia cuenta con un Anillo de Fibra Óptica que atraviesa todas las cabeceras cantonales, y permite mejorar los servicios de comunicaciones en los sectores más alejados de la provincia, específicamente facilitará los servicios en telefonía móvil, fija e Internet.

El Cantón Loja en los últimos años ha desarrollado la infraestructura troncal y aumentado la penetración de los servicios básicos de telecomunicaciones, los resultados obtenidos por el Censo desarrollado en el año 2010 mencionan que a nivel cantonal (ARCOTEL, 2019):

- 84,2 % tenía disponibilidad de teléfono celular
- 38,6 poseía teléfono convencional,
- 42,6% disponía de computadora,
- 17% tenía internet,
- y un 20,5% disponía de TV por cable.

Los datos anteriores muestran que en el Cantón Loja hasta el año 2011, existió una alta disponibilidad de dispositivos móviles, sin embargo, esto se diferencia con la disponibilidad de otros servicios como son el caso de Internet y TV por cable (ARCOTEL, 2019).

#### **4.3.3.2. Empresas tecnológicas en la ciudad**

A partir de 2007, Loja le está apostando a desarrollar la industria de tecnologías, la ciudad de Loja se ha transformado en una ciudad tecnológica debido al emprendimiento de los lojanos y gracias al apoyo de diferentes entidades, como universidades, municipio e inversión extranjera. Esto ha causado un gran interés, para la creación de empresas tecnológicas, que ofrecen sus diversos servicios como internet por fibra óptica, desarrollo web, equipos de computación, energías renovables y otros. El valle de tecnología fundado por Nelson Piedra con el respaldo de la Universidad Técnica Particular de Loja (GPL, 2011), bajo la premisa de convertir a Loja en un polo tecnológico. Es un esfuerzo para propender el desarrollo de la industria, esto sumado a otras empresas que ofertan productos y servicios importantes, están allanando el camino hacia la consecución de la meta. En la siguiente lista se presenta algunas empresas de renombre en la ciudad:

- Enerwi-Prendho de la Universidad Técnica Particular de Loja, Prendho nace como un proyecto de la Universidad Técnica Particular de Loja, con el objetivo de promover la investigación, la innovación y el emprendimiento. El proyecto es administrado por FEDES.
- Megaelectronics, brindar soluciones tecnológicas en todos los niveles.
- Kradac, es una empresa conformada por un grupo especializado en ingeniería, dedicados a: investigar, diseñar, desarrollar e implementar soluciones tecnológicas de alta calidad con el mejor desempeño.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Materiales

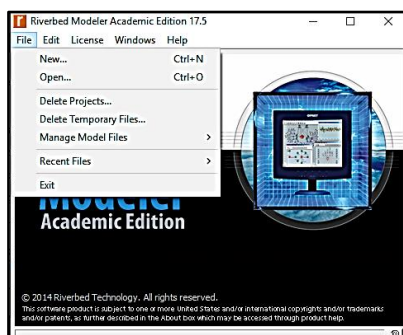
#### 5.1.1. Software utilizado

Para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo, se necesitó la ayuda de algunos programas técnicos, que permitieron entre algunos aspectos: la simulación del diseño de red, adecuada para la topología establecida, la configuración del hardware para la evaluación práctica, el desarrollo de la interfaz gráfica para el monitoreo en tiempo real y la programación para la adquisición de datos en los sensores. A continuación, se detalla cada uno de estos software con sus principales características y su aplicación en este proyecto:

##### 5.1.1.1. Software de simulación

Para el desarrollo de la simulación del diseño realizado en este trabajo se ha seleccionado al software **Riverbed Modeler Academic Edition 17.5**, el cual se compone de un conjunto de protocolos y tecnologías con un sofisticado entorno de desarrollo, amigable con el usuario y fácil de usar y cuya funcionalidad permite modelar todos los tipos y tecnologías de red (incluyendo VoIP, TCP, OSPFv3, MPLS, IPv6, Zigbee y más), solo es necesario agregar las librerías correspondientes al inicio del proyecto.

En el presente proyecto, el software Riverbed Modeler es usado para comparar el impacto de diferentes diseños de la tecnología Zigbee, en el comportamiento de extremo a extremo y en diferentes entornos, esto quiere decir, a diferentes distancias de conexión. Además, permite probar y demostrar el diseño de la tecnología antes de la producción; aumentar la productividad de la red; desarrollar protocolos y tecnologías inalámbricas propietarias; y evaluar mejoras en los protocolos basados en estándares.

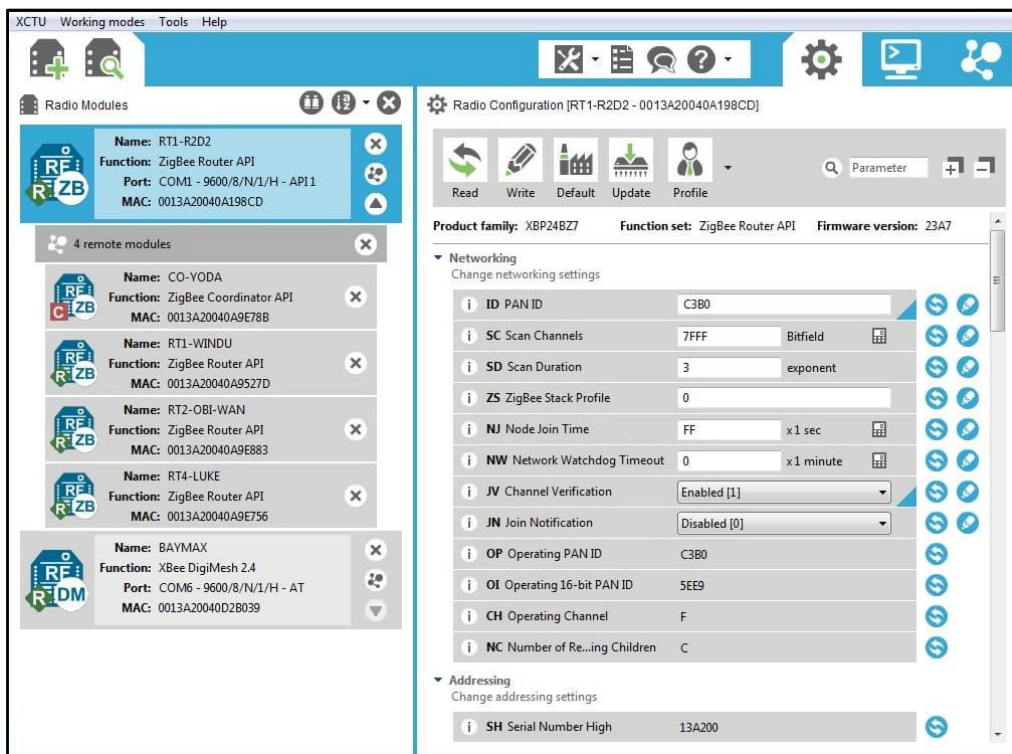


**Ilustración 31:** Interfaz gráfica del software Riverbed Modeler Academic

**Fuente:** Autor

### 5.1.1.2. Software para la configuración del nodo

En cuanto al software para la configuración de los nodos, tanto coordinador como nodo sensor, se usa el programa **XCTU**, diseñada para permitir a los desarrolladores interactuar con los módulos Digi RF a través de una interfaz gráfica fácil de usar, como lo muestra en la ilustración 32. Este software Incluye herramientas que facilitan la configuración y prueba de los módulos de RF XBee® (DIGI, XCTU Next Generation Configuration Platform for XBee/RF Solutions, 2019).



**Ilustración 32:** Interfaz gráfica del software XCTU

**Fuente:** (DIGI, XCTU Next Generation Configuration Platform for XBee/RF Solutions, 2019)

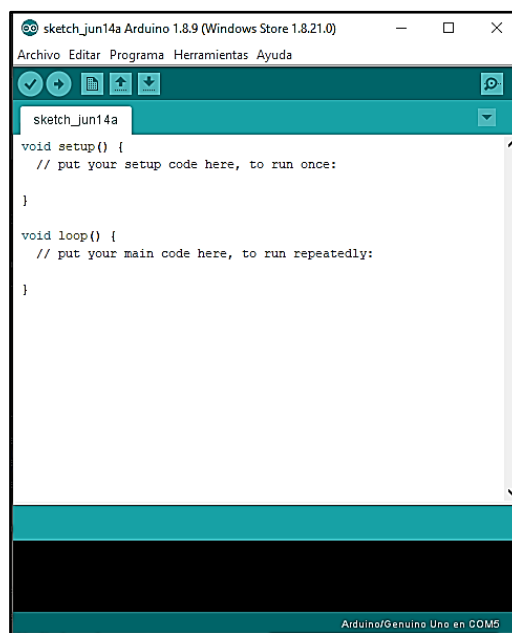
En la elaboración del proyecto, este software se utilizó en la evaluación practica del diseño realizado y de dos diferentes maneras:

- 1) Para la configuración de los módulos Zigbee de RF que conformaron la red, en este caso los dos módulos de los nodos sensores y un módulo del nodo coordinador, estableciendo los parámetros como: PAN ID, direccionamiento, tiempo de transmisión y modo de operación.
- 2) Para la Prueba de rango entre 2 módulos de radio de la misma red, logrando verificar las distancias de operación.

Además, que nos sirvió para la interpretación de tramas recibidas, decodificando una trama API y ver sus valores de trama específicos.

### 5.1.1.3. Software para la recolección de datos

Con respecto a la recolección de datos, se tuvo que realizar la programación de cada una de las placas Arduino usadas, para ello se necesitó del software **Arduino IDE**, que es el entorno de desarrollo y en él se realiza la programación de cada una de las placas de Arduino a través del lenguaje de programación fundamentado en Wiring. Su interfaz es muy fácil de usar tal como se observa en la ilustración 33.



**Ilustración 33:** Interfaz gráfica del software Aduino IDE  
**Fuente:** Autor

También, es importante aclarar que el microcontrolador de este hardware es programado por medio de un ordenador y para ello se hace uso de la comunicación serial que se establece por medio del convertidor RS-232 a TTL serial (Arduino, 2017).

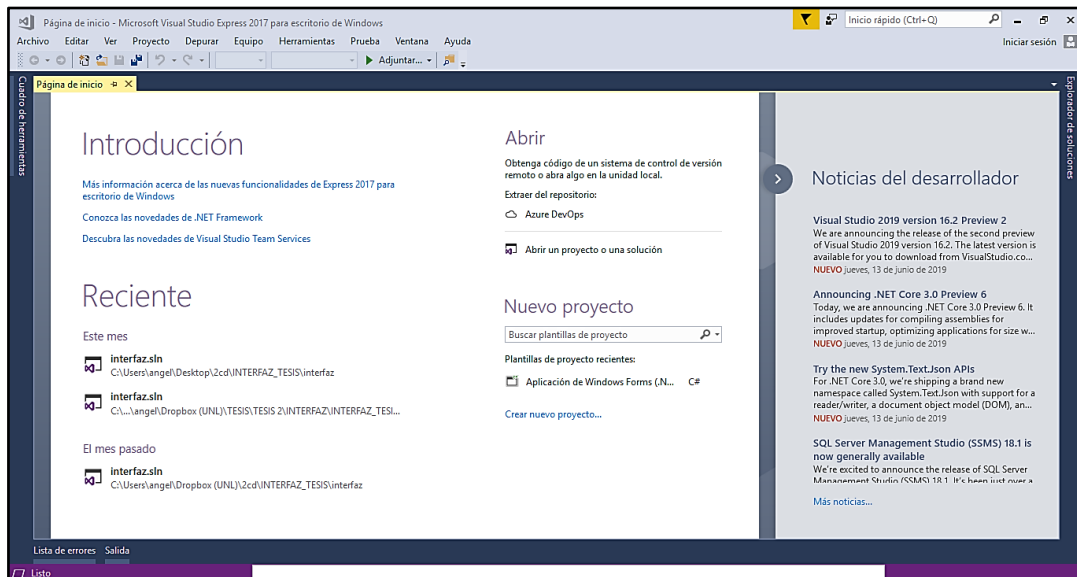
Específicamente en este proyecto se lo utilizó para programar la placa Arduino UNO, que recolecta los datos de los sensores y posteriormente crea una trama para ser enviada por el módulo de transmisión Zigbee: XBee PRO.

#### 5.1.1.4. Software para la interfaz de monitoreo

Para el desarrollo de la interfaz de monitoreo se ha usado el software **VS Express 2017**, que es un conjunto de entornos de desarrollo integrado (IDE) desarrollado por Microsoft como una versión limitada de función *freeware* y *registerware* de Microsoft Visual Studio no libre. Visual Studio Express 2017 (ver ilustración 34) está disponible para desarrolladores de Windows Desktop. Siendo ésta la versión final de Visual Studio Express.

Dentro de las actividades que se realiza con el programa Visual Studio Express 2017 en el proyecto son:

- Creación del programa de escritorio de Windows para el monitoreo de la red.
- Recepción e interpretación de los datos obtenidos a través del nodo coordinador.
- Almacenamiento de la información receptada en una base de datos.



**Ilustración 34:** Interfaz gráfica del software VS Express 2017

**Fuente:** Autor

## 5.2. Métodos

Con respecto a la metodología utilizada para la realización y posterior ejecución del presente trabajo de Titulación y de acuerdo con la información descrita en la sección anterior, se utiliza una variedad de ellos entre los cuales se encuentran:



### **5.2.1. Método Científico**

Este método permitió la búsqueda y recopilación de información bibliográfica relevante sobre las Redes Inalámbricas de Sensores, necesaria para determinar y orientar el punto de partida de la investigación, importante para la obtención del marco teórico del proyecto, estudiar las características importantes que posteriormente fueron utilizadas en el desarrollo del diseño. Además, se identificó las principales tecnologías que usan las redes inalámbricas de sensores.

### **5.2.2. Método Deductivo**

La aplicación de este método se lo realizó a través de la descripción técnica de la información bibliográfica recolectada, con el conocimiento de los aspectos generales de las Redes Inalámbricas de Sensores y sus principales características, cuyo propósito fue determinar las tecnologías habilitadoras para la ejecución de este tipo de redes, la obtención los parámetros correctos para la creación de un diseño funcional y posteriormente un análisis correcto para una implementación fiable.

### **5.2.3. Método Analítico**

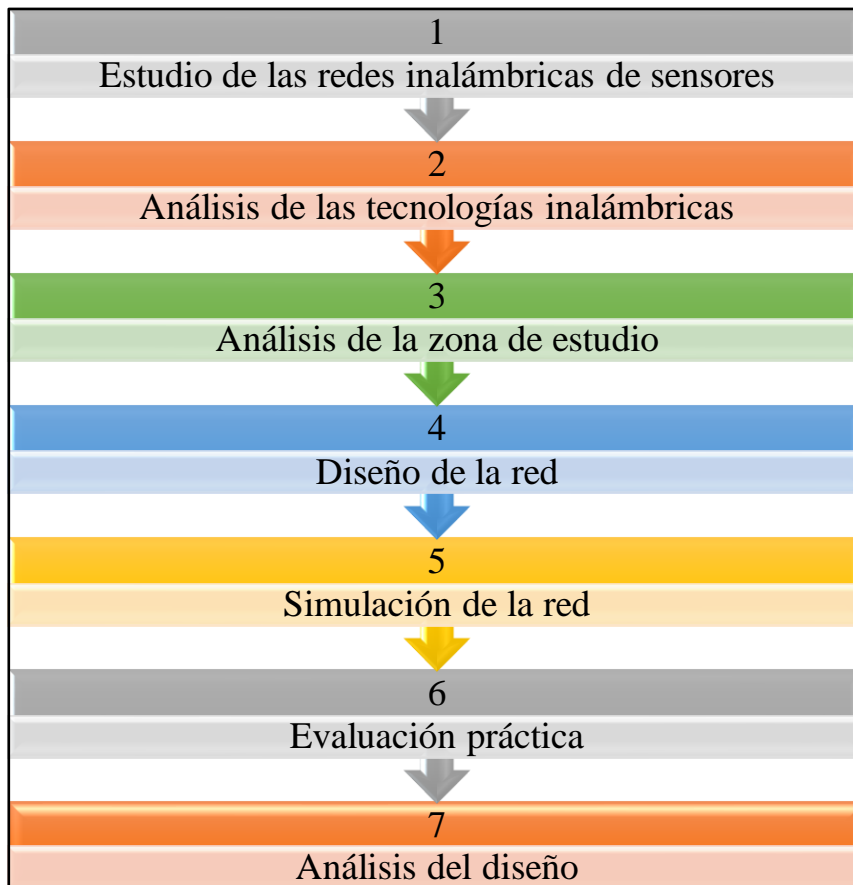
Este método se lo aplicó a partir del proceso de observación y estudio de las tecnologías inalámbricas habilitadoras para las Redes Inalámbricas de Sensores, la determinación de escenarios de estudio en la ciudad, elección de equipos, logrando contrastar un análisis efectivo del diseño desarrollado para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y niveles de ruido.

### **5.2.4. Método Inductivo**

Este método se empleó para establecer las conclusiones del trabajo realizado con el detalle de los resultados, así como, las recomendaciones obtenidas a partir del estudio del diseño de red, necesarios para realizar y establecer la posible implementación a futuro, y facilitando que pueda replicarse para las otras zonas de la ciudad.

## **5.3. Plan de Trabajo y Desarrollo**

Para llevar a buen término esta investigación y cumplir con todos los objetivos se llevó a cabo un plan de trabajo, y se detalla en la ilustración 35 que a continuación se muestra:



**Ilustración 35:** Planificación y desarrollo del proyecto  
**Fuente:** Autor

**1) Estudio de las Redes Inalámbricas de Sensores:** A partir de la obtención de material bibliográfico relevante sobre las Redes Inalámbricas de Sensores, se definió este tipo de redes, se estableció sus principales características de funcionamiento, se detalló las topologías de soporte y se describió sus principales áreas de aplicación, que finalmente permitió inferir los requerimientos mínimos para el uso de este tipo de redes sobre la ciudad de Loja, tales como: velocidad de transmisión, número de nodos aceptados, la eficiencia energética y la seguridad de la red.

**2) Análisis de las Tecnologías Inalámbricas:** Con la identificación de los requerimientos mínimos para una red inalámbrica de sensores en la ciudad, se pudo entablar el reconocimiento de las tecnologías inalámbricas soportadas para esta aplicación, dando lugar al análisis de tecnologías como Bluetooth, Wifi, WiMAX, Zigbee y Lora, de las cuales se ha elegido Zigbee por sus diferentes características que lo hacen ideal para el monitoreo del CO<sub>2</sub> en el aire y niveles de ruido.

**3) Análisis de la zona de estudio:** Una vez establecida la tecnología a usar, se identificó el escenario de estudio, para el que se consideró la demografía de la ciudad que establece el porcentaje de incidencia de este estudio, también se consideró la infraestructura de la ciudad que permite reconocer las características urbanísticas de la ciudad.

**4) Diseño de la red:** En cuanto al diseño de la red inalámbrica de sensores, se estableció los diagramas correspondientes a las motas sobre el escenario de estudio, en la que se identificó el diseño del nodo sensor y del nodo coordinador. También se estableció la topología de red que indica la distribución de los diferentes elementos.

Con respecto al diseño del nodo sensor, se ha tomado en cuenta la distribución de los puntos de muestreo, que consistió en la repartición de los sitios de muestreo dentro de la ciudad y como tal en la zona de estudio que se ha establecido en el apartado anterior, para medir el ruido (dBA) y la concentración de CO<sub>2</sub> (ppm) en el aire, de manera uniforme en el área total. La selección de puntos de muestreo se llevó a cabo a través de los siguientes métodos, para crear mapas de sonido y mapas de CO<sub>2</sub>:

- **Método de cuadrícula o retícula:** que consistió en colocar sobre el plano de la ciudad una retícula o cuadrícula que permitió visualizar mejor la zona de estudio y se identificó los puntos de muestreo como esquinas o vías más próximas (Suárez, 2012).
- **Método de viales o de tráfico:** que consistió en identificar y ubicar las principales fuentes generadoras de ruido (García, 2012), para ello se contó con la información preliminar proporcionada en la sección 4.2.3.1. y 4.2.3.2. este procedimiento permitió ampliar la zona de estudio comparado con el método anterior.
- **Método de zonas específicas:** a través de este método se determinó los puntos de medida tomando en cuenta el tipo de fuente que vamos a medir para distribuirlos según el interés de medición (Ejemplo zonas comerciales o industriales).
- **Método aleatorio:** en este caso, los puntos de medición son determinados al azar, usando preliminarmente el método de la cuadrícula, para no descartar ninguna zona que se haya quedado anteriormente.

**5) Simulación de la Red:** Una vez establecido el diseño de la red sobre el escenario de estudio, se procedió a la simulación en el software Riverbeb Modeler, cuyo objetivo es encontrar los parámetros de evaluación como la velocidad de transmisión, el retardo y el

consumo de energía, siendo este un referente para los resultados a obtener si se desea la implementación.

**6) Evaluación práctica:** Para asegurar el funcionamiento del diseño de la Red Inalámbrica de Sensores, se consideró evaluar el funcionamiento de la tecnología establecida sobre el escenario de estudio, a través de la prueba y validación del diseño sobre una zona en particular, en la que se obtuvo datos como potencia de recepción, paquetes recibidos, datos recibidos y velocidad de recepción.

**7) Análisis de la Red:** Finalmente, una vez realizado el análisis de las tecnologías inalámbricas, análisis de la zona de estudio, diseño de la red, simulación de la red y prueba de la red, se contrastó los resultados a través de un análisis comparativo. En el que se presenta los resultados según cada actividad realizada.

## **6. RESULTADOS**

### **6.1. Planificación y Diseño de la Red**

#### **6.1.1. Análisis y delimitación geográfica**

En esta sección, se estableció el esquema idóneo para el funcionamiento de la Red Inalámbrica de Sensores, esta actividad se realizó con el cumplimiento de tres fases que se detallan a continuación.

En la primera fase, se describe el entorno para el desarrollo de una red inalámbrica de sensores aplicada a la monitorización de niveles de ruido, en la que se determinó las fuentes que generan mayor ruido y las áreas de mayor exposición al ruido en la ciudad de Loja bajo las características descritas en la sección 4.2.3.2, para luego plantear un esquema general de la red inalámbrica de sensores definiendo los parámetros de su funcionamiento.

En la segunda fase, se desarrolla la red inalámbrica de sensores para el monitoreo del CO<sub>2</sub> en el aire de la urbe lojana, en él, se establece las fuentes que generan la emanación de CO<sub>2</sub> en el aire en la ciudad en base a la información descrita en la sección 4.2.3.1, que permitió determinar las áreas de mayor exposición, y así establecer una red que permita la monitorización de este parámetro ambiental sobre la urbe lojana.

Finalmente, en la tercera fase, se procede a realizar el esquema final de la red acoplando los esquemas, tanto de niveles de ruido como de CO<sub>2</sub>, para obtener una visión general del estudio sobre la ciudad de Loja.

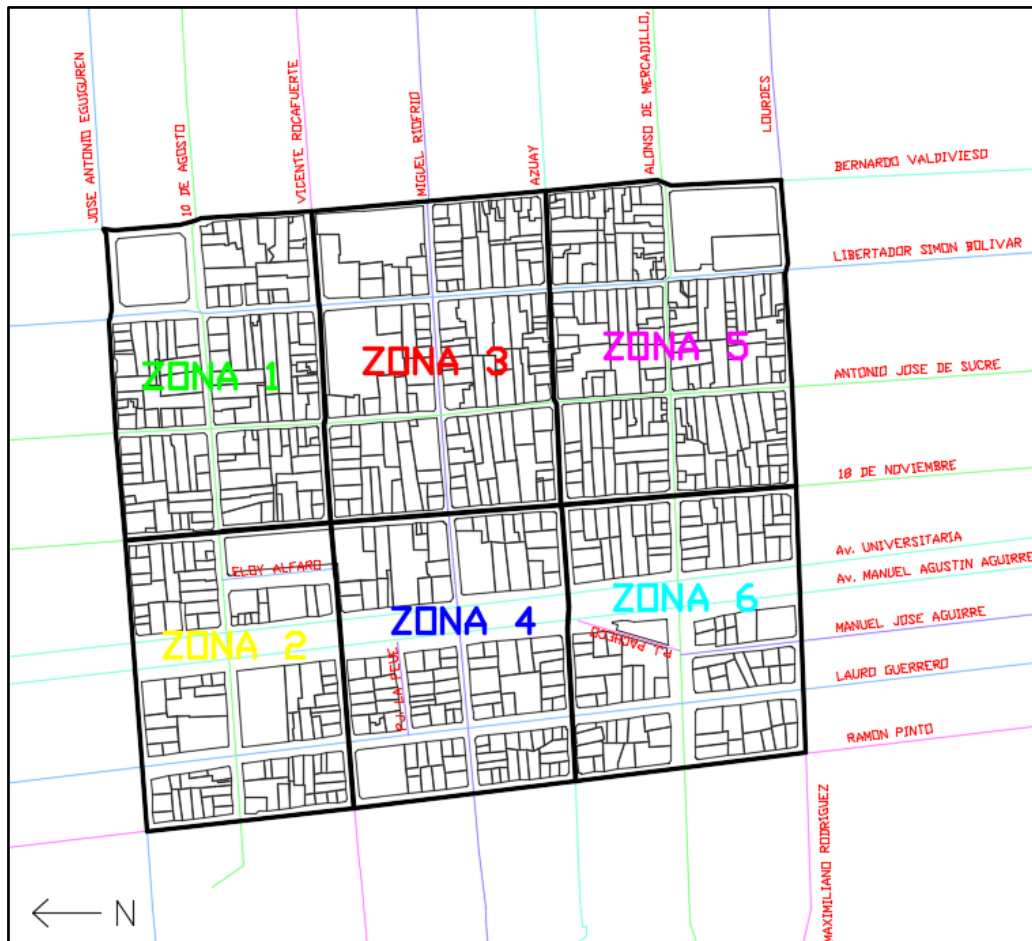
Por otro lado, si recordamos, en capítulos anteriores se describió el funcionamiento de la Red Inalámbrica de Sensores, la cual nos permite crear redes inalámbricas, de bajo costo, en una determinada zona para monitorear o controlar diferentes condiciones, por lo que se ha considerado establecer la red, sobre una zona determinada dentro del casco urbano de la ciudad de Loja, considerando los polos de mayor actividad dentro de la ciudad, esto con el fin de fijar un modelo a seguir dentro de la parte urbana, que se pueda replicar en diferentes zonas de la ciudad.

De acuerdo a estudios realizados, en: 2014 (Iñiguez Armijos, 2014) y según el Plan de Ordenamiento Urbano de la ciudad de Loja, POUL, 2009-2022, establece dentro de su

normativa urbana el uso de suelo para la ciudad de Loja, según código de parroquias, zonas y sectores de planificación, mismas que son necesarias, ajustar de acuerdo a las necesidades de la comunidad. las zonas con mayor actividad se encuentran en:

1. Centro de la ciudad, que alberga los servicios administrativos y actividades económicas.
2. Redondel Pío Jaramillo, en el que se encuentra el Centro Comercial “La Pradera” y el mercado “La Tebaida”.
3. Mercado Gran Colombia, cuyo uso es especialmente de comercio y servicios.
4. Terminal Terrestre, uso especialmente de comercio y servicios.
5. El Valle, uso especialmente de comercio y servicios.

Con esta información, se deduce que el centro de la ciudad es la zona con mayor actividad en la urbe, concentrándose ahí los servicios administrativos y actividades comerciales, por lo que se ha considerado éste el escenario de estudio y puede replicarse el análisis posterior para las otras zonas de la ciudad.



**Ilustración 36:** Escenario de estudio para la Red Inalámbrica de Sensores

**Fuente:** Autor

Dentro de este escenario se ha dividido en 6 zonas como se muestra en la ilustración 35, que permitan identificar correctamente los puntos de muestreo para la investigación.

Ahora bien, se procede a delimitar el escenario a las siguientes direcciones, para efectos de estudio, corroborando a través del método observación la concentración de actividades dentro de la urbe:

- **Norte:** Calle José Antonio Eguiguren
- **Sur:** Calle Lourdes
- **Este:** Calle Bernardo Valdivieso
- **Oeste:** Calle Ramon Pinto

De acuerdo con la ilustración 36, se ha obtenido la dimensión de la zona de estudio conformándose de un ancho de 608m y 683m de largo y con una superficie de 414.6 km<sup>2</sup>, cuyos datos son útiles para la simulación de la red.

### **Fase 1: Esquema para el Monitoreo de los niveles de Ruido**

De acuerdo con la tabla 6, se consideró observar, identificar y establecer sobre nuestro escenario, los puntos más sobresalientes que generan mayor ruido en la urbe lojana, obteniendo la tabla 20.

**Tabla 20:** Selección de zonas con mayor generación de ruido sobre la urbe lojana.

<b>Fuente</b>	<b>Descripción</b>	<b>Dirección</b>
Actividades Comerciales	Mercado “Centro Comercial”	18 de Noviembre entre 10 de Agosto y Rocafuerte
	Mercado “San Sebastián”	Bernardo Valdivieso y Lourdes
	Centro Comercial “Jesús del Gran Poder”	18 de Noviembre entre Rocafuerte y Miguel Riofrio
	Centro Comercial “La Casona”	Bolívar y Miguel Riofrio
	Parque “Simón Bolívar”	Av. Universitaria y Colón
	Plaza de San Francisco	Bolívar y Colón
	Parque Central	Bolívar y 10 de Agosto
	Plaza de la Federación de Loja o Santo Domingo	Bolívar y Rocafuerte
	Plaza de la Independencia “San Sebastián”	Bolívar y Mercadillo
	Hospital Militar Básico “7B.I”	Colón entre Bolívar y Bernardo Valdivieso
	Centro Clínico Quirúrgico Ambulatorio - Hospital del Día del IESS	10 de Agosto entre Lauro Guerrero y Av. Manuel Agustín Aguirre
	Clínica “MEDILAB”	Rocafuerte entre 18 de Noviembre y Sucre
	Hospital Clínica “San Agustín”	18 de Noviembre y Azuay
	Hospital Privado “Clínica Galenos”	Lauro Guerrero entre Pasaje la FEUE y Miguel Riofrio

	Agencia Banco de Loja	Lauro Guerrero y José Antonio Eguiguren
	Cooperativa de Transportes “Loja Internacional”	Lauro Guerrero y 10 de Agosto
	Bomberos	Av. Universitaria y 10 de Agosto
Comunitario	Unidad Educativa “La Porciúncula”	Bolívar entre Colón y J. A. Eguiguren
	Unidad Educativa “La Inmaculada”	Bolívar entre Rocafuerte y Miguel Riofrio
	Escuela de Educación General Básica “Miguel Riofrío”	Bernardo Valdivieso entre Azuay y Mercadillo
	Escuela de Educación General Básica “Zoilo Alvarado”	Bernardo Valdivieso entre Mercadillo y Lourdes
	Instituto Tecnológico Superior “Sudamericano”	Miguel Riofrío entre Sucre y Bolívar

**Fuente:** Autor

Además, reportes proporcionados por la Unidad de Control Operativa de Tránsito – UCOT de la ciudad de Loja, detalla que las calles de la parte céntrica de la urbe son muy congestionadas tanto de vehículos particulares como de servicios públicos como se puede observar en la tabla 21, convirtiéndolos en una zona con evidente ruido, además esta información se tomará en cuenta para selección de las zonas con mayor emanación de CO2 en la siguiente sección. Una observación sobre esta zona también es que por ahí circulan la mayoría de las líneas de transporte público, se tomará en cuenta las paradas que por el sitio se encuentran. En la siguiente lista, se detalla las intersecciones congestionadas y que demandan de mayor atención en el presente estudio.

**Tabla 21:** Lista de intersecciones más congestionadas en la ciudad de Loja

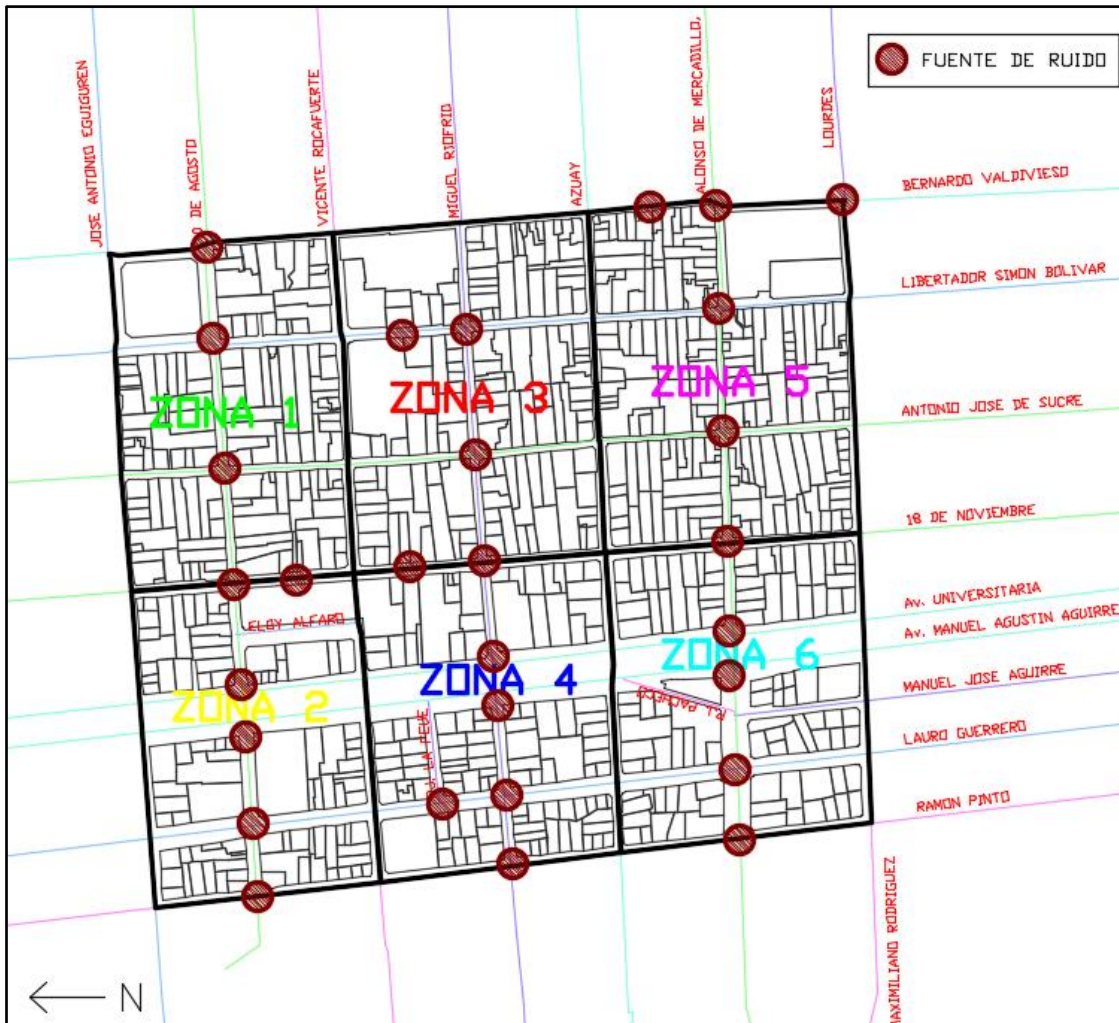
PRINCIPAL	INTERSECCIONES		
	CALLE 1	CALLE 2	CALLE 3
Ramón Pinto	10 de Agosto	Miguel Riofrio	Mercadillo
Lauro Guerrero	10 de Agosto	Miguel Riofrio	Mercadillo
Av. Manuel Agustín Aguirre	10 de Agosto	Miguel Riofrio	Mercadillo
Av. Universitaria	10 de Agosto	Miguel Riofrio	Mercadillo
18 de Noviembre	10 de Agosto	Miguel Riofrio	Mercadillo
Antonio José de Sucre	10 de Agosto	Miguel Riofrio	Mercadillo
Simón Bolívar	10 de Agosto	Miguel Riofrio	Mercadillo
Bernardo Valdivieso	10 de Agosto	Miguel Riofrio	Mercadillo

**Fuente:** (UCOT, 2019)

Cabe mencionar que no se ha colocado algunos puntos, debido a que se encuentran muy próximos, por lo que, se estaría redundando sobre una misma zona.

Ahora si representamos los puntos (simbolizados con un círculo de color marrón) establecidos en la tabla 15 y con la información de la UCOT, se obtiene la ilustración siguiente:





**Ilustración 37:** Disposición de los puntos de muestreo para la Red de Sensores para el monitoreo de ruido sobre el escenario de estudio

**Fuente:** Autor

## Fase 2: Esquema para el Monitoreo del CO<sub>2</sub> en el aire

Caso similar a la fase anterior, en esta fase se desarrolla la red para el monitoreo de CO<sub>2</sub>, por lo tanto, en referencia a la tabla 9, se consideró observar, identificar y establecer sobre nuestro escenario, los sitios más sobresalientes que generan CO<sub>2</sub> en el aire de la urbe lojana, además, se adhiere la información de la UCOT mencionada anteriormente en la tabla 20; obteniendo la lista de la tabla 22.

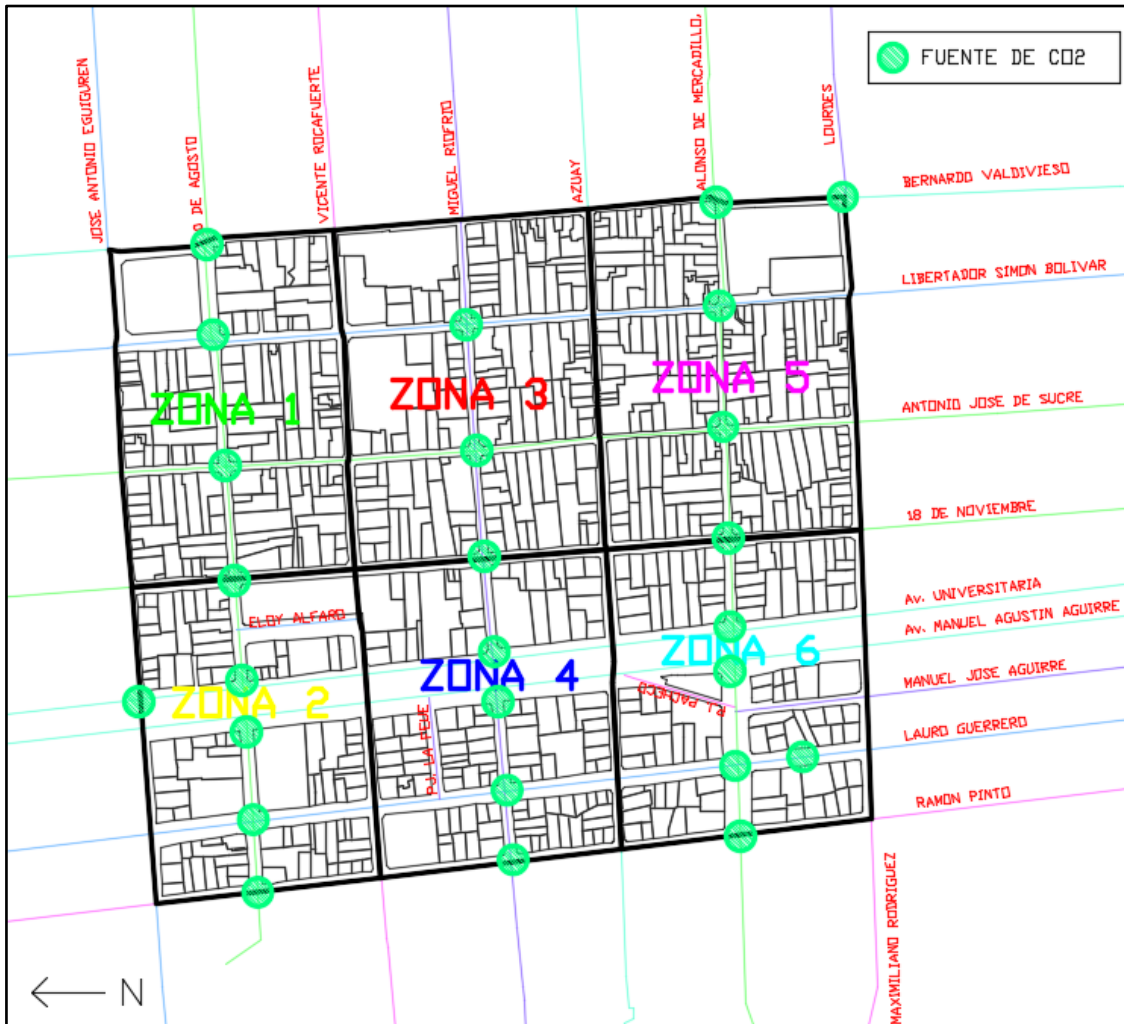
**Tabla 22:** Selección de zonas con mayor generación de CO<sub>2</sub> en la ciudad de Loja

Fuente	Descripción	Dirección
Industrias	Estación de Servicio “Jaramillo” – Gasolinero	Av. Universitaria y Colon
	Cooperativa de Transportes “Loja Internacional”	Lauro Guerrero y 10 de Agosto
	Ferretería “DIMACO”	Lauro Guerrero entre Mercadillo y Lourdes
	Ferretería “DISENSA”	Av. Universitaria y Lourdes
	Concesionario “TOYOTA”	Av. Universitaria y Miguel Riofrío

Otros	Mercado “Centro Comercial”	18 de Noviembre entre 10 de Agosto y Rocafuerte
	Mercado “San Sebastián”	Bernardo Valdivieso y Lourdes
	“Pavi Pollos”	Sucre y Mercadillo

Fuente: Autor

Con la información de la tabla 20 y 22, se coloca en el mapa de la ciudad los puntos de muestreo (simbolizados con un círculo de color verde), resultando la ilustración 38.

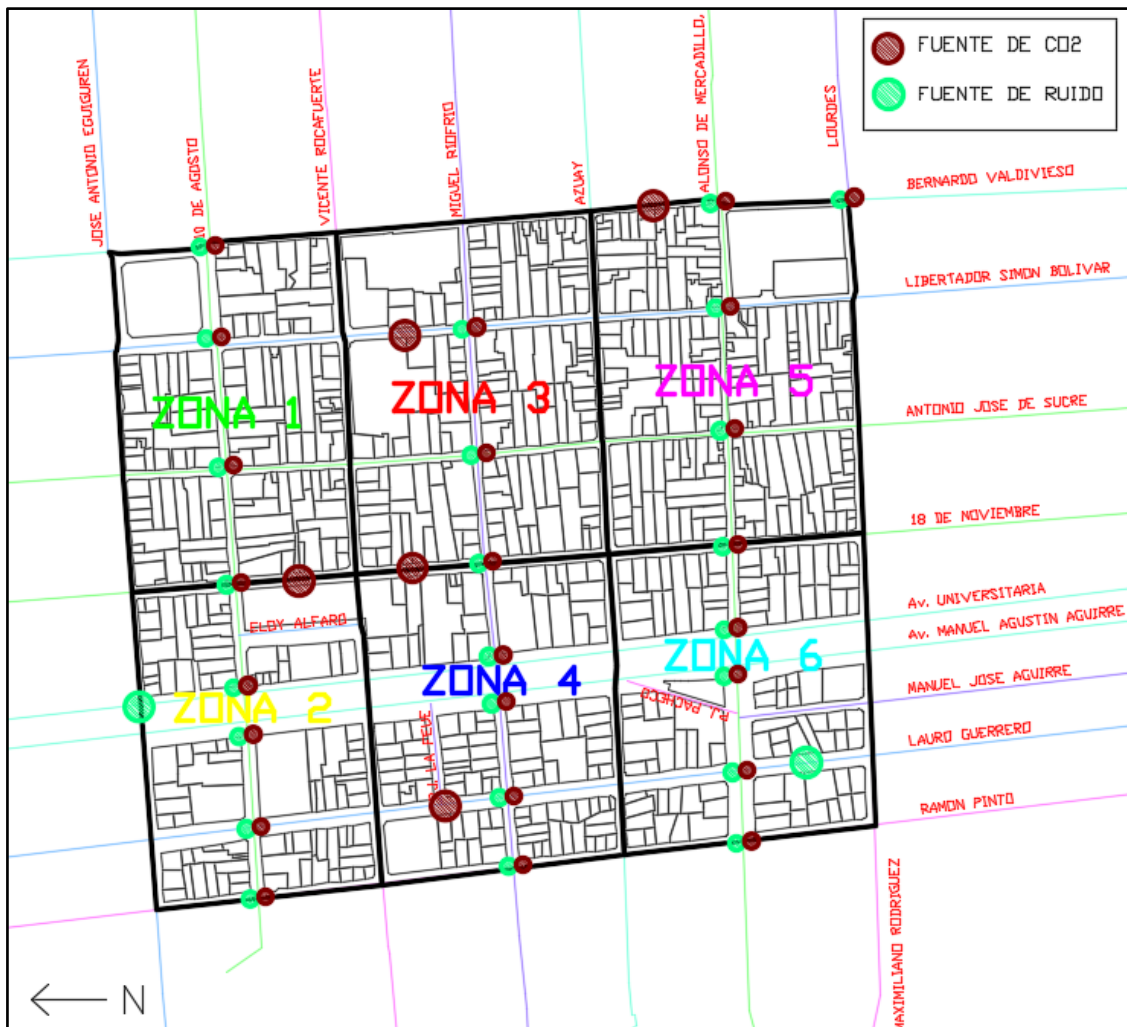


**Ilustración 38:** Disposición de los puntos de muestreo de la Red de Sensores para el monitoreo del CO2 en el aire sobre el escenario de estudio

Fuente: Autor

### Fase 3: Esquema General de la Red Inalámbrica de Sensores para el monitoreo de CO2 en el aire y niveles de ruido

Una vez que se tenga la disposición geográfica de los puntos de muestreo; se realiza el diagrama general de la red en estudio, como se puede observar en la ilustración 39.



**Ilustración 39:** Esquema general de los puntos de muestreo de la Red Inalámbrica de Sensores  
**Fuente:** Autor

En la ilustración 39 se puede diferenciar las siguientes características: los círculos de color marrón representan los puntos de muestra para el ruido y los círculos de color verde, están designados como los puntos de muestra para el CO<sub>2</sub>.

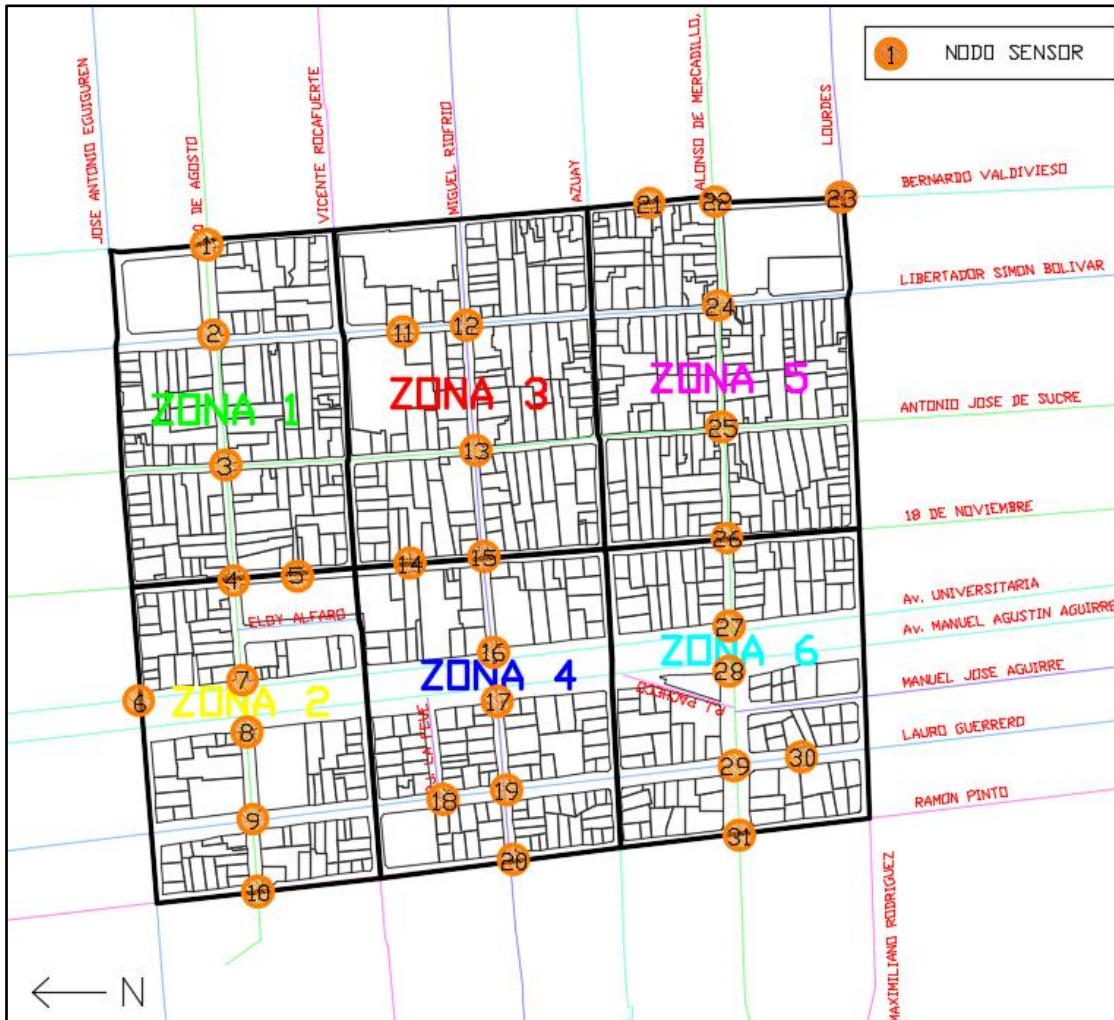
### 6.1.2. Diseño de la red

Para objeto de estudio se ha considerado el diseño de la red de sensores para lo cual se ha tomado en cuenta la distribución geográfica de los puntos de muestreo, estableciendo la topología adecuada, para su posterior análisis tanto en hardware como en software, y su posible implementación en trabajos futuros, con el objetivo de asegurar el correcto funcionamiento de la Red Inalámbrica de Sensores.

Para iniciar con esta sección se describe la organización de los nodos de acuerdo con el ambiente de operación, como se describe a continuación.

### 6.1.2.1. Análisis del ambiente de operación de la red

Para comenzar este análisis, primero se determina el número de nodos que va a poseer la red, esto se logró a partir de la ilustración 39 que indicaba los puntos de muestreo de la red. Con dicha información se obtuvo un número total de nodos de 31 sobre la zona de estudio, y se lo puede apreciar en la ilustración 40. Además, se ha elaborado la tabla 23 con la organización general de la red.



**Ilustración 40:** Número de nodos de la Red Inalámbrica de Sensores  
**Fuente:** Autor

Con el esquema presentado en la ilustración 40 y la organización de los nodos de acuerdo con la tabla 23, se tiene una visión general del diseño, por lo que se puede establecer la topología Malla o Mesh, como la ideal para este tipo de aplicaciones, que requiere que un número elevado de nodos estén conectados a la red.

**Tabla 23:** Organización de los nodos en la zona de estudio

ZONA	NODO	TIPO DE SENSOR	ZONA	NODO	TIPO DE SENSOR
ZONA 1	NS1	• Sensor de CO2	ZONA 4	NS16	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2
	NS2	• Sensor de Ruido		NS17	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2
	NS3	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2		NS18	• Sensor de Ruido
	NS4	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2		NS19	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2
	NS5	• Sensor de Ruido		NS20	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2
ZONA 2	NS6	• Sensor de CO2	ZONA 5	NS21	• Sensor de Ruido
	NS7	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2		NS22	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2
	NS8	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2		NS23	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2
	NS9	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2		NS24	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2
	NS10	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2		NS25	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2
ZONA 3	NS11	• Sensor de Ruido	ZONA 6	NS26	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2
	NS12	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2		NS27	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2
	NS13	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2		NS28	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2
	NS14	• Sensor de Ruido		NS29	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2
	NS15	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2		NS30	• Sensor de CO2
				NS31	• Sensor de Ruido • Sensor de CO2

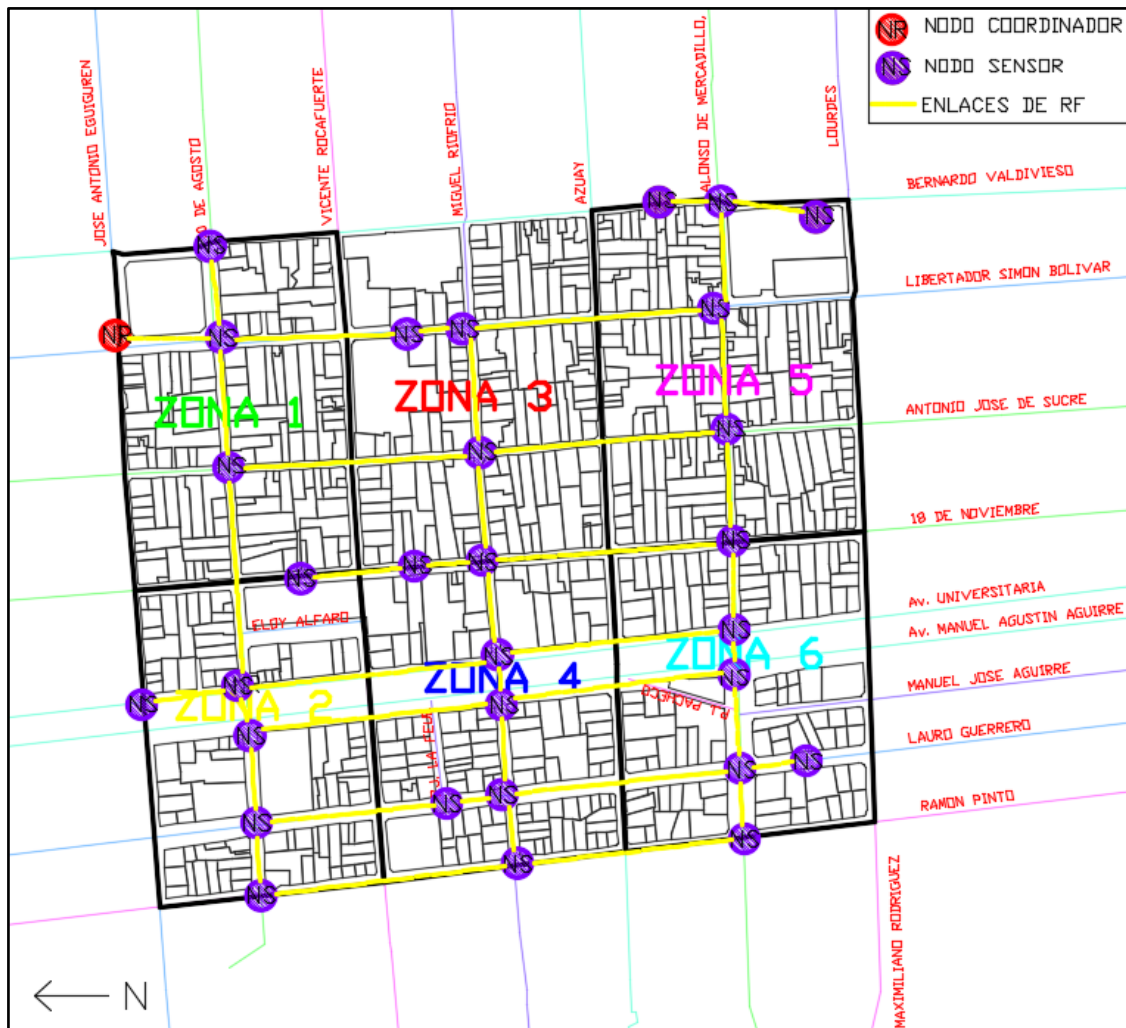
**Fuente:** Autor

Además, se consideró la posible implementación del diseño en el casco urbano de la ciudad de Loja, por lo tanto, unas de las características importantes en el diseño es la línea de visión. La línea de visión es un tipo de propagación en el que se transmite y recibe datos, sólo si el emisor y receptor se ven uno al otro sin ningún tipo de obstáculo entre ellos (Techopedia, 2017). Las ondas radio frecuencia (RF) usadas por el estándar Zigbee son un ejemplo de comunicación por la línea de visión. Dicho esto, los edificios y los árboles de la zona de estudio significan un problema para la comunicación de los nodos de la red.

Para solucionar este problema se ha propuesto que la red sea de tipo multi-salto, de tal forma que cada nodo hijo de la red tenga la capacidad de retransmitir el mensaje encaminándolo hacia su destino, de modo que debería existir al menos un nodo en la intersección de las diferentes zonas en el escenario de estudio.



Finalmente, para que el diseño esté completo se va a identificar los elementos en el diseño, de acuerdo con la topología seleccionada, estableciendo dos tipos de elementos denominados como: Elemento 1: Nodos Sensores (NS) y Elemento 2: Nodo Coordinador (NR).



**Ilustración 41:** Ubicación de elementos en la red diseñada  
**Fuente:** Autor

Para ello se va a tomar en cuenta las características técnicas de la tecnología a probar. De acuerdo con la descripción en la sección 4.2.5., los módulos Xbee de Zigbee tiene un alcance de aproximadamente 1.6 km con línea de vista, y que pueden trabajar en los tres modos que necesitan los elementos, por ende, se va a tratar de distribuir dichos elementos para abarcar la mayor cantidad de nodos sensores sin que se sature una zona; con estas especificaciones se obtiene la ilustración 41, en la que los círculos de color morado representan los nodos sensores (NS) y el círculo de color rojo representa el nodo coordinador (NR).

### 6.1.2.2. Diseño del nodo sensor

El nodo sensor es el encargado de recibir la información captada por los sensores, procesarla y para su posterior envío de la información hacia los otros nodos, para ello se lo ha distribuido en cinco etapas que se describe a continuación:

- **Etapa 1: Sensado**

De acuerdo con la sección 4.1.2, esta etapa permite la conversión de una magnitud física en un valor medible, cumpliendo características como precisión, estabilidad, sensibilidad y velocidad de respuesta, dependiendo de estos elementos la recolección de la información.

- **Etapa 2: Procesamiento de Información**

Esta etapa permite al nodo sensor la interpretación y la adecuación de la información, para la posterior transmisión, obtenidos a través de los elementos de sensado y este elemento puede aceptar las tres formas de un nodo sensor: con un sensor de sonido, con un sensor de CO<sub>2</sub> y con ambos en un mismo nodo. Una función adicional es de proporcionar la alimentación adecuada para los elementos tanto de sensado como de acondicionamiento.

- **Etapa 3: Alimentación**

Esta etapa proporciona la energía necesaria para el funcionamiento total del nodo sensor.

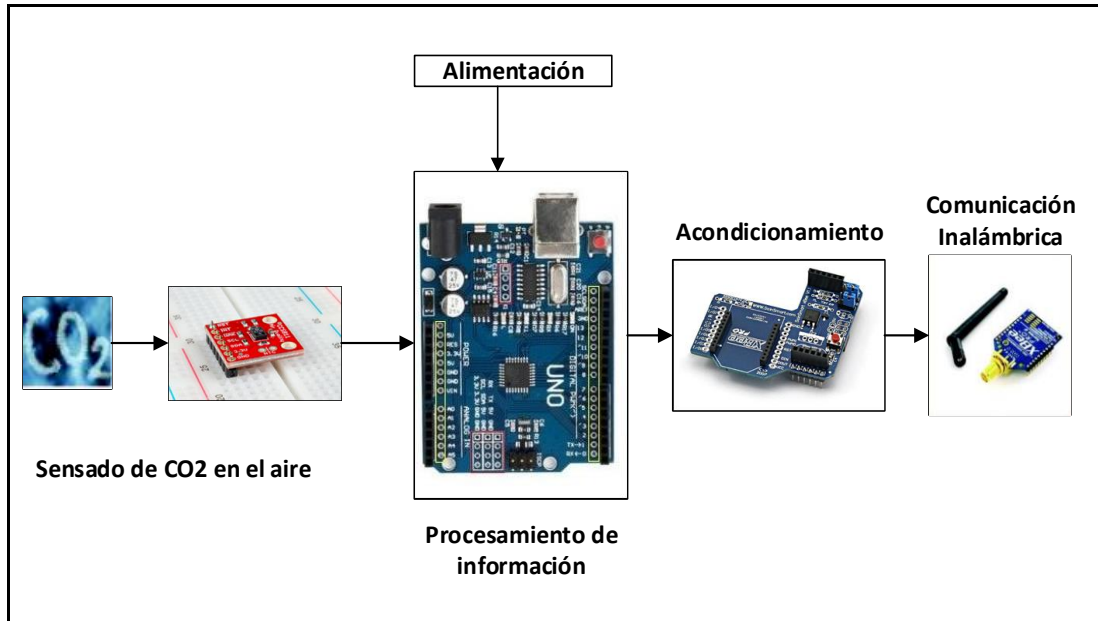
- **Etapa 4: Acondicionamiento**

Esta etapa se encarga de crear el vínculo con la etapa de procesamiento de información de procesamiento con la etapa de comunicación inalámbrica.

- **Etapa 5: Comunicación Inalámbrica**

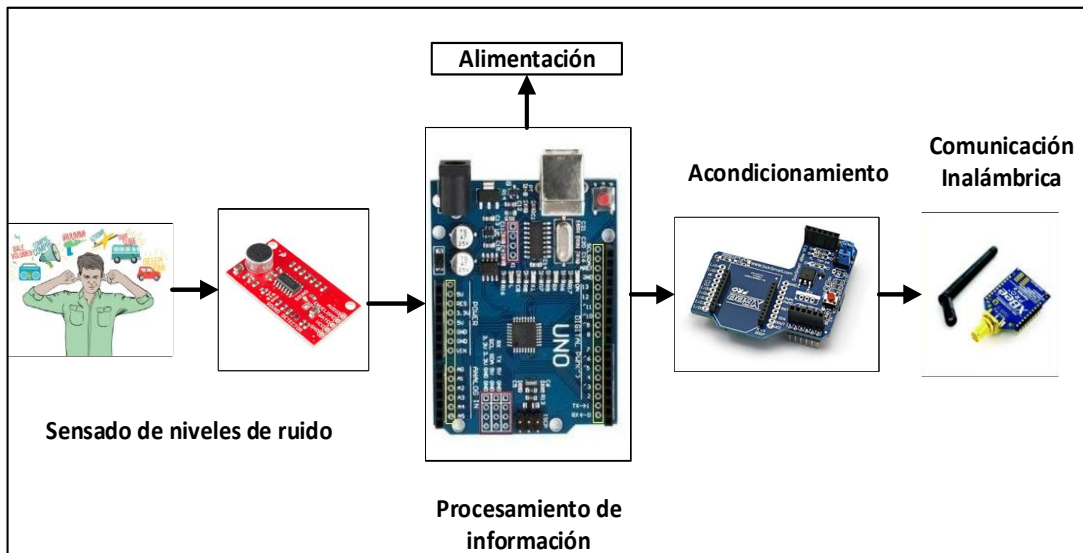
Esta etapa es la encargada de transmitir y entablar la comunicación inalámbrica con los otros nodos y con el nodo coordinador, para la cual, es necesario que cumpla con los siguientes requerimientos: potencia, tiempo de vida y estabilidad, logrando la cobertura necesaria para el monitoreo del proyecto.

A partir de las cinco etapas descritas, se ha elaborado tres esquemas de nodo sensor que pueden estar presente dentro de la zona de estudio y que se puede observar en las siguientes ilustraciones:



**Ilustración 42:** Diagrama de bloques del nodo sensor de CO2

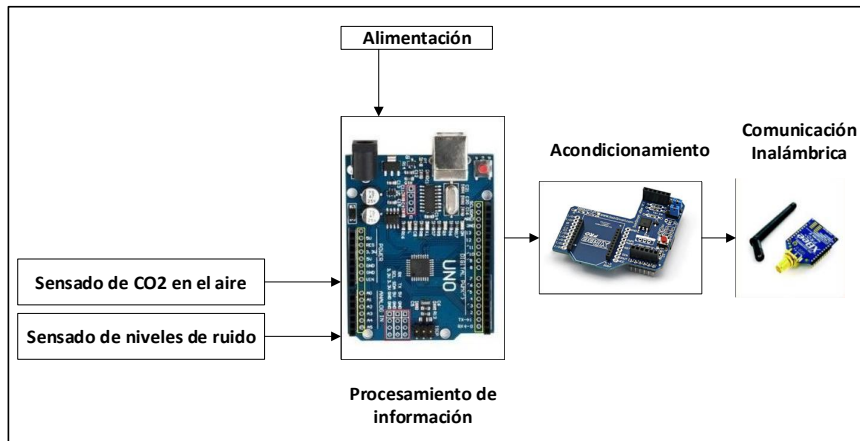
**Fuente:** Autor



**Ilustración 43:** Diagrama de bloques del nodo sensor de niveles de ruido

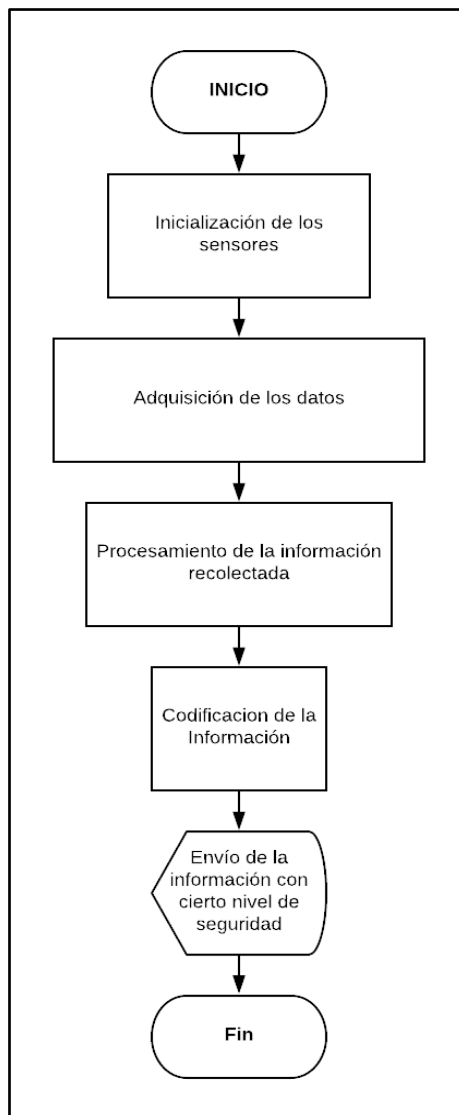
**Fuente:** Autor





**Ilustración 44:** Diagrama de bloques del nodo sensor con ambos tipos de sensores  
**Fuente:** Autor

El funcionamiento del nodo sensor se lo puede apreciar en la ilustración 45 a través de un diagrama de flujo.



**Ilustración 45:** Diagrama de flujo para el funcionamiento del nodo sensor  
**Fuente:** Autor

Cada módulo sensor se configura para que automáticamente tome el valor de las variables ambientales y la transmita por la red hacia el coordinador.

### 6.1.2.3. Diseño del nodo coordinador

El nodo coordinador es el encargado de recibir la información enviada por los nodos sensores, procesarla y para su posterior presentación a través de una interfaz gráfica en un computador, para ello se lo ha distribuido en tres etapas que se describe a continuación:

- **Etapa 1:** Comunicación Inalámbrica

Al igual que la etapa 5 de transmisión en el nodo sensor, la etapa 1 de recepción en el nodo coordinador es de gran importancia pues se encargará especialmente de la comunicación con los nodos sensores para la correcta recolección de datos. Esta etapa recibe los datos provenientes de los nodos sensores o finales y los envía hacia la interfaz HMI que se encarga de procesarlos para su posterior interpretación por el usuario.

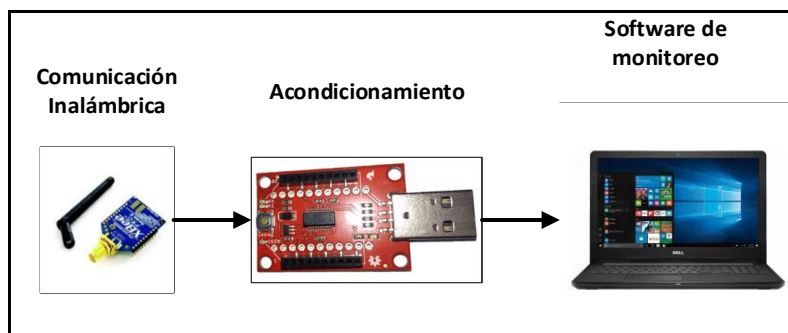
- **Etapa 2:** Acondicionamiento

Similar al elemento de acondicionamiento del nodo sensor, este se encarga de conectar el módulo Xbee Pro S2B con el ordenador en el que se encuentra la interfaz de monitoreo, además de proporcionar el voltaje necesario al módulo de recepción.

- **Etapa 3:** Presentación de la información

Esta etapa es encargada de realizar la interpretación de los datos obtenidos a través de la etapa 1 y la presenta en una interfaz gráfica, amigable al usuario.

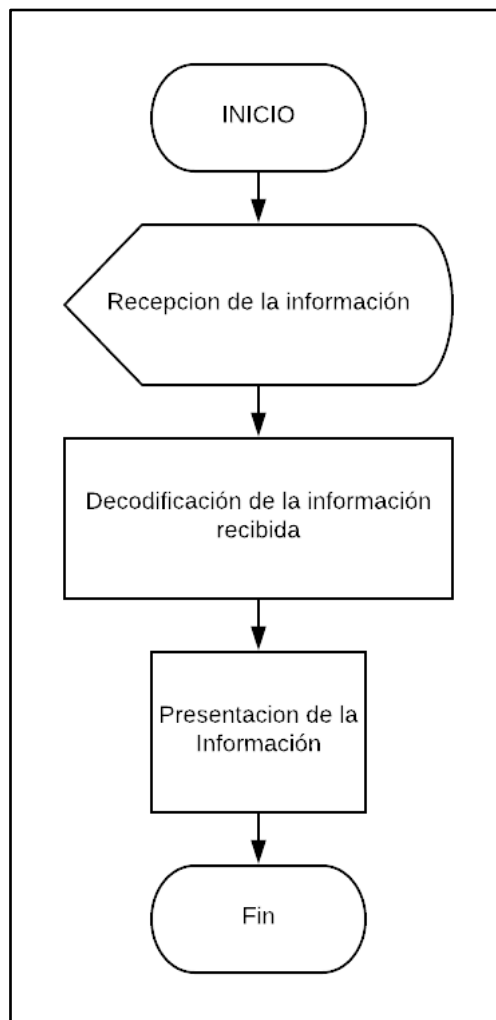
Con estas tres etapas se realiza el esquema de diseño del nodo coordinador que se observa en la ilustración 46.



**Ilustración 46:** Diagrama de bloques del nodo coordinador

**Fuente:** Autor

El funcionamiento del nodo coordinador se lo puede apreciar en la ilustración 47 a través de un diagrama de flujo.



**Ilustración 47:** Diagrama de flujo para el funcionamiento del nodo coordinador  
**Fuente:** Autor

#### 6.1.2.4. Análisis matemático de los enlaces entre nodos

##### **Pérdidas en el enlace de comunicación ( $L_t$ )**

Las pérdidas en el enlace de comunicación están compuestas por 3 parámetros que son: las pérdidas en el espacio libre o pérdidas básicas de propagación y las pérdidas debido a agrupación de árboles (se toma en cuenta debido a que dentro de la zona de estudio existen lugares como parques y zonas verdes cerca del río que atraviesa la zona), estas pérdidas se calculan a través de la ecuación 5.

$$L_t = L_{tpf} + L_{ITU-R} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$L_{lpf}$ : Pérdidas en el espacio libre, y se calcula a través de la ecuación 6.

$$L_{lpf} = 92.44 + 20 \log f(\text{GHz}) + 20 \log d(\text{km}) \quad \text{Ecuación 6.}$$

$L_{ITU-R}$ : Pérdidas por presencia de vegetación, se calcula a través de la ecuación 7 y se aplica en distancias entre nodo sensor y nodo coordinador inferior a 400m.

$$L_{ITU-R} = 0.2 f(\text{MHz})^{0.3} d(\text{m})^{0.2} \quad \text{Ecuación 7.}$$

### Cálculo de la pérdida en el espacio libre

Con las siguientes especificaciones técnicas de los equipos obtenidas del fabricante y del análisis del ambiente de operación, se obtiene los siguientes cálculos:

- Frecuencia de trabajo: 2,4 GHz
- Distancia de separación máxima de nodo sensor a nodo router sobre la zona de estudio: 250m

Por lo tanto, según la ecuación 6, las pérdidas básicas de propagación son:

$$L_{lpf} = 92.44 + 20 \log(2.4) + 20 \log(0.25) = 88 \text{ dB}$$

### Cálculo por presencia de vegetación

Establecido por la ITU-R, es aplicable en la banda UHF (300Mhz-3GHz) únicamente en casos en los que la distancia del enlace es menor a 400m y donde existe una agrupación de árboles pequeños, como por ejemplo nuestra zona de estudio. El cálculo de esta pérdida se la realiza a partir de la ecuación 7 de la siguiente manera:

$$L_{ITU-R} = 0.2(2400)^{0.3}(250)^{0.2} = 6.23 \text{ dB}$$

### Cálculo de las pérdidas totales

Para finalizar se realiza el cálculo del enlace de comunicación total a partir de la ecuación 5, lo que resulta:

$$L_t = 88 + 6.23 = 94.23 \text{ dB}$$

## Potencia de recepción $P_{Rx}$

La potencia de recepción es uno de los parámetros que indica, evalúa y garantiza las condiciones para la comunicación de la red, esto se lo realiza a través de la siguiente ecuación:

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_t \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- $P_{Tx}$ : Potencia de transmisión expresada en dBm.
- $G_{Tx}$ : Ganancia de transmisión expresada en dBi.
- $G_{Rx}$ : Ganancia de recepción expresada en dBi.
- $L_t$ : Pérdidas totales del enlace.

Para determinar la  $P_{Tx}$ ,  $G_{Tx}$  y  $G_{Rx}$ , se considera las características de los equipos de la tecnología usada, como:

- Potencia de los dispositivos:  $P_{Tx} = 63 \text{ mW}$  equivalente a  $18 \text{ dBm}$
- Ganancia de la antena transmisora:  $G_{Tx} = 7 \text{ dBi}$
- Ganancia de la antena receptora:  $G_{Rx} = 5 \text{ dBi}$
- Y para las pérdidas se considera el valor calculado anteriormente:  $L_t = 94.23 \text{ dB}$

## Cálculo de la potencia de recepción

Con los datos proporcionados anteriormente se calcula la potencia de recepción a través de la ecuación 8 de la siguiente manera:

$$P_{Rx} = 18 + 7 + 5 - 94.23 = -64.23 \text{ dBm}$$

Al contrastar el valor calculado con la sensibilidad de los equipos utilizados en la Red Inalámbrica de Sensores el cual es  $-100 \text{ dBm}$  podemos verificar que estos en el área de trabajo funcionarán normalmente siempre y cuando su unidad de potencia se encuentre funcionando con total normalidad.

## Margen y Relación S/N

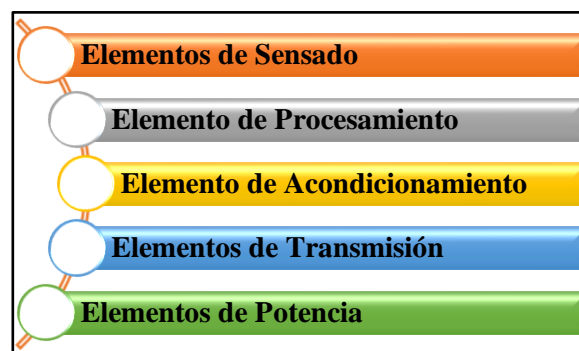
No es suficiente que la señal que llega al receptor sea mayor que la sensibilidad de este, sino que además se requiere que haya cierto margen para garantizar el funcionamiento adecuado.

En situaciones donde hay muy poco ruido el enlace está limitado primeramente por la sensibilidad del receptor. En áreas urbanas donde hay muchos radioenlaces operando, es común encontrar altos niveles de ruido (tan altos como -92 dBm). En esos escenarios, se requiere un margen mayor.

### 6.1.3. Componentes de la red

#### 6.1.3.1. Nodo sensor

El nodo sensor se conforma con 5 elementos de acuerdo con la ilustración 48:



**Ilustración 48:** Componentes del Nodo Sensor

**Fuente:** Autor

#### a) Elementos de Sensado

Cada uno de los nodos sensores cuentan con su propio dispositivo sensor, existen una variedad de sensores para la medición de CO<sub>2</sub> en el aire y niveles de ruido, sin embargo, para la realización las pruebas de este estudio se ha utilizado el Sensor CCS811 para medir el CO<sub>2</sub> en el aire y el Detector de Sonido Sparkfun para medir los niveles de ruido, cumpliendo con los requerimientos de la Red Inalámbrica de Sensores.

#### b) Elementos de procesamiento

El elemento de procesamiento seleccionado para los nodos sensores es una placa Arduino Uno R3 compatible CH340 (ver ilustración 49), que brinda una plataforma *open source*, es una tarjeta de varias entradas y salidas y con un lenguaje de desarrollo fácil denominado *Processing/Wiring* (Arduino, 2017). Este elemento proporciona muchas facilidades en el procesamiento de los datos obtenidos (tabla 24). Otra ventaja es la alimentación que suministra para los otros elementos del nodo sensor.



**Ilustración 49:** Arduino Uno, elemento de procesamiento  
**Fuente:** Autor

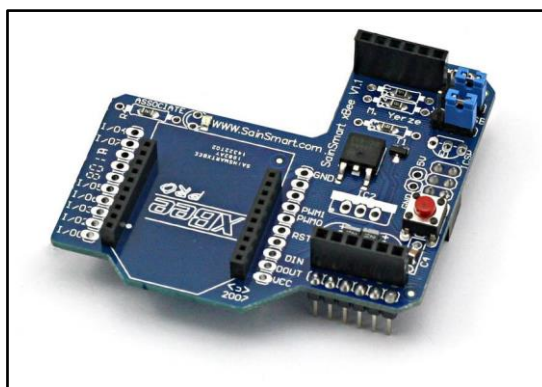
**Tabla 24:** Características técnicas de la placa Arduino Uno

Características	Detalle	Unidad
Chipset	ATmega328P	-
Plataforma de hardware	Arduino	-
Memoria Flash	32	KB
EEPROM	1	KB
Velocidad de reloj	16	MHz
Voltaje de funcionamiento	5	V
Alimentación recomendada	7-12	V
E/S digitales	14	Pines
Pines I/O PWM digitales	6	Pines
Pines I/O analógicos	6	Pines
Corriente máxima por pin	20	mA
Largo	7	cm
Ancho	5,5	cm
Peso	0,023	Kg

**Fuente:** (Arduino, 2017)

### c) Elemento de Acondicionamiento

Este elemento se encarga de crear el vínculo con el elemento de procesamiento (Arduino UNO) y el elemento de transmisión (XBee), Para ello se seleccionó el *Shield XBee PRO v1.1* (ver ilustración 50), que es una placa electrónica que se conecta directamente con la tarjeta Arduino y permite la comunicación inalámbrica a través de un protocolo ZigBee modificado utilizando el popular módulo XBee de Maxstream. Contiene características técnicas y compatibles con la tarjeta de procesamiento utilizada, lo que la hace ideal para el este estudio (tabla 25).



**Ilustración 50:** Tarjeta Shield Xbee pro v1.1.  
**Fuente:** (SainSmart, 2019)

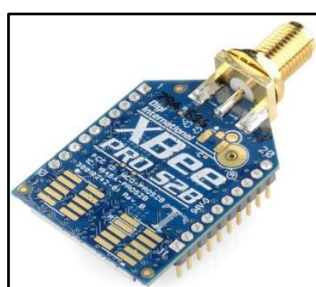
**Tabla 25:** Características técnicas de la tarjeta Shield Xbee Pro v1.1.

Especificación técnica	Detalle
Comando	AT simple
Instalación	Fácil en Arduino
Energía	Bajo consumo
Compatibilidad	Xbee 1mW, Xbee PRO, Serie Xbee 2.5
Configuración	Predeterminada

**Fuente:** (SainSmart, 2019)

#### d) Elementos de Transmisión

De acuerdo con los requerimientos establecidos y conforme a la revisión de literatura se seleccionó el módulo XBee Pro S2B con conector RP-SMA (ver ilustración 51). Las características técnicas se muestran en la tabla 26:



**Ilustración 51:** Módulo Xbee Pro S2B  
**Fuente:** (DIGI, XBee®/XBee-PRO® RF Modules datasheet, 2016)

**Tabla 26:** Características técnicas del módulo Xbee Pro S2B

Característica	Descripción	Detalle
Rendimiento	Cobertura en interiores	Hasta 300 pies (90m)
	Cobertura en exteriores	Hasta 1 milla (1600m)
	Potencia de salida	63 mW (+18dBm)
	RF, Velocidad de datos	250Kbps
	Sensibilidad del receptor	-102 dBm
Requerimientos de potencia	Alimentación	2,7 V ~ 3,6 V DC
	Transmisión de corriente	205 mA @ 3.3 V
	Recepción de corriente	47 mA @ 3.3. V



	Intensidad de reposo	3.5 $\mu$ A @ 25 °C
Información general	Banda de frecuencia	2.4 GHz ISM
	Métodos de configuración	AT y API, local o por aire
	Tipo de Antena	RP-SMA
Trabajo en red	Topologías de red	Punto a punto, punto a multipunto y mesh.
	Capacidad de canales	15 canales de secuencia directa (11 a 25)
	Direccionamiento	PAN ID, 64-bit IEEE MAC

**Fuente:** (DIGI, XBee®/XBee-PRO® RF Modules datasheet, 2016)

### e) Elemento de Potencia

Normalmente los nodos sensores se alimentan a través de baterías, las mismas que pueden ser reemplazadas o recargadas cuando se agotan, por lo que la fuente de alimentación a seleccionarse depende del tipo de aplicación y de la duración del tiempo de operación de la red.

Debido a que se considera uno de los elementos fundamentales para el correcto funcionamiento del resto de elementos se debió tomar en cuenta lo siguiente:

- Tensión que suministra la batería, suficiente como para garantizar el correcto funcionamiento de la red, y dependerá principalmente de la unidad de procesamiento a utilizar, en este caso la unidad de procesamiento será una placa ARDUINO UNO. Esta tensión se deberá encontrar en el rango de 6 a 20 V.
- Capacidad de la batería, un parámetro muy importante puesto que de este dependerá el tiempo de duración de la red. Se mide en mAh

Para el cálculo de la batería se ha desarrollado la tabla 27, que indique los valores mínimos requeridos por los elementos en la red según sus hojas de datos:

**Tabla 27:** Consumo de energía por elementos de la Red Inalámbrica de Sensores

Elemento	Voltaje Requerido	Consumo
Arduino UNO	6 – 20 V	40 mA
Sensor de ruido	5 V	2 mA
Sensor de CO2	5 V	2 mA
Elemento de acoplamiento	5 V	4 mA
Elemento de Transmisión	3.3 V	10 mA

**Fuente:** Autor

Por lo tanto, en base a la tabla 27, se deduce que el consumo de corriente por nodo es aproximadamente de 50mA, mientras que el consumo de voltaje es de 3.3 a 6 V, por lo que se calcula que la potencia a consumir es de 0.30 W.

En el mercado existe una gran variedad de soluciones con respecto a baterías, por lo que presentamos algunas soluciones en la tabla 28 que cumplen con las características.

**Tabla 28:** Características técnicas de algunas baterías que se encuentran en el mercado

Características técnicas	Batería 1	Batería 2	Batería 3
Voltaje	12 V	7 V	12 V
Capacidad	1.3 A/h	4200 mA/h	9800 mA/h
Marca	First Power	UitraFire	Super
Duración (aprox.)	2 días	½ día	1 día
Tamaño	97x43x53 mm	65x15x15 mm	127x65x23 mm
Peso	500 gr.	100 gr.	200 gr.
Tipo	Tipo gel	Litio	Litio
Recargable	Si	Si	Si

**Fuente:** Autor

Para medir la eficiencia de las baterías de la tabla 29, se ha realizado la ponderación a través de la escala de Likert cuyos resultados se encuentran en la tabla 29.

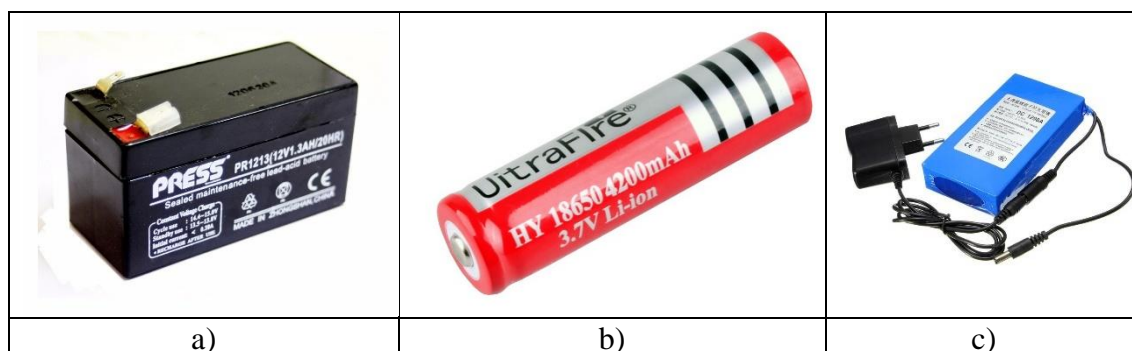
**Tabla 29:** Ponderación de eficiencia de las baterías

Características técnicas	Batería 1	Batería 2	Batería 3
Voltaje	5	5	5
Capacidad	5	3	4
Duración (aprox.)	5	3	4
Recargable	5	5	5
<b>Total de incidencias</b>	20	16	18
<b>Ponderación de eficiencia</b>	100%	80%	90%

**Fuente:** Autor

Como se puede observar, la mayoría de las baterías presentan excelentes características, que para la aplicación en estudio son válidas, sin embargo, se eligió la batería 1 por su gran capacidad de duración.

En la ilustración 52, se muestra las alternativas antes mencionadas como fuente de alimentación para la Red Inalámbrica de Sensores.



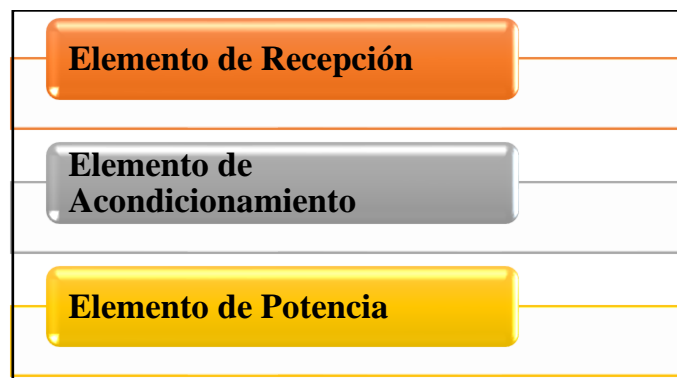
**Ilustración 52:** a) Batería First Power, b) Batería UitraFlrc c) Batería Super  
**Fuente:** (EEMB, 2018)

Para mantener las baterías cargadas se ha señalado algunas alternativas, entre las que nombramos:

- Energía eléctrica convencional, es necesario tener junto a la red eléctrica para mantener las baterías cargadas.
- Energía solar, esto es a través de paneles solares que proporcionaran la energía necesaria cuando las baterías se recargan. En el mercado existe diferentes soluciones: una de estas es el módulo de alimentación solar Lipo Rider Pro, que consta de una etapa de alimentación por medio de paneles solares y además funciona como un cargador de baterías de Li-Po o Li-Ion

### 6.1.3.2. Nodo coordinador

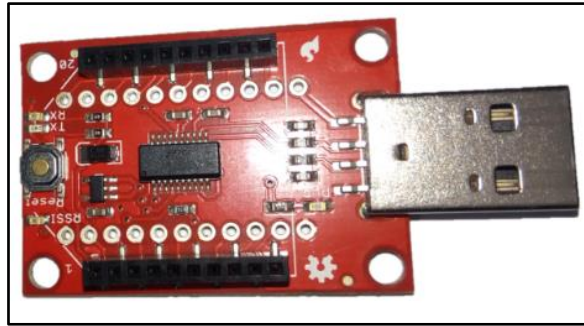
El nodo coordinador se conformó de tres elementos esenciales descritos en la ilustración 53:



**Ilustración 53:** Elementos que conforman el Nodo Coordinador  
**Fuente:** Autor

**Elemento de Recepción:** El módulo que se seleccionó para realizar esta función es el mismo utilizado en los nodos sensores, el módulo XBee Pro S2B, que ya se detalló en el nodo sensor.

**Elemento de Acondicionamiento:** El elemento que se usó es el módulo XBee USB Explorer (ver ilustración 54).



**Ilustración 54:** Módulo USB Explorer  
**Fuente:** Autor

**Elemento de Potencia:** El nodo Coordinador es la parte principal de la red de sensores, de su correcto funcionamiento depende el trabajo del resto de dispositivos que conforman la red, por tal razón, este nodo estará continuamente alimentado por el voltaje proporcionado por una computadora mediante el puerto USB.

## **6.2. Desarrollo y configuración de la red**

Una vez que el nodo sensor y el nodo coordinador se encuentran diseñados, para su posterior funcionamiento se realizó su configuración, llevando a cabo el siguiente procedimiento.

Cuando el nodo sensor haya recolectado y procesado la información, esta se envía hacia el nodo coordinador, el cual se encontrará conectado al ordenador de monitoreo, en dicho ordenador se debe encontrar la interfaz que permita la lectura correcta de la información receptada.

Para que la red funcione correctamente, se debe realizar las siguientes configuraciones.

### **6.2.1. Configuración de los nodos**

Considerando los requerimientos de la red a ser establecida se ha seleccionado el módulo XBee Pro S2B con conector RP-SMA, que garantiza el establecimiento fiable del enlace de comunicación y la movilidad del nodo, ya que al colocar una antena externa se puede mejorar las características de la red.

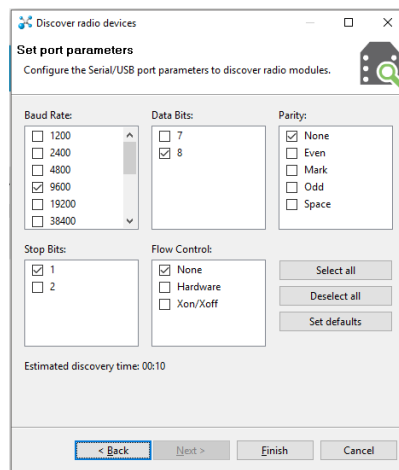
La configuración de este módulo se la realizó en el software X-CTU y debe ser ejecutada cautelosamente pues de esto depende que el consumo de energía sea mínimo.

La configuración se la realizó en dos diferentes maneras; una para el nodo sensor y otra para el nodo coordinador.

### 6.2.1.1. Configuración del nodo sensor

A continuación, se describe paso a paso la configuración del nodo sensor en la cual el módulo consumirá únicamente la energía necesaria para la transmisión de datos procedentes de los sensores.

- Primero se inserta el módulo XBee Pro S2B en la tarjeta XBee Explorer USB.
- Se abre una ventana del terminal X-CTU.
- Se realiza la búsqueda de los dispositivos conectados, esto es presionando simultáneamente las teclas ctrl+shift+D o dando clic sobre el botón de búsqueda en el terminal y se selecciona el puerto con el que el módulo se encuentra conectado.
- Una vez encontrado el módulo Xbee conectado, se configura los valores de Baud Rate: 9600, Flow Control: none, Data Bits: 8, Parity: none; Stop Bits: 1, como lo muestra la ilustración 55:



**Ilustración 55:** Configuración del bus serial USB  
**Fuente:** Autor

- Se presiona doble clic sobre el módulo ya encontrado.
- Se hace clic sobre el botón *Read* del terminal X-CTU.
- En el botón *Update*, se configura el XBee con el firmware de Zigbee Router AT.
- En la opción *Networking*, se configura el Pan ID para el dispositivo considerando que este ID debe ser el mismo en todos los nodos de la red.

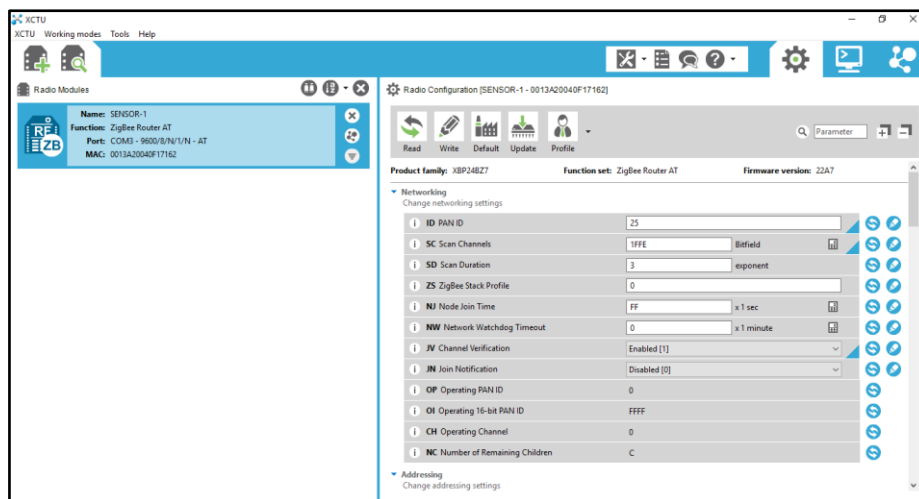
- El dispositivo coordinador por defecto asignara al dispositivo final el canal de operación que escogió.
- En la opción *Addressing*, se configura la dirección del módulo coordinador, esto en el parámetro *Destination Address*.
- Se configura el parámetro *Node Identifier* donde se colocará el nombre del nodo.
- A continuación, se debe configurar el modo de operación que en este caso será el modo *cycle sleep*, esto en la pestaña *Sleep Modes*, así mismo se configura el tiempo que el módulo permanecerá en estado de reposo y el tiempo de envío de datos.
- Una vez terminada la configuración se da clic en el botón *Write* del terminal.

A continuación, en la tabla 30 se presentan los parámetros configurados en cada uno de los nodos sensores y la ilustración 56 muestra una perspectiva del terminal de configuración X-CTU. La descripción de la columna “Indicador” se encuentra en la hoja de datos del módulo XBee PRO S2B.

**Tabla 30:** Configuraciones del nodo sensor

Indicador	Nombre	Valor
NI	Identificador del nodo	SENSOR 1
ID	PAN ID	25
SD	Duración de escaneo	3
DH	Dirección de destino en alto	13A200 (Dirección en alto del nodo coordinador)
DL	Dirección de destino en bajo	40F505BD (Dirección en bajo del nodo coordinador)
SH	Dirección de origen en alto	13A200
SL	Dirección de origen en bajo	40F17162
SP	Periodo de reposo	3E8 (10 segundos)
SN	Número de periodos	3C (5 segundos)

**Fuente:** Autor



**Ilustración 56:** Pantalla de configuración del nodo sensor

**Fuente:** Autor

Una vez configurado el módulo de transmisión se procede a la configuración del módulo de procesamiento de datos. Como se estableció en la sección 6.1.3.1. el módulo para el procesamiento de datos es la tarjeta Arduino Uno para la adquisición de variables ambientales y su posterior transmisión al nodo coordinador, para la cual se realizó el código como se muestra en la ilustración 57, desarrollado en la plataforma Arduino IDE para la adquisición de datos provenientes de los sensores de ruido y de CO2y en la ilustración 57 se muestra el esquema de funcionamiento.

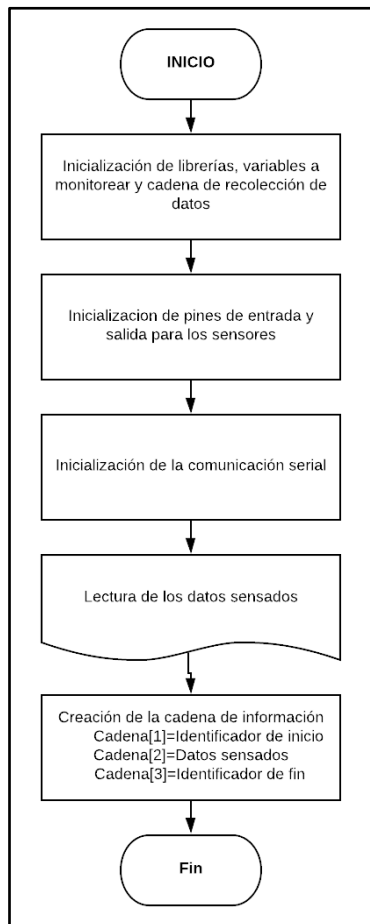
```

#include <Wire.h>
#include "SparkFunCCS811.h" //Importación de librerías para el sensor de CO2 CCS811
byte cadena[3];
#define CCS811_ADDR 0x5B //Dirección de I2C
CCS811 mySensor(CCS811_ADDR);

void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Inicializa la comunicación serial
  Wire.begin(); //Inicialice hardware I2C
  CCS811Core::status returnCode = mySensor.begin(); //Establece los pines de entrada y salida, según se ha definido en la librería
}
void loop()
{
  if (mySensor.dataAvailable())
  {
    mySensor.readAlgorithmResults();
    //Se llena la cadena de envío
    cadena[0]='1';
    cadena[1]=mySensor.getCO2();
    cadena[2]='\0';
    //Se envía la trama a través del puerto serial
    Serial.write(cadena,3);
  }
}

```

**Ilustración 57:** Configuración para el procesamiento realizado en uno de los nodos sensores  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 58:** Diagrama de flujo del procesamiento realizado por el elemento de procesamiento  
**Fuente:** Autor

De acuerdo con el diagrama de flujo de la ilustración 58, cada vez que se lee un dato se lo almacena en una cadena para su posterior envío, esta cadena como se observa está conformada por un identificador de inicio, que en la programación está la letra “i”, luego se colocó los datos sensados; que pueden ser del sensor de CO2 o del sensor de ruido y finalmente está el identificador de fin con la letra “o” en la programación.

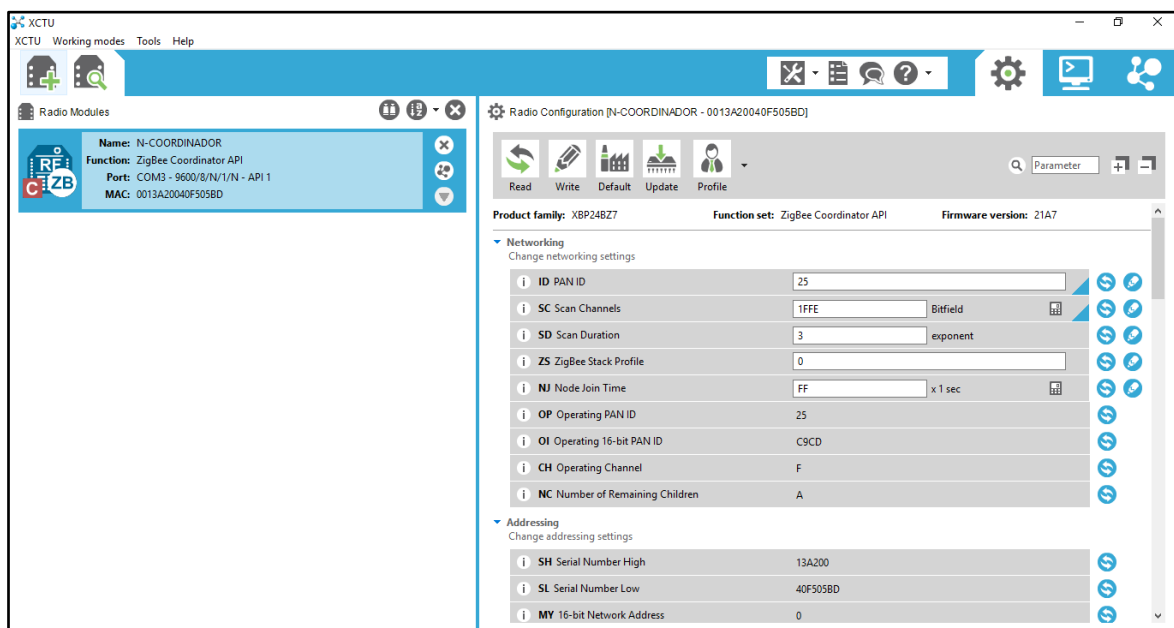
### 6.2.1.2. Configuración del nodo coordinador

Ahora, para la configuración del nodo coordinador, es similar a la del nodo sensor con la pequeña variación en la dirección de destino, pues al ser el nodo coordinador su destino serán todos los nodos sensores de la red, por lo tanto, las direcciones de destino van desde el valor 0 al valor FFFF en hexadecimal, estas configuraciones se muestran en la tabla 31 y en la ilustración 59 muestra la pantalla de su configuración.

**Tabla 31:** Configuraciones del nodo coordinador

Indicador	Nombre	Valor
NI	Identificador del nodo	N-COORDINADOR
ID	PAN ID	25
SD	Duración de escaneo	3
DH	Dirección de destino en alto	0
DL	Dirección de destino en bajo	FFFF
SH	Dirección de origen en alto	13A200
SL	Dirección de origen en bajo	40F505BD
AP	Modo de operación API	1

**Fuente:** Autor



**Ilustración 59:** Pantalla de configuración del nodo coordinador

**Fuente:** Autor



## **Procesamiento de la señal**

Con el componente de recepción ya configurado, la siguiente etapa es el procesamiento de la información receptada, esto se lo hace a través de la lectura de las tramas de todos los nodos sensores en interfaz gráfica ejecutada en el computador.

El desarrollo de la interfaz gráfica y su descripción se lo va a tratar en la siguiente sección.

### **6.2.2. Sistema de adquisición de datos**

Como se había descrito anteriormente la adquisición de la información se la realiza por medio del módulo receptor conectado a un computador en el que a través de una aplicación presenta los datos al usuario.

Para el desarrollo de la aplicación gráfica de monitoreo se eligió como lenguaje de programación la herramienta de Microsoft Corporation VS Express 2017 que ofrece una licencia académica de fácil acceso por medio del sitio web: <https://visualstudio.microsoft.com/es/vs/older-downloads/>.

El funcionamiento de la interfaz de monitoreo que se desarrolló; es la de visualizar en tiempo real la información que es generada en la red. En este caso, se tiene 31 nodos sensores distribuidos en 6 zonas y que envían información cada 10 minutos, y por medio de la interfaz se conoce el estado de las variables del sitio donde se encuentra el módulo sensor.

#### **6.2.2.1. Elaboración de la interfaz de monitoreo**

Una vez que las tramas enviadas por los nodos sensores llegan al nodo coordinador, el módulo de comunicación inalámbrica XBee de este nodo es el encargado de enviarlas hacia el PC para ser procesadas. La lectura de esta información a través del software se realiza de la siguiente manera:

- Para comenzar, se establece la comunicación física entre la tarjeta XBee Explorer USB y el software VS Express 2017, para esto, se implementó el control SerialPort (ilustración 60); este control permite abrir el puerto serial del computador, leerlo o escribir datos en él.



**Ilustración 60:** Recurso de puerto serie SerialPort en VS Express 2017

**Fuente:** Autor

El uso de la herramienta SerialPort en el software se lo hace a través de las siguientes líneas de código, que permite la apertura de todos los puertos COM:

```
SerialPort1.PortName = puerto.Text 'Asignamos al puerto serial el COM seleccionado en el menú desplegable
SerialPort1.Open() 'Se abre el puerto seleccionado en el menú desplegable
```

**Ilustración 61:** Programación para el uso de SerialPort en VS Express 2017

**Fuente:** Autor

En esta parte se asigna el puerto COM en el que se encuentra conectado el módulo receptor del nodo coordinador.

- Luego de realizar la conexión con el puerto de comunicación serial conectado al nodo coordinador, se procede a la lectura de la información receptada, esto se realiza a través de las líneas de código que se presentan en la ilustración 62, cuyo procedimiento comienza con la lectura de 3 bytes de datos recibidos, tomando en cuenta que la unidad de procesamiento en el nodo sensor realiza el envío de 3 bytes de información como se mostró en la ilustración 58, en la cual dos bytes son delimitadores de inicio/fin a la vez que permiten conocer el nodo de origen de la información y un byte son la información obtenida por el nodo sensor.

```
If caracter = 97 Then
    datos = SerialPort1.ReadByte() 'Leemos datos del puerto serie
    vns1_ruido = datos 'Asignamos los datos a la variable
    caracter = SerialPort1.ReadByte()
    n1 = 1
    If vns1_ruido > maxruido Then 'Calculamos el valor maximo y minimo
        maxruido = vns1_ruido
        If minruido > vns1_ruido Then
            minruido = vns1_ruido
        End If
    End If
If caracter = 98 Then
    CheckForIllegalCrossThreadCalls = False 'Es una propiedad de control para desbloquear cualquier interrupcion en la lectura de los datos
    libro.Sheets(1).cells(x, 3) = vns1_ruido.ToString() 'Almacenamos el valor leído en la base de datos
    libro.Sheets(1).cells(x, 4) = DateTime.Now.ToString() 'Almacenamos la hora y fecha del valor leído en la base de datos
    x = x + 1
    libro.Save
    ns2_ruido.Series("Ruido (dB)").Points.AddXY(DateTime.Now.ToString(), vns1_ruido.ToString()) 'Graficamos los datos leídos
    reg()
```

**Ilustración 62:** Programación para la lectura de datos en la interfaz gráfica

**Fuente:** Autor

El código comienza con la lectura del puerto serial, va almenando los datos conforme llegan, en las variables establecidas para cada nodo sensor, calcula el valor máximo y mínimo registrado y posteriormente cuando llegue al byte delimitador de fin de trama, empezará a graficar y guardar los datos en una base de datos previamente elaborada en

Excel, a través de la última línea de código presentada en la ilustración 62. Este procedimiento se repetirá para cada uno de los nodos sensores identificados con su propio byte de inicio y fin. En la ilustración 62 se encuentra como ejemplo el byte de inicio 97 y el de fin 98, que representan las letras a y b en la programación.

### 6.2.2.2. Funcionamiento general de la interfaz

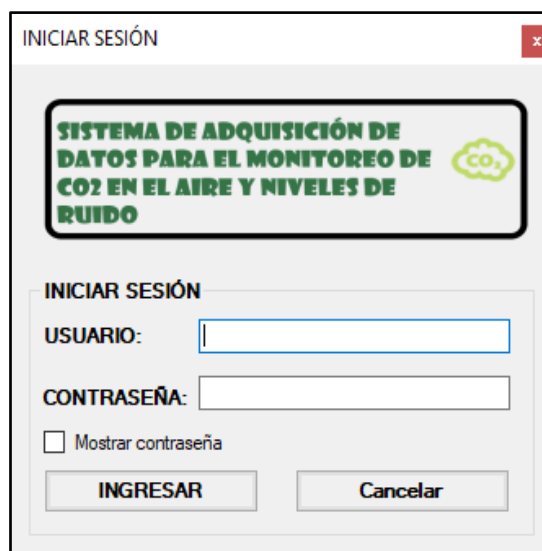
La interfaz gráfica de usuario consta de cinco ventanas con diferentes funciones cada una y que a continuación se describe:

La primera ventana denominada “Ventana de Presentación”, como se muestra en la ilustración 63, permite al usuario dos funciones a través de las pestañas “Iniciar Sesión” y “Salir”, en la primera opción como se menciona, permite al usuario iniciar sesión y la otra pestaña permite salir de la interfaz gráfica.



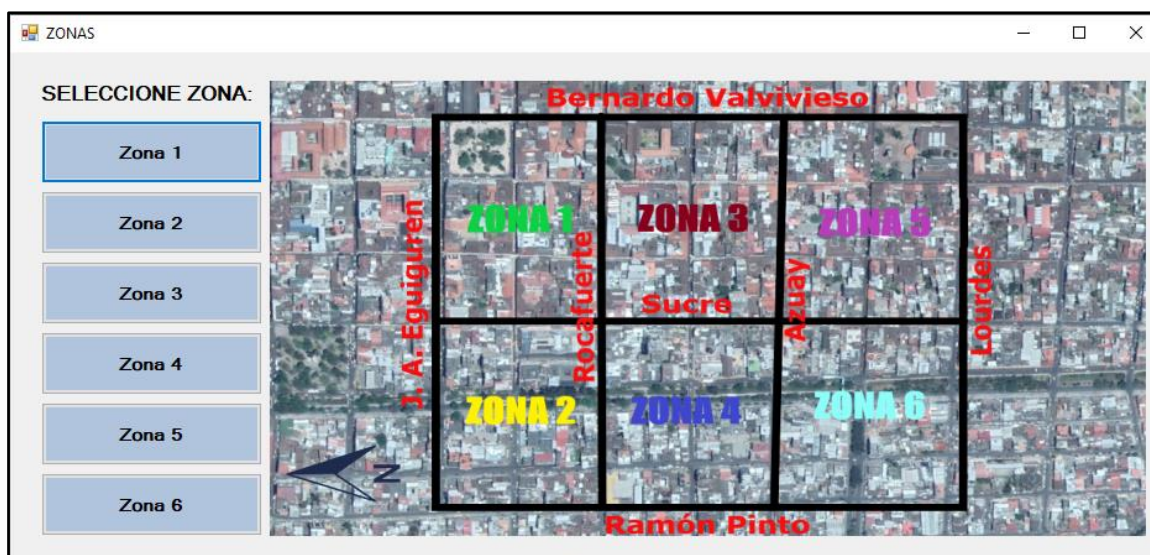
**Ilustración 63:** Interfaz gráfica de usuario - Ventana de Inicio  
**Fuente:** Autor

La segunda ventana o también llamada “Iniciar Sesión” como se observa en la ilustración 64, permite al usuario iniciar sesión a través de un usuario y una clave previamente registrados.



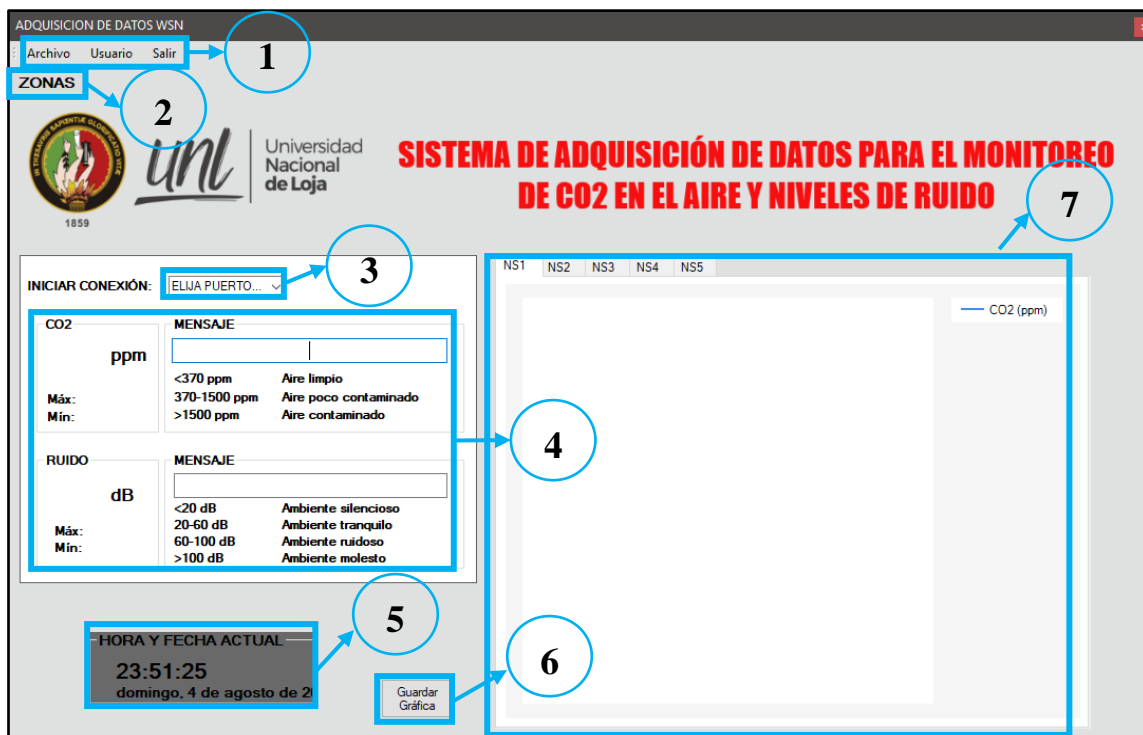
**Ilustración 64:** Interfaz gráfica de usuario – Ventana Iniciar Sesión  
**Fuente:** Autor

La tercera ventana llamada “Zonas” permite al usuario ingresar a la ventana de adquisición de datos, a través de la selección de una de las seis zonas establecidas en el estudio como se puede observar en la ilustración 65.



**Ilustración 65:** Interfaz gráfica de usuario - Ventana de Selección de zonas del área de estudio  
**Fuente:** Autor

La cuarta ventana como se observa en la ilustración 66, se llama “Adquisición de datos WSN”, en donde se encuentra básicamente toda la información actualizada referente a los nodos sensores creados, en la que se puede ir navegando a través de las diferentes opciones, cuya descripción se encuentra a continuación.



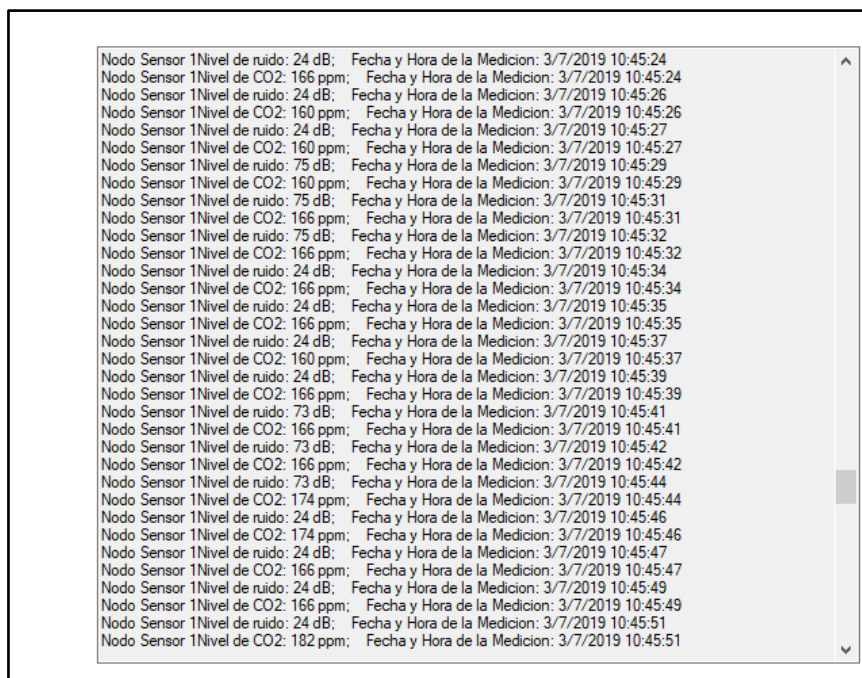
**Ilustración 66:** Interfaz gráfica de usuario - Ventana Adquisición de datos WSN  
**Fuente:** Autor

- 1) Como se observa en la ilustración 65 son un conjunto de pestañas que permiten las siguientes funciones:

**Tabla 32:** Descripción de las pestañas en la ventana Adquisición de datos WSN de la interfaz gráfica de usuario

Sección		Descripción
Archivo	Base de datos	Permite la visualización de un registro de la información que se encuentra obteniendo en la unidad de recepción como se muestra en la ilustración 67, siempre y cuando se haya iniciado sesión.
	Iniciar Sesión	Esta opción permite al usuario iniciar con su cuenta y habilitar las opciones de guardar y crear nuevos usuarios, al realizar clic en este apartado se abrirá la pantalla que se muestra en la ilustración 64. Para la validación de los datos de usuarios se hizo una base de datos desarrollada en Microsoft Access Office 365, en la cual se especifican los campos de: nombre de usuario y contraseña.
Usuario	Agregar	Permite ingresar nuevos usuarios en una base de datos, esto abre la quinta ventana.
	Cerrar Sesión	Permite cerrar sesión del usuario que este usando actualmente la aplicación para que otro usuario ingrese, deteniendo la comunicación serial del puerto con el nodo coordinador.
Salir		Permite al usuario salir de aplicación.

**Fuente:** Autor

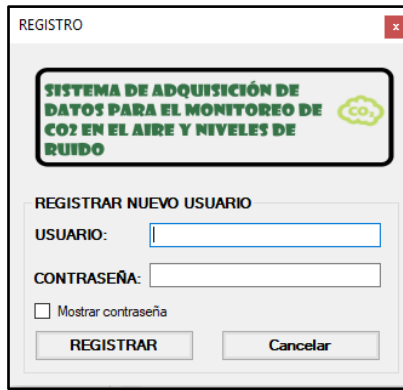


**Ilustración 67:** Ingreso de datos del nodo coordinador

**Fuente:** Autor

- 2) El Botón ZONAS abre la ventana de la ilustración 65 que permite al usuario seleccionar y mostrar la información de los nodos de una de las seis zonas establecidas en el estudio, tal y como se describió en el apartado 6.1.2.1.
- 3) El menú desplegable Iniciar Conexión permite la conexión con el puerto serie conectado al nodo coordinador, para poder recibir y mostrar los datos.
- 4) La sección 4, muestra los datos recibidos actualmente con su respectivo valor máximo y mínimo registrados y dependiendo del valor actual se presenta un mensaje de advertencia.
- 5) En la sección 5 se puede observar la hora y fecha actual en la que se está ejecutando la interfaz.
- 6) A través del botón “Guardar grafica” permite al usuario realizar una instantánea de los datos guardados en las gráficas.
- 7) En la sección 7 se puede observar las gráficas de los datos en el tiempo que hayan llegado al nodo coordinador.

Finalmente, la quinta ventana denominada “Registro” (Ver ilustración 68), permite registrar un nuevo usuario para el inicio de sesión.



**Ilustración 68:** Interfaz gráfica de usuario - Ventana Registro  
Fuente: Autor

### 6.2.2.3. Almacenamiento de datos

Para el almacenamiento de los datos que se vayan registrando en el nodo coordinador, se ha elaborado una base de datos en el que se va guardando los valores conforme ingresan, como se observa en la ilustración 69 y su descripción es la siguiente:

- Nodo al que pertenecen
- Valor recibido cuyo valor difiere en:
  - Nivel de ruido o
  - Nivel de CO2 y finalmente,
- Fecha y hora de la medición

Cuya información se va guardando en un archivo Excel en el computador.

	NODO SENSOR 1		NODO SENSOR 2		NODO SENSOR 3		NODO SENSOR 4	
	CO2 (ppm)	Fecha y Hora de Medición	RUIDO (dB)	Fecha y Hora de Medición	CO2 (ppm)	Fecha y Hora de Medición	RUIDO (dB)	Fecha y Hora de Medición
3	410	28/7/2019 16:35:58	23	28/7/2019 16:35:44				
4	410	28/7/2019 16:36:22	21	28/7/2019 16:36:12				
5	420	28/7/2019 16:36:50	24	28/7/2019 16:36:36				
6	420	28/7/2019 16:37:15	23	28/7/2019 16:37:04				
7	410	28/7/2019 16:37:43	23	28/7/2019 16:37:29				
8	410	28/7/2019 16:38:11	23	28/7/2019 16:37:57				
9	410	28/7/2019 16:38:35	23	28/7/2019 16:38:21				
10	410	28/7/2019 16:39:03	21	28/7/2019 16:38:49				
11	410	28/7/2019 16:39:31	24	28/7/2019 16:39:14				
12	410	28/7/2019 16:39:56	23	28/7/2019 16:39:42				
13	410	28/7/2019 16:40:24	24	28/7/2019 16:40:10				
14	410	28/7/2019 16:40:48	24	28/7/2019 16:40:34				
15	420	28/7/2019 16:41:16	23	28/7/2019 16:41:02				
16	410	28/7/2019 16:41:44	24	28/7/2019 16:41:30				
17	410	28/7/2019 16:42:12	23	28/7/2019 16:41:58				
18	410	28/7/2019 16:42:48	21	28/7/2019 16:42:34				
19	400	28/7/2019 16:42:57	21	28/7/2019 16:42:56				
20	410	28/7/2019 16:43:01	24	28/7/2019 16:42:59				
21	410	28/7/2019 16:43:04	24	28/7/2019 16:43:03				

**Ilustración 69:** Almacenamiento de información en la base de datos  
Fuente: Autor



#### **6.2.2.4. Seguridad**

La seguridad, es un punto muy importante en el desarrollo de cualquier red, por lo tanto, se ha desarrollado para nuestro estudio dos niveles de seguridad; uno a nivel de procesamiento y otro a nivel de software.

Dentro del nivel de procesamiento, se ha realizado una parte en la que se le da cierto grado de seguridad a la información que posteriormente será transmitida, esto consiste en inicializar un vector en la que no solo consta la información recolectada por la unidad de sensado, sino, además se le agregará 2 constantes únicas, una de inicio y otra de fin dependiendo del nodo sensor. Por lo tanto, la información enviada solo podrá ser entendida por el usuario registrado.

Para la seguridad a nivel de software, se ha elaborado el inicio de sesión, como lo muestra en la ilustración 64, que permite que sólo los usuarios registrados puedan ver la información en la interfaz gráfica elaborada. Con esto estamos asegurando la información de nuestra red.

### **6.3. Simulación y Evaluación**

#### **6.3.1. Simulación de la red inalámbrica de sensores**

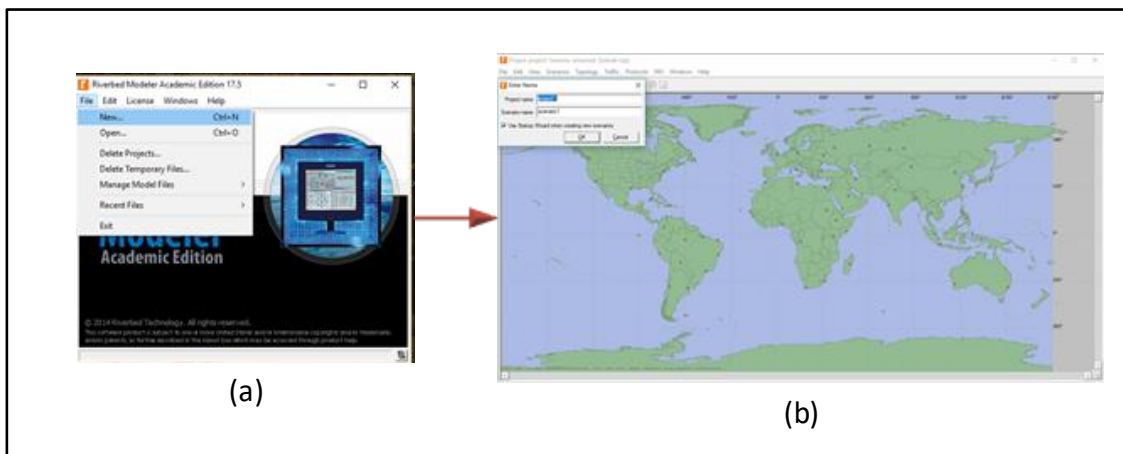
Con el fin de probar la viabilidad y la escalabilidad de este estudio, previamente a la implantación en un ambiente real, es necesario introducir las herramientas de simulación, ya que sería altamente costoso desplegar cientos de sensores para replicar cualquier escenario de riesgo potencial. Hay que tener en cuenta que un sistema simulado puede evaluar todo tipo de situaciones, así como casos excepcionales o comportamientos a largo plazo, mientras que en un entorno real sólo pueden evaluar algunos riesgos desplegando sensores específicos para cada situación. El uso de herramientas de simulación para entornos de prueba permite un tiempo de despliegue más rápido, más barato y exento de riesgos (Clark, 2015).

Para realizar la simulación de la Red Inalámbrica de Sensores, se ha modelado un esquema de la red diseñada anteriormente en el software Riverbed Modeler.

Para iniciar en este software, se ejecuta el programa y se da clic en la pestaña “File” en el que se elegirá la opción “New” como esta en la ilustración 70(a), en el que solicita el



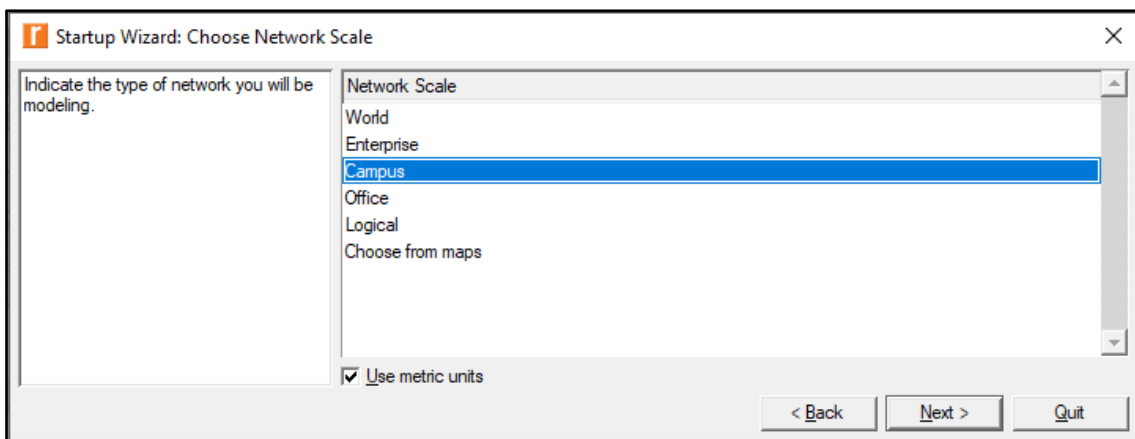
nombre del proyecto y el nombre del escenario en el que se coloca la topología a simular como se muestra en la ilustración 70(b).



**Ilustración 70:** Inicio para simulación de la Red Inalámbrica de Sensores: a) Crear nuevo proyecto, b) Nombre del proyecto

**Fuente:** Autor

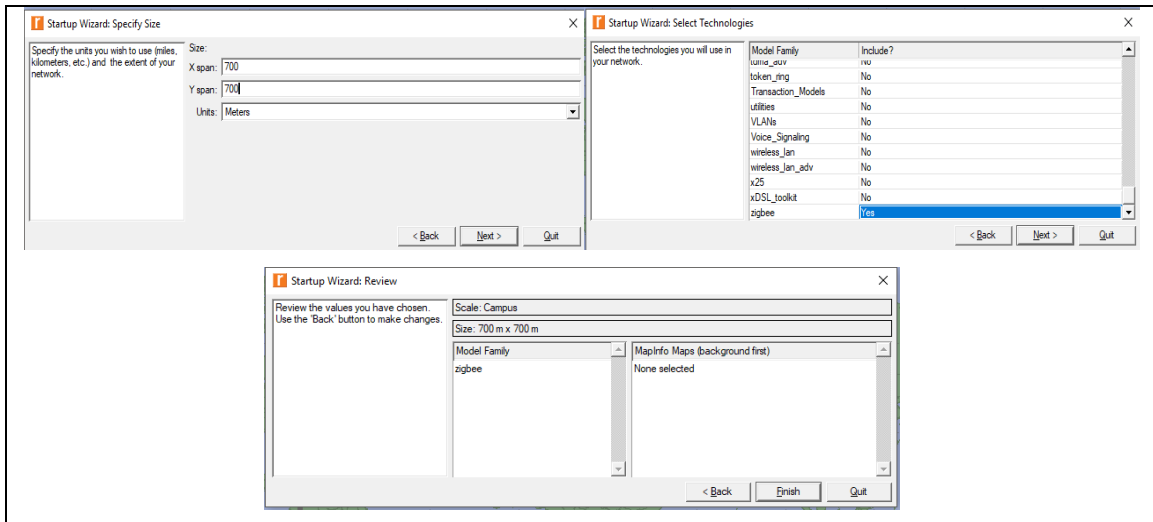
Posteriormente se seleccione para crear un proyecto vacío y además se elige el área de trabajo, en este caso se elegirá la opción “Campus” como se muestra en la ilustración 70, esto depende del tamaño de la red, la cual se ha determinado en la sección 6.1.



**Ilustración 71:** Selección del área de trabajo para la simulación de la Red Inalámbrica de Sensores

**Fuente:** Autor

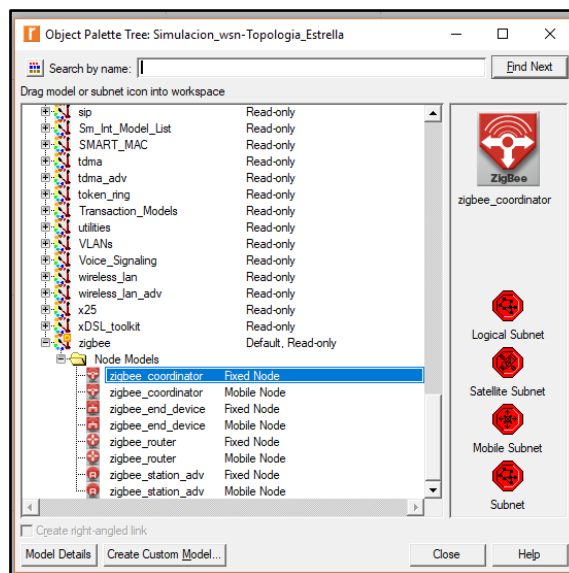
El paso siguiente es colocar las dimensiones del área de trabajo y posterior habilitar las opciones para simulación con el protocolo Zigbee, le damos en “Finish” como se muestra en la ilustración 72.



**Ilustración 72:** Habilitación del protocolo Zigbee en el simulador para la Red Inalámbrica de Sensores  
**Fuente:** Autor

Ahora vamos a crear la red en el simulador, mediante la selección de los componentes de la red:

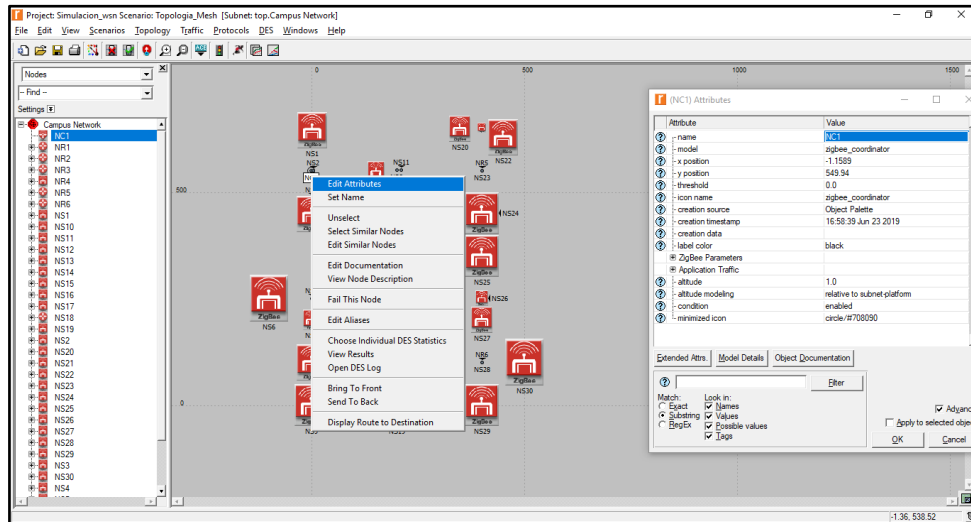
- Nodo coordinador
- Nodo router
- Dispositivo final



**Ilustración 73:** Paleta de componentes en el simulador Riverbed  
**Fuente:** Autor

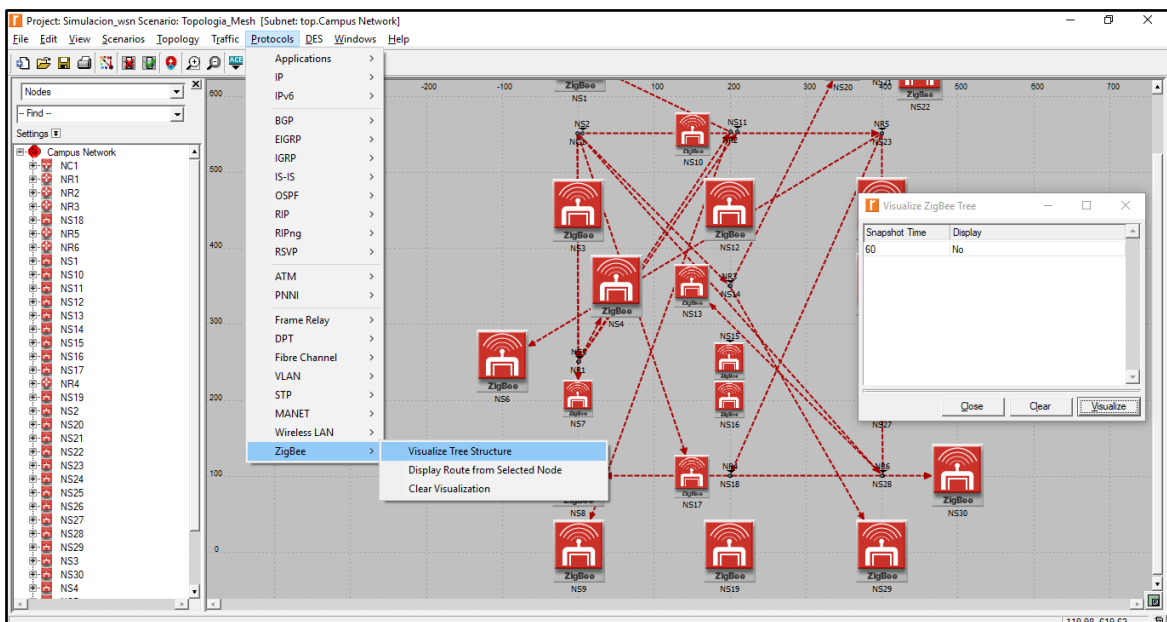
Ya cuando esté dibujado el esquema de la red como se muestra en la ilustración 74, se configura cada uno de los componentes con la opción “Edit Attributes” con la información del nodo:

- Potencia de radiación
- ID de la red
- Nombre del nodo



**Ilustración 74:** Esquema de la Red Inalámbrica de Sensores en el simulador Riverbed  
Fuente: Autor

Finalmente, una vez definida la topología de red, definida como Topología Mesh, con sus respectivos parámetros, se puede observar la conexión configurada, esto se logra al hacer clic en la pestaña “Protocols”, seguidamente clic en “Zigbee” y clic en “Visualize tree structure”, como se muestra en la ilustración 75, aparecerá una pantalla en la cual se debe activar el display para poder visualizar la topología configurada.



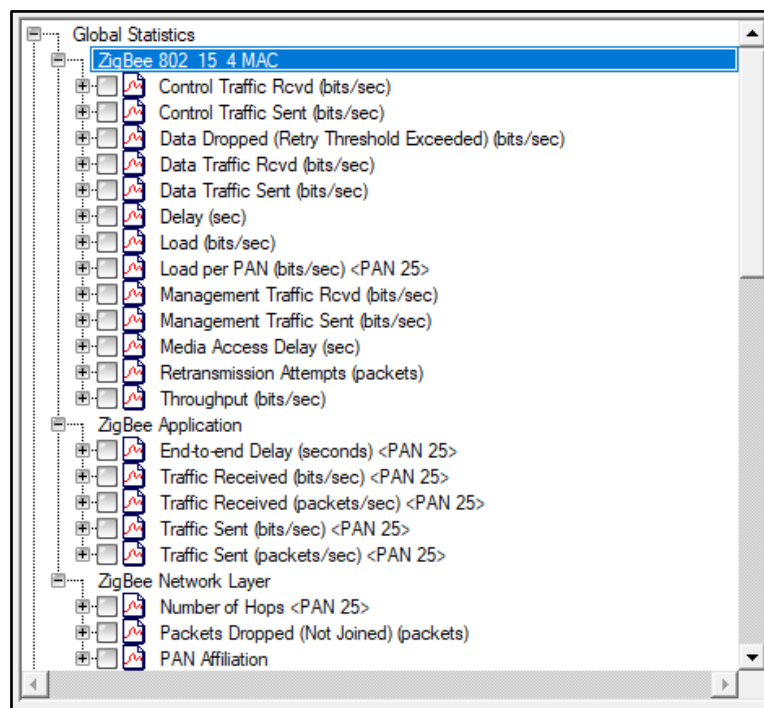
**Ilustración 75:** Visualización de la topología de red configurada en el simulador Riverbed  
Fuente: Autor

## Funcionalidad

El simulador está configurado a través de un nodo coordinador, que incluye una lista de nodos router que enrutan la información hacia los nodos sensores que se desea simular, con su descripción y configuración especificada.

El simulador implementado es capaz de generar mediciones de un alto número de sensores, considerando también los errores de medición y anomalías.

En la simulación se puede identificar el ID del sensor, la ubicación (longitud y latitud), y otros parámetros como se muestra en la ilustración 76. Además, se puede ejecutar, detener o pausar cada sensor durante la simulación de forma independiente.

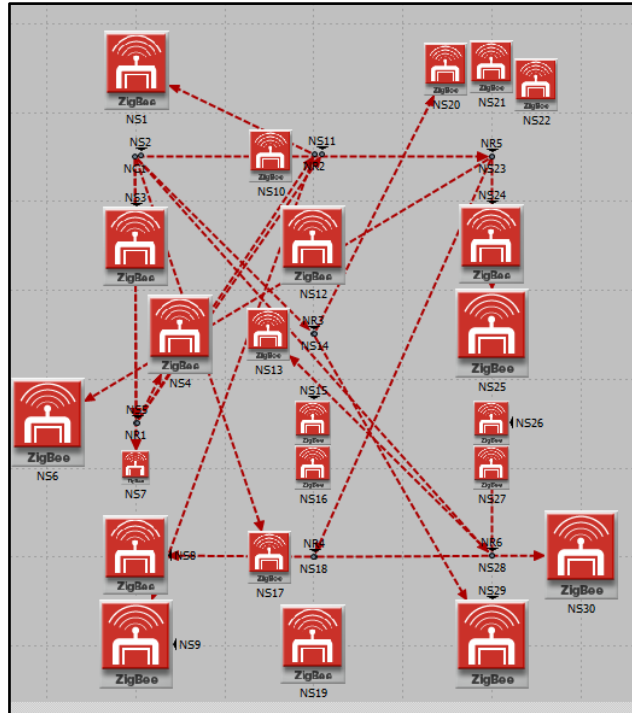


**Ilustración 76:** Parámetros de evaluación en la simulación de red, software Riverbed Modeler

**Fuente:** Autor

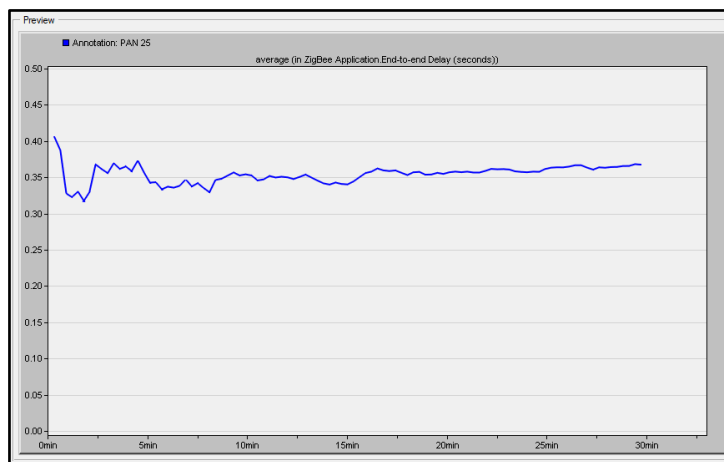
## Resultados y Análisis de la Simulación de Red

En la ilustración 77 se presenta la topología Malla o Mesh simulada, considerada para este estudio de red, la simulación se hizo en base a los equipos de la tecnología elegida.

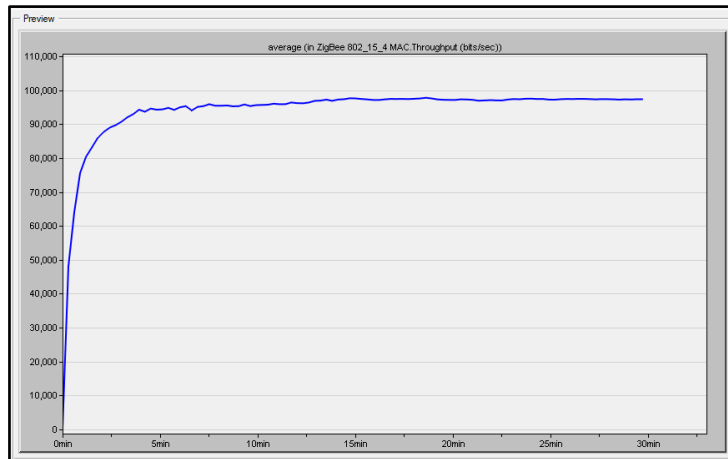


**Ilustración 77:** Simulación de la topología Mesh de la red  
**Fuente:** Autor

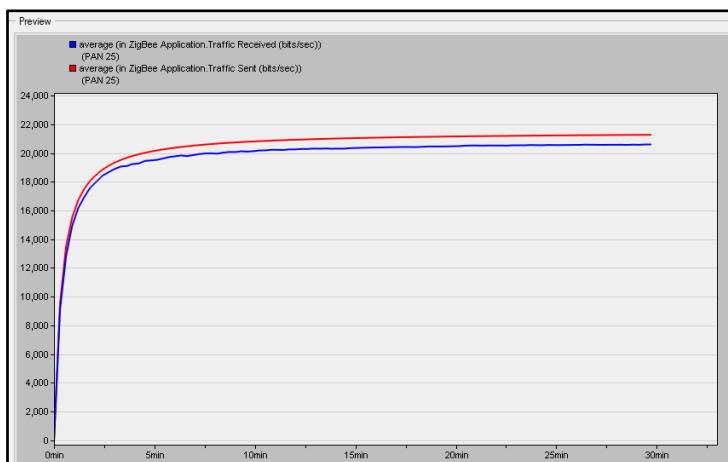
En las ilustraciones 78 a 81, se puede apreciar las curvas con los valores obtenidos de los parámetros evaluados en la simulación: en la ilustración 78 se ve el resultado del parámetro End to End Delay expresado en segundos, que indica la velocidad para transmitir los datos, en la ilustración 79 se aprecia los valores de Troughput, expresados en bits/segundo, que representa los números totales de los bits reenviados desde 802.15.4 MAC a las capas más altas en todos los nodos WPAN de la red y finalmente, en las ilustraciones 80 y 81 se observa el tráfico enviado (línea roja) versus el tráfico recibido (línea azul) en bits/segundo y paquetes/segundo respectivamente:



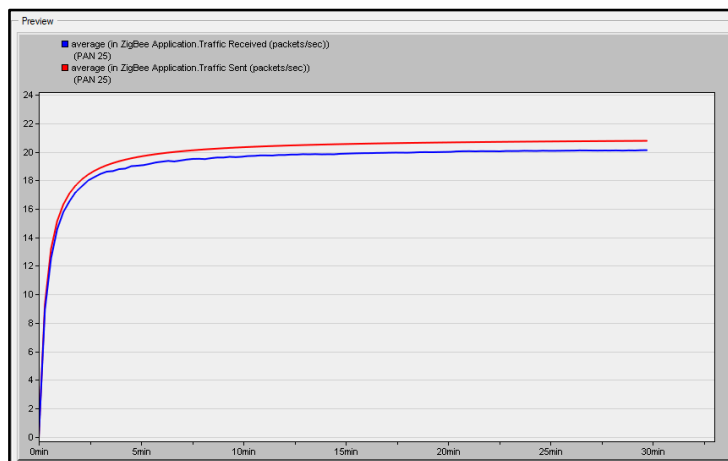
**Ilustración 78:** Delay existente en la simulación de la red  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 79:** Troughput o velocidad efectiva existente en la simulación de red  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 80:** Tráfico recibido vs tráfico enviado en bits/segundo en la simulación de red  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 81:** Tráfico recibido vs tráfico enviado en paquetes/segundo en la simulación de red  
**Fuente:** Autor

A partir de las ilustraciones anteriores, se obtiene la tabla 33 con los resultados respectivos a los diferentes parámetros de simulación:

**Tabla 33:** Resumen de los resultados obtenidos en la simulación de red

<b>Parámetros</b>	<b>Valores obtenidos en la simulación</b>
PAN ID	25
Canal	26
Paquetes enviados	840
Paquetes Recibidos	801
Paquetes pendientes	39
Paquetes caídos	0
End to end delay (ms)	350
Throughput (kbps)	98
Tráfico enviado (bits/segundo)	21.000
Tráfico enviado (paquetes/segundo)	21
Tráfico recibido (bits/segundo)	20.100
Tráfico recibido (paquetes/segundo)	20

**Fuente:** Autor

Como se observa en la tabla 33, los parámetros evaluados que presenta la simulación son acorde a los parámetros requeridos para una red inalámbrica de sensores, tal y como se describe en la sección 4.2.4.3.

La simulación de la red tiene algunas características a favor, que se puede observar cómo:

- El retraso del Enrutamiento Mesh es menor frente a los otros tipos de topologías como el tipo árbol, debido a que el proceso de enrutamiento de malla encuentra rutas más eficientes que el enrutamiento basado en árbol para parte del tráfico. Para algunos nodos, la ruta basada en árbol será la ruta más eficiente, lo que resultará en una mejora general menor en el Retraso de datos.
- La carga para el Enrutamiento Mesh es menor debido a la menor cantidad de saltos para el tráfico de aplicaciones, lo que se traduce en menos tráfico general visto en la capa MAC. También hay que tomar en cuenta que hay un pico pequeño en la ilustración 78 esto se debe a la carga para el enrutamiento Mesh cerca del comienzo de la simulación que no se ve. Esto se debe a que los mensajes de enrutamiento se transmiten en ese momento.
- Los paquetes perdidos son nulos por lo que garantiza la transmisión de datos.

### **6.3.2. Evaluación del funcionamiento de la red**

Para objeto de estudio se ha determinado realizar pruebas con la tecnología seleccionada sobre la zona de estudio, esto se lo realizará a través del montaje de un nodo coordinador con dos nodos sensores; uno de sensado del CO2 y otro de niveles de ruido, que permitan corroborar las siguientes características:

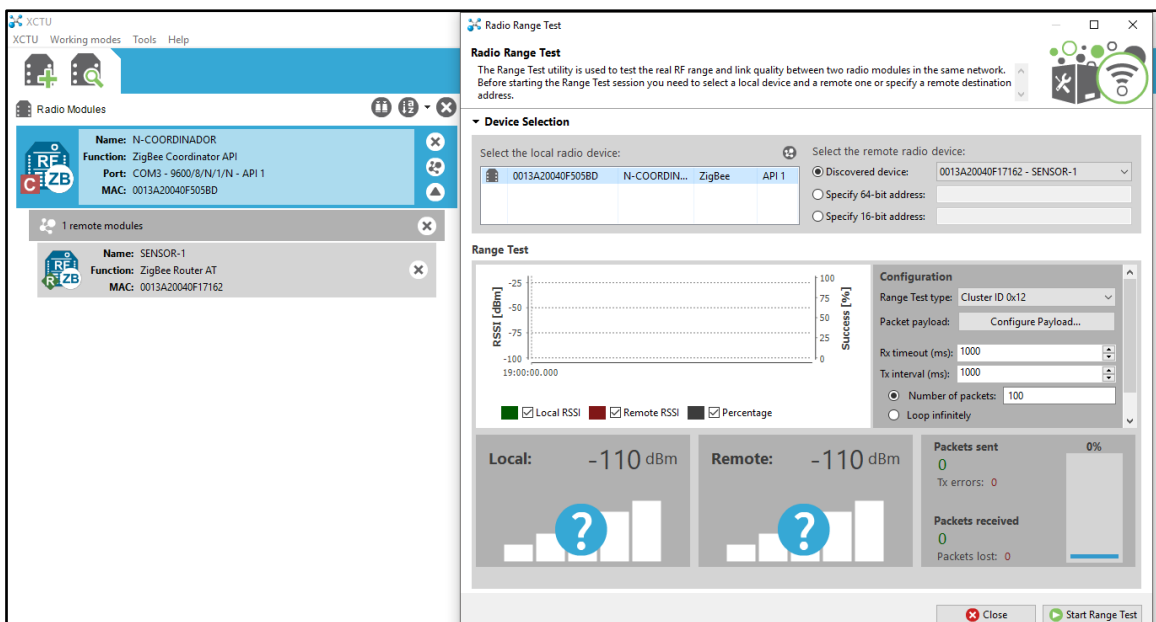
- a) Prueba de distancias de transmisión.
- b) Análisis y orden de la estructura de la red.
- c) Facilitación para el procedimiento de trabajo, para su posterior implementación en trabajos futuros.

### 6.3.2.1. Pruebas de recepción de la señal

Para la medición de la potencia de recepción que presentan los módulos XBee PRO S2B, configurados como Nodo Coordinador y Nodos Sensores, se realizaron pruebas a diferentes distancias con el fin de verificar el correcto funcionamiento de trabajo dentro de la zona de estudio, para ello se ha tomado muestras para las siguientes distancias: 100 m, 200 m y 300 m.

Para llevar a cabo la realización de estas pruebas, se lo hizo a través del software X-CTU, en la pestaña de configuración, opción “Range Test” (ver ilustración 82), en el cual evalúa los siguientes parámetros:

- RSSI (Receive Signal Strength Indication) o Potencia de recepción,
- Cantidad de paquetes enviados y
- Cantidad de paquetes recibidos.



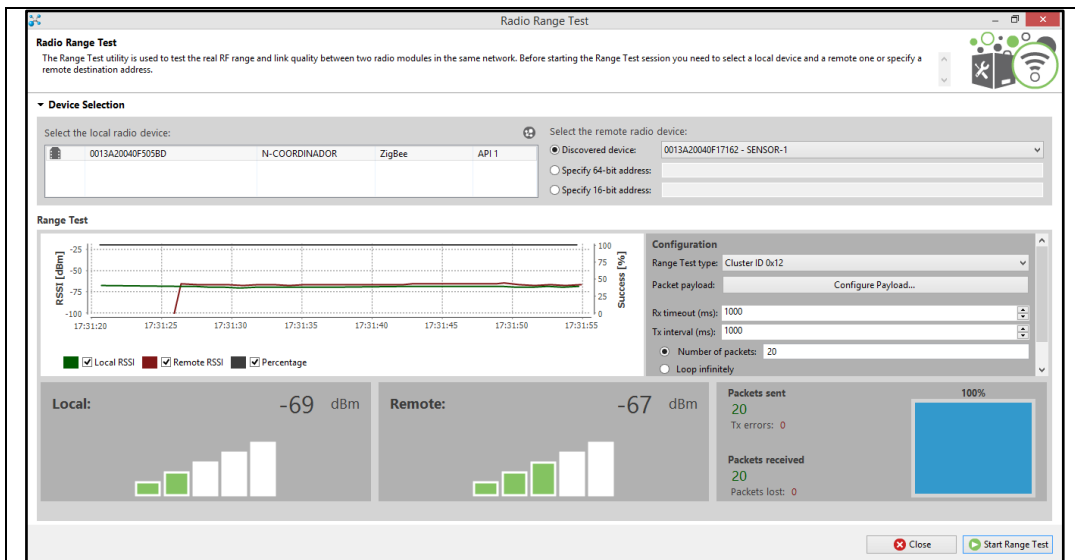
**Ilustración 82:** Interfaz gráfica del modo Range Test del software X-CTU

**Fuente:** Autor

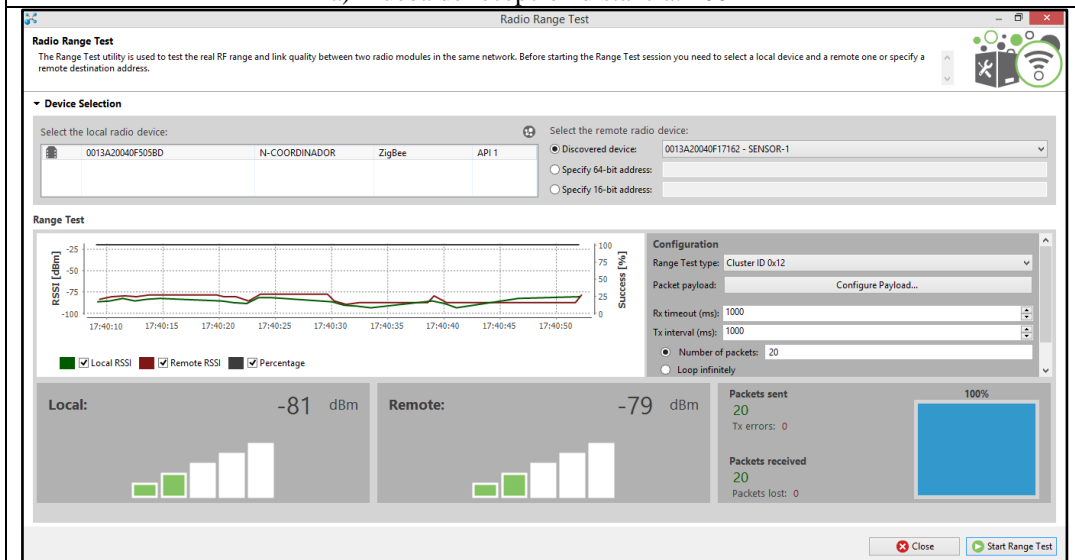


Esta opción permite enviar paquetes de datos de 32 bytes de un dispositivo a otro el cual a su vez devuelve la trama de datos hacia el origen.

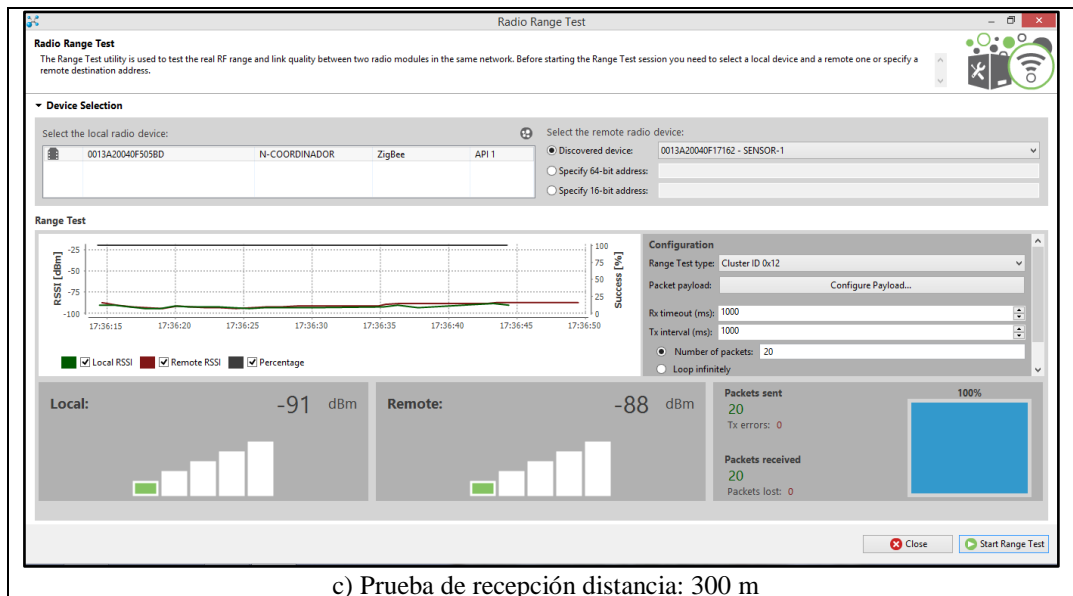
Para realizar la medición de prueba se utilizó uno de los nodos sensores (SENSOR-1), el nodo coordinador (N-COORDINADOR) y el pc portátil de monitoreo. Los resultados alcanzados durante la medición se muestran en las diferentes ilustraciones a continuación.



a) Prueba de recepción distancia: 100 m



b) Prueba de recepción distancia: 200 m



**Ilustración 83:** Pruebas de Recepción de Señal: a) Prueba a 100m, b) Prueba a 200m y c) Prueba a 300m  
**Fuente:** Autor

En la ilustración 83a se muestra el resultado de la prueba de recepción de señal que se realizó a 100 m de distancia entre dos dispositivos XBee Pro S2B, como se observa se mantiene un 100% de recepción de paquetes con un nivel indicador de fuerza de señal (RSSI) de -69dBm.

En la prueba realizada a una distancia de 200m, se mantiene un 100% de recepción de paquetes y un nivel de recepción de -81 dBm (nivel de potencia), tal como lo muestra la ilustración de 83b.

A una distancia de 300 m se mantiene un 100% de recepción de paquetes con un nivel indicador de fuerza de señal de -91dBm. (ilustración 83c).

Los resultados generales obtenidos al realizar la prueba de recepción de señal en exteriores son representados en la tabla 34:

**Tabla 34:** Resultados de las pruebas de recepción de señal

Distancia	RSSI	Recepción de paquetes
100 m	-69 dB	100%
200 m	-81 dB	100%
250 m	-91 dB	100%

**Fuente:** Autor

Las pruebas para determinar la potencia de recepción en exteriores se realizaron en el escenario en donde se desplegara la red inalámbrica de sensores, según las pruebas realizadas a una distancia de 100 m, 200 m y 300 m; el nivel de recepción de los paquetes

en todos los casos es de un 100% (tabla 34) y el nivel de potencia de la señal de recepción en ningún caso es menor a la sensibilidad de recepción (-102 dBm) permitida por el dispositivo, los resultados obtenidos en esta prueba concuerdan con los cálculos efectuados en la sección 6.1.2.4, por tanto se corrobora que la eficiencia de la red no se ve afectada; al igual mediante esta prueba se constató que entre mayor es la distancia de comunicación entre dos módulos XBee disminuye el RSSI (Receive Signal Strength Indication).

### **6.3.2.2. Validación del diseño de los nodos sensores**

Con el objetivo de validar el diseño del nodo sensor se consideró evaluar el funcionamiento de los sensores de CO<sub>2</sub> y de ruido a través de las siguientes formas:

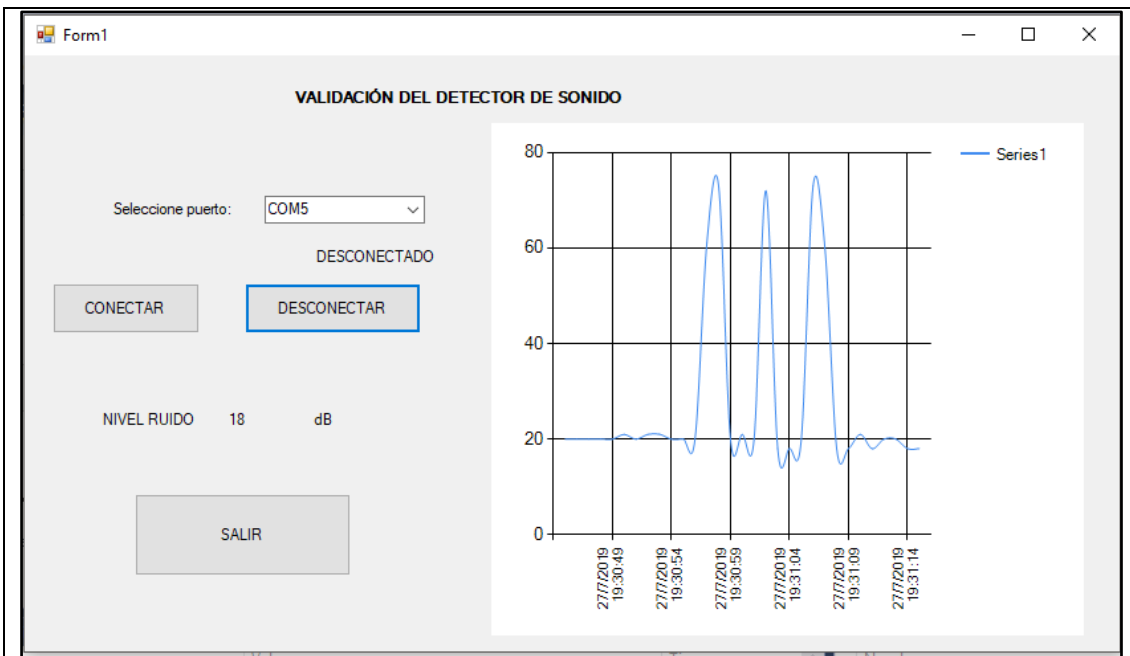
1. Para el nodo sensor que monitorea los niveles de ruido.

En este caso se comparó los valores obtenidos por el detector de sonido Sparkfun con una aplicación para Android ejecutada desde un dispositivo celular denominada “Sound Analyzer App”, que al igual que nuestro sensor mide los niveles de ruido expresados en dB.

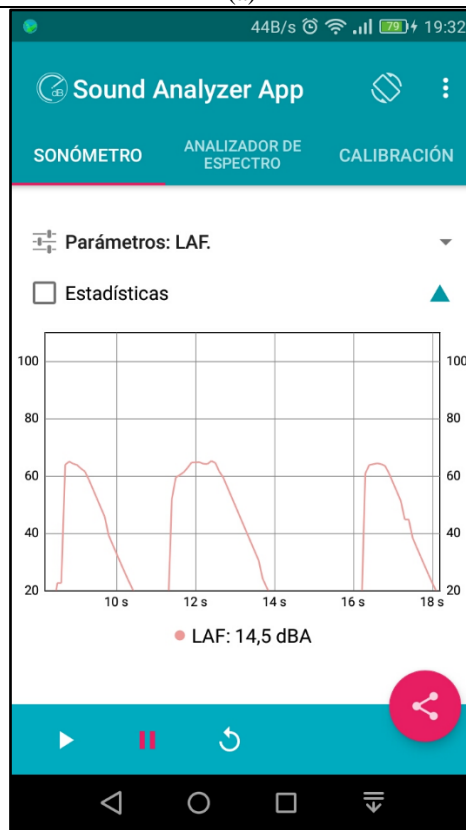
Para ello se ejecutó el programa desarrollado en Visual Studio 2017 que obtiene los valores de ruido en tiempo real para compararlos con los valores obtenidos en la aplicación al ejecutarlos al mismo tiempo.

La aplicación Sound Analyzer permite usar nuestro teléfono inteligente como un medidor de nivel de sonido (SLM) y un analizador de audio en tiempo real (RTA). El ruido ambiental, medido en decibelios (dB) se puede monitorear en tiempo real. La sensibilidad del micrófono es ajustable mediante el menú de calibración. Esta aplicación es solo para indicación o con fines educativos.

A continuación, se presentan las ilustraciones obtenidas por la aplicación para la validación de los datos receptados por el sensor comparados con los datos en la aplicación:



(a)



(b)

**Ilustración 84:** Validación de datos obtenidos a) Por el detector de sonido Sparkfun b) Por la app Sound Analyzer  
**Fuente:** Autor

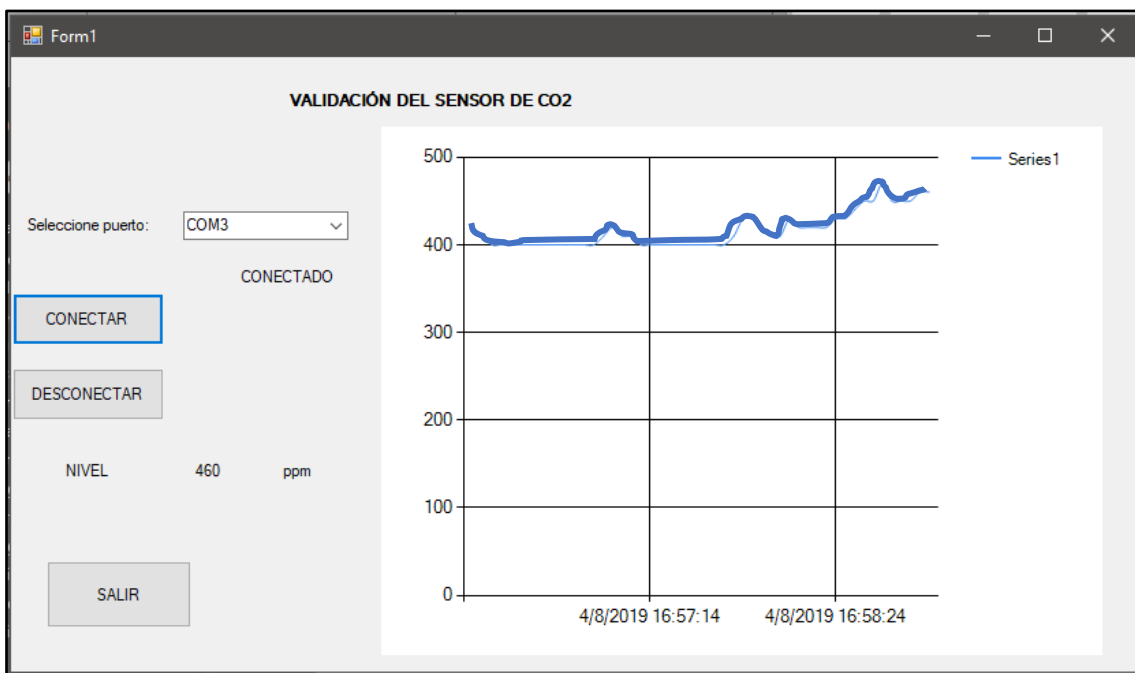
Como se puede verificar en la ilustración 84a y 84b, los valores presentados en ambas figuras son similares con una ligera diferencia debido a la sensibilidad de cada

dispositivo, comprobando así el correcto funcionamiento del nodo sensor con el detector de sonido Sparkfun.

2. Para el nodo sensor que monitorea la concentración de CO2 en el aire.

La validación del sensor CCS811, se decidió comparar los valores obtenidos por el sensor con los valores promedios de concentraciones atmosféricas de CO2 obtenidos por el observatorio Mauna Loa en Hawái y datos de la Organización Mundial de la Salud OMS, para la cual se requirió que las mediciones del sensor CCS811 se realice en un lugar con poca exposición a gases contaminantes.

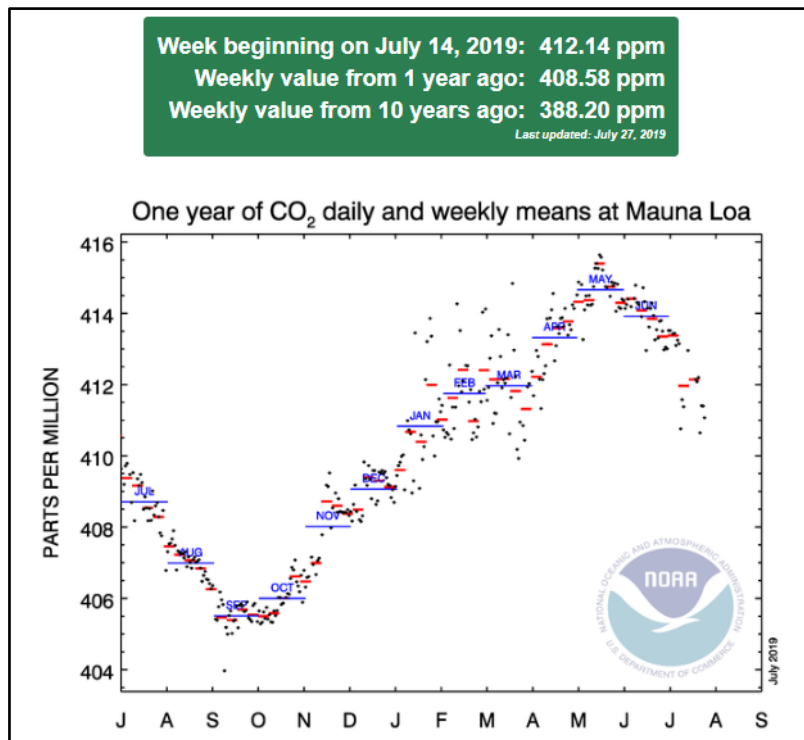
En la ilustración 85 se presenta los valores medidos por el sensor CCS811 cuyo promedio es de 447ppm.



**Ilustración 85:** Validación de datos obtenidos por el sensor CCS811

**Fuente:** Autor

En la ilustración 86 se encuentra el promedio de los valores medidos por el observatorio Mauna Loa, cuyos valores están por los 412 ppm según la última actualización, obtenidos través de la página web: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/weekly.html>.



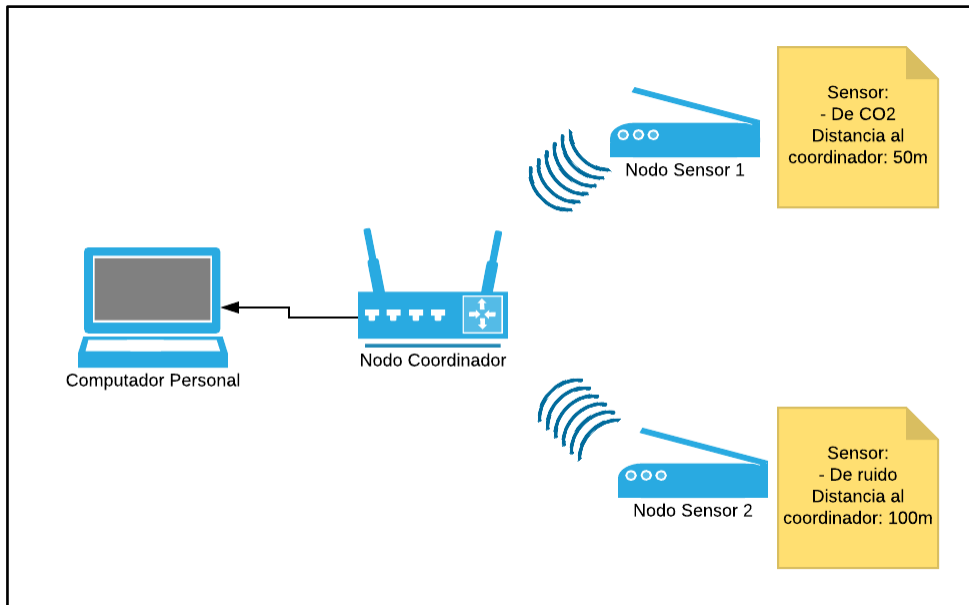
**Ilustración 86:** Validación de datos obtenidos por el observatorio Mauna Loa  
**Fuente:** (ESRL.NOA, 2019)

Por lo tanto, se corrobora que el sensor funciona correctamente, la variación que se puede notar es debido al lugar que se hizo las mediciones. Tomar en cuenta las especificaciones técnicas del sensor, pues este tiene un tiempo de precalentamiento de 20 minutos.

### 6.3.2.3. Pruebas del diseño de la red

Como ya se ha descrito anteriormente para objeto de estudio se evaluó el funcionamiento del diseño de la red, con la implementación de un nodo coordinador y dos nodos sensores sobre la zona de estudio, que permitieron verificar el uso de la tecnología establecida, comprobando el funcionamiento del diseño realizado y la fiabilidad para su posible implementación sobre toda la zona de estudio.

Para el cumplimiento de este fin, se dispuso de la topología lógica, en la que se realizó esta prueba, conforme se muestra en la ilustración 87 y la topología física en la ilustración 88.



**Ilustración 87:** Prueba de diseño - Topología lógica y características  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 88:** Pruebas de diseño - Topología física  
**Fuente:** Autor

De acuerdo con la ilustración 88, los nodos sensores se encontraron ubicados a lo largo de la calle Bolívar entre José Antonio Eguiguren y 10 de Agosto, formando una red de sensores punto – multipunto, se ha considerado esta ubicación de acuerdo a observaciones realizada y concluyendo que es una zona muy transitada por vehículos y transeúntes, además que se encuentra en sus alrededores: lugares comerciales, Gobernación y Municipio de la ciudad y centros religiosos como la Catedral de Loja.

Tanto la ubicación como la disposición de cada nodo dentro de la red se rigen a la arquitectura física de los postes de alumbrado público de la ciudad, como se observa en la ilustración 89 (los puntos azules representan un poste de alumbrado), tómesese en cuenta que dentro de la zona de estudio se encuentran identificados postes de 6, 10, 12 metros y en algunas partes se encuentra en fachada, información obtenida por EERSSA y a través del método de observación. Por lo tanto, se ha considerado colocar los nodos a una altura de 5 metros del suelo.



**Ilustración 89:** Infraestructura física del casco urbano de la ciudad de Loja

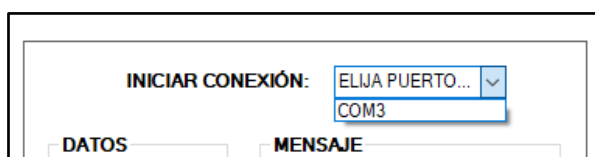
**Fuente:** Autor



Los parámetros considerados para el análisis de las mediciones obtenidas son: nivel de ruido tranquilo, moderado, molesto e insoportable, mientras que para CO2 un nivel de concentración típica, identificados como aire limpio, aire poco contaminado y aire contaminado.

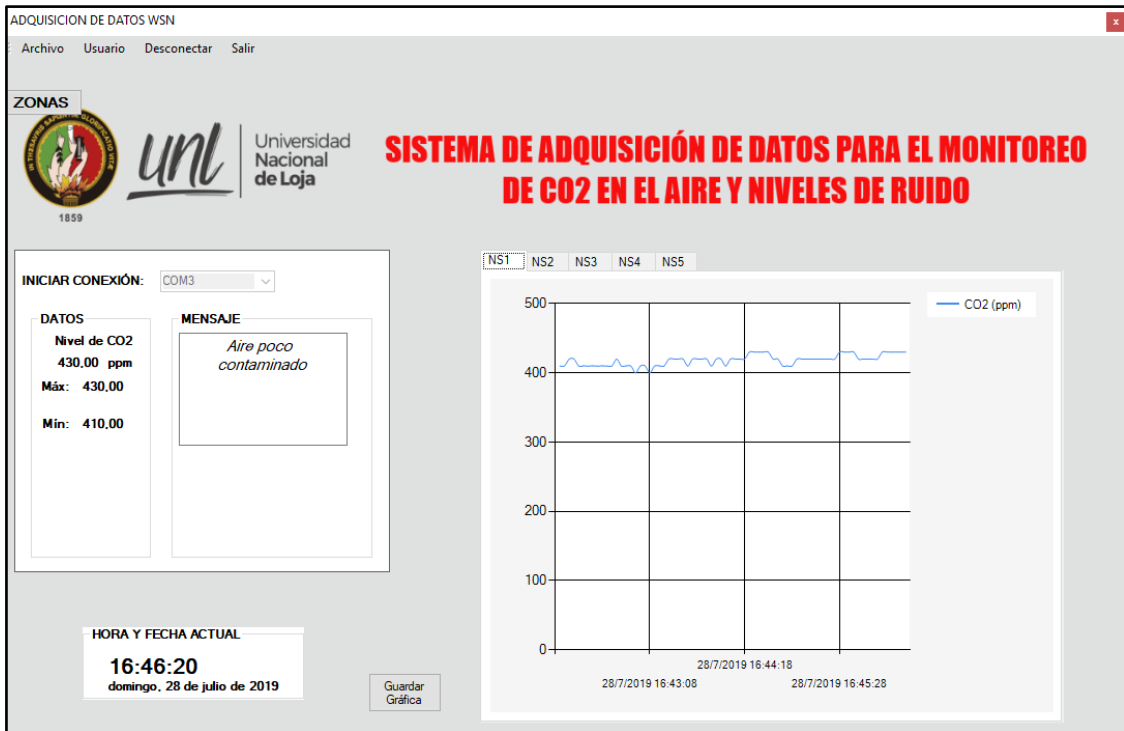
A continuación, en el escenario se estableció el lugar del nodo coordinador para el monitoreo, que puede ser cualquier punto cercano a la zona de estudio y que para este caso se lo estableció específicamente en la esquina de las calles Bolívar y 10 de Agosto. El nodo coordinador se encuentra directamente conectado al computador personal en uno de los puertos de comunicación serial o puerto COM.

Una vez que la red se ponen ejecución, la comunicación empieza entre el nodo coordinador y el computador. El nodo coordinador forma la red enviando un broadcast a todos los dispositivos que posean el mismo identificador de red, en este caso se ha seleccionado el ID = 25, así establece una frecuencia de acuerdo con la tabla 17. Al mismo tiempo, se ejecuta la interfaz gráfica de monitoreo desarrollada en la sección 6.2.2., se ingresa con su respectivo “Usuario” y “Contraseña” para que permita la visualización de los datos, para ello, primero se debe establecer la zona en la que se va obtener los datos como se mostró en la ilustración 65 y posterior se debe establecer la conexión con el puerto serie conectado al nodo coordinador, en mi caso fue el puerto COM 3, como se muestra en la ilustración 90.

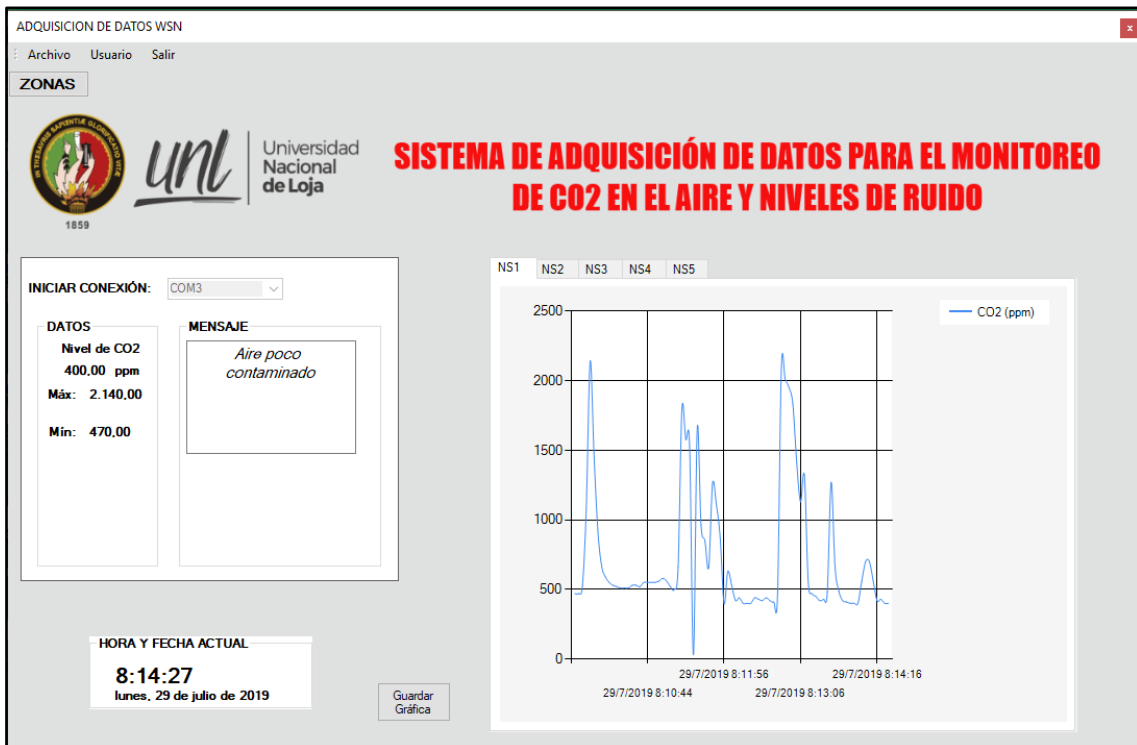


**Ilustración 90:** Selección del puerto COM serie en la interfaz gráfica de monitoreo  
**Fuente:** Autor

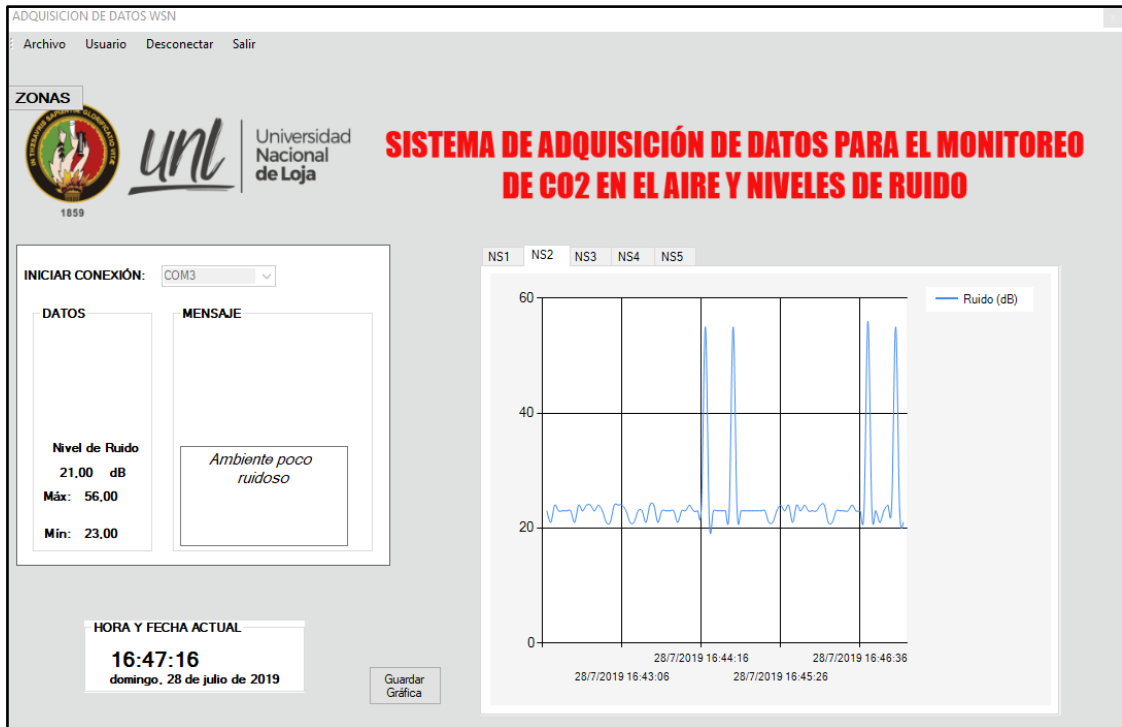
Posterior a establecer la comunicación correcta del nodo coordinador con la interfaz, ésta procederá en la ventana de “Adquisición de datos WSN” a presentar las mediciones de valores correspondientes a cada nodo sensor, juntamente con la observación de los datos obtenidos en tiempo real, confirmando de este modo el buen funcionamiento de la red. En las ilustraciones 91 y 92 se muestran las mediciones obtenidas de CO2 y en las ilustraciones 93 y 94 las mediciones de niveles de ruido obtenidas durante la prueba de implementación los días domingo 28 y lunes 29 de julio de 2019.



**Ilustración 91:** Mediciones de CO2 y ruido realizadas en el nodo sensor 1, Fecha: 28/07/2019  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 92:** Mediciones de CO2 y ruido realizadas en el nodo sensor 1, Fecha: 29/07/2019  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 93:** Mediciones de ruido realizadas en el nodo sensor 2, Fecha: 28/07/2019  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 94:** Mediciones de ruido realizadas en el nodo sensor 2, Fecha: 29/07/2019  
**Fuente:** Autor

#### 6.3.2.4. Interpretación de la información obtenida

Las mediciones para la prueba del diseño de la red se realizaron en el transcurso de dos días, en diferentes horarios según la tabla 35, con el fin de generar información relevante y permita realizar un análisis adecuado, para ello se ha elaborado el siguiente horario:

**Tabla 35:** Horario para las mediciones de prueba del diseño

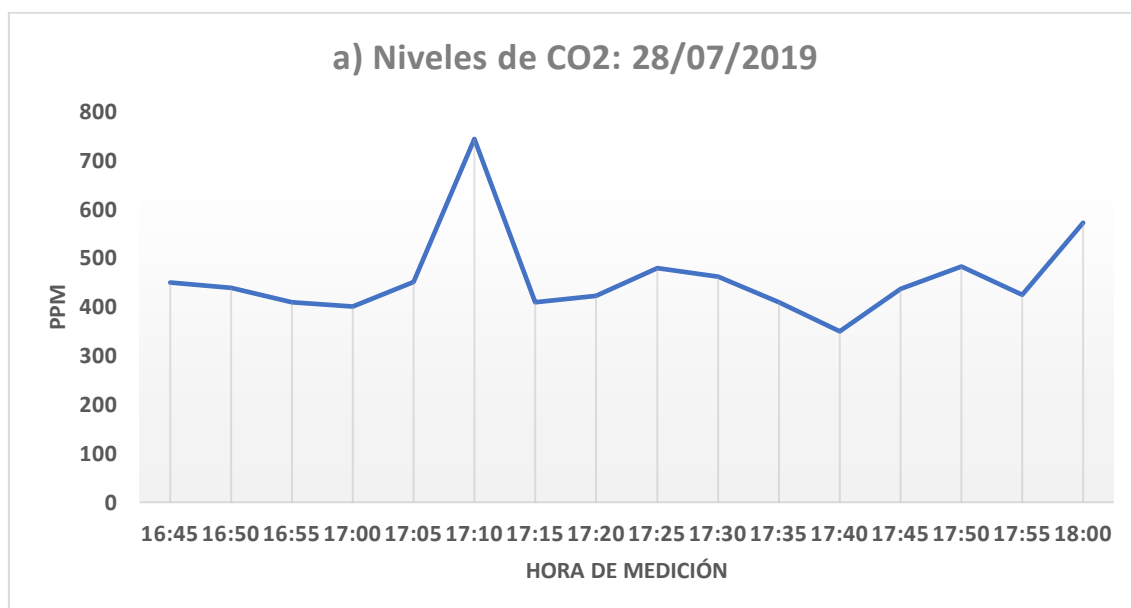
Fecha	Hora
Domingo, 28 de julio de 2019	16h45 a 18h00
Lunes, 29 de julio de 2019	08h00 a 09h30

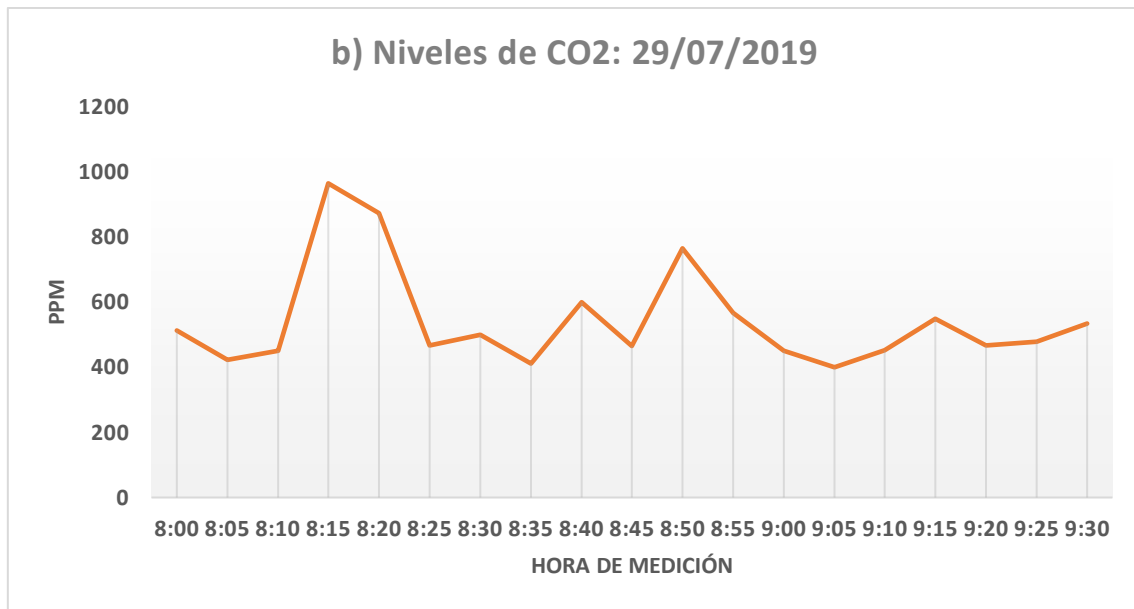
**Fuente:** Autor

Una vez realizada la recopilación de los datos obtenidos en sitio, se procede a representarlas mediante graficas estadísticas sobre el monitoreo de CO2 en el aire y niveles de ruido.

#### Concentración de CO2

Los valores obtenidos de CO2 son muy notables debido a que existen algunos valores elevados, como se observa en las ilustraciones 95a y 95b las mediciones realizadas los días: domingo 28 de julio y lunes 29 de julio del presente año, en los horarios establecidos en la tabla 35.





**Ilustración 95:** Medición de niveles de CO2 a) Fecha 28/07/2019 y b) Fecha 29/07/2019  
**Fuente:** Autor

Como se puede observar en la ilustración 95a, las variaciones de CO2 no son muy altas inclusive en la hora pico, debido a que el tránsito vehicular los fines de semana no es muy constante, sin embargo, los valores reflejados son considerables ya que de acuerdo con la sección 4.2.3.1. los niveles normales se encuentran entre 300 a 400 ppm, y sacando un promedio de los valores obtenidos está en 459 ppm sobrepasándolos niveles establecidos. Además, se registró el valor máximo como 744 ppm y un valor mínimo de 350 ppm.

Con respecto al lunes 29 de julio de 2019, de la ilustración 95b, las variaciones de CO2 son más altas, esto incluye también en la hora pico, ya que se pudo observar que tanto el tránsito vehicular como las labores socio económicas fueron mayores a los del fin de semana, por lo tanto, hubo un aumento de niveles de CO2 en el aire sobre el lugar de prueba. Se pudo registrar un promedio de 544 ppm, con un máximo de 965 ppm y un mínimo de 400 ppm.

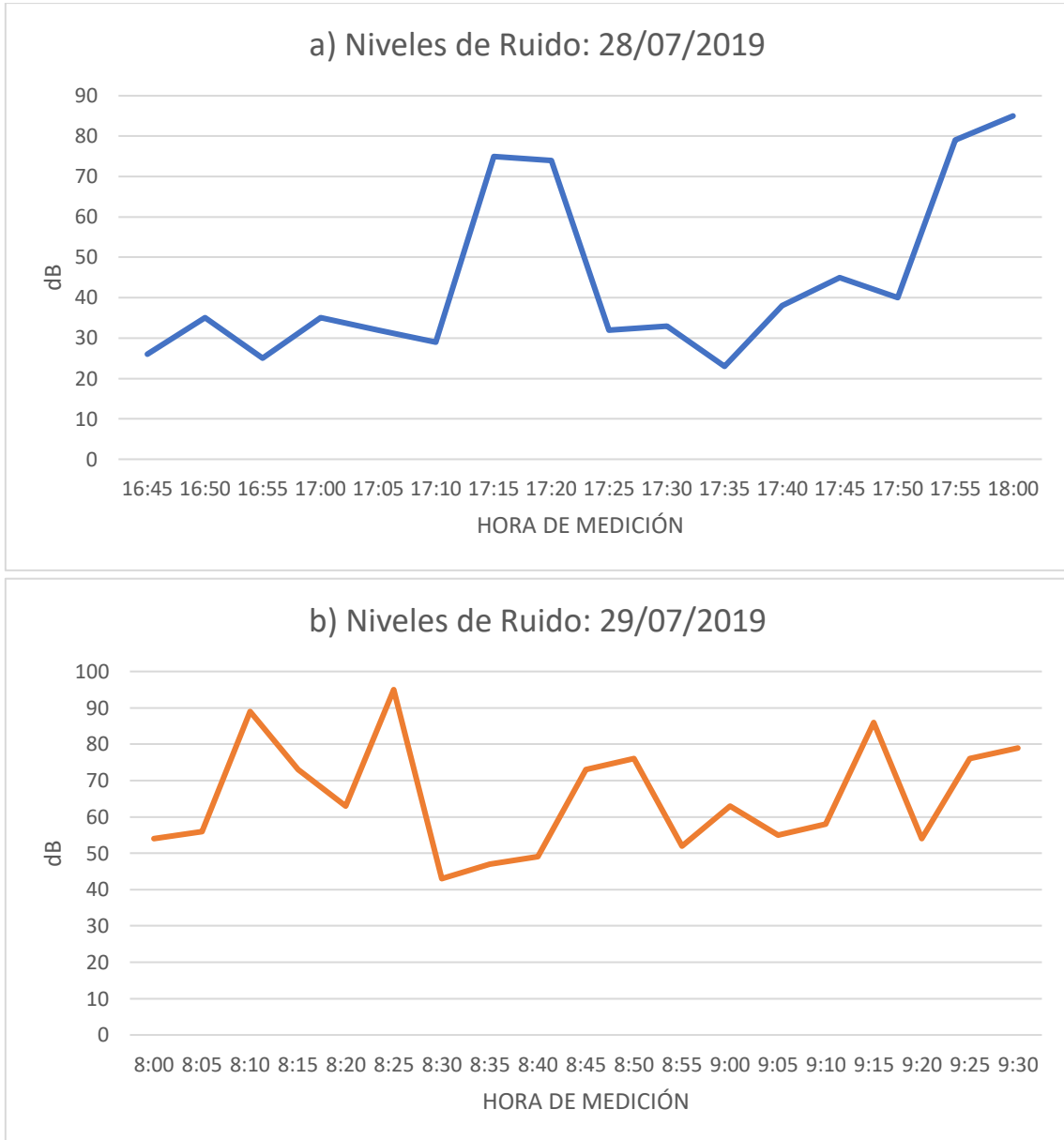
Tómese en cuenta que la susceptibilidad del nodo sensor es de acuerdo con la altura establecida.

## Ruido

La ilustración 96a y 96b contiene las mediciones de ruido de los días domingo 28 y lunes 29 de julio respectivamente del año en curso. Se puede observar claramente que el nodo

es susceptible a los cambios de niveles de ruido y dependiendo de la altura colocada dependerá su funcionalidad.

A pesar de este inconveniente los valores en la hora pico se encuentran por encima de los 75dB aclarándonos que existe una mayor actividad vehicular y socio económica en esas horas y disminuyendo considerablemente en el resto de las horas. Niveles constantes por encima de los 75 dB indican un tránsito vehicular constante y posible congestionamiento.



**Ilustración 96:** Medición de niveles de Ruido a) Fecha 28/07/2019 y b) Fecha 29/07/2019  
**Fuente:** Autor

En la ilustración 96a, se puede observar las mediciones realizadas el 28 de julio del presente año y en que se ha registrado un promedio de 44 dB, con un máximo de

85 dB y un mínimo de 23 dB registrado en la tarde, considerándose como un ambiente moderado poco ruidoso, que sin embargo hay que ponerle atención. Pero si consideramos la ilustración 96b, muestra elevados niveles de ruido en todo el tiempo de monitorización, registrándose un promedio de 63 dB, el nivel máximo en 95 dB y el mínimo en 43 dB, y de acuerdo con la sección 4.2.3.2. son ambientes ruidosos y que pueden afectar a la salud humana.

Finalmente, se considera que las mediciones son válidas debido a que se pudo probar la tecnología establecida y poder indagar las variaciones de CO<sub>2</sub> y ruido que existen en la ciudad de Loja.

### 6.3.2.5. Análisis económico de la implementación del sistema

El análisis económico de los dispositivos está basado en los precios actuales y del mercado local, estos se detallan en la Tabla 36, así mismo, se presenta una estimación del costo del diseño e implementación del hardware y software del diseño de la red inalámbrica de sensores realizado.

**Tabla 36:** Análisis presupuestario de los dispositivos del proyecto

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio (USD)	
			Unidad	Total
31	U.	Arduino UNO	\$ 9,82	\$ 304,42
30	U.	Detector de sonido Sparkfun	\$ 10,95	\$ 328,50
26	U.	Sensor CCS811	\$ 20,95	\$ 607,55
31	U.	XBee Shield PRO S2B	\$ 14,00	\$ 434,00
31	U.	Módulo Xbee PRO S2B	\$ 70,00	\$ 2.170,00
31	U.	Batería 12V/1.3Ah	\$ 12,50	\$ 387,50
31	U.	Antena de 7dBi	\$ 6,14	\$ 190,34
31	U.	Carcasa para el nodo sensor	\$ 5,00	\$ 155,00
1	U.	Carcasa para el nodo coordinador	\$ 5,00	\$ 5,00
<b>PRECIO TOTAL</b>				<b>\$ 4.582,31</b>

**Fuente:** Autor

Los precios son referenciados a través de la página: <https://www.sparkfun.com/categories>.

**Tabla 37:** Análisis presupuestario de equipos y herramientas del proyecto

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio (USD)	
			Unidad	Total
25	m	Cable flexible 14 AWG	\$ 0,25	\$ 6,25
194	U.	Cable de conexión	\$ 0,08	\$ 15,52

2	U.	Extensión eléctrica 8m	\$ 15,00	\$ 30,00
1	U.	Escalera 6m	\$ 70,00	\$ 70,00
<b>PRECIO TOTAL</b>				<b>\$ 121,77</b>

**Fuente:** Autor

**Tabla 38:** Análisis económico del proyecto

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Total</b>
1	Análisis presupuestario de los dispositivos del proyecto	\$ 4.582,31
2	Análisis presupuestario de equipos y herramientas del proyecto	\$ 121,77
<b>COSTO TOTAL</b>		<b>\$ 4.704,08</b>

**Fuente:** Autor



## 7. DISCUSIÓN

El considerable crecimiento demográfico en la ciudad de Loja es una variable para considerar dentro de la gestión y ordenamiento de la ciudad, siendo importante la utilización de una red de comunicación automática, con el objetivo de conocer qué pasa en la ciudad. Con esta premisa se realizó la presente investigación para validar la viabilidad de una red inalámbrica de sensores en la ciudad de Loja que monitoree los niveles de CO<sub>2</sub> y ruido, enfocándonos en conseguir una ciudad más limpia y ordenada.

El objetivo es crear una propuesta que cumpla con las normas ambientales, protocolos y metodologías de diseño de una red inalámbrica, la investigación “Estudio y diseño para el monitoreo de CO<sub>2</sub> en el aire y niveles de ruido para el Casco Urbano de la ciudad de Loja”, se lo realizó mediante el planteamiento de tres objetivos puntuales, los cuales se enfocan a establecer etapas para obtener un buen resultado. Cada objetivo planteado propone, actividades secuenciales de carácter técnico-investigativo, técnico-científico y técnico-normativo, que posibiliten estructurar el estudio, de tal manera que este posea claridad conceptual, versatilidad constructiva, facilidad de implementación, y viabilidad técnica y económica.

El análisis de los resultados del presente trabajo ha permitido validar el cumplimiento de los objetivos, como se detalla a continuación.

**Objetivo 1: Analizar el funcionamiento de las redes de sensores inalámbricos aplicados a la monitorización del CO<sub>2</sub> en el aire y niveles de ruido en ciudades.**

En base a la investigación, recopilación y validación de información necesaria, se llevó a cabo este objetivo. Para ello, se utilizó diferentes fuentes bibliográficas como: libros, investigaciones, informes, entre otras, con el fin de recolectar toda la información referente a las Redes Inalámbricas de Sensores para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y niveles de ruido, y enfocarse en la información más relevante para este estudio, la cual se encuentra plasmada en la sección de revisión de literatura, esto además permitió crear un punto de partida y resaltar sus características como: auto organización, procesamiento distribuido, eficiencia energética, comunicación en tiempo real, consumo en ancho de banda bajo y heterogeneidad; que hacen de esta tecnología, una de las más prometedoras en el campo

de la monitorización de CO<sub>2</sub> y contaminación acústica, logrando implementar redes en lugares que antes no se había contemplado y con un bajo costo.

Además, el análisis de la literatura recolectada identificó las principales áreas de aplicación es las Redes Inalámbricas de Sensores, siendo una de sus aplicaciones el monitoreo ambiental, el cual se basa este estudio. Así mismo, se puede integrar las Redes Inalámbricas de Sensores en el contexto de una ciudad, logrando un alto potencial en diferentes áreas como las industrias, la manufactura, la agricultura, la cadena de suministro, la infraestructura, el ordenamiento y sostenibilidad de las ciudades en las que se aplique.

Adicionalmente, se determinó el estado actual en el que se encuentran las Redes Inalámbricas de Sensores para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y ruido, y se avaluó el área de aplicación para este tipo de redes sobre nuestra región, considerando ciertos aspectos socioeconómicos, demográficos, infraestructura, vialidad y tecnológicos dentro de la urbe lojana.

**Objetivo 2: Realizar un análisis comparativo de tecnologías inalámbricas para los sensores inalámbricos usados en la monitorización de campos medioambientales para medir los niveles de concentración de CO<sub>2</sub> en el aire y contaminación acústica.**

Para cumplir con este objetivo, se identificó las especificaciones y normativas que definen las Redes de Sensores Inalámbricos, destacando las principales tecnologías de aplicación, a través de cuadros comparativos y análisis respectivos. Con ello se distinguió tecnologías como Bluetooth, Wifi, Zigbee que comúnmente son utilizadas en redes de bajo costo y reducido consumo energético, además de nuevas tecnologías como LoRa y SigFox que se están implementando en países más desarrollados y que actualmente en nuestro país su implementación tiene un costo elevado.

En el desarrollo se identificó diferentes estándares que cumplen con este requerimiento, es así como, se definió cada una de las tecnologías con sus características más importantes como se puede apreciar en la tabla 3 de la sección 4.1.7. entre las cuales tenemos la tasa de transmisión y las distancias de operación, útiles para el diseño de la red inalámbrica de sensores especializados en el monitoreo de CO<sub>2</sub> y niveles de ruido.

Finalmente, mediante un análisis minucioso se estableció como tecnología de diseño el estándar IEEE 802.15.4 Zigbee como la ideal para el propósito establecido, debido a sus facilidades y bajo coste de adquisición en masa, siendo una de las tecnologías más usadas actualmente.

### **Objetivo 3: Diseñar un sistema de sensores inalámbricos para el monitoreo de CO2 en el aire y contaminación acústica en el casco urbano de la ciudad de Loja.**

Este objetivo, se estableció en cuatro fases: la primera se centra en la planificación sobre la zona de estudio, el cual permitió determinar las diferentes zonas con mayor actividad en el casco urbano de la ciudad de Loja, estableciendo la zona céntrica como la de mayor actividad, de acuerdo a estudios realizados, en 2014 por (Iñiguez Armijos, 2014) y según el Plan de Ordenamiento Urbano de la ciudad de Loja, POUL, 2009-2022, utilizándola como referente para el presente estudio. Así mismo, se logró identificar las diferentes fuentes generadoras de ruido y CO2 sobre esta zona, como se puede apreciar en la sección 6.1.1.

La siguiente fase, se enfoca en el desarrollo del diseño, donde primero se realiza un esquema general sobre la zona de estudio, se efectúa el respectivo análisis sobre el ambiente de operación, estableciendo la cantidad de 31 nodos sensores y estableciendo la topología malla como la ideal a usar sobre el mismo, con ello se obtiene la adecuada ubicación de los elementos sobre la zona de estudio, basándonos en las características de alcance de la tecnología establecida, siendo este un valor de 1,6 km. Posteriormente, se realiza el diseño de cada nodo, diferenciando dos tipos: el nodo sensor que consta de 5 etapas encargadas de receptar la información captada por los sensores, procesarla y para su posterior envío de la información hacia los otros nodos y el nodo coordinador diseñado en tres etapas cuya función es receptar la información enviada por los nodos sensores, procesarla y para su posterior presentación a través de una interfaz gráfica en un computador. Y por último en esta fase se mencionan las configuraciones necesarias para los nodos sensores y nodo coordinador.

En la tercera fase se ejecuta la simulación del diseño antes realizado para la evaluación y verificación de la tecnología a usar y la topología que se pretende monitorear. Para ello se han establecido ciertos parámetros de valoración como: la velocidad efectiva, el retardo y la cantidad de paquetes enviado y recibidos, como se observa en la sección 6.3. A partir

de los resultados obtenidos de los parámetros evaluados que presenta la simulación se deduce que son acorde a los parámetros requeridos, esto es excelente cobertura de red, rápido tiempo de respuesta, facilidad en la sincronización y un reducido coste de energía para una red inalámbrica de sensores para el monitoreo de CO<sub>2</sub> y ruido.

Finalmente, la última fase comprende la prueba del diseño de red, mediante el montaje de un nodo coordinador con dos nodos sensores dentro de la zona de estudio; para ello se utilizó un nodo sensor para el monitoreo del CO<sub>2</sub> y otro para el monitoreo de niveles de ruido, contruidos a partir de los lineamientos establecidos en la sección 4.1 y 4.2, que permitió corroborar las distancias de transmisión de la tecnología a usar y la recepción adecuada de los datos. Para la presentación en tiempo real de las lecturas de los parámetros ambientales de CO<sub>2</sub> en el aire y niveles de ruido, se elaboró una interfaz gráfica que permite al usuario entre otras cosas: la visualización gráfica de los datos en tiempo, presenta los valores sensados actualmente, almacena los datos recibidos por el nodo coordinador y otras opciones como se detalla en la sección 6.2.2.

## 8. CONCLUSIONES

Se analizó el estado del arte correspondiente a las Redes Inalámbricas de Sensores, con la finalidad de identificar el funcionamiento de este tipo de redes, determinar sus principales características y señalar sus aplicaciones en el entorno, concluyendo que este tipo de redes están dispersas en todo el mundo y en diferentes entornos, como aplicaciones navales, domótica, salud, monitorización del medio ambiente, etc., y que a través de diferentes tecnología innovadoras como LoRa, SigFox, Wimax y Zigbee han desarrollado proyectos medioambientales y de control de tráfico vehicular muy interesantes en ciudades como Barcelona, Madrid (España), Seoul (Korea), Taipei (Taiwan), entre otras.

Se analizó los protocolos que permiten que la red sea eficiente, en el caso que existan varias rutas para llevar la información hacia el nodo final, además se diferenció y estableció la tecnología inalámbrica Zigbee para la evaluación de este proyecto, cuyo soporte y bajo coste permiten la transmisión y recepción fiable de los datos y finalmente se seleccionó los dispositivos, tomando en cuenta la disponibilidad de información de los dispositivos de campo y sus especificaciones técnicas, llegando a la conclusión de que el detector de sonido Sparkfun y el sensor de CO2 CCS811 presenta mejores características para la adquisición de estas variables.

La delimitación y planificación geográfica de la zona de estudio, determinó la selección adecuada de la topología física a utilizar, estableciendo la topología tipo malla la adecuada para implementar una red inalámbrica de sensores para el monitoreo de CO2 en el aire y niveles de ruido, debido a que elimina la necesidad de que cada nodo terminal tenga una línea de vista directa con el nodo coordinador, de tal forma que cada nodo sensor de la red, tenga la capacidad de retransmitir el mensaje encaminándolo hacia su destino, además, permitió la selección de la tecnología a través de un nodo coordinador y dos nodos sensores conjuntamente con los dispositivos.

El análisis de la simulación desarrollada en el software Riverbed Modeler, permitió conocer el rendimiento de la red inalámbrica de sensores diseñada en la topología malla, logrando excelentes parámetros como un delay o retardo de comunicación de 350ms, velocidad efectiva o throughput de 98 kbps, paquetes recibidos por segundo de 20, cantidad de información recibida de 20.1 kbps y paquetes perdidos son nulos, cumpliendo con los requisitos establecidos en la tabla 1 de este estudio; por lo que, de esta manera se garantiza la transmisión de datos dentro de la red.

Las pruebas de recepción de la señal en exteriores a través del software XCTU y la evaluación práctica del diseño a través de un nodo coordinador y dos nodos sensores (CO2 y ruido), determinó el alcance de la red y verificó que los módulos de comunicación XBee de la tecnología Zigbee, son adecuados para implementar una red inalámbrica de sensores en el casco urbano de la ciudad de Loja, además, se validó que estos módulos pueden trabajar en diferentes modos de operación que requiere la topología del proyecto: esto es como dispositivo final, router o coordinador, que garantiza un ahorro de energía en los dispositivos, demostrando la factibilidad sin pérdida de información que requiere el desarrollo de este estudio.

Se diseñó una Interfaz Hombre-Máquina de carácter intuitiva y de fácil uso, que presenta las lecturas de los parámetros ambientales de CO2 en el aire y niveles de ruido establecidas de forma textual y gráfica, facilitando al usuario diferenciar entre los diferentes estados de los elementos de la red, esto con la integración del software Microsoft Visual Studio Express 2017 para la programación, brindando así, toda la información necesaria sobre el proceso al usuario y permitiéndole conocer sobre las variables ambientales de todos los elementos que comprenden la red inalámbrica de sensores.

## **9. RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar la implementación del proyecto según las especificaciones realizadas, tanto física como lógica, como se puede apreciar en la sección 6.2 y el anexo VII, ya que se han establecido todos los requerimientos mínimos para llevar a buen término esta aplicación, además, que con en este trabajo se pretende informar, alertar y concientizar a la ciudadanía sobre preservar un ambiente sano dentro de la urbe, y de generar políticas públicas que regulen la emisión de este tipo de contaminantes, con el fin de reducir el riesgo de enfermedades por exposición a CO<sub>2</sub> y ruido.

Para la obtención de información oportuna y con propósito de tomar medidas correctivas, se recomienda considerar la organización con algunas entidades públicas que regulen estas condiciones, la Comisaría de Higiene para un control sanitario y protección del ambiente y la Unidad de Control Operativa de Tránsito – UCOT, para disminuir el congestionamiento vehicular.

Para la etapa de implementación, se recomienda tomar en cuenta cada una de las especificaciones técnicas de diseño descritas en este estudio, con la finalidad de seleccionar los equipos con las características requeridas, así como realizar una correcta colocación e instalación de cada uno de estos.

Se recomienda comprobar que los elementos usados para hacer los prototipos funcionen correctamente, a través de la validación realizada en la sección 6.3.2.2, de esta manera, las pruebas futuras que se realicen podrán arrojar resultados veraces, que demuestren sin interferencias el comportamiento real del sistema. Adicionalmente a esto, se recomienda realizar un calentamiento previo de los sensores de CO<sub>2</sub> antes de realizar las pruebas de funcionamiento, de esta manera se obtiene una mejor precisión en los datos recogidos.

Para completar el desarrollo de este proyecto, se requiere de la inclusión de un gateway en la red, de tal forma que la visualización de datos y las acciones de control se puedan realizar a través de Internet desde cualquier parte del mundo. Esta característica no ha sido implementada en la red prototipo desarrollada quedando esta propuesta como parte de un trabajo futuro.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M. (2006). *Estudio del estándar IEEE 802.15.4 Zigbee para comunicaciones inalámbricas de área personal de bajo consumo de energía y su comparación con el estándar 802.15.1 bluetooth*. Quito-Ecuador: S/N.
- Ahson, S. A., & Ilias, M. (2018). *WiMAX: technologies, performance analysis, and QoS*. CRC press.
- Akyildiz, I., & Vuran, M. (2010). Wireless Sensor Networks. En *Advanced Texts In Communications and Networking* (págs. 413-502). New Jersey: Mankrono Print Media.
- Alliance. (2018). *Zigbee*. Zigbee.
- ARCOTEL. (2019). *Estadísticas de Telecomunicaciones*. Obtenido de Agencia de Regulación y Control de Telecomunicaciones: <http://www.arcotel.gob.ec/estadisticas-de-telecomunicaciones2/>
- Arduino. (2017). *Arduino UNO R3 Clone - Con cable USB - (USB Chip CH340)*. Obtenido de Arduino: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- Arévalo, J. E., Prieto, J. C., Reina, W. M., & Santana, J. (2011). *Tarjeta Multipropósito Bluetooth*. Bogotá: Umbral Científico.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2015). The Internet of Things: A survey. *Computers Networks*, 2787-2805.
- Barenguer, M. J., & Bernal, F. (2000). *El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire*. Obtenido de INSHT Web: [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp\\_549.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp_549.pdf)
- Berglund, B., Lindvall, T., & Schwela, D. H. (2015). *NORMA TÉCNICA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN POR RUIDO*. Obtenido de Unican Web site: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/965/course/section/1090/Guias%2520para%2520el%2520ruido%2520urbano.pdf>



- Campaña, S., & Jorge, L. (2013). ESTUDIO DE REDES DE SENSORES Y APLICACIONES ORIENTADAS A LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES BIOMÉDICAS. *GTI*, 90-91.
- Campos Castillo, V. (2019). *CONTAMINACIÓN ACÚSTICA: DEL SONIDO AL RUIDO*. Obtenido de Santo Tomás Web Site: <https://enlinea.santotomas.cl/blog-expertos/contaminacion-acustica-del-sonido-al-ruido/>
- Clark, J. (2015). *The importance of simulation techniques in its research and analysis*. Savannah.
- COLLEGE OF THE ATLANTIC. (2015). *Great Duck Island Project*. Obtenido de Islands Program - COLLEGE OF THE ATLANTIC: <https://www.coa.edu/islands/great-duck-island/>
- DIGI. (2016). *XBee®/XBee-PRO® RF Modules datasheet*. Obtenido de DIGI Zigbee RF Modules: <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf>
- DIGI. (2019). *XCTU Next Generation Configuration Platform for XBee/RF Solutions*. Obtenido de DIGI: <https://www.digi.com/products/iot-platform/xctu>
- EcuRed. (2019). *Loja (Ecuador)*. Obtenido de EcuRed:Enciclopedia: [https://www.ecured.cu/Loja\\_\(Ecuador\)](https://www.ecured.cu/Loja_(Ecuador))
- EEMB. (2018). *Lithium-ion Battery Data Sheet*. Obtenido de EEMB Co., Ltd. : <https://www.ineltro.ch/media/downloads/SAAItem/45/45958/36e3e7f3-2049-4adb-a2a7-79c654d92915.pdf>
- Enciclopedia. (2019). *Sobrecalentamiento de la atmósfera*. Obtenido de Enciclopedia de Ejemplos: <https://www.ejemplos.co/que-gases-provocan-el-sobrecalentamiento-de-la-atmosfera/>
- ESRL.NOA. (2019). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. Obtenido de Earth System Research Laboratory: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/weekly.html>
- Evans, D. (2011). *Cisco*. Obtenido de Cisco Website: [https://www.cisco.com/c/dam/global/es\\_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/global/es_mx/solutions/executive/assets/pdf/internet-of-things-iot-ibsg.pdf)

- Faludi, R. (2010). *Building Wireless Sensor Networks*. New York: BRIAN.
- FIGARO. (2018). *Figaro Product Information: TGS 4161 - for the detection of Carbon Dioxide*. Obtenido de FIGARO Web Site: <https://cdn.sos.sk/productdata/62/d9/f2bb36a6/tgs-4161.pdf>
- García, A. (2012). *Realizacion de Mapas Acústicos*. Madrid, España.
- Gascón, D. (2010). Redes de sensores inalámbricos, la tecnología invisible. *Revista MIT Technology Review*, 53-55.
- Gil Jimenez, M. E. (2009). *Estudio de la eficiencia del encaminamiento del Protocolo AODV en redes Ad Hoc inalámbricas de gran escala*. Obtenido de Eciencia: [http://eciencia.urjc.es/bitstream/10115/2546/1/PFC\\_MariaElenaGilJimenez.dpf](http://eciencia.urjc.es/bitstream/10115/2546/1/PFC_MariaElenaGilJimenez.dpf)
- GPL. (2011). Diagnóstico del sistema económico productivo. *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la provincia de Loja*, 90-99. Obtenido de [https://www.prefectura Loja.gob.ec/documentos/pdtot/DIAGNOSTICO\\_ECONOMICO.pdf](https://www.prefectura Loja.gob.ec/documentos/pdtot/DIAGNOSTICO_ECONOMICO.pdf)
- Grupo de Investigación EDMANS. (2009). *REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES: TEORÍA Y APLICACIÓN PRÁCTICA*. Logroño: Servicio de Publicaciones de la Universidad de La Rioja.
- Guaña Moña, E. (2016). Protocolos WSN. En E. Guaña, *Diseño de una red de sensores inalámbricos (WSN) para monitorear parámetros relacionados con la agricultura*. (págs. 25-31). Escuela Politécnica Nacional.
- Guaña, J., & Escutar, V. (2016). *Aplicaciones Inalámbricas utilizando Tecnologías Wireless Sensor Network (WSN)*.
- Han, G., Jiang, J., Bao, N., Wan, L., & Guizani, M. (2015). Protocolos de enrutamiento para redes de sensores inalámbricos subacuáticos. *IEEE Communications Magazine*, 72-78.
- Hasan, S., Hussain, M. Z., & Singh, R. K. (2013). *A Survey of Wireless Sensor Network*. Obtenido de International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Website: <http://ijetae.com>

- Hwang, S., & Yu, D. (2012). *Remote monitoring and controlling system based on ZigBee networks*. International Journal of Software Engineering and Its Applications.
- INEC. (2010). *Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos. Censo de Población y de Vivienda 2010*. Quito, Ecuador: Publicaciones INEC.
- INVESTPRO MX. (2014). *Xbee comunicaciones inalámbricas*. Obtenido de INVDESPRO MX: <http://modulosxbee.blogspot.com/2014/01/configuracion-del-moduloxbee.html>.
- Iñiguez Armijos, J. P. (2014). *Análisis Espacio - Temporal del ruido ambiental en la ciudad de Loja*. Loja: UTPL.
- IQAir. (2018). 2018 World Air Quality Report. *IQAir AirVisual*, 15-16.
- Kennedy, C. (2015). *State of Climate: Carbon Dioxide*. Obtenido de Climate Gov: <https://www.climate.gov/newsfeatures/understanding-climate/2014-state-climate-carbon-dioxide>
- Kopetz, H. (2011). *Internet de las Cosas. En sistemas en tiempo real*. Boston: Springer.
- Korc, M. E. (2009). *MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN AMÉRICA LATINA*. Lima: Organización Panamericana de la Salud.
- LaHora. (2013). Contaminación del aire en análisis. *Diario La Hora*, pág. 10. Obtenido de <https://lahora.com.ec/noticia/1101546982/contaminacion-del-aire-en-analisis>
- Lajara Vizcaíno, J. R. (2014). *Modelado y optimización de energía en redes de sensores inalámbricas para la medida de parámetros medioambientales*. Valencia: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.
- LH, Y., & WT, T. (2010). Comunicaciones por computadora. En *El problema de la escasez de habitaciones de ZigBee / IEEE 802.15 basado en árboles. 4 redes inalámbricas*. (págs. 454-462).
- Libelium. (2015). *Libelium Comunicaciones Distribuidas SL*. Obtenido de Libelium Website: [http://www.libelium.com/resources/top\\_50\\_iot\\_sensor\\_applications\\_ranking](http://www.libelium.com/resources/top_50_iot_sensor_applications_ranking)

- LojaGOB. (2017). *PROGRAMA DE MOVILIDAD Y LOGÍSTICA DE LA CIUDAD DE LOJA*. Obtenido de Ilustre Municipalidad de Loja: <https://www.loja.gob.ec/contenido/programa-movlog-loja>
- LojaGOB. (2019). *Gestión Ambiental*. Obtenido de Loja para todos: <https://www.loja.gob.ec/gestionambiental>
- LoRaWAN. (2019). *¿Qué es LoRa y LoRaWAN?* Obtenido de LoRaWAN: <https://lorawan.es/>
- Maroto Cantillo, S. R. (2010). Estándares de Comunicación orientados a Redes WSN. En M. Sebastián, *Desarrollo de Aplicaciones basadas en WSN* (págs. 57-59).
- MicroJPM. (2019). *MG811 CO2 Sensor Dióxido Carbono*. Obtenido de Micro JPM Web Site: <https://www.microjpm.com/products/mg811-co2-sensor-dioxido-carbono/>
- Microphone - Arduino. (2017). *SparkFun Sound Detector - SEN-12642* . Obtenido de SparkFun Electronics: <https://www.sparkfun.com/products/12642>
- Natura. (2017). *Las 10 ciudades más contaminadas de Latinoamérica*. Obtenido de Natura Medioambiental: <https://www.natura-medioambiental.com/las-10-ciudades-mas-contaminadas-de-latinoamerica/>
- NITTEL, S. (2009). *A Survey of Geosensor Networks: Advances in Dynamic Environmental Monitoring*. Obtenido de Universidad de Maine. EEUU: [www.mdpi.com/1424-8220/9/7/5664/pdf](http://www.mdpi.com/1424-8220/9/7/5664/pdf)
- Ochoa Azuero, M. E. (2016). *Diseño de un prototipo de red inalámbrica de sensores de bajo estándar IEEE 802.15.4 para el monitoreo de variables ambientales*. Loja: Servicio de Publicaciones de la Universidad Nacional de Loja.
- OMS. (2019). *Global ambient air pollution*. Obtenido de World Health Organization: <http://maps.who.int/airpollution/>
- Ortiz, G. (2013). *Ruido Urbano Generado en la ruta Troncal Principal del Sistema Integrado de Transporte Urbano "SITU" y su incidencia en la Población de la Ciudad de Loja*. Loja, Ecuador.
- Oyarce, A. (2015). *Guía del usuario XBEE*. Obtenido de Olimex: [www.olimex.cl](http://www.olimex.cl)

- Perevochtchikova, M. (2009). Estudios Demográficos Urbanos. *El Colegio de México*, 513-547.
- Prensa CRC. (2016). *Redes de sensores inalámbricos: estado actual y tendencias futuras*. Prensa CRC.
- Quinde, V. E. (2016). *Monitoreo en tiempo real de la salud estructural de puentes (MSE) para la detección temprana de fallas mediante un prototipo de red de sensores inalámbricos ubicados en el puente del Río Boquerón-Catamayo*. Loja, Ecuador.: Servicio de Publicaciones de la Universidad Nacional de Loja.
- Riverbed. (2019). *PLATAFORMA DE DESEMPEÑO DIGITAL DE RIVERBED*. Obtenido de Riverbed Technology: <https://www.riverbed.com/mx/digital-performance/index.html>
- SainSmart. (2019). *XBee Shield para Arduino*. Obtenido de SainSmart Power to the makers: <https://www.sainsmart.com/products/arduino-xbee-shield>
- Salinas Castillo, O., & Alfie Cohen, M. (2016). *Ruido en la ciudad. Contaminación auditiva y ciudad caminable*. Obtenido de Estudio demográficos y urbanos - SCIELO: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-72102017000100065](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-72102017000100065)
- Sarangapani, J. (2017). *Redes inalámbricas ad hoc y de sensores: protocolos, rendimiento y control*. CRC Press.
- SENESCYT. (2018). *Innovación y Desarrollo Tecnológico Ecuador*. Obtenido de Educacion Superior: <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/4765/1/Anexo%201.pdf>
- SENSORae. (2018). *MODULO SENSOR MQ135 CALIDAD DEL AIRE MQ-135 AIR QUALITY HAZARDOUS GAS SENSOR*. Obtenido de SENSORae Web Site: <https://www.sensorae.com/es/inicio/1711-modulo-sensor-mq135-calidad-del-aire-mq-135-air-quality-hazardous-gas-sensor.html>
- SensorKit. (2016). *Módulo sensor de sonido KY-038 micrófono*. Obtenido de SensorKit X40 Wiki: [http://sensorkit.en.joy-it.net/index.php?title=KY-038\\_Microphone\\_sound\\_sensor\\_module](http://sensorkit.en.joy-it.net/index.php?title=KY-038_Microphone_sound_sensor_module)

- Soleimany, K. (2015). *Security in IEEE 802.15.4/zigbee*. Irán.
- Sparkfun. (2019). *SparkFun Air Quality Breakout - CCS811*. Obtenido de Sparkfun: <https://www.sparkfun.com/products/14193>
- Sparkfun. (2019). *SparkFun Sound Detector*. Obtenido de Sparkfun Start Something: <https://www.sparkfun.com/products/12642>
- Suárez, E. (2012). *Metodologías simplificadas para estudios de Acustica Ambiental: Aplicación en la Isla Menorca*. Madrid, España.
- Tan, Q., An, W., Han, Y., Liu, Y., Ci, S., Shao, F. M., & Tang, H. (2015). *Energy harvesting aware topology control with power adaptation in wireless sensor networks*. Ad Hoc Networks.
- Tanenbaum, W. (2012). *Redes de Computadoras*. Mexico: Pearson.
- Techopedia. (2017). *Line of Sight (LoS)*. Obtenido de Techopedia Web Site: <https://www.techopedia.com/definition/5069/line-of-sight-los>
- Towsend, C. P., & Arms, S. W. (2004). Wireless Sensor Networks: Principles and Applications. En *Sensor Technology Handbook* (págs. 439-449).
- UCOT. (2019). *Transparencia 2019*. Obtenido de Municipio de Loja: <https://www.loja.gob.ec/contenido/ucot>
- UNFPA. (2010). *United Nations Population Fund*. Obtenido de <http://www.unfpa.org/swp/2004/espanol/ch4/index.htm>
- Urbiotica. (2016). *U-Sound sensor de ruido*. Obtenido de Urbiotica Web Site: <https://www.urbiotica.com/producto/u-sound/>
- Valdez Cervantes, L. (2014). A STUDY ON THE WIRELESS SENSOR NETWORKS. *Excellence in Engineering To Enhance a Country's Productivity*, 3-4.
- Villalba, Á., & Madero, M. (2015). *Aplicación de una red inalámbrica de sensores para detección de presencia y conteo*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- WHO. (2015). *World Health Organization - Noise*. Obtenido de Euro web site: <http://www.euro.who.int/en/healthtopics/environment-and-health/noise>

Wooldridge, P. (2017). *What fraction of the world's oceans did SOSUS cover?* Obtenido de Quora: <https://www.quora.com/What-fraction-of-the-world's-oceans-did-SOSUS-cover>

Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). *Internet of Things for Smart Cities*. Padova, Italia: IEEE Internet of Things Journal.

## 11. ANEXOS

### ANEXO I: GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

**AES:** Advanced Encryption Standard (AES), también conocido como Rijndael, 25;

Estándar de cifrado avanzado, 53

**AMIS:** Air management information system, 29

**AODV:** Ad Hoc On-Demand Vector Routing (Enrutamiento vectorial Ad-hoc bajo demanda), 52

**API:** Aplicación de interfaz de programación, 54, 56, 90

**ARCOTEL:** Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 59

**AT:** Comandos que conforman un lenguaje de comunicación entre el usuario y el terminal, 54, 56, 89, 90

**AWACS:** Airborne Early Warning and Control (Aviones de control y vigilancia aérea), 8

**CO2: Dióxido de Carbono,** 30; Dióxido de Carbono, 1, III, 1, 4, 5, 25 31, 32, 33, 34, 35, 36, 70, 73, 74 75, 88

**CODA:** Congestion Detection and Avoidance (Detección de congestión y evitación), 21

**CSMA-CA:** Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance (Acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones), 49

**dB:** Decibel, 37, 39

**DSN:** Distributed Sensor Networks (Redes de sensores distribuidos), 8, 9

**DTC:** Distributed TCP Caching (Almacenamiento en caché distribuidoTCP), 21

**GARUDA:** Protocolo que garantiza la confiabilidad en sentido descendente., 21

**IEEE:** Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, VII, XI, XV, 23, 24, 46, 48, 49, 50, 53, 90, 129

**INEC:** Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 57



**INSHT:** Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 31

**IoT:** Internet of Things (Internet de las cosas), 6, 15

**ISM:** Bandas de radio reservadas internacionalmente para el uso de energía de radiofrecuencia (RF) para fines industriales, científicos y médicos distintos de las telecomunicaciones., 23, 49, 90

**LTE:** Long Term Evolution (evolución a largo plazo), 24

**m. s. n. m:** Metros sobre el nivel del mar, 57

**MAC:** Media Access Control (Control de acceso al medio), 52, 90

**MEMS:** Sistemas-Micro-Electro-Mecánicos, 9

**MIC:** Código de integridad del mensaje, 53

**MINTEL:** Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, 59

**MPLS:** Conmutación de etiquetas multiprotocolo, 47, 62

**OFDM:** Multiplexación por división de frecuencias ortogonales, 24

**OMS:** Organización Mundial de la Salud, XV, 29, 37, 38, 42

**OSA:** Open System Authentication; la autenticación del cliente está basada en su dirección MAC., 25

**OSI:** Modelo de interconexión de sistemas abiertos, XI, 18, 19, 51, 52

**OSPFv3:** Open Shortest Path First, Primer Camino Más Corto versión 3, 47, 62

**PDA:** Personal Digital Assistant, Asistente Digital Personal, 23

**pH:** Potencial Hidrógeno, 30

**POUL:** Plan de Ordenamiento Urbano de la ciudad de Loja, 70

**ppm:** Partes por millón, 31

**PSFQ:** Pump Slowly Fetch Quickly (Bomba de recuperación rápido y despacio)., 21

**puerto COM:** Puerto serie, XIV, 101, 120, 121

**RF:** Radiofrecuencia, 11, 56, 90

**RFID:** identificación por radiofrecuencia (Radio Frequency Identification), 11

**RMST:** Reliable Multi-Segment Transport (Transporte fiable de varios segmentos)., 21

**RSSI:** Receive Signal Strength Indication (indicador de fuerza de señal de recepción), 115, 118

**SenTCP:** Protocolo enfocado en el control de gestión, 21

**SIMA:** Sistema de Monitorización Ambiental, 26

**SKA:** Shared Key Authentication; en este caso para la autenticación se utilizan “claves compartidas”, 25

**SOSUS:** Sound Surveillance System (Sistema de Vigilancia Sónica), 7, 8

**TCP:** Transmission Control Protocol (Protocolo de Control de Transmisión), 21, 47, 62

**TIC:** Tecnologías de la Información y Comunicación, 4, 6

**TSS:** TCP Support for Sensor Networks (Soporte para redes de Sensores)., 26

**TVOC:** Compuestos Orgánicos Volátiles Totales, 35

**UART:** Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal), 56

**UCOT:** Unidad de Control Operativa de Tránsito, 73

**VoIP:** Voz sobre protocolo de internet, 47, 62

**Wifi:** Wireless Fidelity, 23, 49

**Wimax:** Worldwide Interoperability for Microwave Access (interoperabilidad mundial para acceso por microondas), 24

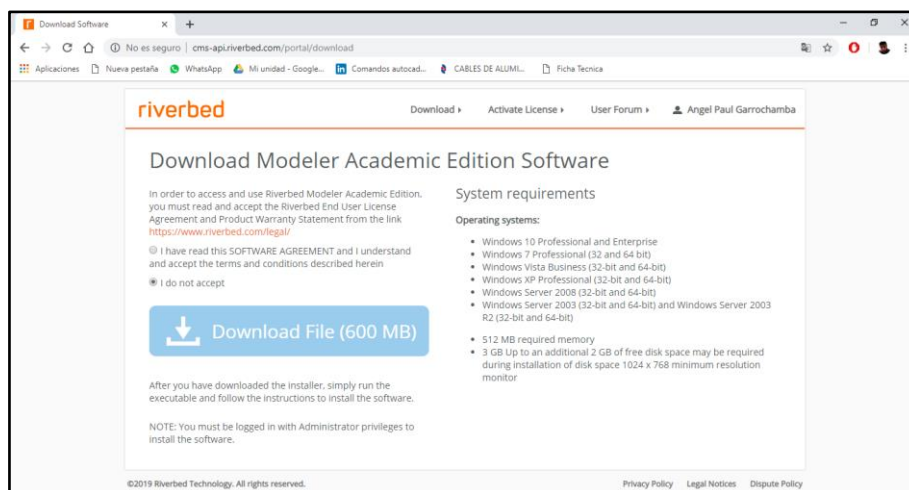
**WPAN:** Redes Inalámbricas de Área Personal, 48

**WSN:** Wireless Sensor Network (Redes Inalámbricas de Sensores), 4, 6, 7, 11, 12, 13, 14, 16, 25, 46, 48, 66, 71, 77, 91, 107, 108, 110

## ANEXO II: INSTALACIÓN DEL SIMULADOR DE REDES

El proceso de instalación del software Riverbed versión académica se realiza de la siguiente manera, esto en el sistema operativo Windows:

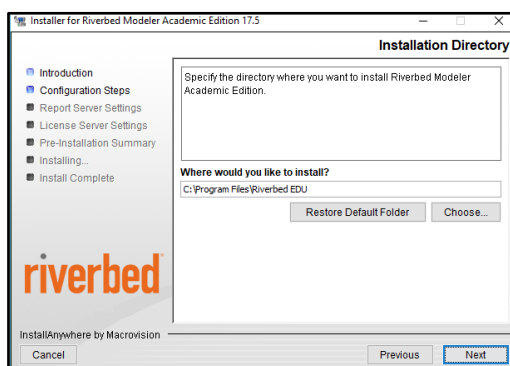
- a. Descarga del archivo .exe en el siguiente enlace: <http://cms-api.riverbed.com/portal/download>, se debe registrar para poder descargar esta versión, como se muestra en la ilustración 97.



**Ilustración 97:** Página de descarga del Software Riverbed

**Fuente:** Autor

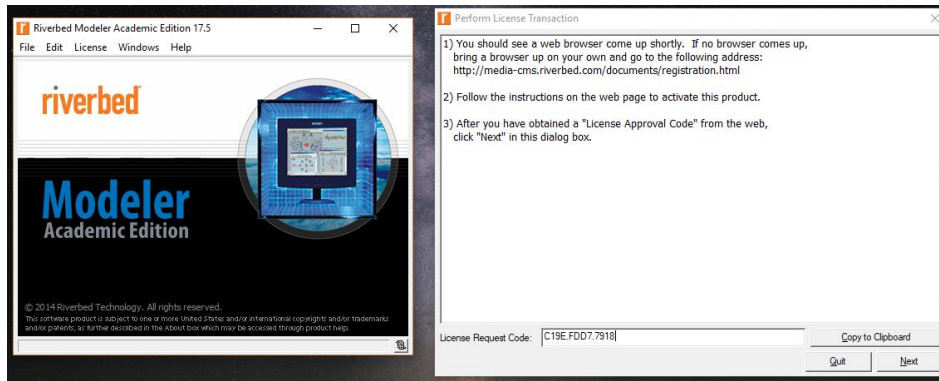
- b. Se acepta los términos y se da clic en el botón “Download File (600 MB)”.
- c. Una vez descargado el archivo se procede a ejecutarlo y se podrá observar una ventana como lo muestra la ilustración 98.



**Ilustración 98:** Pantalla de instalación del software Riverbed

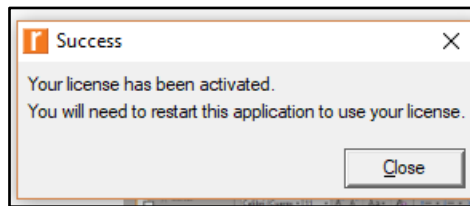
**Fuente:** Autor

- d. Clic en “Next” para iniciar la instalación y esperar que se instale en el computador.
- e. Una vez instalado, se ejecuta el programa y se procede a la activación de la licencia. Para ello se sigue las instrucciones que salen en la ilustración 99.



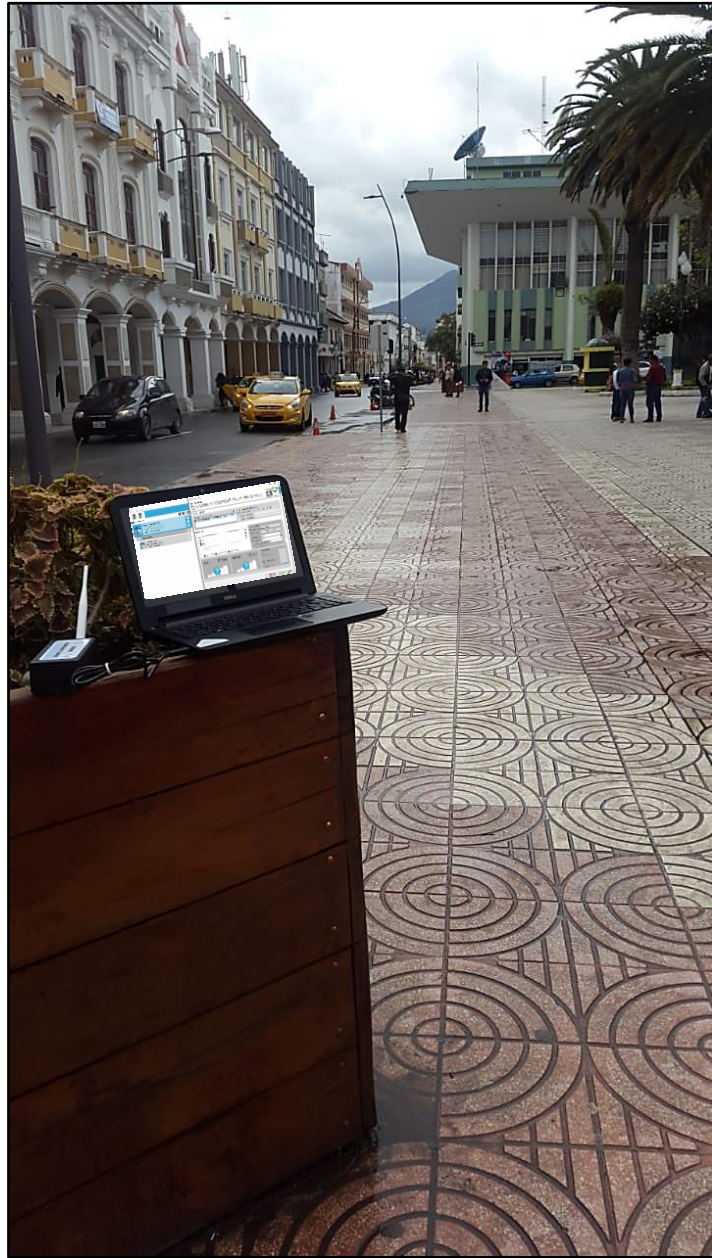
**Ilustración 99:** Activación del software Riverbed  
**Fuente:** Autor

- f. Se dirige al link de la ilustración 95 y se copia el código en el portapapeles, luego lo pega en la parte donde dice “License Request Code” y clic en “Next”. Y el producto estará activado como se muestra en la ilustración 100.



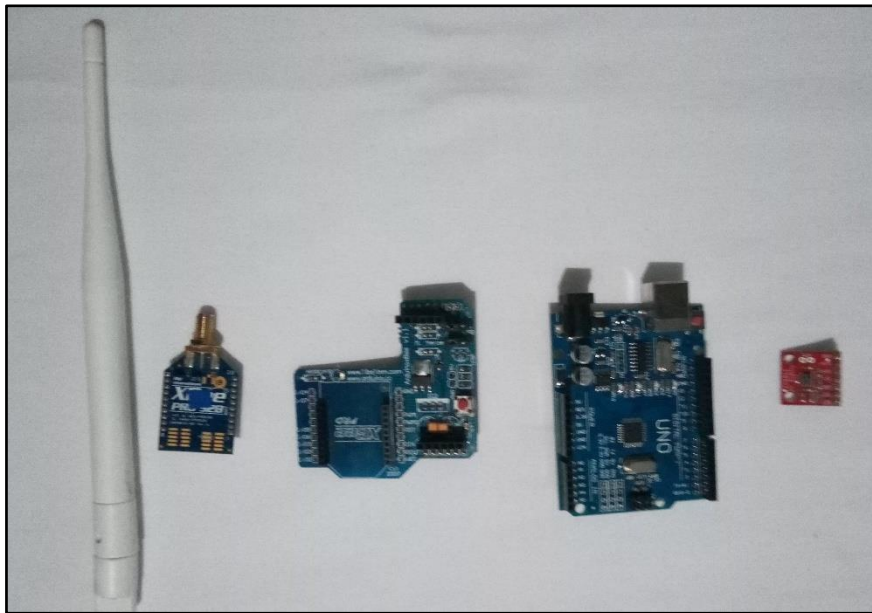
**Ilustración 100:** Confirmación de activación del software Riverbed  
**Fuente:** Autor

### ANEXO III: PRUEBAS DE RECEPCIÓN DE SEÑAL

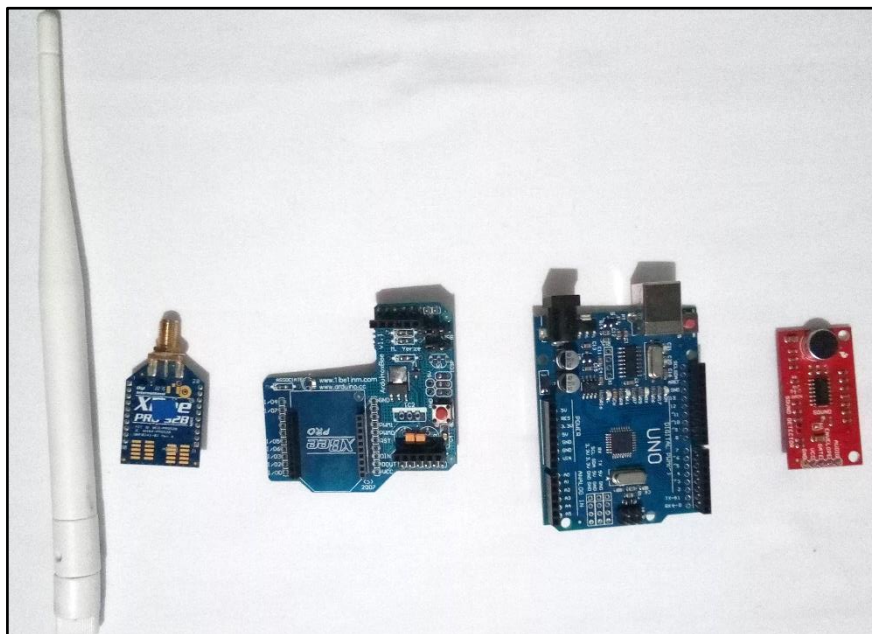


**Ilustración 101:** Prueba de recepción de señal  
**Fuente:** Autor

## ANEXO IV: CONSTRUCCIÓN DEL NODO SENSOR PARA LA EVALUACIÓN PRÁCTICA

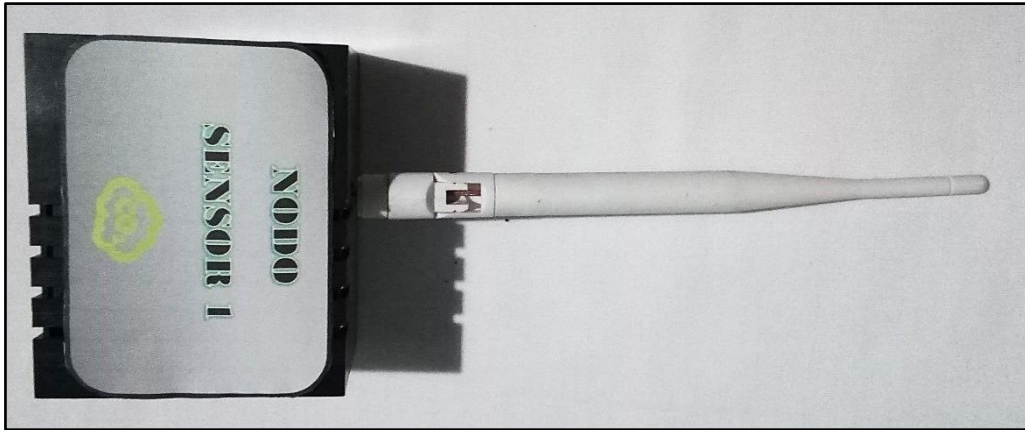


**Ilustración 102:** Dispositivos utilizados en el nodo sensor 1 para el monitoreo de CO2  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 103:** Dispositivos utilizados en el nodo sensor 2 para el monitoreo de Ruido  
**Fuente:** Autor





**Ilustración 104:** Montaje del nodo sensor 1 para el monitoreo de CO2  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 105:** Montaje del nodo sensor 2 para el monitoreo de Ruido  
**Fuente:** Autor

## ANEXO V: CONSTRUCCIÓN DEL NODO COORDINADOR PARA LA EVALUACIÓN PRÁCTICA



**Ilustración 106:** Dispositivos utilizados en el nodo coordinador  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 107:** Montaje del nodo coordinador  
**Fuente:** Autor



## ANEXO VI: EVALUACIÓN PRÁCTICA



**Ilustración 108:** Pruebas de funcionamiento del diseño de red  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 109:** Pruebas de funcionamiento del domingo 28/07/2019  
**Fuente:** Autor



**Ilustración 110:** Pruebas de funcionamiento del lunes 29/07/2019

**Fuente:** Autor

## **ANEXO VII: CONDICIONES TÉCNICAS PARA EL MONITOREO EN LA ZONA DE ESTUDIO**

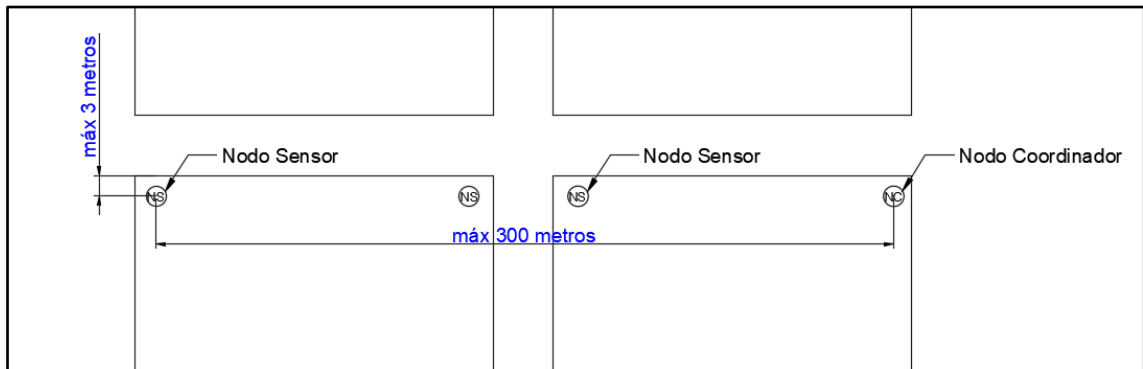
### **Condiciones de diseño:**

- Los nodos al estar expuestos a condiciones climáticas variables deben estar protegidos herméticamente, por lo que se debe considerar el diseño de una caja cerrada, de tal manera que, en condiciones de sol o lluvia, éstas no penetren o no tengan contacto con los equipos en el nodo.
- La antena del módulo de comunicación inalámbrica se colocará en el exterior, con el objetivo de poder reemplazarla en el momento en que se precise un alcance mayor y evitar la atenuación de la señal.

### **Condiciones para la ubicación ideal para los transmisores:**

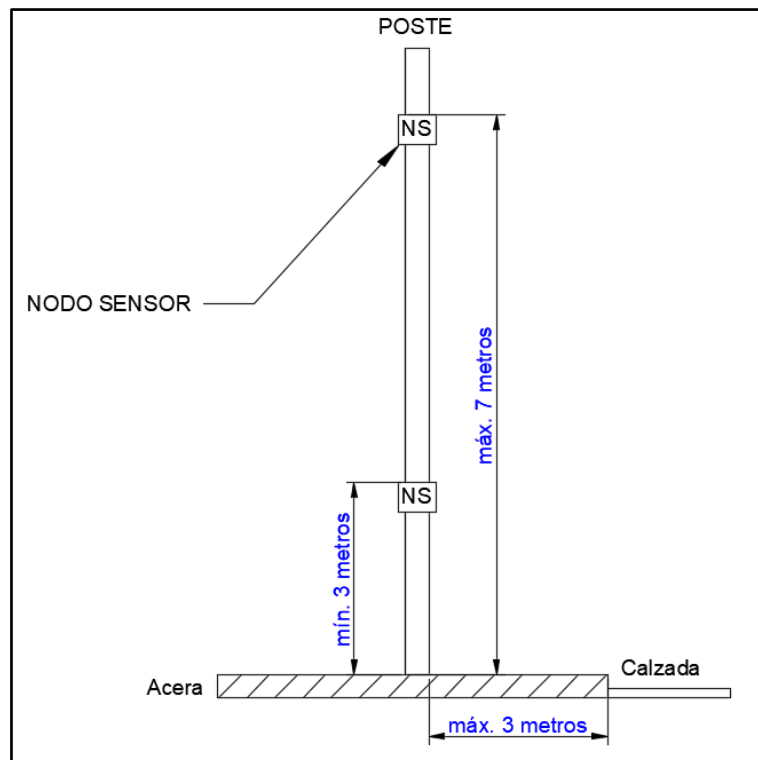
- Evitar de colocar a una distancia mayor de 300 metros de separación entre nodos finales y nodos router, para evitar la pérdida de señal entre estos dispositivos, esto se logró validar a través de las pruebas de recepción de señal hecha en la sección 6.3.2.
- Evitar ubicaciones en las cuales las personas puedan respirar directamente sobre el sensor.
- Evitar siempre ubicar los sensores próximos a conductos de escape o tomas de aire, o cerca de ventanas y entradas.
- Considerar la ubicación de los nodos sensores, tanto de CO<sub>2</sub> como de ruido, a una altura máxima de 7 metros y mínima de 3 metros, para que los focos de estudio estén dentro del umbral de medición aceptable, teniendo lecturas más claras y evitando que los equipos puedan ser sustraídos sin consentimiento de los postes.
- Si la ubicación del nodo se considera en la fachada de una vivienda, considerar a una distancia máxima de 3 metros de la calzada y tómesese en cuenta la altura del ítem anterior.
- En las situaciones de ventilación controlada por demanda, los sensores montados en la pared ofrecen información más precisa sobre la efectividad de la ventilación
- Los sensores montados en conductos se adaptan mejor a sistemas con una única zona y deberían instalarse lo más cerca de un espacio ocupado como sea posible para permitir un fácil acceso para realizar las tareas de mantenimiento.

- Cuando se realizan mediciones de CO2 a los efectos de la seguridad personal, los transmisores deben instalarse cerca de los potenciales puntos de fuga para permitir una detección temprana.
- Deben tenerse en cuenta factores como la geometría, la ventilación y el flujo de aire del área monitoreada.
- La cantidad y la ubicación de los transmisores de CO2 deben definirse por medio de la evaluación del riesgo.



**Ilustración 111:** Consideraciones técnicas de distancia para la implementación

**Fuente:** Autor



**Ilustración 112:** Consideraciones técnicas de altura para la implementación

**Fuente:** Autor

## ANEXO VII: HOJAS DE DATOS

### Hoja de datos del módulo XBee PRO S2B

Overview

#### Specifications of the XBee/XBee-PRO ZB RF Module

**Note** Range figure estimates are based on free-air terrain with limited sources of interference. Actual range will vary based on transmitting power, orientation of transmitter and receiver, height of transmitting antenna, height of receiving antenna, weather conditions, interference sources in the area, and terrain between receiver and transmitter, including indoor and outdoor structures such as walls, trees, buildings, hills, and mountains.

Specification	XBee	XBee-PRO (S2)	XBee-PRO (S2B)
<b>Performance</b>			
Indoor/urban range	up to 133 ft. (40 m)	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) international variant	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) international variant
Outdoor RF line-of-sight range	up to 400 ft. (120 m)	Up to 2 miles (3200 m), up to 5000 ft (1500 m) international variant	Up to 2 miles (3200 m), up to 5000 ft (1500 m) international variant
Transmit power output	2 mW (+3dBm), boost mode enabled 1.25 mW (+1dBm), boost mode disabled	50 mW (+17 dBm) 10 mW (+10 dBm) for International variant	63mW (+18 dBm) 10mW (+10 dBm) for International variant
RF data rate	250,000 b/s	250,000 b/s	250,000 b/s
Data throughput	up to 35000 b/s (see <a href="#">Transmission, addressing, and routing</a> )	up to 35000 b/s (see <a href="#">Transmission, addressing, and routing</a> )	up to 35000 b/s (see <a href="#">Transmission, addressing, and routing</a> )
Serial interface data rate (software selectable)	1200 b/s - 1 Mb/s (non-standard baud rates also supported)	1200 b/s - 1 Mb/s (non-standard baud rates also supported)	1200 b/s - 1 Mb/s (non-standard baud rates also supported)
Receiver sensitivity	-96 dBm, boost mode enabled -95 dBm, boost mode disabled	-102 dBm	-102 dBm
<b>Power Requirements</b>			
Supply voltage	2.1 - 3.6 V	3.0 - 3.4 V	2.7 - 3.6 V
Operating current (transmit, max output power)	40 mA (@ 3.3 V, boost mode enabled) 35 mA (@ 3.3 V, boost mode disabled)	295 mA (@3.3 V) 170 mA (@3.3 V) international variant	205 mA, up to 220 mA with programmable variant (@3.3 V) 117 mA, up to 132 mA with programmable variant (@3.3 V), International variant
Operating current (receive)	40mA (@ 3.3 V, boost mode enabled) 38mA (@ 3.3 V, boost mode disabled)	45 mA (@3.3 V)	47 mA, up to 62 mA with programmable variant (@3.3 V)
Idle current (receiver off)	15mA	15mA	15mA



Overview

Specification	XBee	XBee-PRO (S2)	XBee-PRO (S2B)
Power-down current	< 1 $\mu$ A @ 25°C	3.5 $\mu$ A typical @ 25°C	3.5 $\mu$ A typical @ 25°C
<b>General</b>			
Operating frequency band	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960 x 1.297 (2.438 cm x 3.294 cm)	0.960 x 1.297 (2.438 cm x 3.294 cm)
Operating temperature	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)
Antenna options	Integrated whip antenna, embedded PCB antenna, RPSMA, or U.FL connector	Integrated whip antenna, embedded PCB antenna, RPSMA or U.FL connector	Integrated whip antenna, embedded PCB antenna, RPSMA or U.FL connector
I/O interface	3.3 V CMOS UART (not 5 V tolerant), DIO, ADC	3.3 V CMOS UART (not 5 V tolerant), DIO, ADC	3.3 V CMOS UART (not 5 V tolerant), DIO, ADC
<b>Networking and Security</b>			
Supported network topologies	Point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer, and mesh	Point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer, and mesh	Point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer, and mesh
Number of channels	16 direct Sequence channels	14 Direct sequence channels	15 Direct sequence channels
Channels	11 to 26	11 to 24	11 to 25
Addressing options	PAN ID and addresses, cluster IDs and endpoints (optional)	PAN ID and addresses, cluster IDs and endpoints (optional)	PAN ID and addresses, cluster IDs and endpoints (optional)
<b>Agency Approvals</b>			
United States (FCC Part 15.247)	FCC ID: OUR-XBEE2	FCC ID: MCQ-XBEEPRO2	FCC ID: MCQ-PROS2B
Industry Canada (IC)	IC: 4214A-XBEE2	IC: 1846A-XBEEPRO2	IC: 1846A-PROS2B
Europe (CE)	No	Yes	Yes
Australia	RCM/R-NZ	RCM/R-NZ	RCM/R-NZ
Japan	R201WW07215215 (Wire, chip, RPSMA, and U.FL versions) R210-101040 (PCB antenna version)	R201WW08215142 (international variant) Wire, chip, RPSMA, and U.FL versions are certified for Japan. PCB antenna version is not.	R201WW10215062 (international variant)
Brazil		ANATEL: 2256-14-1209	
RoHS	Compliant	Compliant	Compliant

## Hoja de datos del módulo XBee Shield

2



Tech Support: [info@iteadstudio.com](mailto:info@iteadstudio.com)

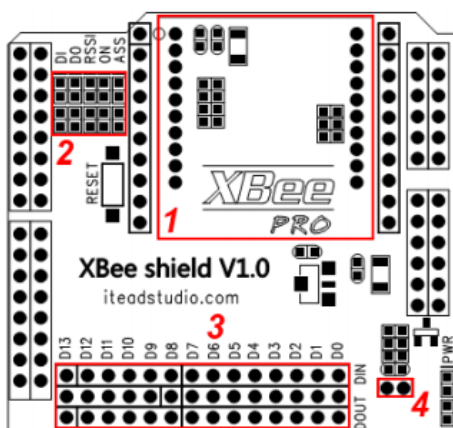
### Specifications

PCB size	54.9mm X 58.8mm X 1.6mm
Indicators	PWR State, DI, DO, RSSI, ON, ASS
Power supply	5V DC
Communication Protocol	UART/XBee
RoSH	Yes

### Electrical Characteristics

Specification	Min	Type	Max	Unit
Power Voltage	4.5	5	5.5	VDC
Input Voltage VH:	4.5	5	5.5	V
Input Voltage VL:	-0.3	0	0.5	V
Current Consumption	-	20	40	mA

### Hardware



Zone	Description
1	XBee Socket
2	Indication LEDs
3	DIN and DOUT connection select
4	RTS and D3 pins connectivity options

XBee Shield

[iteadstudio.com](http://iteadstudio.com)

03.21.2011

# Hoja de datos del módulo sensor de Ruido: Detector de ruido Sparkfun



www.fairchildsemi.com

## LMV321, LMV358, LMV324 General Purpose, Low Voltage, Rail-to-Rail Output Amplifiers

### Features at +2.7V

- 80µA supply current per channel
- 1.2MHz gain bandwidth product
- Output voltage range: 0.01V to 2.69V
- Input voltage range: -0.25V to +1.5V
- 1.5V/µs slew rate
- LMV321 directly replaces other industry standard LMV321 amplifiers; available in SC70-5 and SOT23-5 packages
- LMV358 directly replaces other industry standard LMV358 amplifiers; available in MSOP-8 and SOIC-8 packages
- LMV324 directly replaces other industry standard LMV324 amplifiers; available in SOIC-14 package
- Fully specified at +2.7V and +5V supplies
- Operating temperature range: -40°C to +125°C

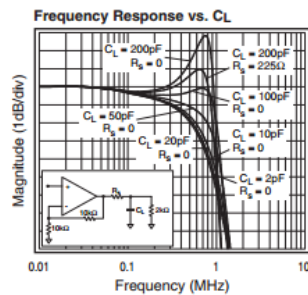
### Applications

- Low cost general purpose applications
- Cellular phones
- Personal data assistants
- A/D buffer
- DSP interface
- Smart card readers
- Portable test instruments
- Keyless entry
- Infrared receivers for remote controls
- Telephone systems
- Audio applications
- Digital still cameras
- Hard disk drives
- MP3 players

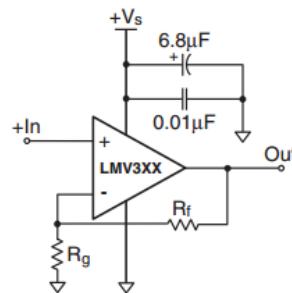
### Description

The LMV321 (single), LMV358 (dual), and LMV324 (quad) are a low cost, voltage feedback amplifiers that consume only 80µA of supply current per amplifier. The LMV3XX family is designed to operate from 2.7V ( $\pm 1.35V$ ) to 5.5V ( $\pm 2.75V$ ) supplies. The common mode voltage range extends below the negative rail and the output provides rail-to-rail performance.

The LMV3XX family is designed on a CMOS process and provides 1.2MHz of bandwidth and 1.5V/µs of slew rate at a low supply voltage of 2.7V. The combination of low power, rail-to-rail performance, low voltage operation, and tiny package options make the LMV3XX family well suited for use in personal electronics equipment such as cellular handsets, pagers, PDAs, and other battery powered applications.



### Typical Application



REV. 1D, Feb. 2012



# Hoja de datos del módulo sensor de CO2: CS811



## Key Benefits & Features

The benefits and features of CCS811, Ultra-Low Power Digital Gas Sensor for Monitoring Indoor Air Quality are listed below:

Figure 1:  
Added Value of Using CCS811 Sensor

Benefits	Features
<ul style="list-style-type: none"><li>• Manages the sensor drive modes and measurements while detecting VOCs</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Integrated MCU</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Provides eCO<sub>2</sub> level or TVOC indication with no host intervention</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• On-board processing</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Simplifies the hardware and software integration</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Standard I<sup>2</sup>C digital interface</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Extend battery life in portable applications</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Optimised low-power modes</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Suitable for small form-factor designs</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2.7mm x 4.0mm x 1.1mm LGA package</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Saves up to 60% in PCB footprint</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Low component count</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Designed for high volume and reliability (&gt;5years lifetime)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Proven technology platform</li></ul>

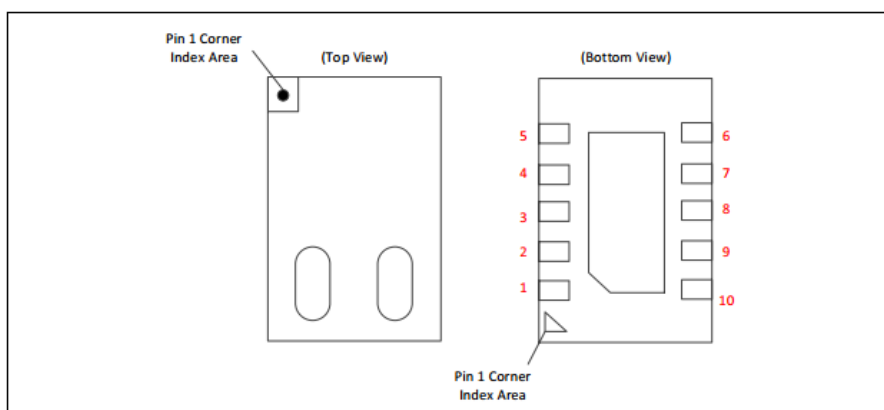
## Applications

This device can be mainly used for indoor air quality monitoring in:

- Smart phones
- Wearables
- Home and Building automation
- Accessories

## Pin Assignment

Figure 3:  
Pin Diagram



Pin Diagram: The Exposed Pad is underneath

Figure 4:  
CCS811 LGA Pin Assignment

Pin No.	Pin Name	Description
1	ADDR	Single address select bit to allow alternate address to be selected <ul style="list-style-type: none"> <li>When ADDR is low the 7 bit I<sup>2</sup>C address is decimal 90 / hex 0x5A</li> <li>When ADDR is high the 7 bit I<sup>2</sup>C address is decimal 91 / hex 0x5B.</li> </ul>
2	nRESET	nRESET is an active low input and is pulled up to V <sub>DD</sub> by default. nRESET is optional but external 4.7KΩ pull-up and/or decoupling of the nRESET pin may be necessary to avoid erroneous noise-induced resets.
3	nINT	nINT is an active low optional output. It is pulled low by the CCS811 to indicate end of measurement or a set threshold value has been triggered.
4	PWM	Heater driver PWM output. Pins 4 and 5 must be connected together.
5	Sense	Heater current sense. Pins 4 and 5 must be connected together.
6	V <sub>DD</sub>	Supply voltage
7	nWAKE	nWAKE is an active low input and should be asserted by the host prior to an I <sup>2</sup> C transaction and held low throughout.
8	AUX	Optional AUX pin which can be used for ambient temperature sensing with an external NTC resistor. If not used leave unconnected.
9	SDA	SDA pin is used for I <sup>2</sup> C data. Should be pulled up to V <sub>DD</sub> with a resistor
10	SCL	SCL pin is used for I <sup>2</sup> C clock. Should be pulled up to V <sub>DD</sub> with a resistor
EP	Exposed Pad	Connect to ground