



**Análisis comparativo de las tecnologías de comunicación para IoT en la monitorización
de zonas agrícolas de las provincias de Cotopaxi y Tungurahua**

Ramírez Mosquera, Alexis Orlando y Ruales Galarza, Christian Andrés

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y
Telecomunicaciones

Ing. Rivas Lalaleo, David Raimundo PhD.

19 de junio del 2021

Document Information

Analyzed document	Tesis_Ramirez_Ruales pdf (D109308890)	
Submitted	6/19/2021 5:20:00 PM	
Submitted by		
Submitter email	aoramirez@espe.edu.ec	 Escanea el código QR para: DAVID RAIMUNDO RIVAS LALALEO
Similarity	2%	
Analysis address	drivas.espe@analysis.orkund.com	

Sources included in the report

SA	1598851914_190__Documento_completo.pdf-PDFA.pdf Document 1598851914_190__Documento_completo.pdf-PDFA.pdf (D79869883)		1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis_BryanAllauca.pdf Document Tesis_BryanAllauca.pdf (D77308949) Submitted by: bdallauca@espe.edu.ec Receiver: ralara.espe@analysis.orkund.com		6
SA	Tesis Angel Viñamagua.pdf Document Tesis Angel Viñamagua.pdf (D78518683)		1
W	URL: https://www.aulavirtualusmp.pe/ojs/index.php/rc/article/download/1829/2155 Fetched: 6/13/2021 7:51:40 PM		6
W	URL: https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095 Fetched: 6/19/2021 5:22:00 PM		1
W	URL: https://doi.org/10.1109/colcomcon.2018.8466722 Fetched: 6/19/2021 5:22:00 PM		1
W	URL: https://doi.org/10.1109/ICETIETR.2018.8529060 Fetched: 6/19/2021 5:22:00 PM		1
SA	1612983219_Documento Completo _ Bajaña-Guartan_revMAAV.pdf Document 1612983219_Documento Completo _ Bajaña-Guartan_revMAAV.pdf (D95205682)		1
W	URL: https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/11837/Miguel%20%C3%81ngel%20Lanz%20Morales.pdf?sequence=1&isAllowed=n Fetched: 5/16/2021 9:37:04 PM		1
W	URL: https://doi.org/10.1109/andescon.2018.8564674 Fetched: 6/19/2021 5:22:00 PM		1
W	URL: https://doi.org/10.1109/s3c.2017.8501379 Fetched: 6/19/2021 5:22:00 PM		1
SA	3651b7739857aa545584e5cf33d19cde83b44c62.docx Document 3651b7739857aa545584e5cf33d19cde83b44c62.docx (D63937926)		1



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: "Análisis comparativo de las tecnologías de comunicación para IoT en la monitorización de zonas agrícolas de las provincias de Cotopaxi y Tungurahua", fue realizado por los señores Ramírez Mosquera, Alexis Orlando y Ruales Galarza, Christian Andrés; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 19 de junio del 2021

Firma:



Ing. Rivas Lalaleo, David Raimundo PhD.

C. C.: 1802445302



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

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Ramírez Mosquera, Alexis Orlando** con cédula de ciudadanía n° 1721995163 y **Ruales Galarza, Christian Andrés** con cédula de ciudadanía n° 1722913777, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Análisis comparativo de las tecnologías de comunicación para IoT en la monitorización de zonas agrícolas de las provincias de Cotopaxi y Tungurahua** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 19 de junio del 2021

.....
Ramírez Mosquera, Alexis Orlando

C. C.: 1721995163

.....
Ruales Galarza, Christian Andrés

C. C.: 1722913777



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

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Ramírez Mosquera, Alexis Orlando** con cédula de ciudadanía n° 1721995163 y **Ruales Galarza, Christian Andrés** con cédula de ciudadanía n° 1722913777, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Análisis comparativo de las tecnologías de comunicación para IoT en la monitorización de zonas agrícolas de las provincias de Cotopaxi y Tungurahua en el Repositorio Institucional**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 19 de junio del 2021

.....
Ramírez Mosquera, Alexis Orlando

C. C.: 1721995163

.....
Ruales Galarza, Christian Andrés

C. C.: 1722913777

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Alicia y Hugo, por ser los pilares más importantes en mi vida, por su amor incondicional, por su influencia en mi formación ética y humana, paciencia y por ser una guía y apoyo, gracias por enseñarme a plantarle cara a cualquier dificultad.

A mi hermano Javier por ser mi principal ejemplo, por siempre incitarme a mejorar y crecer, estoy tan orgulloso de él, así como lo está de mí.

A mi abuelito Luciano por cuidarme siempre en momentos complicados y a mi abuelita Enma por todo su amor, oraciones, consejos y palabras de aliento.

A Doménica por siempre creer en mí, brindarme todo su apoyo, amor y ser una persona tan importante en todo este camino.

Este logro es por y para ustedes.

Christian Andrés Ruales Galarza

El presente trabajo de titulación quiero dedicarlo a mis padres Silvy y Orlando por su amor y confianza incondicional en todas las etapas de mi vida, ustedes han sido hacia mí el ejemplo de responsabilidad y esfuerzo para no rendirme en mis objetivos planteados. Este logro obtenido no es solo mío sino también de ustedes por el apoyo que día a día me supieron brindar, por haberme guiado por el camino del bien y formado con buenos valores.

A mis hermanos Kathy y Danny, que siempre estuvieron ayudándome y dándome ánimos para que siga adelante, y por darme su tiempo para reír, conversar y pasar buenos momentos juntos.

A mis abuelitos, abuelitas y mi tío Lenin por darme su cariño sincero y preocuparse por mí, también por brindarme esas palabras sabias que son muy importantes para la vida.

A mis demás familiares por estar siempre ahí dándome su apoyo y deseando lo mejor para mí.

A Fer, por ser la persona que me acompaño en toda esta etapa universitaria estando pendiente de mí, por darme su amor incondicional y siempre decirme que siga adelante para cumplir mis metas.

A mis amigos presentes y pasados por haber pasado buenos momentos y haberme brindado su amistad.

Alexis Orlando Ramírez Mosquera

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad. Les damos gracias a nuestros padres por apoyarnos en todo momento, por los valores que nos han inculcado, y por habernos dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de la vida. Y a nuestros hermanos por ser parte de nuestra vida y representar la unidad familiar.

Nuestro agradecimiento al director de esta tesis, Dr. David Rivas, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a nuestras sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Gracias por la amistad ofrecida en tan corto tiempo. También un agradecimiento al codirector de la tesis Dr. Freddy Acosta por su guía en el desarrollo del trabajo.

También queremos agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, directivos y profesores por ser una guía a lo largo de la carrera universitaria y habernos brindado su conocimiento para desarrollarnos profesionalmente.

Alexis Ramírez y Christian Ruales

Índice de Contenido

Resumen.....	19
Abstract.....	20
Capítulo I.....	21
Definición del Proyecto.....	21
Introducción.....	21
Antecedentes.....	22
Justificación e Importancia.....	24
Alcance.....	25
Objetivos.....	26
<i>Objetivo General</i>	26
<i>Objetivos Específicos</i>	26
Capítulo II.....	27
Marco Teórico.....	27
Internet de las Cosas.....	35
Agricultura de precisión.....	36
Red de sensores inalámbricos.....	37
Redes de Área Amplia y Baja Potencia.....	38
Sigfox.....	39
Zigbee.....	40
LoRa.....	41

	10
Narrow-Band IoT	42
Identificación de frecuencia de radio (RFID)	43
Wireless Fidelity	44
Bluetooth	44
Redes móviles celulares	45
IoT Satelital.....	46
Proceso de jerarquía analítica	48
Temperatura de la Sierra Ecuatoriana.....	48
Modelo de propagación de señales.....	49
Modelo de propagación por difracción REC. UIT-R P.526	50
Equipos Patrones.....	51
<i>Medidor de temperatura y humedad Fluke 971.....</i>	<i>51</i>
<i>Medidor de Radiación UV General UV513AB</i>	<i>52</i>
<i>Medidor de Luz Reed SD-1128.....</i>	<i>53</i>
<i>Medidor de Humedad de suelo Dr. Meter.....</i>	<i>53</i>
Capítulo III	55
Materiales y Métodos.....	55
Visual Studio Code.....	57
Pycom.....	58
<i>Tipos de placas de Pycom</i>	<i>58</i>
Sensor de Temperatura y Humedad	59

	11
Sensor de luz digital	59
Sensor de luz Ultra Violeta (UV)	60
Sensor de humedad de suelo	61
Lenguajes De Programación Seleccionados Para El Desarrollo	61
<i>Python</i>	62
Método Bland Altman.....	63
Capítulo IV	64
Desarrollo y Pruebas	64
Análisis Bibliométrico	64
<i>Base de datos IEEE Xplore</i>	64
<i>Base de datos Scopus</i>	67
<i>Tendencias de tecnologías de comunicación inalámbrica</i>	72
Comparación de características de las tecnologías de comunicación inalámbrica	73
Simulaciones de cobertura radioeléctrica.....	74
<i>Primer caso de estudio</i>	76
<i>Segundo caso de estudio</i>	79
Diseño del Sistema en General	81
Características del Nodo Sensor	82
Diagrama de Bloques del Sistema	83
Implementación del Hardware del Sistema	84
<i>Nodo Sensor</i>	84

	12
<i>Diagrama de Pistas</i>	86
Diseño de la carcasa del nodo sensor.....	86
Ajuste de Sensores	87
Análisis de Mediciones de Variables	87
<i>Variable Física de Temperatura</i>	88
<i>Variable Física de Humedad</i>	92
<i>Variable Física de Radiación UV</i>	95
<i>Variable Física de Luminosidad</i>	99
<i>Variable Física de Humedad de Suelo</i>	102
Implementación del Software.....	106
<i>Software de la placa de desarrollo</i>	106
Red de Sigfox.....	109
<i>Registro del dispositivo</i>	110
<i>Backend Sigfox</i>	112
<i>Decodificación del mensaje</i>	117
<i>Configuración del callback</i>	119
Plataforma de registro y visualización de datos	121
Capítulo V	124
Resultados	124
Integración del nodo sensor.....	124
Despliegue de la red	125

Integración del Dashboard.....	127
Información general del enlace.....	131
<i>Mensajes</i>	131
<i>Bytes</i>	132
<i>Indicador de Fuerza de la Señal Recibida (RSSI)</i>	133
Análisis de Costos.....	134
Conclusiones y Recomendaciones	135
Conclusiones.....	135
Recomendaciones	137
Trabajos Futuros	137
Referencias Bibliográficas	139
Anexos	150

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Porcentaje final de tecnologías utilizando AHP</i>	74
Tabla 2 <i>Parámetros utilizados en el simulador Xirio Online</i>	75
Tabla 3 <i>Puntos de ubicación para simulaciones de cobertura radioeléctrica</i>	75
Tabla 4 <i>Niveles de potencia de la señal</i>	76
Tabla 5 <i>Ejemplo de conversión entero a bytes</i>	109
Tabla 6 <i>Indicador de calidad del enlace para zonas RC2 y RC4</i>	133
Tabla 7 <i>Costos del prototipo de sistema de monitorización de zonas agrícolas</i>	134
Tabla 8 <i>Costos de implementación de la red</i>	134
Tabla 9 <i>Costos de servicios</i>	134

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Dimensiones de las Tecnologías de la Comunicación</i>	36
Figura 2 <i>Servicios aplicados a la Agricultura de Precisión</i>	37
Figura 3 <i>Representación gráfica de una WSN</i>	38
Figura 4 <i>Presencia de la red Sigfox por países</i>	40
Figura 5 <i>Enrutamiento con topología de malla formado por nodos 1,2,3,4 y 5.</i>	41
Figura 6 <i>Presencia de la red Lora por países</i>	42
Figura 7 <i>Representación gráfica del funcionamiento de RFID</i>	44
Figura 8 <i>Representación gráfica de IoT Satelital</i>	47
Figura 9 <i>Representación gráfica de la temperatura media anual de la Sierra ecuatoriana</i>	49
Figura 10 <i>Equipo Fluke 971</i>	52
Figura 11 <i>Equipo General UV513AB</i>	52
Figura 12 <i>Equipo Reed SD-1128</i>	53
Figura 13 <i>Equipo Dr. Meter</i>	54
Figura 14 <i>Diagrama de flujo de la metodología utilizada en el proyecto de investigación.</i>	55
Figura 15 <i>Sensor DHT11</i>	59
Figura 16 <i>Sensor BH1750</i>	60
Figura 17 <i>Sensor ML8511</i>	60
Figura 18 <i>Sensor HD-38</i>	61
Figura 19 <i>Análisis bibliométrico con cadena de búsqueda lot + Agricultura</i>	65
Figura 20 <i>Análisis bibliométrico con cadena de búsqueda lot + Agricultura + América</i> .	66
Figura 21 <i>Análisis bibliométrico con cadena de búsqueda lot + Agricultura + Ecuador</i> .	67
Figura 22 <i>Análisis bibliométrico con cadena de búsqueda lot + Agricultura</i>	68
Figura 23 <i>Análisis bibliométrico por países con cadena de búsqueda lot + Agricultura</i> .	69

Figura 24 <i>Análisis bibliométrico con cadena de búsqueda lot + Agricultura + América</i> . 70	70
Figura 25 <i>Análisis bibliométrico con cadena de búsqueda lot + Agricultura + Ecuador</i> . 70	70
Figura 26 <i>Análisis bibliométrico temporal</i> 71	71
Figura 27 <i>Tendencias de tecnologías inalámbricas</i> 72	72
Figura 28 <i>Cobertura radioeléctrica de la tecnología Lora</i> 77	77
Figura 29 <i>Cobertura radioeléctrica de la tecnología Sigfox</i> 78	78
Figura 30 <i>Cobertura radioeléctrica de la tecnología ZigBee</i> 79	79
Figura 31 <i>Cobertura radioeléctrica de la tecnología Sigfox desde el cerro Pilisurco</i> 80	80
Figura 32 <i>Cobertura radioeléctrica de la tecnología Sigfox desde el cerro Nitón</i> 81	81
Figura 33 <i>Diagrama de bloques del sistema</i> 83	83
Figura 34 <i>Diagrama esquemático</i> 85	85
Figura 35 <i>Representación física del nodo sensor</i> 85	85
Figura 36 <i>Diseño de la carcasa del nodo sensor del sistema de monitorización de zonas agrícolas</i> 86	86
Figura 37 <i>Nodo sensor para monitorización de zonas agrícolas</i> 88	88
Figura 38 <i>Curvas de Temperatura</i> 89	89
Figura 39 <i>Curva de Error de Temperatura</i> 90	90
Figura 40 <i>Histograma de Error de Temperatura</i> 90	90
Figura 41 <i>Diagrama de Dispersión de Temperatura</i> 91	91
Figura 42 <i>Método gráfico de Bland Altman para la temperatura</i> 91	91
Figura 43 <i>Curvas de Humedad</i> 93	93
Figura 44 <i>Curva de Error de Humedad</i> 93	93
Figura 45 <i>Histograma de Error de Humedad</i> 94	94
Figura 46 <i>Diagrama de Dispersión de Humedad</i> 94	94
Figura 47 <i>Método gráfico de Bland Altman para la humedad</i> 95	95
Figura 48 <i>Curvas de Radiación UV</i> 96	96

Figura 49 <i>Curva de Error de Radiación UV</i>	97
Figura 50 <i>Histograma de Error de Radiación UV</i>	97
Figura 51 <i>Diagrama de dispersión de Radiación UV</i>	98
Figura 52 <i>Método gráfico de Bland Altman para la Radiación UV</i>	98
Figura 53 <i>Curvas de Luminosidad</i>	100
Figura 54 <i>Curva de Error de luminosidad</i>	100
Figura 55 <i>Histograma de Error de luminosidad</i>	101
Figura 56 <i>Diagrama de dispersión de Luminosidad</i>	101
Figura 57 <i>Método gráfico de Bland Altman para la Luminosidad</i>	102
Figura 58 <i>Curvas de Humedad de Suelo</i>	103
Figura 59 <i>Curva de Error de Humedad del Suelo</i>	104
Figura 60 <i>Histograma de Error de Humedad de Suelo</i>	104
Figura 61 <i>Diagrama de dispersión de Humedad de Suelo</i>	105
Figura 62 <i>Método gráfico de Bland Altman para la Humedad de Suelo</i>	105
Figura 63 <i>Payload formado por bytes de variables medidas</i>	107
Figura 64 <i>Diagrama de flujo de programa de nodo sensor</i>	107
Figura 65 <i>Página principal para el registro del dispositivo Sigfox</i>	110
Figura 66 <i>Selección de la zona horaria para el registro Sigfox</i>	110
Figura 67 <i>Información de ID y PAC de la placa de desarrollo</i>	111
Figura 68 <i>Información del usuario para registro del dispositivo</i>	112
Figura 69 <i>Ventana de backend de Sigfox</i>	113
Figura 70 <i>Ventana del Grupo, backend de Sigfox</i>	114
Figura 71 <i>Ventana de ID del dispositivo en el backend de Sigfox</i>	116
Figura 72 <i>Área de localización del dispositivo en el backend de Sigfox</i>	116
Figura 73 <i>Recepción de mensajes en el backend de Sigfox</i>	117
Figura 74 <i>Configuración de la carga útil personalizada</i>	119

Figura 75 Configuración del Callback desde el backend de Sigfox	120
Figura 76 Plataforma de IoT Ubidots	121
Figura 77 Comprobación de la integración de los datos	122
Figura 78 Recepción de los datos en la plataforma de Ubidots	122
Figura 79 Creación de tableros en Ubidots.....	123
Figura 80 Sensores implementados en nodo sensor	124
Figura 81 Nodo sensor final	125
Figura 82 Instalación estación base en Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo.....	126
Figura 83 Radio base de Sigfox ubicada en edificio central de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo.....	126
Figura 84 Cobertura radioeléctrica de tecnología Sigfox de la radio base ubicada en el edificio central de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo.....	127
Figura 85 Representación de variable humedad en tableros de Ubidots	128
Figura 86 Representación de variable humedad de suelo en tableros de Ubidots	129
Figura 87 Representación de variable luminosidad en tableros de Ubidots	129
Figura 88 Representación de variable temperatura en tableros de Ubidots.....	130
Figura 89 Representación de variable radiación UV en tableros de Ubidots.....	131
Figura 90 Representación gráfica del número de mensajes enviados	132
Figura 91 Representación gráfica de la cantidad de bytes enviados.....	132
Figura 92 Representación gráfica del RSSI.....	133

Resumen

El desarrollo de la agricultura se basa en la mejora de los estándares de vida, a nivel nacional en las provincias de Cotopaxi y Tungurahua representa un tema de especial interés, actualmente el sector agrícola en entorno andinos presenta impacto del cambio climático, variación de temperatura y humedad, y alteración del suelo. Es por esto que el Internet de las Cosas con la integración de las tecnologías de comunicación inalámbricas, sensores y procesamiento de datos ofrece la posibilidad de generar sistemas tecnológicos que recogen datos de los campos de cultivo. El presente proyecto de investigación se basó en el análisis comparativo de las tecnologías de comunicación inalámbrica para IoT en la monitorización de zonas agrícolas, recopilando estudios de bases de datos científicas identificando tendencias a nivel mundial, del continente americano y local. Además, se evaluaron las tecnologías de comunicación con sus características en base al método de Proceso de Análisis Jerárquico obteniendo a las tecnologías Sigfox, LoRa y Zigbee como principales alternativas para las simulaciones de cobertura radioeléctrica. Posteriormente, se obtuvo el patrón de radiación de las tecnologías anteriormente mencionadas seleccionando a Sigfox por sus características y prestaciones como la tecnología a implementar en el proyecto, logrando el despliegue de la red y el funcionamiento del nodo sensor. Se concluyó que Sigfox es idóneo para la monitorización de cultivos agrícolas por su amplio rango de cobertura, costo económico y baja tasa de envío de datos, siendo una alternativa de comunicación para la alerta temprana de detección de heladas.

PALABRAS CLAVE:

- **SIGFOX**
- **INTERNET DE LAS COSAS**
- **COBERTURA RADIOELÉCTRICA**
- **NODO SENSOR**

Abstract

The development of agriculture is based on the improvement of living standards, at the national level in the provinces of Cotopaxi and Tungurahua represents a topic of special interest, currently the agricultural sector in Andean environment has the impact of climate change, temperature and humidity variation, and soil alteration. This is why the Internet of Things with the integration of wireless communication technologies, sensors and data processing offers the possibility of generating technological systems that collect data from crop fields. This research project was based on the comparative analysis of wireless communication technologies for IoT in monitoring of agricultural areas, compiling studies from scientific databases identifying global trends, of the American continent and locally. In addition, the communication technologies with their characteristics were evaluated based on the Hierarchical Analysis Process method obtaining the Sigfox technologies, LoRa and Zigbee as main alternatives for radio coverage simulations. Subsequently, the radiation pattern of the aforementioned technologies was obtained, then Sigfox was selected for its characteristics and features such as the technology to be implemented in the project, achieving the deployment of the network and the operation of the sensor node. It was concluded that Sigfox is ideal for the monitoring of agricultural crops due to its wide range of coverage, economic cost and low rate of data sending, being a communication alternative for early warning of frost detection.

KEYWORDS:

- **SIGFOX**
- **INTERNET OF THINGS**
- **RADIO COVERAGE**
- **SENSOR NODE**

Capítulo I

Definición del Proyecto

Introducción

La agricultura en la sociedad se basa en la mejora de los estándares de vida, enfocados en los sectores más pobres y a su vez debe tener presente su sustentabilidad de manera económica, social y medioambiental (FAO, 2017). En las provincias de Cotopaxi y Tungurahua la agricultura representa un tema de especial interés, debido a que el sector agrícola contribuye significativamente a la economía de estas zonas y del Ecuador, además la agricultura aporta a la base de la política de soberanía alimentaria que es promovida en el artículo 281 de la Constitución de la República que establece la necesidad de garantizar que las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades alcancen la autosuficiencia de alimentos sanos y culturalmente apropiados de forma permanente (Carvajal, 2009). En la actualidad el sector agrícola en entornos andinos se ve afectado por el cambio climático, donde se han registrado variaciones en el dióxido de carbono y alteración en la acidez del suelo afectando las actividades de la producción (Velazquez et al., 2019).

Asimismo, la calidad de los datos es crucial para lograr la participación y aceptación del usuario con aplicaciones de IoT, debido a que, si los datos son de mala calidad es probable que las decisiones no sean acertadas (Karkouch et al., 2016). Por otro lado, la futura gran demanda de conectividad de redes IoT, la restringida cantidad de nodos en un área limitada, la coexistencia de múltiples nodos generando una tasa de datos reducida, la abundancia de tecnologías ofertadas en el mercado y la necesidad de infraestructuras cableadas para abarcar grandes áreas de cobertura (Ismail et al., 2018), además, el medio ambiente es conocido por ser uno de los principales factores que conducen a una baja calidad del enlace inalámbrico, a través

de los efectos de propagación de múltiples rutas y su contribución al ruido de fondo (Wang & Lee, 2012).

Por lo expuesto, el proyecto de investigación establece el estado del arte de las tecnologías de comunicación IoT para la monitorización en entornos agrícolas a través del análisis comparativo. Para este estudio se parte del mapa de cobertura y uso de tierra del Ecuador continental del año 2014 (MAE-MAGAP, 2015) en la cual se identifican las zonas agrícolas de las provincias antes mencionadas, con la utilización de simuladores de cobertura se evalúan distintas tecnologías inalámbricas, de esta manera se obtiene las capacidades de alcance para generar conclusiones sobre su comportamiento. De la tecnología que resulta más eficiente se implementa una red de sensores en zonas agrícolas de las provincias de Cotopaxi y Tungurahua con la finalidad de realizar la experimentación práctica. Este trabajo se encuentra enmarcado dentro del proyecto de investigación "Prototipo de alerta temprana para detección de heladas en las zonas agrícolas de las Provincias de Cotopaxi y Tungurahua- CONGOPE" aprobado según resolución ESPE-CA-RES-2020-050.

Antecedentes

En la época del IoT, los objetos cotidianos se han equipado con microcontroladores y dispositivos de comunicación que pueden trabajar en conjunto para ayudar a las personas, y de esta forma mejorar la calidad de vida (Al Fuqaha et al., 2015). Las aplicaciones de esta tecnología generan un impulso en la búsqueda de una mayor eficiencia en la gestión de recursos, largo alcance, baja velocidad de datos, bajo consumo de energía y rentabilidad (Mekki et al., 2018a). Por lo tanto, los requisitos de las aplicaciones de IoT han desencadenado un desarrollo para que las tecnologías de comunicación inalámbrica se utilicen en nuevas áreas, incluyendo seguridad, seguimiento de activos, agricultura, medición inteligente, ciudades inteligentes y hogares inteligentes (Sadowski & Spachos, 2020).

La monitorización agrícola es un ejemplo en el que IoT puede ayudar a aumentar la productividad, la eficiencia y rendimiento de producción, es por esto que en (Zhao et al., 2010) proyectaron los beneficios de ejecutar actividades agrícolas dentro de una tecnología de invernadero, así como, el proceso de automatizar la zona congregando los conceptos de esta tecnología, por lo tanto, el sistema de monitorización remoto (RMS) con internet y comunicaciones inalámbricas fue propuesto, el marco resultó en un buen crecimiento y salud de las plantas cultivadas en invernadero, el cual era sencillo de operar en comparación a los campos abiertos. De igual manera, (Bandyopadhyay & Sen, 2011) propusieron un marco de vanguardia donde se visualizó la ayuda que los agricultores podrían obtener de las aplicaciones de IoT para adquirir información en la entrega de cultivos directamente a los clientes dentro de una región pequeña.

Por otro lado, (Tongke, 2013) en su estudio describió una solución a los problemas encontrados para la agricultura, el autor propuso la modernización con el uso de conceptos de IoT y técnicas de computación en la nube para realizar actividades agrícolas, las tecnologías de Arquitectura Orientada a Servicios (SOA) e Identificación por Radiofrecuencia (RFID) también fueron incorporados al estudio. Con el advenimiento de técnicas de Redes de Sensores Inalámbricos (WSN), (Ojha et al., 2015) estimuló una nueva dirección de investigación en el campo agrícola, en su estudio valoró las posibles aplicaciones de WSN junto con varios desafíos y problemas asociados en la implementación.

La agricultura inteligente utiliza diferentes tipos de sensores de bajo costo para medir varios parámetros, en (Gaddam & Rai, 2018) realizan un estudio comparativo de las tecnologías de comunicación que requieren poca potencia de consumo para mejorar la duración de la batería, analizan que los sensores envían la información pocas veces por hora debido a que las condiciones no cambiarán instantáneamente. En su estudio

destacan que LoRaWAN es adecuada para estos requisitos debido a su largo alcance y bajo consumo de energía, en cambio, NBloT y LTE-M no son ideales porque muchas zonas agrícolas no tienen cobertura celular. De manera similar en (Pitu & Gaitan, 2020), proponen un sistema de seguimiento capaz de recopilar información como luminosidad, temperatura y humedad del medio ambiente los cuales permiten el crecimiento óptimo de las plantas en base a la integración de una red de sensores capaces de transmitir los datos con el uso de la tecnología SigFox, los autores pretenden incrementar las ganancias y la productividad, además, de reducir el trabajo humano.

Justificación e Importancia

El Ecuador es un país agrícola que cuenta con el 67.12%, 23.94% y 8.94% para presencia de cultivos permanentes en las regiones de Costa, Sierra y Oriente respectivamente, teniendo como producto de exportación al banano, café, cacao, entre otros, convirtiendo a la agricultura en el Sector Primario de la economía debido a su uso para la producción de alimentos, producción de materias primas y generación de capital mediante tratos comerciales (Basantes, 2015). Teniendo en cuenta el cambio climático y todos los aspectos que esto engloba tales como variación de temperatura o aumentos de niveles de CO_2 y la manera en que esto afecta productividad y la calidad de los productos (Ossa, 2017), ya que generan la existencia de microclimas a veces ignorados debido a la ausencia de tecnologías o sistemas de instrumentación que faciliten al agricultor reconocer momentos críticos para la producción del cultivo (Vera et al., 2015).

Hoy en día, uno de los conceptos tecnológicos que crece cada vez más es el IoT (Chulbi, 2020), presenta altas demandas de comunicaciones entre dispositivos denominada Comunicación Tipo Máquina (MTC), generando interés en la integración de soluciones de conectividad con sensores, medidores, actuadores, autos, etc (Hamidreza et al., 2015), los cuales son controlados remotamente o a su vez sin la intervención del ser humano. IoT se basa en una serie de redes con distintos objetivos de diseño, las

MTC emplean diferentes tecnologías que se pueden clasificar según la tasa de transmisión de datos y cobertura. De igual manera, las tecnologías de red de área amplia de baja potencia Low Power Wide Area Network (LPWAN) están diseñadas para una distancia de transmisión mayor a un kilómetro, con bajo consumo de potencia y soportando transmisión de datos en banda angosta, esto se efectúa con un bajo coste de comunicación (Machado, 2019), estas tecnologías utilizan tanto banda de espectro no licenciada como licenciada. Por consiguiente, mediante la implementación de sensores inalámbricos que permitan disponer de información en tiempo real censando variables tales como la temperatura, luminosidad, velocidad del viento o el pH en el suelo se puede aumentar la eficiencia en la producción y desarrollo de los cultivos, además, de la reducción de pérdidas en los mismos; esto permite también generar la información necesaria para la mejora y elección de técnicas de cultivo más adecuado.

Tomando en cuenta lo antes mencionado, este proyecto busca tener un estudio detallado que permita reconocer las prestaciones de las tecnologías inalámbricas utilizadas en nodos sensores mediante la comparativa poder definir cuál de las alternativas es la más adecuada en entornos agrícolas dentro de las zonas Andinas del Ecuador, de esa manera, implementar una red de sensores que utilice dicha tecnología inalámbrica dentro del Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara de la ciudad de Latacunga. Cabe mencionar que el tema de tesis se encuentra relacionado con el proyecto “Prototipo de alerta temprana para detección de heladas en las zonas agrícolas de las Provincias de Cotopaxi y Tungurahua-CONGOPE” aprobado según resolución ESPE-CA-RES-2020-050.

Alcance

El proyecto en mención busca realizar un estudio detallado que permita reconocer las prestaciones de las tecnologías inalámbricas utilizadas en nodos sensores, mediante el estado del arte de comunicaciones implementados para zonas

agrícolas, de igual forma, se obtiene el comportamiento de tecnologías de comunicaciones inalámbricas en zonas agrícolas ecuatorianas con el uso simuladores de cobertura radioeléctrica. A su vez, se realiza el análisis de las normativas de uso del espectro radioeléctrico de las tecnologías inalámbricas más utilizadas en proyectos agrícolas en el Ecuador. De esta manera, se selecciona la tecnología inalámbrica óptima aplicable en la monitorización de zonas agrícolas en el Ecuador. Finalmente, se despliega una red inalámbrica compatible con la tecnología seleccionada y su análisis de costos que presenta la implementación.

Objetivos

Objetivo General

Realizar un análisis comparativo de los sistemas de comunicación IoT para la monitorización de zonas agrícolas en las provincias de Cotopaxi y Tungurahua.

Objetivos Específicos

- Realizar el estudio del estado del arte de comunicaciones implementadas en nodos sensores en zonas agrícolas.
- Comparar y seleccionar información sobre tecnologías inalámbricas aplicada en la monitorización de zonas agrícolas en el Ecuador.
- Realizar el diseño experimental para la comparación de tecnologías de comunicaciones inalámbricas de zonas agrícolas en las provincias Cotopaxi y Tungurahua mediante simuladores de cobertura radioeléctrica.
- Implementar una red inalámbrica compatible con la tecnología seleccionada y analizar los costos que representa su ejecución.

Capítulo II

Marco Teórico

En (Kiruthika et al., 2015) mencionan la necesidad del uso de redes de sensores inalámbricos en la agricultura para incrementar la productividad, especialmente en su entorno, la India. Además, explica la arquitectura necesaria para el monitoreo y el análisis de parámetros medioambientales. En (Chaudhary et al., 2011) proponen una red de sensores inalámbricas basada en Sistemas en un Chip (SoC) para el control y el monitoreo de parámetros en un invernadero, también se tratan puntos de la evolución de los sensores relacionados a WSN. En (Khot & Gaikwad, 2016) monitorean la intensidad lumínica en una plantación para posteriormente poder analizarlo. En (Vatari et al., 2016) plantean resolver problemas debido a la diferencia de distribución de lluvia en un sembrío controlando la humedad del suelo, para ello se usó una placa de adquisición Arduino. En (Brewster et al., 2017) describen las limitaciones y problemas presentados en un proyecto piloto de IoT en agricultura. En (Takekar & Takekar, 2017) describen la implementación y el despliegue paulatino del IoT en la agricultura, sobre todo tomando en cuenta la importancia de la accesibilidad a la información en cualquier momento.

Las tecnologías de comunicación inalámbrica para la agricultura tienen ventajas de bajo costo de construcción y mantenimiento, bajo consumo de energía y excelente extensibilidad, es por esto que la mayoría de investigadores, organizaciones y fabricantes las eligen para construir sus WSN en monitoreo ambiental, riego automático y control remoto (Kumar & Hancke, 2014) (Corkery et al., 2013), como en (Correia et al., 2013), que señalan la necesidad de la monitorización de factores que afecten a las cosechas, los autores plantean el diseño de un modelo de propagación para la tecnología Zigbee en un viñedo, de esa manera encontraron la atenuación principal, factores del campo en la plantación y una predicción de pérdida del modelo de

trayectoria que se adapte bien a las medidas. De forma similar, en (Zulkifli & Noor, 2017), la tecnología ZigBee es aplicada en 2,45 GHz y RFID para mantener activa la WSN mediante el desarrollo de una solución de IoT automatizada para el sistema de riego, el sistema incluye nodos sensores instalados en un campo de cultivo que envía una identificación de una señal de suelo en condición seca de un área específica hacia un receptor en la estación base, los autores enfatizan en su investigación que ZigBee es una tecnología práctica para ese tipo de sistemas. De igual importancia, Sigfox es una tecnología utilizada en aplicaciones de IoT, en (Llaria et al., 2015) se desarrolló un sistema de geolocalización para el seguimiento de rebaños de ganado con el fin de mejorar las condiciones de trabajo agrícolas y conocer mejor el comportamiento de los animales, los autores proponen dispositivos de geolocalización que transmiten una vez por hora con comunicación de largo alcance, baja potencia e interfaz dedicada como lo es Sigfox, en su estudio al elegir esta comunicación inalámbrica como solución resolvieron dos problemas: la superficie amplia a cubrir y el reducido consumo de energía de los equipos de geolocalización. De esta manera, los resultados obtenidos por los investigadores fueron la accesibilidad de los usuarios por medio de distintos dispositivos y el estudio de la información recopilada.

Otra de las comunicaciones inalámbricas utilizadas para IoT es LoRa, en (Zhiguo et al., 2020) proponen la construcción de una LPWAN basada en la tecnología LoRa para un parque científico agrícola en Ningxia, los investigadores diseñan la ubicación óptima en la cual se deben encontrar los sensores en un invernadero de luz solar con pared de ladrillo tradicional para medir la calidad de la señal, los autores obtienen en el invernadero una tasa de éxito del 100% de la comunicación de los datos entre el terminal y el nodo sensor, además en base a los experimentos indican que la distancia de cobertura de la red LoRa alcanza los 3km en las condiciones comunes en el parque científico. En el mismo contexto, los investigadores (Miles et al., 2020),

presentan un estudio del desempeño de la comunicación con LoRa orientado en una aplicación IoT para una granja, en el trabajo discuten distintos escenarios y utilizan Network Simulator 3, a su vez plantean un modelo matemático que predice la entrega exitosa de los datos para la tecnología de red LoRa, considerando la duración de la transmisión y el número de nodos; los autores validan los resultados en base a la simulación que realizan. De forma similar, en (Yim et al., 2018) indican cómo la configuración de PHY afecta la confiabilidad y la cobertura en una granja de árboles real, la vegetación también puede ser un obstáculo para el rendimiento de la red, por lo que los autores esperan que LoRa tenga un desempeño menor que en otros entornos, además, los autores señalan que el desempeño esperado de la red LoRa en varias áreas es verdaderamente aceptable.

El agua es un recurso esencial para el desarrollo de la agricultura, el sistema propuesto por (Navarro et al., 2015), en la aplicación de estrategias para mejorar el proceso de riego de agua, utilizó tecnologías de la información y comunicación que permitieron al usuario analizar los datos obtenidos por distintos sensores desde un dispositivo. La arquitectura se basa en varios nodos inalámbricos equipados con conectividad General Packet Radio Service (GPRS), los autores enfatizan en utilizar esta tecnología por su cobertura en comparación de cualquier otra tecnología móvil y porque la cantidad de datos recopilados en cada muestreo es menor que la velocidad de la tecnología, los nodos inalámbricos son totalmente autónomos, además, la información es enviada, procesada y almacenada en un servidor remoto, lo que permite una verificación y análisis de datos de forma sencilla. En (Sakthipriya, 2014) propone una tecnología de sensores inalámbricos que ayuden a la comunidad agrícola rural debido a que, emplean métodos tradicionales, los sensores miden humedad, pH del suelo y presión atmosférica; según el valor del sensor de humedad del suelo, la mota activa el rociador de agua durante el período de sequía, una vez que el suelo está

rociado con una cantidad agua necesaria el rociador de agua se apaga. La información es recogida por los sensores y enviada bajo el sistema de comunicación Short Message Service (SMS) usando un módem Global System for Mobile (GSM). Como resultado de la investigación el autor obtuvo el control automatizado de la aspersión de agua y el suministro final de información a los agricultores.

Por otro lado, la eficiencia energética es el requisito clave para cualquier aplicación IoT basada en sensores, las tecnologías de comunicación se utilizan tanto en aplicaciones interiores como exteriores (Mekki et al., 2018b), en (Singh et al., 2020) describen una evaluación del consumo de energía para las tecnologías inalámbricas LPWAN, los autores miden el consumo actual de las tecnologías NB-IoT, Sigfox, LoRa, DASH7, obteniendo la respectiva vida útil de la batería, de esa manera cuantifican el rendimiento energético de diferentes protocolos, en su estudio observan que DASH7 y LoRa tienen mayor eficiencia energética en comparación con NB-IoT y SigFox, además realizan un análisis sobre el consumo de energía en agricultura de precisión en un invernadero, lo que demuestra que la vida útil de la batería en aplicaciones reales se puede reducir. En (Shuker & Auday, 2016) presentaron un estudio de tecnologías inalámbricas para aplicaciones de IoT en términos de consumo de energía, para utilizar técnicas y módulos inalámbricos de baja potencia en aplicaciones de IoT mediante la introducción de una comparación entre diferentes técnicas de comunicación inalámbrica de baja potencia como ZigBee, Low Power Wi-Fi, 6LowPAN y sus módulos para conservar potencia y tiempo de vida para los sensores de red de IoT. La investigación se encuentra enfocado al consumo energético del protocolo utilizado, estos se clasifican según el rango de conectividad entre las motas sensoras, para una conectividad larga los investigadores señalan que LoRa es la adecuada. En los resultados indican la elección del módulo la cual juega un papel importante en la duración de la batería debido a la diferencia de consumo energético para cada protocolo.

En el mismo contexto, (Casals et al., 2017) detallan modelos analíticos para la caracterización del costo de energía en la entrega de datos, la vida útil y consumo de corriente del dispositivo final de LoRa. Los modelos se presentan en base a mediciones en una plataforma de hardware LoRa preexistente, de tal forma que cuantifican el impacto de los mecanismos y parámetros de la capa de acceso al medio (MAC), la capa física y la tasa de error de bits (BER), sobre el rendimiento energético. Los resultados de la investigación indican que una plataforma de dispositivo final LoRa configurada correctamente y alimentada por una batería de 2400 *mAh* puede alcanzar un año de vida útil mientras envía un mensaje cada cinco minutos en cambio teóricamente consideran una vida útil de seis años para envío de datos frecuentes. (Bouguera et al., 2018) describen un modelo de consumo de energía basado en LoRa, que evalúa la potencia consumida de cada componente del nodo sensor, esta tecnología proporciona tres clases de dispositivos diferentes que tienen un desempeño y consumo de energía distinto por lo que el modelo se utiliza para comparar diferentes modos de LoRa y encontrar el mejor diseño de nodo sensor para lograr su autonomía energética. En (Sultania et al., 2018) establecen un modelo de consumo de potencia para dispositivos NB-IoT que usan recepción discontinua extendida (eDRX) además de un modo de ahorro de energía (PSM), con un proceso de llegada de Poisson para transmisiones de datos de enlace ascendente y descendente. El modelo es comparado con los resultados de la simulación NS-3 de esta manera, analizan el consumo de energía de NB-IoT para distintos temporizadores PSM, eDRX y paquetes de tiempos entre llegadas (IAT) basados en el modelo. Los resultados del modelo y la simulación muestran que con una batería de 5 *Wh*, el dispositivo tiene una vida útil del dispositivo de más de 12 años.

En zonas de plantaciones se presentan problemas entre ellos los cambios climáticos, cantidad de agua utilizada en el sistema de riego y las plagas, causantes de pérdidas de entre veinte y cuarenta por ciento de la producción, es por esto que en

(Núñez et al., 2018) recalcan la necesidad de la aplicación de nuevas tecnologías para la mejora cualitativa y cuantitativa de la producción. La solución que proponen es un dispositivo llamado Smartnode encargado del monitoreo de variables climáticas, utiliza un microcontrolador ATmega2560 para la adquisición y tratado de los datos. Por otro lado, los autores seleccionaron dos protocolos de comunicación debido a las condiciones y acceso a las tecnologías en Latino América: Zigbee considerando como ventajas el bajo consumo de energía durante la inactividad del nodo, este únicamente se encargará del monitoreo utilizando un servidor local en zonas en la que no haya red móvil celular, así como también la red móvil celular en zonas en que esta se encuentre disponible mediante el uso de una tarjeta SIM y una tasa de envío de datos hacia la nube de treinta minutos. Como resultados se obtuvieron las siguientes características en la red: distancia entre el Gateway y el sensor de 0.5 Km, tasa de muestreo treinta minutos, consumo de energía activo igual a 160 mA y consumo en espera igual a 39 mA. Los autores utilizaron el algoritmo de estimación Kriging para el estudio del comportamiento de las variables, concluyeron que puede reducirse la brecha tecnológica en el campo mundial, en base en soluciones de bajo costo.

Problemas como el alto costo de los alimentos, así como también el crecimiento de la agricultura urbana en Latino América y la necesidad de asegurarse que los cultivos no contengan contaminantes y sean aptos para consumo humano se plantean en (Carrion et al., 2018), los autores se enfocan en la agricultura relacionada a las hortalizas, específicamente la lechuga, esta tiene rangos de temperatura y humedad de suelo que ayudan a su crecimiento, como solución se propuso un sistema de seguimiento de variables climáticas y de control de riego para el campus de la Universidad Politécnica Salesiana, su sistema se basa en un dispositivo encargado del monitoreo de variables climáticas, procesamiento de señales, transmisión y visualización de datos, para el monitoreo los datos se tomaron cada tres horas durante

el día y cada seis horas durante la noche. Para el procesamiento y adquisición de datos se utilizó una placa Arduino, por otro lado, para la transmisión de datos se utilizó un módulo ESP8266-01 basado en el protocolo TCP/IP. Como resultados en cuanto a la transmisión se logró una comunicación exitosa entre los dispositivos y la nube para posteriormente almacenar todo en una base de datos en MySQL, además, se redujo el consumo de energía y agua en la plantación, contribuyendo a la sustentabilidad medio ambiental.

Por otro lado, en (Sahitya et al., 2017) tienen como problema la falta de eficiencia utilizando las técnicas de agricultura tradicionales, para lo cual se diseñó una red de sensores que utiliza la tecnología ZigBee que opera en climas extremos o condiciones ambientales. Los autores detallan los requisitos que la red de sensores debe cumplir para poder ser utilizados en la agricultura, entre estos tenemos: no debe afectar el método de cultivo y fertilización manual, deben tener eficiencia energética, la tasa de pérdida de paquetes debe ser pequeña y debe existir interoperabilidad entre la tecnología de la red y otras tecnologías. Para la adquisición de datos se usó una placa Arduino y para la transmisión módulos XBee Pro S2B con una tasa de 9600 baudios, se utilizaron seis nodos y un coordinador. Como resultados se logró la adquisición de datos correctamente, además, se tiene como trabajos futuros la expansión de la red con el objetivo de implementar nuevos servicios en el monitoreo, también se comenta que la correcta ubicación de los nodos influye directamente en la eficiencia de la transmisión de datos.

Un sistema de censado inalámbrico, flexible y simple que pueda ser utilizado en cualquier entorno, y que, además, pueda capturar la información y analizarla en una central se plantea en (Oliveira et al., 2017). Lo antes mencionado debido a que según la ONU en el año 2030 gran parte del planeta estará desertificado generando gran importancia en la agricultura de precisión reduciendo el impacto generado en el medio

ambiente. Los autores utilizaron la tecnología de comunicación inalámbrica Zigbee debido a su seguridad de comunicación y a que está pensado para ser usado en el desarrollo de aplicaciones sensoras y de control. Utilizaron módulos Xbee Series 2, los cuales operan en la banda de frecuencia ISM, debido a que estos cumplen los requisitos de la red inalámbrica de bajo costo y bajo consumo, como placa de adquisición se utilizó un modelo Arduino. Cabe recalcar que nos indican que, en las pruebas realizadas durante cuatro semanas, los datos tomados por los sensores fueron guardados en una tarjeta SD, para posteriormente obtener su curva mediante Excel. Se observan entre otras cosas los cambios que tuvo la humedad del suelo y cómo esta se ve afectada cuando el sistema de riego se activa. En el caso de la temperatura, el comportamiento del sensor DS18B20 utilizado fue el correcto tomando medidas cada quince minutos. Como conclusiones en cuanto al funcionamiento del sistema sensor mencionan que fue correcto, aunque sí se presentaron pérdidas de paquetes, teniendo una eficiencia del 94.79% en el peor de los casos, además, la distancia máxima obtenida sin el uso de router fue de cincuenta y cinco metros a diferencia de la de setenta metros obtenida cuando sí lo usaron.

Un trabajo similar se plantea en (Pascual et al., 2015), su objetivo era monitorear dos tipos de sembríos: en ambiente controlado y en ambiente natural, mediante el uso de una red de sensores inalámbricos se tomaron datos utilizando los módulos Xbee basados en el protocolo de comunicación Zigbee, por último, los datos colectados se interpretaron utilizando MATLAB. El sistema desplegado consta de tres puntos, uno en el ambiente controlado y los otros dos en el ambiente natural, uno de estos monitoreado y otro no. El dispositivo en el ambiente controlado consta de un sensor de temperatura y humedad ambiental, además de uno de humedad del suelo, todos conectados a un dispositivo XBee Pro S2B y un Arduino Uno. Para la toma de datos se tomó una tasa de

muestreo de una hora, haciendo posible el control de las variables consiguiendo un entorno idóneo para el cultivo de papas dulces.

Por otro lado, (Deepa et al., 2020) mencionan de los sistemas IoT en la toma de decisiones en el ciclo de agricultura minimizando el esfuerzo manual y el costo monetario. Los autores definen un nodo como un dispositivo final, además, las redes pueden estar conectadas en topologías tipo malla (Zigbee, Bluetooth), tipo estrella (WiFi, LoRaWan), tipo anillo, tipo árbol. Se eligió un dispositivo final llamado Node MCU ESP-12, el cual consta de GPIO, ADC, UART, SPI y comunicación WiFi, además de tener un consumo bajo de energía. Los sensores elegidos para la medición fueron un LDR, LM35, DHT11 y un sensor para humedad del suelo, como resultados se obtuvieron curvas que representaban las variables a observar y se concluyó que el uso de los sensores y el Node MCU ESP-12 es una manera eficiente de crear un sistema de monitoreo y control automático.

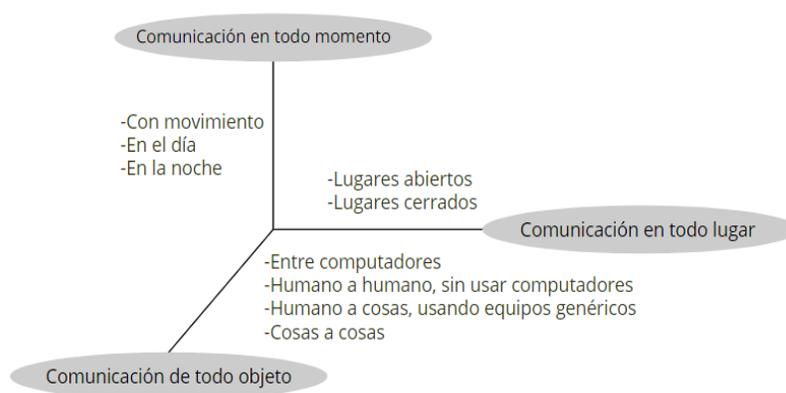
Internet de las Cosas

El término Internet de las Cosas del inglés Internet of Things (IoT) fue utilizado por primera vez por Kevin Ashton en una presentación para la multinacional Procter & Gamble, tenía el deseo de hacer una introducción de la tecnología Identificación por Radiofrecuencia del inglés Radio Frequency Identification (RFID) en 1999 (Ashton, 2009), actualmente ha tomado gran relevancia, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) (ITU-T, 2012) lo define como “Infraestructura mundial para la sociedad de la información que propicia la prestación de servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales)”, además, es posible juntar los conceptos de las palabras sensores, identificadores, software y conectividad de Internet para definir a esta tecnología como “ IoT es la red de cosas, con identificación de elementos clara, embebido con inteligencia de software, sensores, y conectividad a internet ubicua” (Rayaes & Salam, 2019).

En general se puede entender Internet de las Cosas como la interconexión de dispositivos mediante tecnologías que utilicen medios tanto guiados como no guiados, con el objetivo de que exista una compartición de datos entre dichos dispositivos y el usuario final, logrando así que este pueda brindar un tratamiento para su posterior interpretación. Esta tecnología agrega una dimensión al ya existente paradigma de las Tecnologías de la Comunicación, teniendo los siguientes como pilares fundamentales: “Comunicación en cualquier momento”, “Comunicación en cualquier lugar” y “Comunicación de cualquier cosa” (ITU-T, 2012), como se representa gráficamente en la Figura 1 .

Figura 1

Dimensiones de las Tecnologías de la Comunicación



Nota. El gráfico representa las tres dimensiones de las Tecnologías de la Comunicación incluyendo la creada por el IoT.

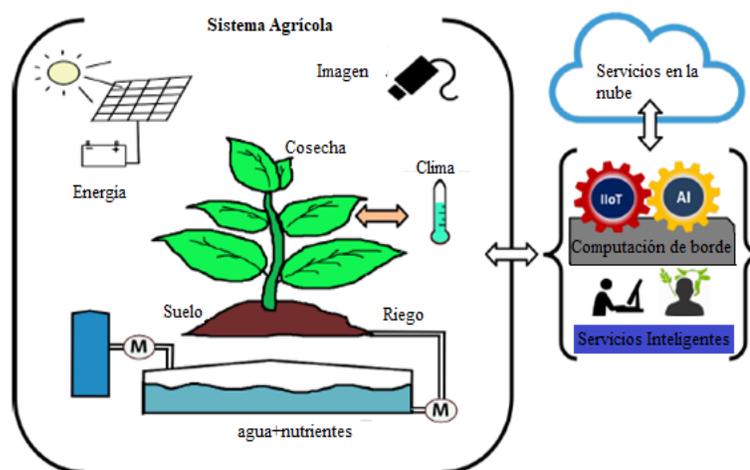
Agricultura de precisión

La agricultura de precisión (AP) implica la adquisición y el procesamiento de una gran cantidad de datos proporcionados por sensores de IoT, se enfoca en la gestión agrícola empleando teledetección, tecnologías de la información (TI) y recopilación de datos proximales para garantizar la rentabilidad, sostenibilidad y protección del ambiente de esta manera los cultivos y el suelo reciben exactamente lo que necesitan

para una salud y productividad óptima (Abhishek & Kaur, 2019) como se muestra en la Figura 2. Esta técnica permite un mayor control en el crecimiento de cultivos y el aislamiento de ganado al utilizar tecnología para monitorear los cultivos, la eficiencia se puede aumentar y los costos pueden disminuir, además admite al agricultor saber con precisión qué parámetros son necesarios para un cultivo. Esto requiere recopilar información masiva de distintas partes del campo, como los nutrientes del suelo, presencia de plagas, algunas condiciones climáticas, etc (Sadowski & Spachos, 2020).

Figura 2

Servicios aplicados a la Agricultura de Precisión



Nota. La figura muestra diseños de servicios inteligentes adaptados a la agricultura de precisión.

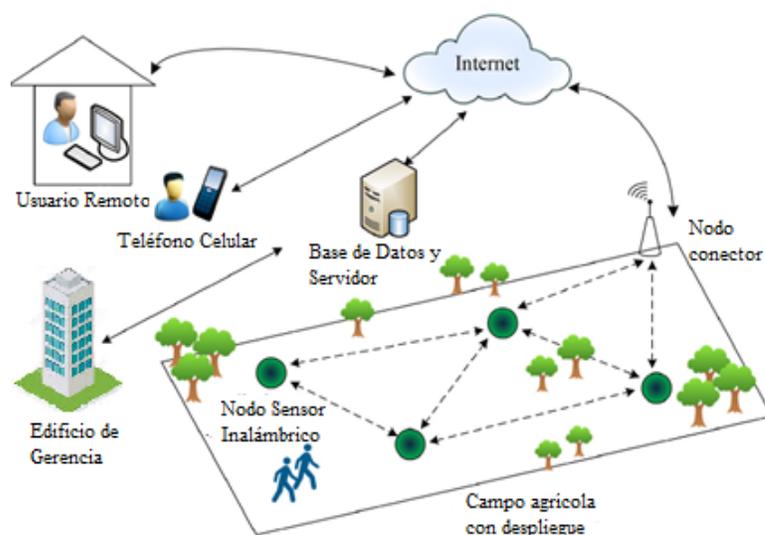
Red de sensores inalámbricos

Las redes de sensores inalámbricos del inglés Wireless Sensor Network (WSN) son un conjunto de una serie de sensores multipropósito de bajo consumo y costo interconectados en un entorno basado en comunicaciones inalámbricas de corta distancia (Ojha et al., 2015). Las WSN pueden reducir el esfuerzo y el tiempo necesarios para la supervisión del medio ambiente además permite diferentes topologías de red y de comunicación multisalto (Zulkifli & Noor, 2017). La red de

sensores ha contribuido a muchas áreas de aplicación en diversos campos como el militar, medicina, educación, sistemas de monitoreo y ha generado interés para desplegar la tecnología en el entorno agrícola, generalmente se implementan para servir a una aplicación en específico como detectar fenómenos físicos de temperatura, humedad, nivel de agua, humedad del suelo, etc (Kiani & Seyyedabbasi, 2018), la Figura 3 indica el concepto de monitoreo inalámbrico que se aplica en la agricultura.

Figura 3

Representación gráfica de una WSN



Nota. La figura muestra una red de sensores inalámbrica típica desplegada para aplicaciones agrícolas.

Redes de Área Amplia y Baja Potencia

También conocidas como LPWANs del inglés Low Power Wide Area Network, utilizan las bandas de frecuencias no licenciadas, se caracterizan por su comunicación de radio de largo alcance, bajo consumo energético, además del uso de topologías estrella, cada dispositivo final se conecta directamente a un nodo colector o Gateway, el cual realiza el empalme con la internet (Centaro et al., 2016). El largo alcance que se puede obtener con esta tecnología es gracias a su diseño de capa física permitiendo

sensibilidades en sus receptores, por otro lado, su tasa de datos baja lo hace ideal para ser usado en aplicaciones IoT (Patel & Won, 2017). Entre las tecnologías LPWAN que están ganando más aceptación se encuentran LoRa, Sigfox, NB-IOT y DASH7 (Chacko & Job, 2018). Entre las características más importantes de esta tecnología tenemos:

- Bajo consumo de energía, manteniendo los dispositivos “dormidos” hasta necesitar una transmisión, además, bajas potencias de Radiofrecuencia de salida.
- Despliegue económico, de ser posible evitar el uso de tarjetas módulo de identificación de abonado (SIM), fácil instalación y mantenimiento.
- Sistema robusto, incluyendo seguridad, de fácil geolocalización y con una modulación adecuada para evitar desvanecimientos (Bardyn et al., 2016).

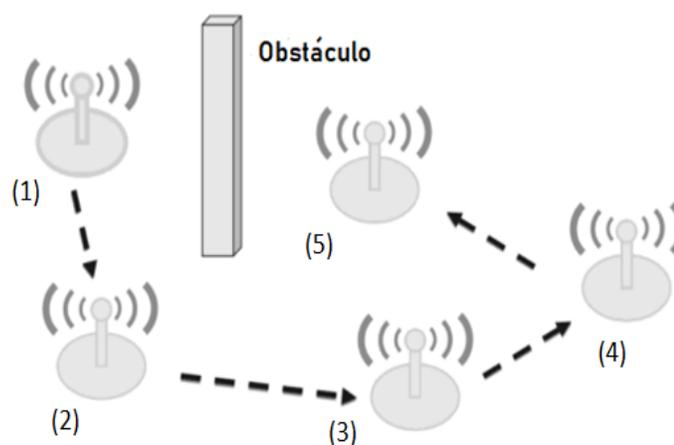
Sigfox

Sigfox es una empresa francesa fundada en 2010, que garantiza la cobertura de 72 países y regiones, conecta a 15,4 millones de dispositivos registrados y transmite alrededor de 15,4 millones de mensajes diariamente, asegurando una red IoT que conecta cerca de 1.100 millones de personas como se indica en la Figura 4. Se utiliza normalmente para desarrollar redes cuando, la cantidad de datos es baja en bytes o kilobytes, el área de operación es amplia y el consumo de energía bajo (Pitu & Gaitan, 2020). Sigfox opera en bandas de radio Industriales, Científicas y Médicas con su acrónimo en inglés (ISM) sin licencia y utiliza diferentes esquemas de modulación, es decir, codificación diferencial binaria por desplazamiento de fase (DBPSK) para el enlace ascendente y modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana (GFSK) para el enlace descendente, además admite la comunicación unidireccional y bidireccional mediante radio de banda ultra estrecha (UNB) (Singh et al., 2020). La red Sigfox se compone de dispositivos finales, estaciones base y el servidor, los sensores

Una de las ventajas de este protocolo es el uso de la topología tipo malla ya que esto permite un gran rango debido al multi salto, formación de red ad-hoc y enrutamiento automático. Como se observa en la Figura 5, mediante esta topología se evita obstáculos además de que se permite la difusión múltiple (Gislason, 2008).

Figura 5

Enrutamiento con topología de malla formado por nodos 1,2,3,4 y 5.



Nota. El gráfico representa el enrutamiento en topología de malla para la comunicación con obstáculos presentes entre los nodos 1,2,3,4 y 5.

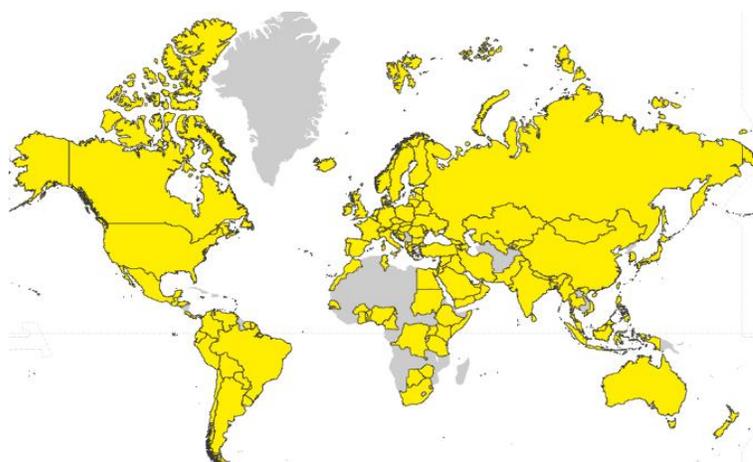
LoRa

Es desarrollado por la empresa LoRa Alliance en 2015 como una tecnología de comunicación LPWAN para proporcionar largo alcance, bajo costo y topología estrella de bajo consumo, garantiza la cobertura de 162 países como se muestra en la Figura 6; la arquitectura de red básica de un LoRaWAN se compone de tres elementos: dispositivos finales, puerta de enlace y un servidor de red. LoRaWAN genera seguridad en base a la incorporación de cifrado de extremo a extremo empleando la red y la clave de aplicación para conservar la integridad de los datos (Singh et al., 2020). LoRa es una tecnología de capa física que modula la señales en bandas ISM sin licencia sub-GHz, es decir, 433 MHz en Asia, 868 MHz en Europa y 915 MHz en Norteamérica. La

comunicación bidireccional es proporcionada por la modulación Chirp Spread Spectrum (CSS) que extiende una señal de banda estrecha sobre un ancho de banda de canal más amplio, la señal que se obtiene presenta bajos niveles de ruido, lo que permite una alta resistencia a la interferencia (Mekki et al., 2018a).

Figura 6

Presencia de la red Lora por países



Nota. La figura indica la presencia de la red LoRa a nivel mundial. Tomado de (Alliance, 2021). Obtenido de: <https://lora-alliance.org/>

Narrow-Band IoT

Un estudio de Proyecto de asociación de tercera generación del inglés 3rd Generation Partnership Project (3GPP) llamado “Soporte de sistema celular para ultra-baja complejidad e Internet de las Cosas de bajo rendimiento” propuso esta tecnología de radio de banda angosta y se lo integró a los estándares de Long Term Evolution (LTE) así como también en una categoría estándar para equipamiento de usuario denominada Cat-NB1 (Días & Merino, 2017). NB-IoT puede trabajar en tres modos: independiente como portadora dedicada utilizando un bloque de recursos de LTE en 180 KHz, en banda dentro del ancho de banda ocupado de una portadora LTE de banda ancha utilizando un canal de GSM en 200 KHz, y dentro de la banda de guarda

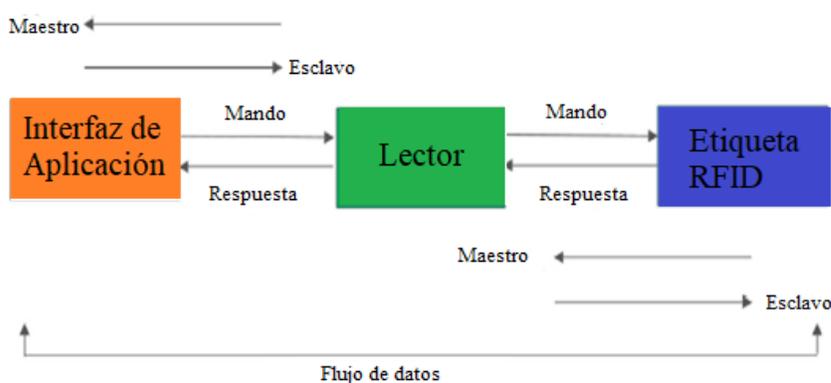
de un operador LTE existente utilizando los mismos recursos que el modo independiente (Ratasuk et al., 2016). En cuanto a una breve revisión a las posibilidades que brinda esta tecnología se tiene la capacidad de tener conexiones masivas con bajas latencias debido a su tasa baja de transmisión para cada usuario, uso de ancho de banda de 180 KHz, bajo consumo de energía haciendo uso de modos de ahorro de batería, gran rango de cobertura, limitación a modulaciones mayores a la modulación por desplazamiento cuadrifásico (QPSK), además de baja congestión de la red debido a su uso de bandas licenciadas (Popli et al., 2018).

Identificación de frecuencia de radio (RFID)

Es una de las tecnologías de identificación automática para distintos objetos, se encuentra compuesto por: etiquetas, lector y una computadora principal; posee la capacidad de monitorizar la posición de los objetos etiquetados en tiempo real sin la necesidad de estar en línea de vista (Zulkifli & Noor, 2017). La etiqueta es un microchip combinado con una antena como un solo paquete compacto, esta antena capta señales de un lector y luego devuelve la señal con algunos datos informativos adicionales (Abhishek & Kaur, 2019). Además, tiene dos tecnologías para el sistema de etiquetas, la primera es de lector activo las cuales utilizan mayor batería y altas frecuencias, el otro es la de lector pasivo que presentan poca potencia (Shafi et al., 2019). RFID hace uso de campos electromagnéticos de radiofrecuencia para transferir datos asociados a un objeto como se muestra en la Figura 7. Algunas aplicaciones de IoT que utilizan esta tecnología incluyen compras inteligentes, atención médica, seguridad nacional y aplicaciones agrícolas.

Figura 7

Representación gráfica del funcionamiento de RFID



Nota. La figura indica la transferencia de datos de RFID asociado a un objeto.

Wireless Fidelity

También conocido como WiFi, es una tecnología inalámbrica de corto alcance basada en los protocolos IEEE 802.11x, mundialmente utilizada en lugares como hogares, oficinas, aeropuertos, etc. Utiliza las bandas no licenciadas de 2.4 y 5 GHz (Song & Issac, 2014). La arquitectura de las redes que utilizan esta tecnología requiere de puntos de acceso para la conectividad y la transferencia de datos, además, uno o varios clientes, la comunicación se logra mediante radiodifusión o mediante paquetes denominados beacons, señales de radio brindan la conectividad. Su rango de cobertura varía según el entorno, para lugares abiertos se pueden alcanzar hasta 300 m, por otro lado, en lugares cerrados se alcanza entre 45 y 90 m. Los esquemas de Calidad de Servicio (QoS por sus siglas en inglés) de esta tecnología se incorporaron posteriormente ya que su versión inicial no contaba con ellos (Kaushik, 2012).

Bluetooth

Se basa en el estándar IEEE 802.15.1, es una tecnología inalámbrica de baja potencia baja, y costo adecuado para transmisión de datos entre dispositivos móviles en un corto rango aproximadamente de 8 a 10 m. El estándar Bluetooth define una

comunicación de red de área personal (PAN), opera en la banda de frecuencia de 2,4 GHz de la banda ISM. La velocidad de datos alcanzada en varias versiones Bluetooth varía de 1 Mb/s a 24 Mb/s (Ray, 2017). Las ventajas de esta tecnología son su naturaleza omnipresente y disponibilidad en la mayoría de los dispositivos móviles, por lo que Bluetooth es adecuado para uso en aplicaciones agrícolas de varios niveles como la información meteorológica, la humedad del suelo, la posición de los aspersores, etc (Mahmood et al., 2017).

Redes móviles celulares

Es una tecnología inalámbrica que ha tomado gran importancia desde su creación a finales de la década de los setenta, siendo una fundamental para la sociedad en general, así como también en el ámbito económico. Una red móvil celular tiene como componentes básicos las estaciones base encargadas de dar cobertura a un espacio físico denominado celda, brindando comunicación entre equipos terminales mediante el uso de ondas de radio (Brito, 2019).

Las características relacionadas a una red celular dependen de la generación con la que esté implementada, se tienen:

- Primera Generación (1G): estrictamente para transmisión de voz y además analógica, con velocidades cercanas a 2400 baudios, utilizaba Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA) como técnica de acceso al medio, carecía de seguridad.
- Segunda Generación (2G): tecnología digital, el más utilizado fue GSM implementaron velocidades más altas cercanas a 56 kbps para transmisión de voz y se empezó a transmitir datos con limitaciones, ya se ofrecía SMS.

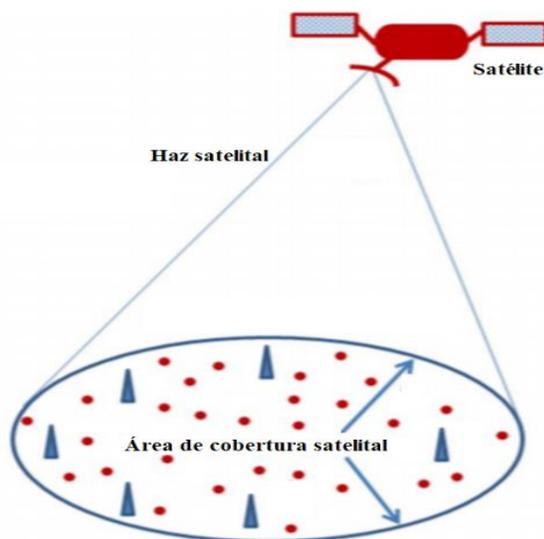
- Generación 2.5G: tecnología ligeramente más rápida que 2G, prestaba Servicio General de Paquetes Vía Radio (GPRS), Velocidades de Datos Mejoradas para la Evolución Global (EDGE), entre otros.
- Tercera Generación (3G): tecnología también conocida como Sistema de Telefonía Móvil Universal (UMTS), capaz de soportar servicios de voz, mensajería, mensajería multimedia (MMS), acceso a Internet, video y recepción de televisión. Alcanza velocidades de transferencia de datos cercanas a 384 Kbps utilizando Acceso Múltiple por División de Código (CDMA) como técnicas de acceso al medio. Implementan como seguridad el cifrado por bloques KASUMI (Rojas, 2009).
- Cuarta Generación (4G): también conocido como LTE, es una tecnología de radio estandarizada por la 3GPP en el Release 8. Presentan alta capacidad de transferencia de datos cercana a 150 Mbps en enlace de bajada y 50 Mbps en el enlace de subida, además, baja latencia, utiliza Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) como técnica de acceso al medio (Jaramillo, 2015).

IoT Satelital

Es una tecnología que provee conectividad a grandes áreas alcanzando casi el 100% de superficie de la tierra con tasas de transmisión de datos bajas (Sohraby et al., 2017), es utilizada en casos de monitorización en lugares alejados de la población mediante la utilización de nodos de comunicación remota, estos sistemas tienen una disposición similar a la de la Figura 8, en donde se representa el área de cobertura con una circunferencia, los puntos de emisión y transmisión hacia el satélite con triángulos y los dispositivos sensores con puntos rojos (Routray & Hussein, 2019).

Figura 8

Representación gráfica de IoT Satelital



Nota. La figura indica los componentes de la Red IoT Satelital.

Entre las áreas de desarrollo de esta tecnología se encuentran constelaciones de satélites de Baja Órbita Terrestre y de Media Órbita Terrestre, LEO y MEO por sus siglas en inglés respectivamente, los cuales planean desplegar una generación que permita alcanzar tasas de transmisión mejoradas y reducción de latencias, entre estas se encuentran las producidas por la compañía SpaceX (Sohraby et al., 2017). En el mercado se encuentran dos principales redes:

- Red global de satélites geoestacionarios Inmarsat: desplegados en la órbita estacionaria, tiene cobertura de hasta 70° en latitud Norte y Sur, incluyendo partes del Ártico y Regiones antárticas. Pueden alcanzar tasas de hasta 384 Kbit/s.
- Red global de satélites no-geoestacionarios Iridium: Puede alcanzar tasas de hasta 128 Kbit/s mediante el uso de mensajes cortos y baja potencia de consumo. Brinda cobertura terrestre completa siendo buena opción para minería

en regiones del Ártico. Para su uso es necesario un punto de acceso LoRa-Iridium (Lysogor et al., 2018).

Proceso de jerarquía analítica

Conocido en inglés como Analytic Hierarchy Process con su acrónimo (AHP), fue diseñado por Thomas Saaty en 1976 para ayudar a las personas a solventar e incorporar aspectos intangibles y cuantitativos de un problema complejo. Es un medio para modelar problemas no estructurados en el ámbito económico, social, administrativo y tecnológico. Se aplica en una amplia variedad de toma de decisiones multiobjetivo, multicriterio y multifactorial con o sin certeza sobre cualquier número de alternativas (Gerdria & Kocaoglu, 2007). En el campo de gestión tecnológica, se han ejecutado varios estudios sobre la aplicación del enfoque AHP a la evaluación de tecnologías como: la elección tecnológica en los países menos desarrollados, enfoque de jerarquía, el proceso de jerarquía analítica para la elección de tecnologías de comunicación, entre otras (Keçeci et al., 2019).

Temperatura de la Sierra Ecuatoriana

En el Ecuador debido a la existencia de factores como la cordillera de los Andes o los vientos presentes en llanuras y valles, se tienen presentes variaciones de temperatura con un promedio anual de entre 0 a 26 °C como se observa en la Figura 9 (Varela & Ron, 2018), específicamente en la Sierra Ecuatoriana, se tiene presentes los climas:

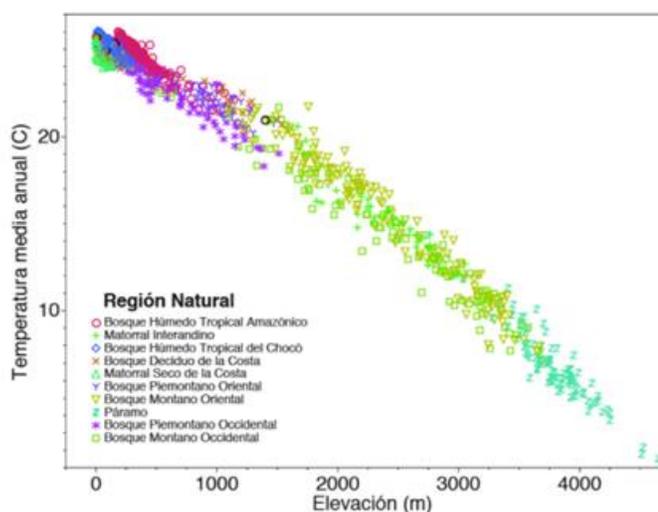
- Tropical andino: temperaturas comprendidas entre 20 y 25 °C, dentro de estas se encuentran todos los terrenos de altura hasta 1500 m.
- Subtropical andino: temperatura cerca a los 20 °C, comprende terrenos de entre 1500 m hasta 2500 m.

- Templado: temperatura cerca a los 17°C , comprende terrenos desde 2500 m hasta 3500 m.
- Frío: temperaturas de entre 1°C hasta 10°C , dentro se encuentran terrenos desde los 3500 m hasta 5650 m.
- Glacial: temperaturas inferiores a 0°C , comprende terrenos por encima de los 5650 m hasta los 6310 m.

Entonces, en la región Sierra la temperatura es inversamente proporcional a la altura de los terrenos, se presentan valores promedio de temperatura de entre 10°C y 16°C con picos máximos cercanos a 25°C en alturas comprendidas entre 1500 y 3000 m (Portilla, 2018).

Figura 9

Representación gráfica de la temperatura media anual de la Sierra ecuatoriana



Nota. La figura indica la temperatura media anual versus la elevación en el Ecuador en las diferentes regiones naturales. Tomado de (Varela & Ron, 2018).

Modelo de propagación de señales

El camino que debe seguir una señal desde el emisor hasta el transmisor se ve afectado por los obstáculos presentes tales como edificios, fallas geográficas o fauna, el

modelado de un canal de comunicaciones es un proceso basado en métodos estadísticos y matemáticos, por lo general se enfocan en predecir el nivel de potencia de recepción en función de la distancia existente desde el emisor antes de realizar el despliegue de un sistema real. Son una colección de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para la representación de características de las señales emitidas tomando en cuenta el ruido y las interferencias presentes en el entorno (Treviño, 2003). Los modelos de propagación se dividen en:

- Estocásticos: describen el comportamiento de la propagación de una señal en función de variables aleatorias.
- Empíricos: describen el comportamiento de la propagación de una señal en función de un modelo matemático.
- Determinísticos: describen el comportamiento de la propagación de una señal en función de leyes del electromagnetismo (Quintana et al., 2013).

Modelo de propagación por difracción REC. UIT-R P.526

La recomendación de la UIT presenta modelos basados en el efecto de la difracción en la intensidad de campo recibida, con la capacidad de ser utilizados en presencia de obstáculos utilizando formas geométricas tipo arista en filo de cuchilla y redondea (UIT, 2011). El modelo UIT-R P.526 se utiliza para determinar los niveles de intensidad de las ondas, tomando en cuenta los siguientes parámetros: ángulo de difracción propagadas en dirección de los picos de los obstáculos, transmisión sin línea de vista (Gaona et al., 2020). Se diferencian los tipos de terreno en los que se realiza la transmisión obteniéndose terreno liso, obstáculos aislados y terreno ondulante, todos estos en función del tamaño de las irregularidades.

En el presente estudio se utiliza la característica de obstáculos con geometría arista en filo de cuchillo, esta utiliza un parámetro adimensional denotado con la letra “ v ” para contener los parámetros geométricos como se indica en la ecuación 1:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (1)$$

donde:

- h : es la altura máxima del obstáculo sobre una recta que une los puntos entre el emisor y el receptor, puede tomar valores positivos y negativos.
- d_1 y d_2 : distancia trazada entre la altura máxima del obstáculo y el emisor y receptor respectivamente.
- λ : longitud de onda representada en metros (UIT, 2011).

Entonces, la pérdida provocada por la presencia de obstáculos denominada $J(v)$, se calcula mediante la ecuación 2:

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) [dB] \quad (2)$$

Equipos Patrones

Con la finalidad de asegurar la calidad de los datos adquiridos los sensores se ajustan contrastándolos con los siguientes equipos patrones.

Medidor de temperatura y humedad Fluke 971

Es un equipo medidor de temperatura y humedad como se indica en la Figura 10, brinda lecturas precisas de las variables, además es una herramienta para el personal de mantenimiento y los técnicos de instalaciones, cuenta con una autonomía de 200 h, el rango de medición de temperatura es de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una exactitud de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el de humedad es de 5 % a 95 % con una exactitud de $\pm 2.5\text{ }%$ de humedad relativa, el tiempo de respuesta del equipo es de 500 ms.

Figura 10

Equipo Fluke 971



Nota. La figura indica el equipo patrón medidor de temperatura y humedad Fluke 971.

Medidor de Radiación UV General UV513AB

Es un equipo medidor de Radiación UV como se observa en la Figura 11 apto para aplicaciones que necesitan de esterilización UV, monitoreo ambiental, fabricación de semiconductores y control de procesos industriales, posee dos rangos de medición $1 \mu W/cm^2$ o $0.01 mW/cm^2$ con una precisión de $\pm 4\%$ de lectura y un tiempo de muestreo de 0.3 s, trabaja en el rango espectral de 280 a 400 nm.

Figura 11

Equipo General UV513AB



Nota. La figura presenta el equipo patrón medidor de luz UV General UV513AB.

Medidor de Luz Reed SD-1128

Es un equipo medidor de luz como se muestra en la Figura 12, tiene un rango de medición de hasta 100, 000 Lux, presenta frecuencias de muestreo seleccionables de 1 a 3600 s, cuenta con una precisión de $\pm 4\%$ Lux además, el dispositivo tiene un tiempo de respuesta menor a 1 s. Se utiliza en aplicaciones de fotografía y cinematografía, monitoreo ambiental, instalaciones de sistemas de iluminación, aplicaciones industriales, entre otros.

Figura 12

Equipo Reed SD-1128



Nota. La figura presenta el equipo patrón medidor de luz Reed SD-1128.

Medidor de Humedad de suelo Dr. Meter

Es un equipo medidor de humedad de suelo como se indica en la Figura 13, adecuado para leer niveles de humedad en jardines, tierra, césped, entre otros. El sistema de lectura de este dispositivo cuenta con código de colores y escalas del 1 al 10 para diferenciar el estado del suelo como puede ser seco y húmedo, no necesita de baterías ni electricidad.

Figura 13

Equipo Dr. Meter



Nota. La figura presenta el equipo patrón medidor de humedad de suelo Dr. Meter.

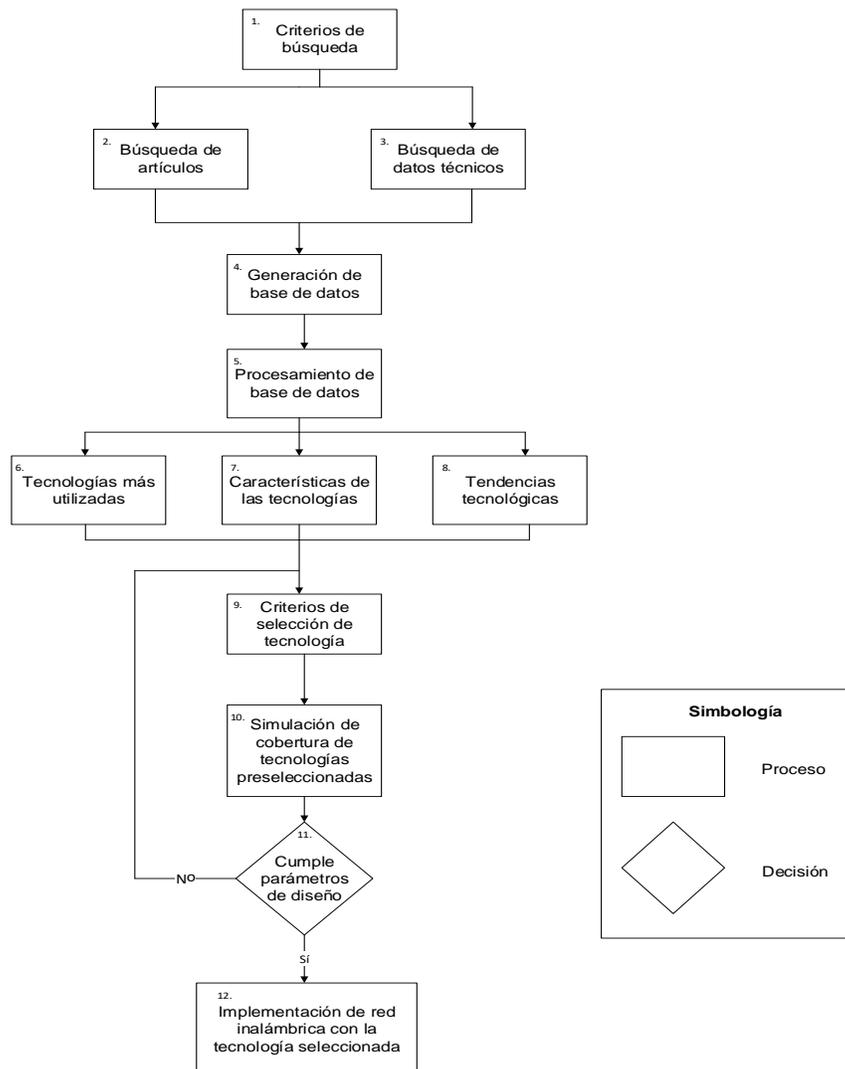
Capítulo III

Materiales y Métodos

El estudio se basa en describir cuatro características principales, el estado del arte de comunicaciones implementadas en nodos sensores para zonas agrícolas, diseño experimental de tecnologías de comunicación inalámbrica mediante simuladores, selección de tecnologías inalámbricas e implementación de una red inalámbrica, la Figura 14, detalla de manera general la metodología realizada en el presente proyecto.

Figura 14

Diagrama de flujo de la metodología utilizada en el proyecto de investigación.



Nota. (Autores, 2021).

Considerando la Figura 14 se describe a continuación los procesos realizados para la metodología.

1. Mediante el nexo de las principales palabras claves enfocadas a las tecnologías inalámbricas para IoT aplicadas en la agricultura, se definieron las siguientes cadenas de búsqueda: *IoT+Agricultura*, *IoT+Agricultura+America*, *IoT+Agricultura+Ecuador* para abarcar por completo las tendencias a nivel mundial, continental y local del tema de estudio.
2. Se realizó la indagación de artículos utilizando las cadenas de búsqueda en las bases de datos científicas Google Académico, IEEE Xplore, Scopus, Springer.
3. Se recopiló las especificaciones técnicas de las tecnologías de comunicación inalámbrica brindadas por los fabricantes o desarrolladores.
4. Se generó una base de datos con los artículos científicos obtenidos en el apartado 2 y las especificaciones técnicas tomadas del apartado 3.
5. Se realizó la revisión de datos técnicos y el análisis bibliométrico con la herramienta de visualización VOSviewer (Leiden, 2021) de la cual se obtienen los resultados de búsqueda de palabras clave a nivel mundial, continental y local de los artículos, de igual manera se identifican los países que presentan mayor cantidad de estudios de IoT para la agricultura.
6. En base a los resultados del apartado 5, se determinó las tecnologías de comunicación inalámbrica más utilizadas a nivel mundial, continental y local.
7. Se extrajeron las características principales de las tecnologías de comunicación inalámbrica en función de la revisión de datos técnicos del apartado 5, que son el objetivo del análisis comparativo de este proyecto de investigación.
8. Se identificó las tendencias tecnológicas de las comunicaciones inalámbricas en zonas agrícolas en base al apartado 5.

9. En base a los apartados 6, 7, 8 y los requerimientos del caso de estudio se definió criterios de selección de la tecnología de comunicación inalámbrica a ser implementada en zonas agrícolas de las provincias de Cotopaxi y Tungurahua.
10. Mediante la utilización del software Xirio Online se obtuvo las simulaciones de cobertura radioeléctrica de las tecnologías de comunicación inalámbrica preseleccionadas.
11. Se evaluó las tecnologías en base a los resultados del apartado 10 y los parámetros del punto 9 y se seleccionó la tecnología de mejor prestación para el caso de estudio.
12. Se implementó la tecnología de comunicación inalámbrica en zonas agrícolas de las provincias de Cotopaxi y Tungurahua, además, se presentan los resultados obtenidos.

Para el trabajo de investigación se utilizaron varios materiales y métodos que se describen a continuación:

Visual Studio Code

Visual Studio Code es un editor de código abierto disponible para sistemas operativos Windows, macOS y Linux. El editor tiene soporte para desarrollo en varios lenguajes de programación tales como Python o C++, entre otros, además de poseer herramientas para desarrollo web. Una de las funcionalidades más potentes es la libertad de agregar extensiones independientes al sistema (Kahlert & Giza, 2016). En el presente trabajo se utilizó la extensión desarrollada por el fabricante de la placa Lopy de Pycom llamado Pymakr la cual permite la programación del dispositivo en lenguaje MicroPython.

Pycom

Pycom es una organización dedicada a brindar soluciones de IoT, conectando cosas y personas de manera eficiente, simple y rápida. Su gestión está encabezada por un equipo dinámico y multicultural de expertos en telecomunicaciones y electrónica de consumo, cuentan con socios como Texas Instruments, LoRa Alliance y Sigfox.

Tipos de placas de Pycom

Pycom cuenta con diversas placas de desarrollo con características diferentes, además de placas de expansión que agregan distintas funcionalidades a las antes mencionadas. Las placas de desarrollo disponibles son:

- Wipy 3.0: Placa de desarrollo basado en el lenguaje de programación MicroPython que permite conectividad mediante Wifi y Bluetooth, cuenta con un chipset ESP32 y procesador dual (Pycom, 2018e).
- Sipy: Placa de desarrollo basado en el lenguaje de programación MicroPython que permite conectividad mediante Sigfox, Wifi de 1 Km de rango y BLE, cuenta con un chipset ESP32 y procesador dual (Pycom, 2018d).
- Lopy4: Placa de desarrollo basado en el lenguaje de programación MicroPython que permite conectividad mediante cuatro diferentes tecnologías: LoRa, Sigfox disponible en frecuencias para las zonas RC1, RC2, RC3, RC4, Wifi y Bluetooth, cuenta con un chipset ESP32 y procesador dual. Puede actuar como puerta de acceso para una red LoRa además de necesitar de ultra baja potencia para su funcionamiento (Pycom, 2018c).
- Fipy: Placa de desarrollo basado en el lenguaje de programación MicroPython que permite conectividad mediante Sigfox, LoRa, WiFi, BLE y red celular LTE, además, cuenta con un chipset ESP32 y procesador dual. Puede ser

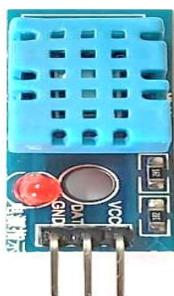
configurado como puerta de acceso en una red LoRa y su consumo de energía para funcionar es bajo (Pycom, 2018a).

Sensor de Temperatura y Humedad

El sensor de temperatura y humedad modelo DHT11 mostrado en la Figura 15, cuenta con una señal de salida digital calibrada. Mediante el uso de la exclusiva adquisición de señales digitales, garantiza una alta confiabilidad y excelente estabilidad a largo plazo. Incluye una medición de humedad de tipo resistivo y un componente de medición de temperatura NTC (Electronics, 2012). Respecto al hardware, es necesario conectar el pin VCC de alimentación a 3 - 5 V, el pin GND a 0 V y el pin de datos a un pin digital de la tarjeta con la que se tome la información. Por otro lado, el rango de medición de temperatura es de 0 a 50 °C con una precisión de ± 2 °C, en cambio para la humedad el rango de medición es de 20% a 90% humedad relativa (RH) con una precisión de 5% RH.

Figura 15

Sensor DHT11



Nota. La gráfica presenta el sensor de temperatura y humedad DHT11.

Sensor de luz digital

El sensor de luz digital modelo BH1750 mostrado en la Figura 16, es compatible con cualquier microcontrolador que soporte comunicaciones I2C, utilizado para obtener datos sobre la luz ambiental de alta resolución de entre 1 y 65535 Lux. Entre sus

características principales está el bajo consumo de corriente de $120 \mu A$ y su voltaje de operación de 3 V, además, su variación de medida del 20% (ROHM, 2009).

Figura 16

Sensor BH1750



Nota. La gráfica presenta el sensor de luz digital BH1750.

Sensor de luz Ultra Violeta (UV)

El módulo ML8511 que se muestra en la Figura 17, es un sensor adecuado para medir la intensidad UV en lugares internos o externos, contiene un amplificador interno que convierte la fotocorriente en tensión de esta manera, entrega la señal analógica que depende de la cantidad de luz UV medida en (mW/cm^2) (LAPIS, 2013), el sensor detecta luz con longitudes de onda que varían entre 280-390 nm cubriendo así los espectros UV-A y UV-B. El voltaje de operación del módulo es de 5 VDC y posee un consumo muy bajo de energía.

Figura 17

Sensor ML8511



Nota. La gráfica presenta el sensor de luz ultra violeta ML8511.

Sensor de humedad de suelo

El sensor de humedad del suelo modelo HD-38 consiste en dos terminales de material conductor anticorrosivo como se indica en la Figura 18, este dispositivo coloca un voltaje entre dichas terminales haciendo que estas conduzcan una corriente eléctrica en función de la humedad del suelo, se utiliza un módulo que se encarga del tratamiento de datos para obtener una señal análoga o digital (Bravo, 2017). Entre sus características se tiene:

- Voltaje de alimentación entre 3.3 y 5 V.
- Voltaje de salida 0 y 4.2 V
- Consumo de corriente 35 mA.
- Capacidad de obtener una salida análoga o digital.

Figura 18

Sensor HD-38



Nota. La gráfica presenta el sensor de humedad de suelo HD-38.

Lenguajes De Programación Seleccionados Para El Desarrollo

Para la implementación del sistema de monitorización para zonas agrícolas se seleccionó Python como lenguaje de programación para el senso de los datos de

temperatura, humedad, radiación UV, luminosidad y humedad del suelo del nodo sensor.

Python

Python fue desarrollado por Guido van Rossum, un programador nacido en Holanda a finales de los años 80 cuando trabajaba en el sistema operativo Amoeba. Principalmente se crea para el manejo de excepciones y tener interfaces con Amoeba como heredero del lenguaje ABC. En el año 2000 lanzan Python 2.0 con nuevas funcionalidades como completo soporte a Unicode, el Python 3.0 llega en diciembre del 2008, es una versión mejorada y no es compatible con las anteriores en varios aspectos, algunas de las características introducidas en la versión 3 fueron compatibilizadas en la versión anterior para que la transición sea más simple entre estas (Challenger et al., 2014). Python es un lenguaje de programación múltiple paradigma, es decir la programación estructurada y la orientada a objetos son compatibles, y varias de las características que presenta permiten la programación funcional.

Por otro lado, Python tiene la capacidad de la reutilización de códigos escritos en C / C++, en base a mecanismos de envolver funciones y clases realizadas en los lenguajes de programación anteriormente mencionados, además contiene una licencia propia denominada Python License que certifica que es de código abierto, lo que quiere decir que se pueden realizar programas para ser distribuidos libremente sin tener que entregar el código fuente, es así que Python puede usarse en software libre como en privativo. En consecuencia, cuenta con herramientas que hacen más productivo el trabajo como son implementaciones, entornos de desarrollo integrado, servidores de aplicaciones entre otros (Van Rossum, 2007).

Método Bland Altman

Este método estadístico tiene como objetivo determinar si las medidas obtenidas mediante dos diferentes sistemas se relacionan lo suficientemente como para aplicar intercambiabilidad y concordancia, se basa en el cálculo de la diferencia entre las medidas a estudiar, posteriormente obteniendo una media de las diferencias, además, se toma en cuenta la desviación estándar de todas las medidas fluctuantes alrededor de dicha media. Si las medidas se encuentran dentro del límite de concordancia formado por las desviaciones estándar, se concluye que los métodos de obtención de las mismas son correctos y pueden ser intercambiables (Srinivas et al., 2000).

Capítulo IV

Desarrollo y Pruebas

Análisis Bibliométrico

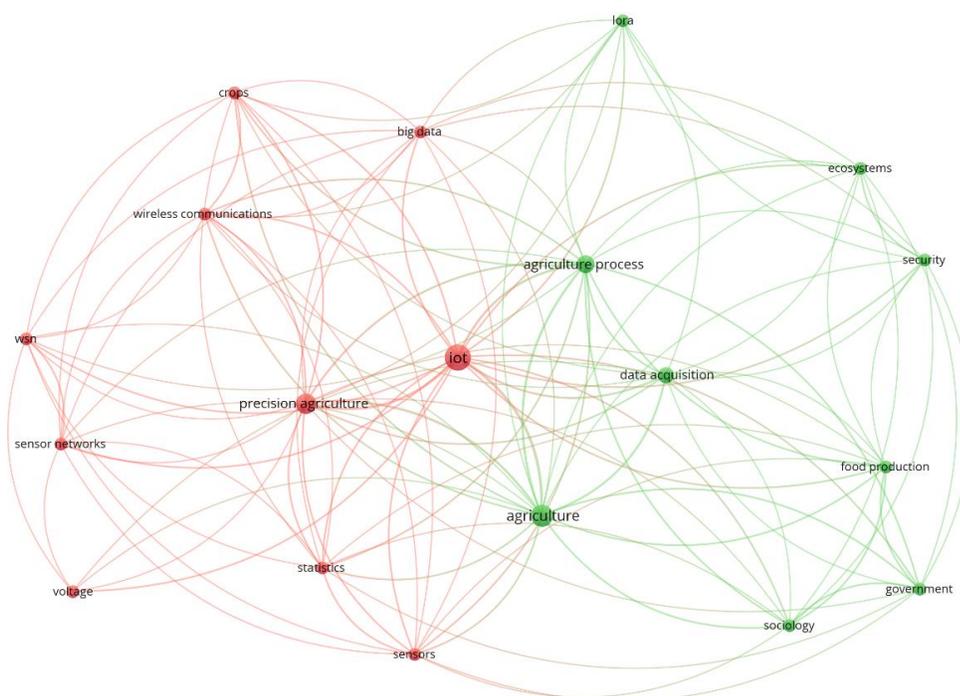
Base de datos IEEE Xplore

Para el estudio bibliométrico de la base de datos IEEE Xplore, se analiza las siguientes cadenas de búsqueda: “IoT+Agricultura”, “IoT+Agricultura+America” y “IoT+Agricultura+Ecuador”. Para la primera cadena se encontraron un total de 1340 documentos, de los cuales se calcula una muestra utilizando 5% de margen de error obteniéndose un total de 300 documentos. Para la segunda y tercera cadena debido a la cantidad de documentos encontrados, no fue necesario el cálculo de la muestra para su análisis dentro del software VOSviewer.

Para la cadena de búsqueda “IoT+Agricultura”, se pueden identificar los dos nodos más significativos en la Figura 19, siendo estos: Agricultura de Precisión e IoT, de la misma manera se puede observar que el estado del arte tiene una tendencia del uso de sensores para la monitorización de cultivos. La gráfica presenta cuatro grandes áreas importantes, el área roja en la que se puede notar que engloba temas como la arquitectura, protocolos, alguno de los usos del IoT tales como el Sistema de Posicionamiento Global con sus siglas en inglés (GPS). El área celeste tiene como puntos importantes la monitorización, la comunicación inalámbrica, la eficiencia energética o la telemetría. El área azul indica el uso de sensores para la monitorización de temperatura, humedad, nivel de agua producido por la lluvia, ph del agua o nivel de contaminación en el aire. Se puede diferenciar las tecnologías de comunicación inalámbricas más utilizadas globalmente, siendo estas: WiFi, Zigbee y GSM; en cuanto a las placas de adquisición de datos se pueden mencionar: Esp8266, Raspberry Pi, así como otro tipo de microcontroladores. El sector de color verde define temas

Figura 20

Análisis bibliométrico con cadena de búsqueda lot + Agricultura + América

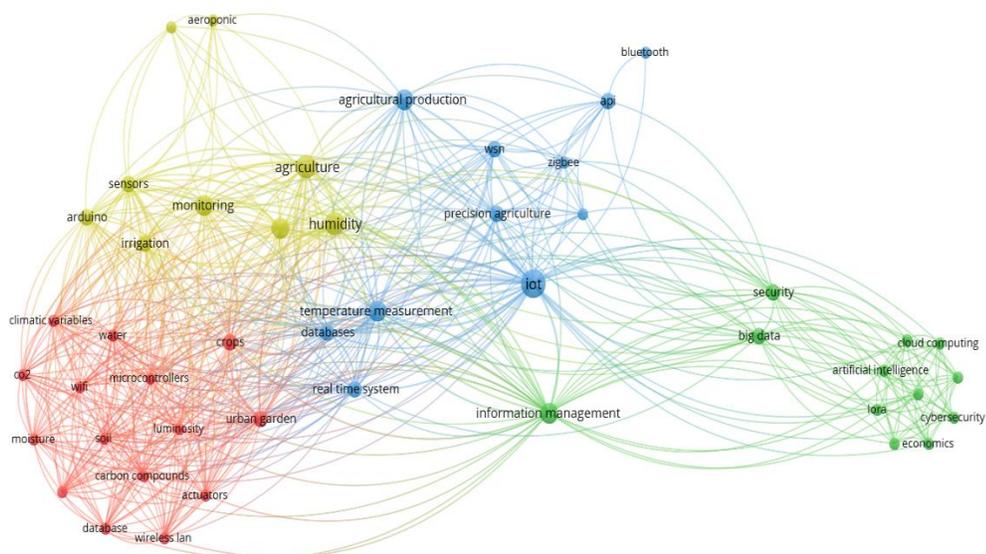


Nota. Gráfica obtenida en VOSviewer, con criterios de búsqueda bibliométrica IoT, Agricultura y América.

Por último, para la cadena de búsqueda “IoT+Agricultura+Ecuador” se puede observar las tendencias del uso de la placa de adquisición de datos Arduino, el uso de sensores para medir variables climáticas tales como la humedad, el CO_2 y la temperatura. En cuanto a las tecnologías de comunicación inalámbrica se pueden distinguir LoRa, Bluetooth y Zigbee, como se observa en la Figura 21.

Figura 21

Análisis bibliométrico con cadena de búsqueda lot + Agricultura + Ecuador



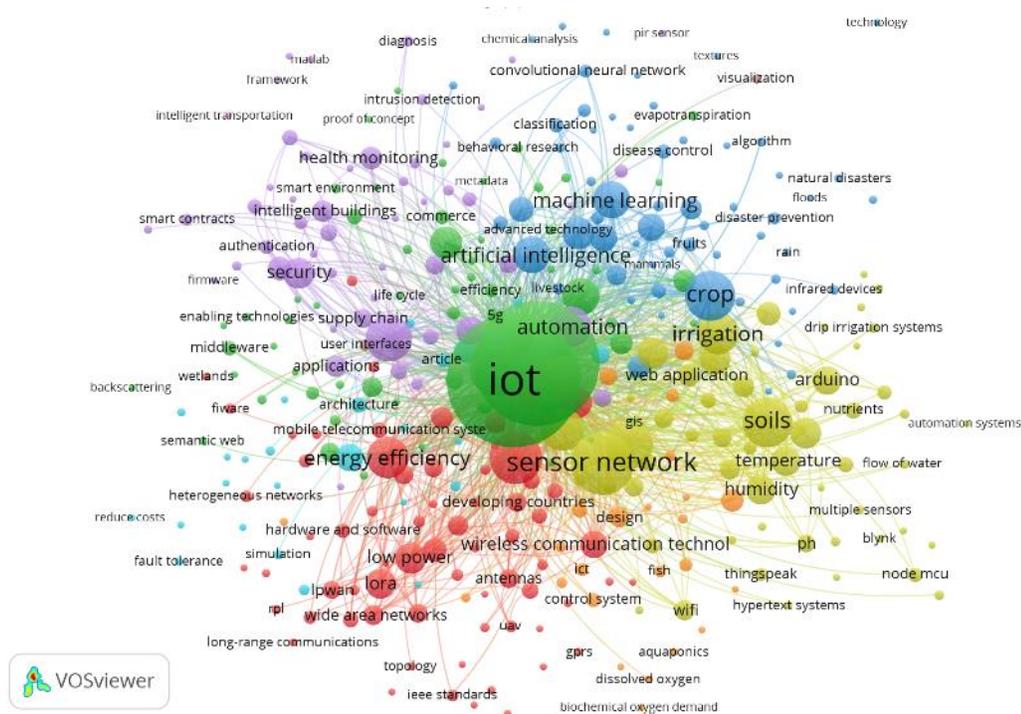
Nota. Gráfica obtenida en VOSviewer, con criterios de búsqueda bibliométrica IoT, Agricultura y Ecuador.

Base de datos Scopus

Para la base de datos de Scopus, se realiza un análisis a nivel mundial utilizando la cadena de búsqueda “IoT+ Agricultura” como se muestra en la Figura 22, donde se registraron un total de 2488 artículos. Se puede distinguir claramente que existen dos nodos principales que son: IoT y Agricultura de precisión los cuales se encuentran relacionados con áreas importantes. El área roja se enfoca a redes de sensores inalámbricos, topologías, eficiencia energética y tecnologías de comunicación inalámbrica donde se puede evidenciar que las LPWAN son la más utilizadas en el campo de la agricultura de precisión, en cambio la zona amarilla se orienta a las mediciones de variables como: humedad, temperatura, ph del suelo y nutrientes, de igual manera el área azul se encuentra dirigida a la inteligencia artificial, aprendizaje automático y redes neuronales, finalmente la zona violeta se enfoca a las aplicaciones del IoT como ciudades, universidades y ambientes inteligentes.

Figura 22

Análisis bibliométrico con cadena de búsqueda lot + Agricultura

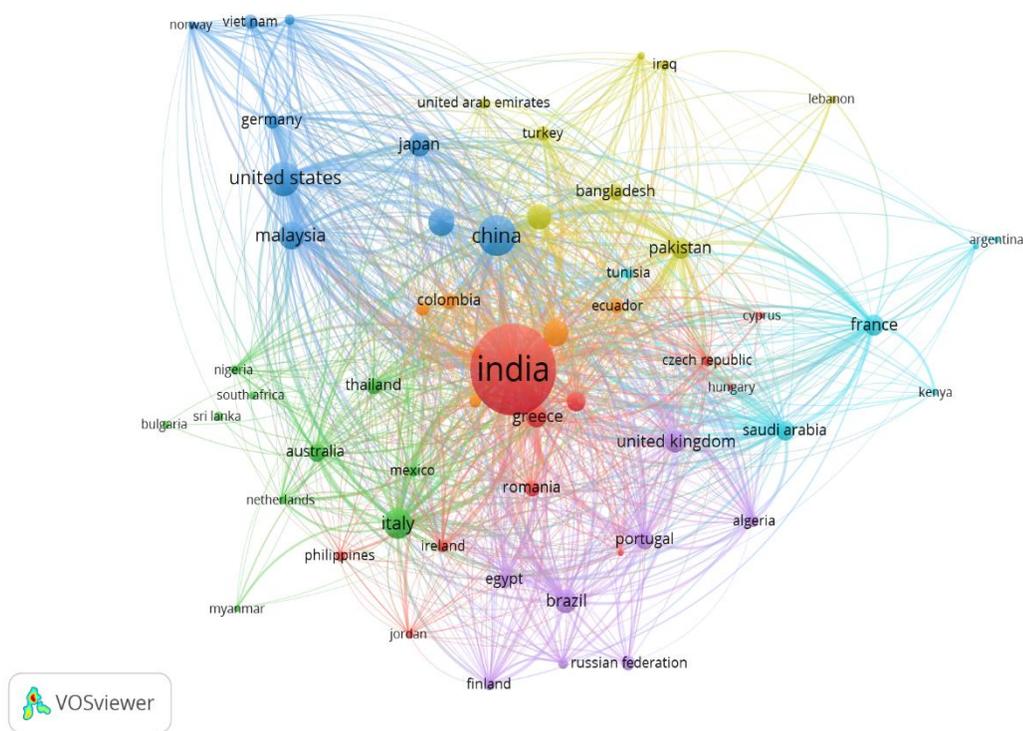


Nota. Gráfica obtenida en VOSviewer, con criterios de búsqueda bibliométrica IoT y Agricultura.

La Figura 23, muestra la implementación y desarrollo de tecnologías IoT enfocado en la agricultura de precisión en diversos países, donde evidentemente el nodo principal es la India, país en el que se presentan mayores estudios, de igual manera se observa que Estados Unidos, Malasya y China son lugares donde se genera un gran impacto en este tema. A nivel de Latinoamérica países como: Ecuador, Colombia y Brasil realizan investigaciones acerca de IoT y agricultura de precisión a menor escala. No obstante, Argentina y México se encuentran en una zona aislada, lo que representa que los casos de estudio son pocos en la actualidad.

Figura 23

Análisis bibliométrico por países con cadena de búsqueda lot + Agricultura



Nota. Gráfica obtenida en VOSviewer, con criterios de búsqueda bibliométrica por países de IoT y Agricultura.

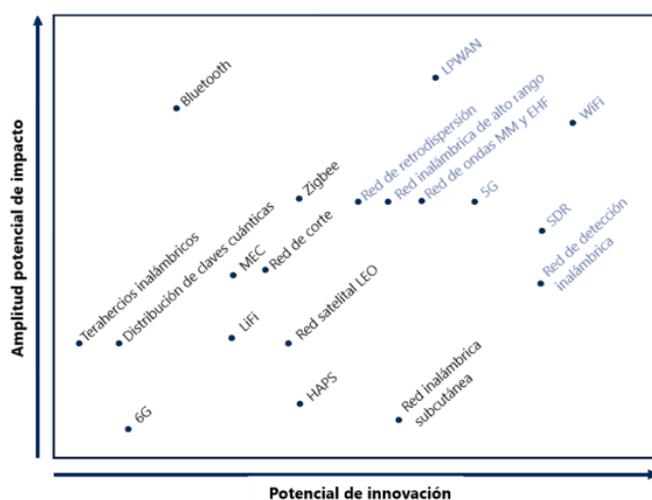
En el mismo contexto, en la Figura 24 se analiza en base a la cadena de búsqueda “IoT+Agriculture+America” donde se encontraron 49 artículos. Se encuentra enfocada a la observación de IoT y agricultura de precisión a nivel del continente americano en lo cual, lo relevante es la zona verde y roja que se orientan a las WSN, automatización y control y tecnologías de comunicación, donde se puede identificar que las más usadas son WiFi y RFID para la agricultura de precisión.

Tendencias de tecnologías de comunicación inalámbrica

El futuro se caracterizará por dispositivos inteligentes que colaboren con servicios digitales en todas partes del mundo, las tecnologías de comunicación inalámbrica generan un gran impacto en el desarrollo de dispositivos para productos y aplicaciones emergentes, drones, robots, vehículos autónomos, agricultura de precisión y dispositivos médicos. Esto significa que los creadores de productos pueden requerir mejorar sus habilidades durante los años próximos en nuevos campos. Las tendencias tecnológicas para las comunicaciones inalámbricas están estimuladas por algunos desafíos y oportunidades como la congestión del espectro, cobertura, longevidad de los protocolos inalámbricos, seguridad inalámbrica, consumo de potencia, arquitecturas de sistemas, y costo como lo menciona (Gartner.Inc, 2019). La Figura 27 muestra las tendencias de tecnología inalámbrica donde se observa a: Zigbee, LPWAN, Bluetooth, WiFi y aparecen otras como: 5G, red satelital LEO, etc.

Figura 27

Tendencias de tecnologías inalámbricas



Nota. La figura representa las tendencias de tecnologías inalámbricas en función de la amplitud potencial de impacto y el potencial de innovación.

Comparación de características de las tecnologías de comunicación inalámbrica

Las tecnologías de comunicación inalámbrica son la columna vertebral de sistemas IoT y permiten la conectividad y el acoplamiento de la red a las aplicaciones (Ray, 2017), se puede tener diferentes soluciones para monitorización de zonas agrícolas, el Anexo A1 compara las tecnologías de comunicación inalámbrica en relación con diferentes parámetros, incluido el consumo de potencia, rango de cobertura, disponibilidad en el Ecuador, costo, latencia, entre otros. Los desafíos en las aplicaciones agrícolas se pueden desarrollar a partir de la selección del rango de despliegue.

Para determinar qué tecnología de comunicación inalámbrica es implementada para IoT en zonas agrícolas, se aplicó el proceso de análisis jerárquico con sus siglas en inglés (AHP), para la toma de decisiones. AHP consta de dos fases, la primera se basa en el análisis de las características de las tecnologías y la segunda en la comparativa de las tecnologías disponibles. En el Anexo A2, se presenta la primera fase y el porcentaje correspondiente a cada característica, donde se determina que los parámetros más importantes son: la disponibilidad en el Ecuador con 23.27%, el costo con 15.44%, el rango de cobertura con el 14.72% y el consumo de potencia con 13.5%.

Debido a la selección de los mayores porcentajes anteriormente mencionados, se realiza un ajuste donde la sumatoria de las características representan el 100%. Los nuevos porcentajes de los parámetros seleccionados son: la disponibilidad en el Ecuador con 34.76%, el costo con 23.07%, el rango de cobertura con el 21.99% y el consumo de potencia con 20.16%. Tomando en cuenta los parámetros seleccionados, se procede al análisis de cada tecnología para la segunda fase donde se obtiene los porcentajes finales como se indica en la Tabla 1. Se determina una prioridad de alternativas idóneas para el caso de estudio, siendo: Sigfox con 17.65%, seguida de Zigbee con 16.08% y por último LoRa con 15.11%. Estas tecnologías de comunicación

inalámbrica son seleccionadas debido a su bajo consumo de potencia, amplia cobertura, bajo costo y alta disponibilidad en el territorio ecuatoriano.

Tabla 1

Porcentaje final de tecnologías utilizando AHP

Tecnologías	Consumo de potencia	Cobertura	Costo	Disponibilidad	Porcentaje final
A. Zigbee	4.21	0.84	4.87	6.16	16.08 %
B. Bluetooth	1.55	0.38	4.87	7.48	14.28 %
C. WiFi	0.58	0.84	0.45	9.09	10.96 %
D. Redes Móviles	0.58	5.26	1.36	4.07	11.28 %
E. Lora	4.21	2.73	4.87	3.30	15.11 %
F. Sigfox	4.21	5.26	4.87	3.30	17.65 %
G. NB-IoT	4.21	1.44	1.36	0.67	7.68 %
H. IoT-Satelital	0.58	5.26	0.45	0.67	6.97 %

Nota. Esta tabla representa los pesos referentes a las características principales de las tecnologías de comunicación inalámbrica para IoT y su porcentaje final.

Simulaciones de cobertura radioeléctrica

Tomando en cuenta las tecnologías de comunicación inalámbrica preseleccionadas en la Tabla 1 bajo el criterio AHP, se utilizó la herramienta de simulación de cobertura radioeléctrica Xirio Online por la gran cantidad de documentación y la cartografía disponible para modelar el terreno. La estimación de la propagación de las ondas electromagnéticas se realiza a través del método de cálculo de Xirio en base a los parámetros que se indican en la Tabla 2 de cada tecnología de comunicación inalámbrica. El primer caso de estudio para las simulaciones de cobertura de las tecnologías se lleva a cabo en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo, posteriormente para la tecnología Sigfox que presenta mayor alcance se realiza dos diferentes simulaciones de cobertura, en los cerros Pilisurco y Nitón, en la Tabla 3 se indican las coordenadas en latitud y longitud de los casos de estudio. Además, en la Tabla 4 se muestran los niveles de potencia de la

señal diferenciados por colores como el rojo que señala un nivel de potencia bajo, amarillo identifica un nivel de potencia medio y fucsia que señala un nivel de potencia alto.

Tabla 2

Parámetros utilizados en el simulador Xirio Online

Parámetro	Lora	Sigfox	Zigbee
Método de cálculo	Rec. UIT-R P.526-11	Rec. UIT-R P.526-11	Rec. UIT-R P.526-11
Altura de la antena transmisora	21.5 metros	21.5 metros	21.5 metros
Frecuencia	915 MHz	915 MHz	2400 MHz
Potencia transmisión	100 mW	122 mW	36.9 mW
Altura de la antena receptora	1.5 metros	1.5 metros	1.5 metros
Umbral de recepción	-148 dBm	-126 dBm	-100 dBm

Nota. Esta tabla indica los parámetros definidos en la herramienta Xirio Online en la simulación de cobertura radioeléctrica de las tecnologías de comunicación inalámbrica Lora, Sigfox y Zigbee.

Tabla 3

Puntos de ubicación para simulaciones de cobertura radioeléctrica

Ubicación	Latitud	Longitud
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE- Sede Belisario Quevedo	0°59'55.41"S	78°35'02.54"W
Cerro Pilisurco	1° 9' 17.3052" S	78° 40' 7.032" W
Cerro Nitón	1°16'40.00"S	78°32'15.00"W

Nota. Esta tabla presenta las coordenadas de los casos de estudio utilizados para las simulaciones de cobertura radioeléctrica de las tecnologías de comunicación inalámbrica.

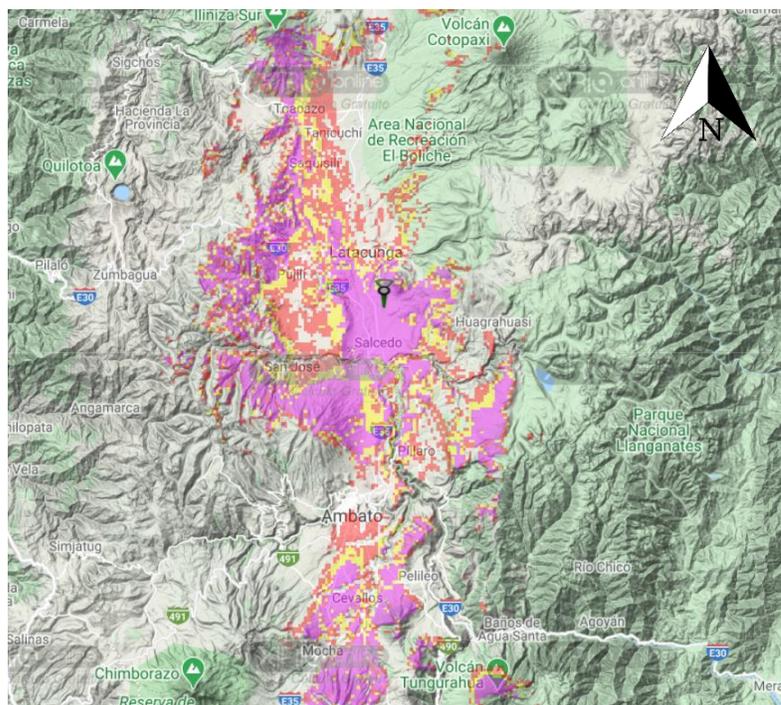
Tabla 4*Niveles de potencia de la señal*

Color	Rango
Rojo	[-137.00, -127.00) dBm
Amarillo	[-127.00, -117.00) dBm
Fucsia	[-117.00, Infinito) dBm

Nota. Esta tabla presenta los niveles de potencia de la señal con su respectivo color.

Primer caso de estudio**Cobertura radioeléctrica con tecnología Lora**

La simulación de cobertura de la tecnología de comunicación inalámbrica LoRa se indica en la Figura 28, Anexo B1, tomando como ubicación la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo, se puede identificar que la ciudad de Salcedo y parte de la ciudad de Latacunga al ser cercanas al lugar donde se ubica la antena receptora tienen una potencia de recepción mayor a -117 dBm, siendo óptima para la comunicación entre el dispositivo sensor y el receptor. Poblados tales como: Toacazo, Tanicuchí, Saquisilí, Pujilí en la provincia de Cotopaxi, Píllaro, Ambato y Cevallos en la provincia de Tungurahua cuentan con cobertura, sin embargo, presentan niveles de potencia de la señal entre -137 dBm y -117 dBm, en ciertos casos no existe cobertura de señal. Además, es importante observar que la cobertura en dirección este y oeste desde la antena receptora se ven completamente afectadas por la altura de la cordillera de la Sierra ecuatoriana.

Figura 28**Cobertura radioeléctrica de la tecnología Lora**

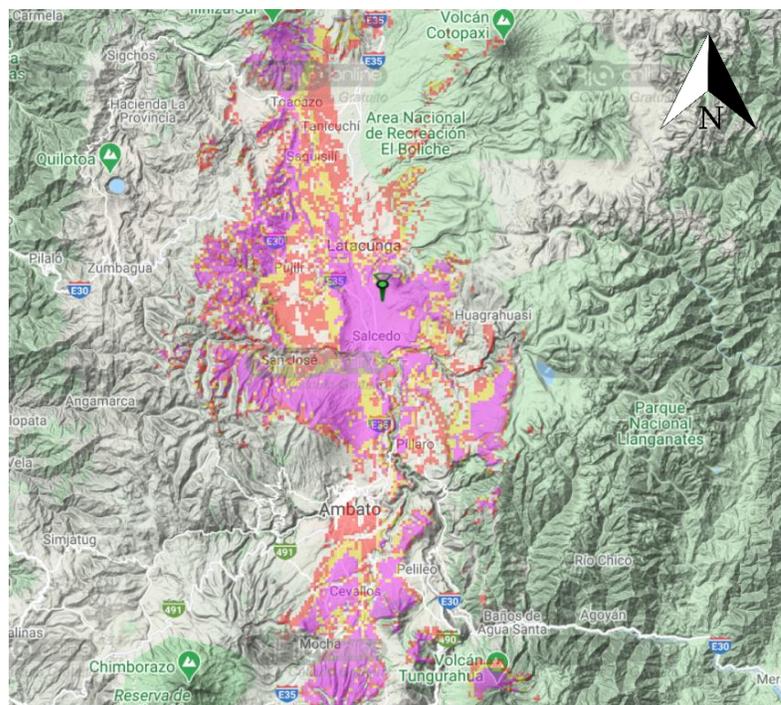
Nota. La figura representa la cobertura radioeléctrica de la tecnología de comunicación inalámbrica Lora realizada con el programa Xirio Online, tomando como punto de prueba la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo.

Cobertura radioeléctrica con tecnología Sigfox

La simulación de cobertura de la tecnología de comunicación inalámbrica Sigfox se observa en la Figura 29, Anexo B2, tomando como la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo como ubicación de la antena transmisora. La cobertura radioeléctrica es similar a la obtenida para la tecnología LoRa, los niveles de potencia de la señal son ligeramente mejorados agrandando el alcance de la cobertura de las zonas, este aumento de la huella radioeléctrica con la tecnología Sigfox se debe al incremento en su potencia de transmisión.

Figura 29

Cobertura radioeléctrica de la tecnología Sigfox



Nota. La figura representa la cobertura radioeléctrica de la tecnología de comunicación inalámbrica Sigfox realizada con el programa Xirio Online, tomando como punto de prueba la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo.

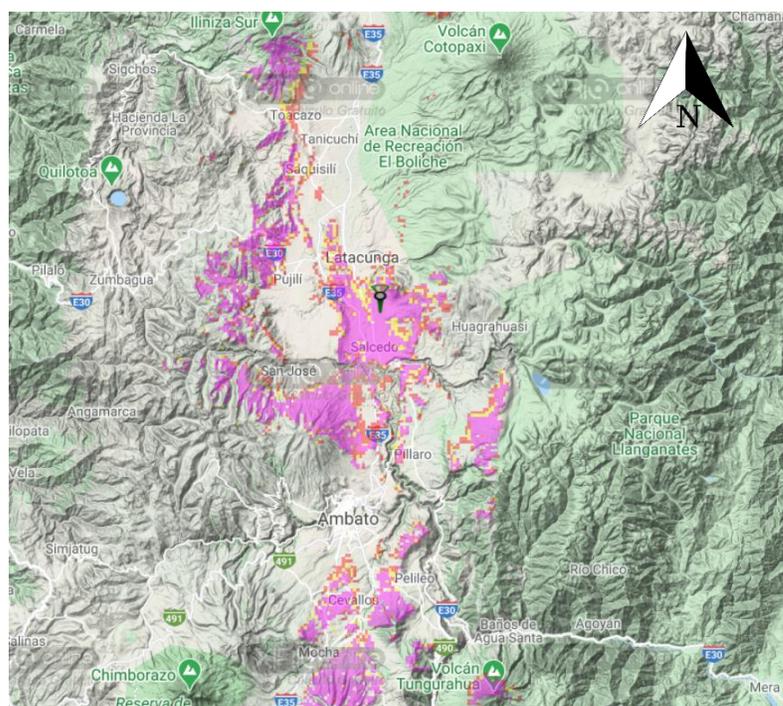
Cobertura radioeléctrica con tecnología ZigBee

En la Figura 30, Anexo B3 se puede observar la cobertura radioeléctrica obtenida para la tecnología ZigBee, las zonas que poseen comunicación disminuyeron en comparación a las obtenidas con las tecnologías LoRa y Sigfox esto se debe al uso de una frecuencia más alta y de la disminución de la potencia de transmisión. Prácticamente la cobertura se limita a la ciudad de Salcedo, parte de la ciudad de Latacunga, Cevallos y Saquisilí. Debido a la limitada cobertura se procede a descartar el uso de la tecnología Zigbee para el presente estudio, además, se ve la necesidad de la reubicación de la estación transmisora con el objetivo de aumentar las zonas

geográficas con comunicación, los sitios elegidos por su altura y el uso actual como ubicación clave para las telecomunicaciones con estructuras que reducirían los costos son el Cerro Pilisurco y el Cerro Nitón, las coordenadas de ambos cerros se pueden observar en la Tabla 3.

Figura 30

Cobertura radioeléctrica de la tecnología ZigBee



Nota. La figura representa la cobertura radioeléctrica de la tecnología de comunicación inalámbrica Zigbee realizada con el programa Xirio Online, tomando como punto de prueba la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo.

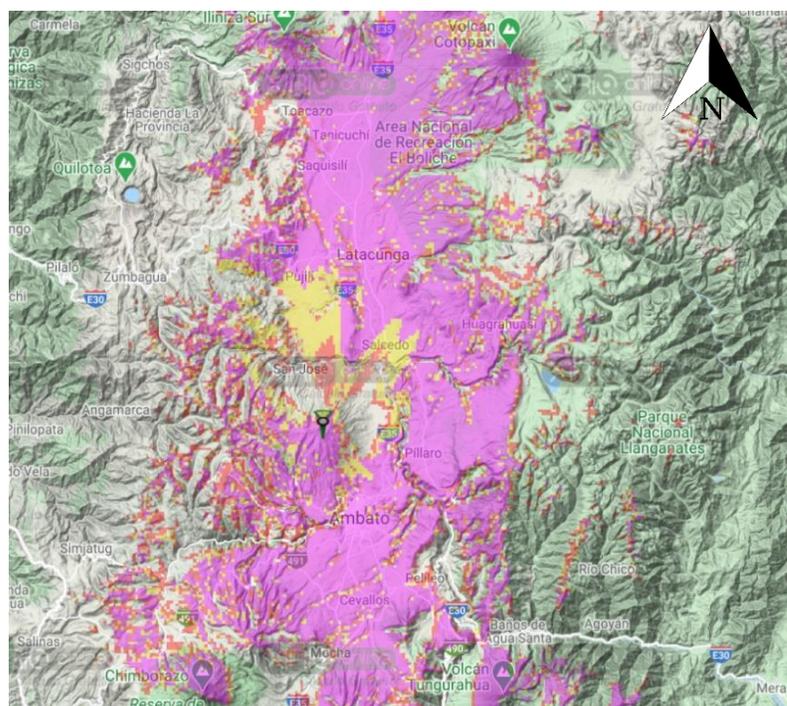
Segundo caso de estudio

En la Figura 31, Anexo B4 y Figura 32, Anexo B5 se puede observar la cobertura de la tecnología Sigfox desde el cerro Pilisurco y Nitón respectivamente, debido al cambio de ubicación de la estación transmisora a lugares geográficos con mayor altura, con aproximadamente 4120 msnm cada uno, el área de cobertura se incrementa

logrando niveles de potencia de las señales mayores a -117 dBm en lugares como Tanicuchí, Saquisilí, Latacunga, Píllaro, Ambato y Cevallos, sin embargo, zonas como Pujilí, Salcedo y Pelileo presentan niveles de potencia de señal baja para los dos casos. Al realizar la simulación en dos lugares similares en altitud se obtiene un mayor alcance, cubriendo ciertos valles y llegando a zonas de las provincias de Tungurahua y Cotopaxi en las cuales la producción agrícola es mayor, de esta manera, cualquiera de los dos puntos geográficos se los considera óptimos para el despliegue de la estación base. Es por esto que en el presente trabajo se selecciona la tecnología de comunicación inalámbrica Sigfox por sus características y cobertura.

Figura 31

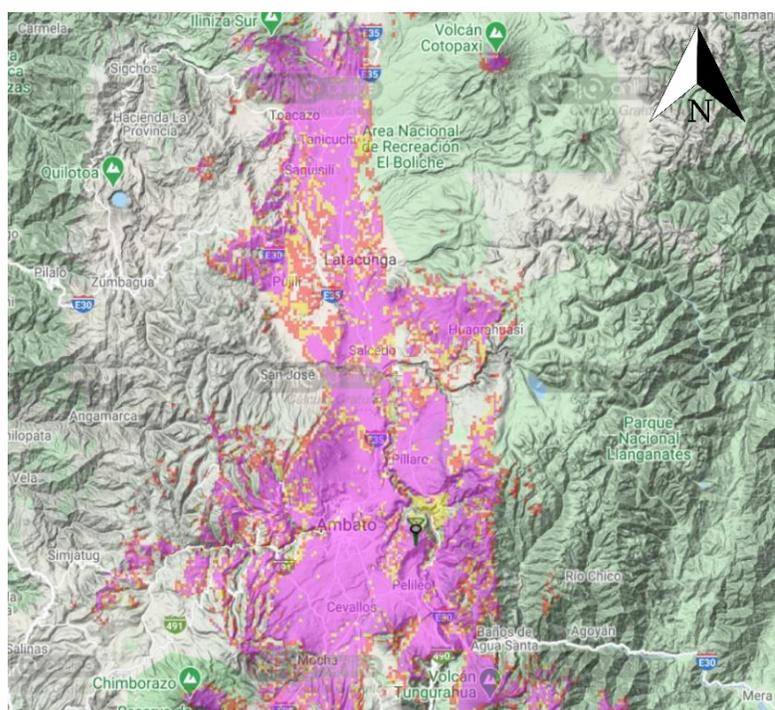
Cobertura radioeléctrica de la tecnología Sigfox desde el cerro Pilisurco



Nota. La figura representa la cobertura radioeléctrica de la tecnología de comunicación inalámbrica Sigfox realizada con el programa Xirio Online, tomando como punto de prueba el cerro Pilisurco.

Figura 32

Cobertura radioeléctrica de la tecnología Sigfox desde el cerro Nitón



Nota. La figura representa la cobertura radioeléctrica de la tecnología de comunicación inalámbrica Sigfox realizada con el programa Xirio Online, tomando como punto de prueba el cerro Nitón.

En cuanto al marco legal para el uso de la tecnología Sigfox dentro del territorio ecuatoriano, considerando que la frecuencia de operación es de 915 MHz y esta se encuentra detallada en las Normas de Espectro de uso libre y Espectro para uso determinado en bandas libres (ARCOTEL, 2018) para enlaces tanto punto a punto como punto multipunto, no se hace necesario ningún tipo permiso de utilización por parte del usuario final, el proveedor del servicio es el único que debe gestionar permisos de instalación y funcionamiento de la red.

Diseño del Sistema en General

Para el diseño del sistema de monitorización se utiliza Sigfox como tecnología de comunicación basado en los resultados de las comparaciones antes realizadas,

también se definen las variables a medir siendo esta temperatura ambiente, humedad del ambiente, humedad de la tierra, índice de luminosidad e índice UV. Los sensores elegidos para el monitoreo de dichas variables son el sensor DHT11, sensor de humedad de suelo HD-38, sensor de luz digital BH1750 y el sensor UV ML8511, respectivamente. Tomando en cuenta que la red Sigfox permite el envío de 140 mensajes diarios por dispositivo con un payload de 12 bytes cada uno y que en cada toma de datos se utilizan 10 bytes para el total de variables, se definió que la frecuencia de envío sea de 4 mensajes por hora, es decir, un mensaje cada 15 minutos.

Características del Nodo Sensor

A continuación, se detallan los componentes y las características que presenta el nodo sensor para el sistema de monitorización de cultivos, entre los componentes se tiene:

- Placa de desarrollo Lopy.
- Sensor DHT11.
- Sensor de humedad de suelo HD-38.
- Sensor de luz digital BH1750.
- Sensor UV ML8511.
- Banco de batería de 5V.
- Carcasa impresa en resina.
- Backend de Sigfox.
- Servidor en línea Ubidots.

Por otro lado, en cuanto a características se tiene:

- Tecnología de comunicación inalámbrica Sigfox.
- La placa de desarrollo se encarga de tratamiento de los datos y la comunicación con la red Sigfox.

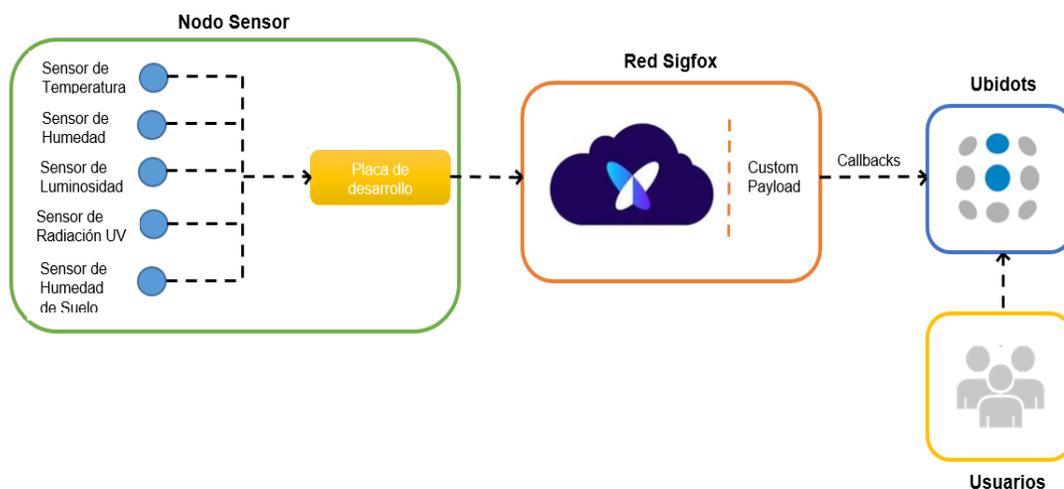
- El sistema está alimentado por un banco de batería comercial de 5V.
- Cada sensor realiza la toma de datos de las variables cada 15 minutos.
- El servidor en línea Ubidots se enlaza al Backend de Sigfox recibiendo todos los mensajes enviados a este.

Diagrama de Bloques del Sistema

En función de los elementos y características que debe contener el sistema de monitorización de zonas agrícolas, se realizó el diagrama de bloques del sistema como se indica en la Figura 33, donde se observa una perspectiva y funcionamiento general de los bloques principales en el sistema desarrollado.

Figura 33

Diagrama de bloques del sistema



Nota. La gráfica presenta el diagrama de bloques del sistema de monitorización de zonas agrícolas.

- **Nodo Sensor:** Este bloque se encuentra conformado por cinco diferentes sensores los cuales son de temperatura, humedad, luminosidad, radiación UV y humedad de suelo, son los encargados de sensar las variables físicas en las zonas agrícolas posteriormente son leídos en la placa de desarrollo y enviados como bytes a la red LPWAN Sigfox.

- **Red Sigfox:** Este bloque tiene la infraestructura de la red de Sigfox, es decir la red de acceso, red de transporte y la conexión hacia Internet. Es el encargado de recibir los datos desde la placa de desarrollo y obtener el custom payload es decir, la decodificación de la carga útil personalizada en variables distintas y simples dentro del backend de Sigfox. Además, en este bloque se configura el callback que sirve para la devolución de llamada esto se realiza con el fin de generar la solicitud de enlace ascendente del mensaje hacia la plataforma de IoT.
- **Ubidots:** Este bloque representa la plataforma de IoT en la nube la cual recibe los datos decodificados a través del callback, para el análisis y visualización en tableros, con esta plataforma los usuarios tienen la posibilidad de recopilar la información para tomar diferentes decisiones en la monitorización de zonas agrícolas.

Implementación del Hardware del Sistema

El hardware del sistema de monitorización de zonas agrícolas está constituido por el primer bloque descrito en la sección anterior que consta de los sensores de: temperatura, humedad, radiación UV, luminosidad y humedad de suelo además de la placa de desarrollo Lopy, estos son implementados en un solo hardware denominado nodo sensor como se observa en la Figura 33.

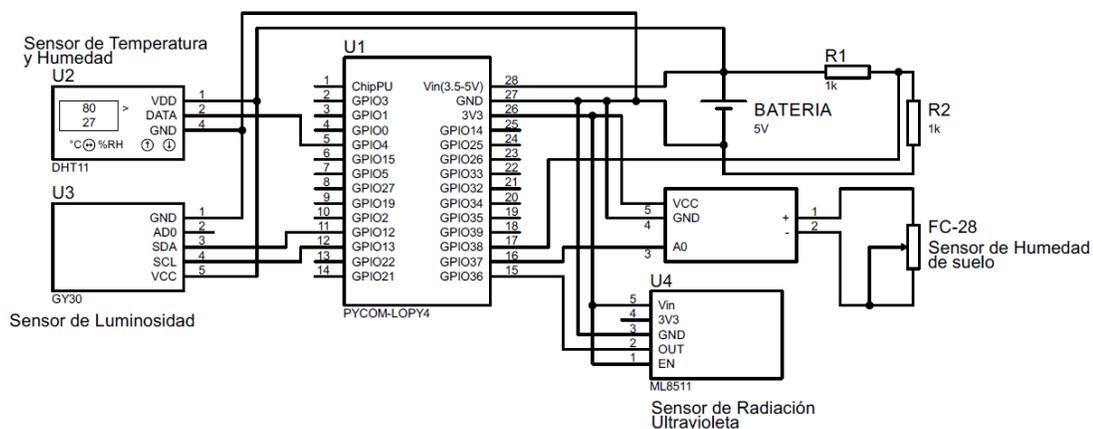
Nodo Sensor

El sistema de monitorización se basa en un nodo sensor formado por la placa de desarrollo, los distintos sensores mencionados en los componentes del sistema y el banco de batería utilizado como alimentación. La placa de desarrollo Lopy es el núcleo del nodo, se encarga del tratamiento de los datos obtenidos por los sensores directamente conectados a la misma, además, utiliza su módulo de radio para acceder a

la red Sigfox. El banco de batería provee 5V y se encarga de alimentar a la placa y a los distintos sensores. En la Figura 34 se observa el circuito esquemático del Nodo Sensor, además, en la Figura 35 se indica la conexión física del nodo sensor.

Figura 34

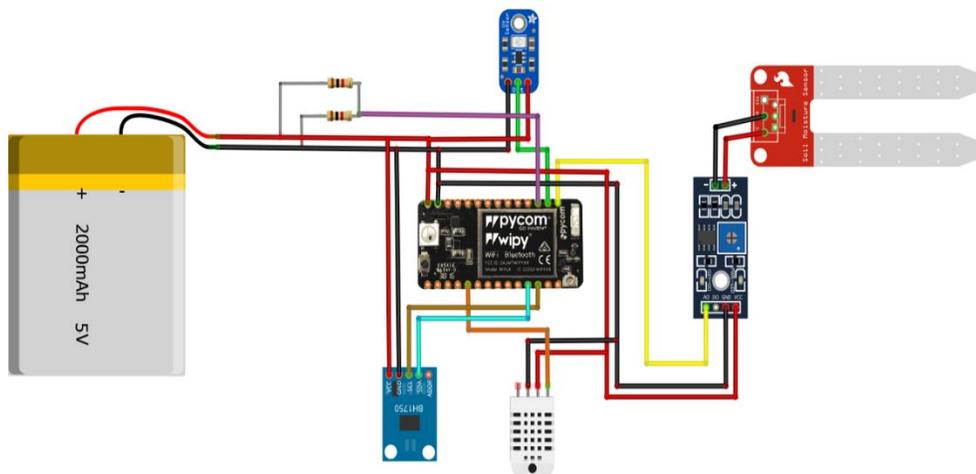
Diagrama esquemático



Nota. La figura presenta el diagrama esquemático del nodo sensor del sistema de monitorización de zonas agrícolas.

Figura 35

Representación física del nodo sensor



Nota. La gráfica indica la representación física de las conexiones del nodo sensor del sistema de monitorización de zonas agrícolas

Diagrama de Pistas

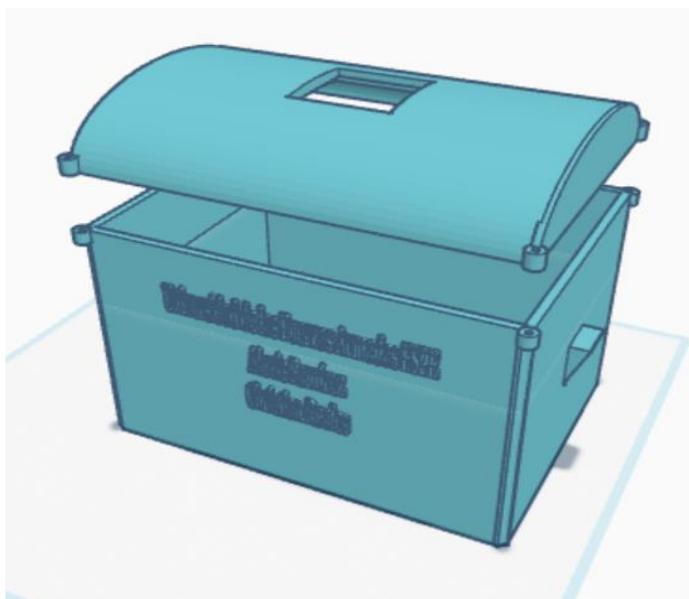
Se realizó el diseño de las pistas para posteriormente crear una placa en la cual montar todos los sensores, así como también la placa de desarrollo y la batería, además, se incluye un divisor de tensión para poder medir el voltaje de esta. En el Anexo C, el apartado A. permite observar la placa en 3D, el apartado B. permite observar únicamente las pistas de la misma y el apartado C. contiene el diseño de las pistas y la disposición de los elementos.

Diseño de la carcasa del nodo sensor

La carcasa se diseña en el software Thinkercad que se encuentra disponible en línea para modelación de estructuras en 3D, el modelo se lo realiza en base a las medidas de la placa del circuito impreso, la batería del nodo sensor y las dimensiones de los sensores que lo conforman, en la Figura 36 se puede observar el producto final, además, se detallan las vistas superior, frontal y lateral en el Anexo D.

Figura 36

Diseño de la carcasa del nodo sensor del sistema de monitorización de zonas agrícolas



Nota. La gráfica indica la carcasa del nodo sensor (Autores, 2021).

Ajuste de Sensores

De acuerdo con los dispositivos que se usó para sensar las variables físicas de temperatura, humedad, radiación UV, humedad de suelo y luminosidad fue necesario utilizar equipos patrones con el fin de comparar los datos de las mediciones de los equipos patrones con los sensores. La obtención de los datos para cada variable física se realizó tomando en cuenta que los dispositivos mencionados anteriormente se encuentren en un mismo lugar y que la recolección de las medidas sean en igual tiempo, de esta manera los equipos patrones utilizados son:

- Fluke 971: dispositivo sensor de temperatura y humedad ambiente.
- Dr. Meter: equipo medidor de humedad de suelo.
- General UVAB: equipo medidor de luz ultravioleta.
- REED SD-1128: equipo medidor de luz.

Análisis de Mediciones de Variables

Las mediciones de las variables físicas con los equipos patrones y los sensores se realizaron entre las 11:00 y 17:00 horas teniendo una muestra por minuto, es decir, se obtuvieron 360 muestras. El experimento se realizó al aire libre como se observa en la Figura 37, para la humedad de suelo se utilizó una maceta de aproximadamente 35000 cm^3 en la cual se colocó agua cada 30 minutos. Por lo tanto, es necesario realizar el análisis del comportamiento de cada variable en función del tiempo, de la correlación de los datos y del error.

Figura 37

Nodo sensor para monitorización de zonas agrícolas



Nota. Toma de datos en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Campus Sangolquí.

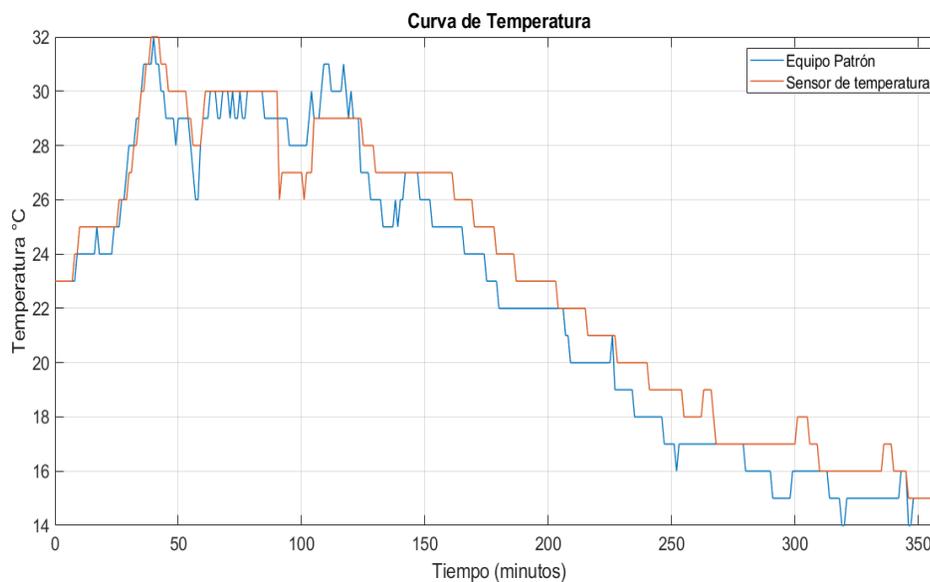
Variable Física de Temperatura

En la medición de temperatura se utilizaron los equipos Fluke 971 como equipo patrón y el sensor DHT11 para evidenciar el comportamiento que tienen en función del tiempo como se indica en la Figura 38, se puede determinar que las dos curvas de temperatura tienen la misma naturaleza sin embargo la curva del equipo patrón presenta mayores fluctuaciones en un menor tiempo dado que la respuesta del equipo es más rápida en comparación al sensor. En la Figura 39, se presenta la curva del error obtenida mediante la diferencia del sensor respecto al equipo patrón donde se observa que generalmente existe una variación entre -2 y 1 °C, sin embargo, se presentan valores con mayor diferencia de hasta -3 y 3 °C. En base a la curva del error se obtiene el histograma de la Figura 40 donde se puede apreciar tres barras predominantes, la mayor de -1 °C, seguido de una barra de error 0 y por último una de -2 °C, por lo tanto, hay una subestimación de la variable por parte del sensor. De igual forma se realizó el

diagrama de dispersión de los datos del equipo patrón y del sensor como se muestra en la Figura 41 en la cual se determina que los datos toman una misma tendencia de la variable física de temperatura es decir los datos tomados por el sensor tienen relación con el equipo es por esto que se evidencia que el factor de correlación de las dos señales es de 0.97. Asimismo, en base al método gráfico de Bland Altman se comparó las mediciones del equipo patrón con el sensor de temperatura como se observa en la Figura 42, donde se establece la media de las diferencias igual a 0.78, además se presentan pocos valores atípicos que se encuentran fuera de los límites de concordancia. En base a lo descrito anteriormente con el sensor de temperatura DHT11 utilizado en el nodo sensor se garantiza la naturaleza de la señal.

Figura 38

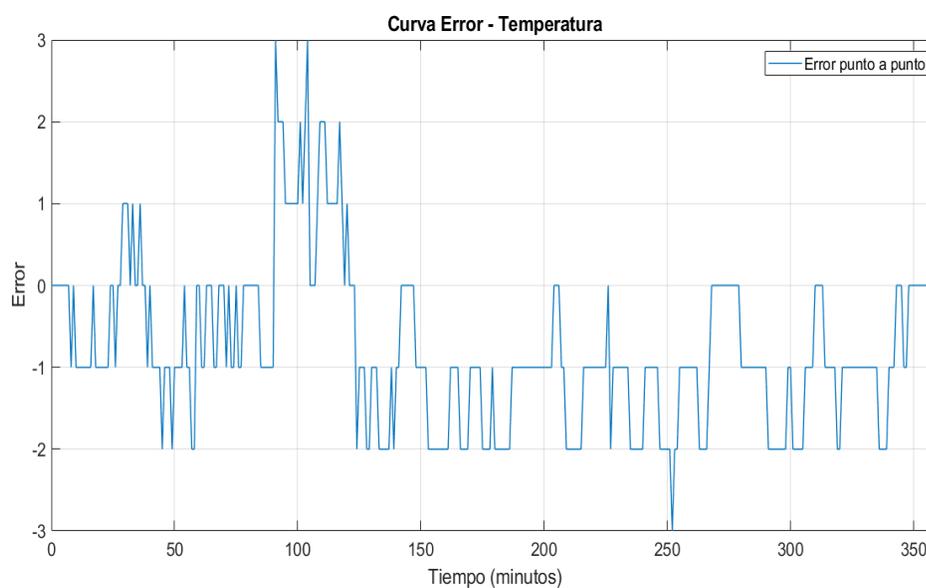
Curvas de Temperatura



Nota. (Autores, 2021).

Figura 39

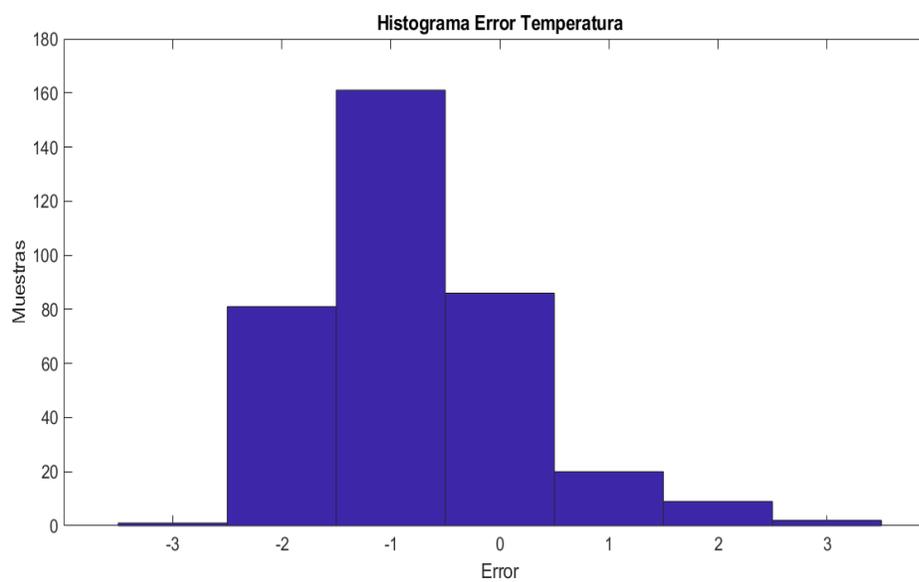
Curva de Error de Temperatura



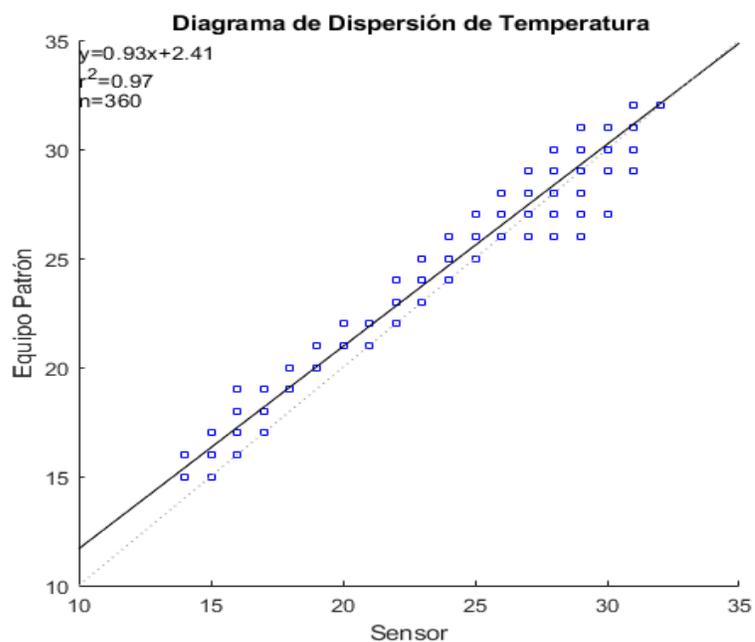
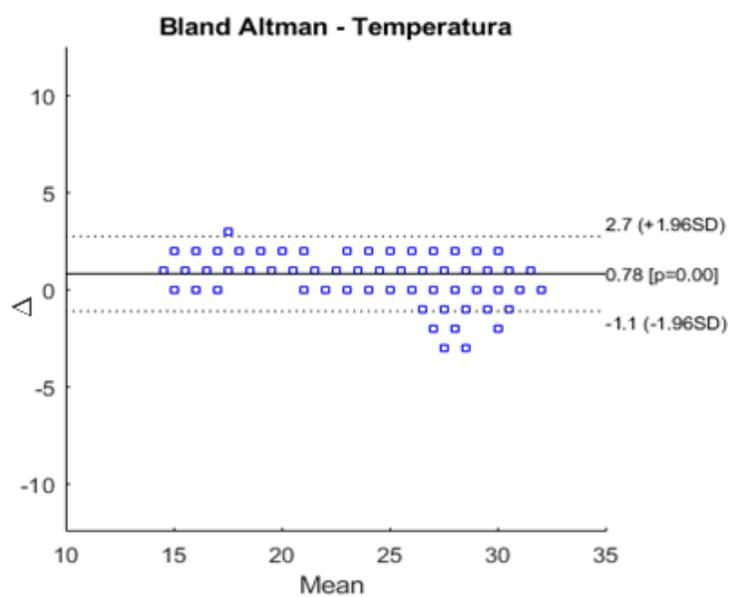
Nota. (Autores, 2021).

Figura 40

Histograma de Error de Temperatura

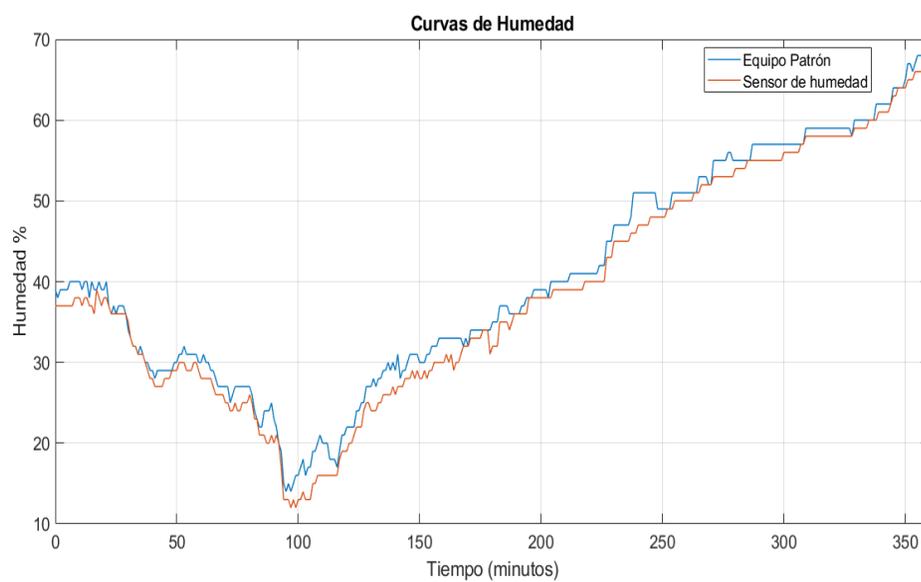


Nota. (Autores, 2021).

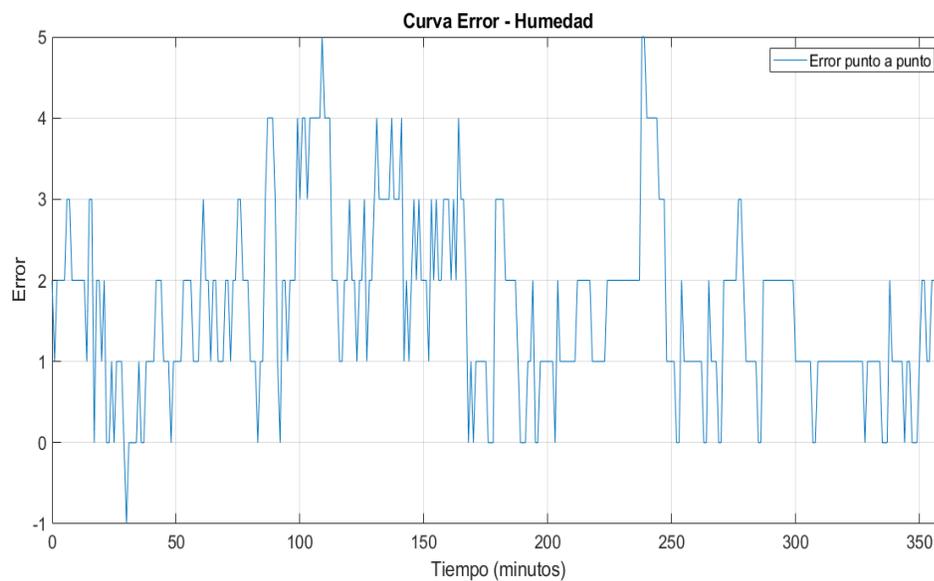
Figura 41*Diagrama de Dispersión de Temperatura**Nota.* (Autores, 2021).**Figura 42***Método gráfico de Bland Altman para la temperatura**Nota.* (Autores, 2021).

Variable Física de Humedad

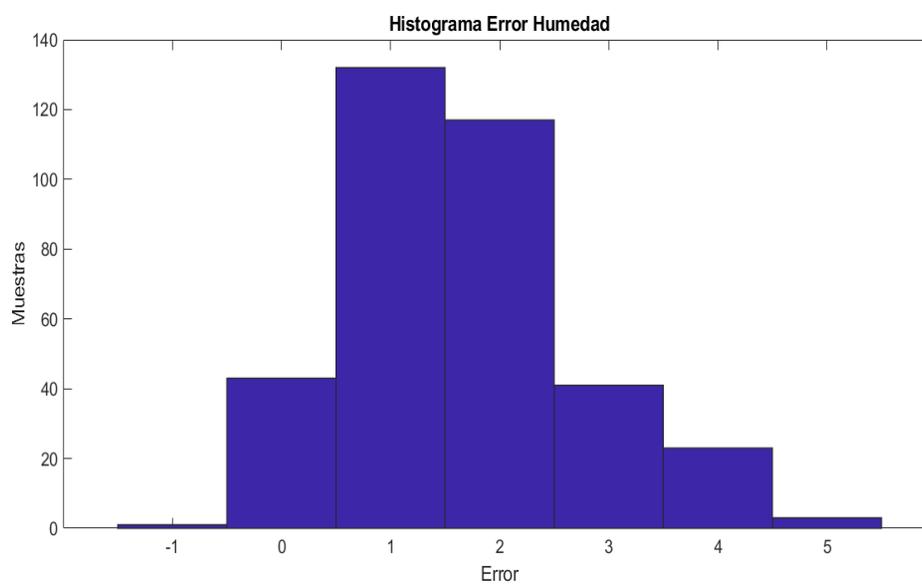
En la medición de humedad se utilizaron los equipos Fluke 971 como equipo patrón y el sensor DHT11, el rango de medición de los dispositivos es de 0 a 100 por ciento, se evidencia el comportamiento que tienen en función del tiempo en la Figura 43, donde se determina que las dos curvas de humedad tienen similar naturaleza sin embargo la curva del sensor presenta estabilizaciones en ciertos instantes de tiempo dado que la respuesta del dispositivo es lenta en comparación al equipo patrón. En la Figura 44, se presenta la curva del error obtenida mediante la diferencia del sensor respecto al equipo patrón donde se observa que generalmente existe una variación entre 2 y 3 por ciento de humedad, sin embargo, se presentan valores con mayor diferencia de hasta 5 por ciento de humedad. En base a la curva del error se obtiene el histograma de la Figura 45 donde se puede apreciar cuatro barras predominantes, la mayor de 1 por ciento más de humedad, seguido de una barra de 2 por ciento más de humedad, luego una barra de error 0 y por último una de 3 por ciento más de humedad, por lo tanto, hay una sobreestimación de la variable por parte del sensor. De igual forma se realizó el diagrama de dispersión de los datos del equipo patrón y del sensor como se muestra en la Figura 46 en la cual se determina que los datos toman una misma tendencia de la variable de humedad es decir los datos tomados por el sensor tienen relación con el equipo es por esto que se evidencia que el factor de correlación de las dos señales es de 0.99. Asimismo, en base al método gráfico de Bland Altman se comparó las mediciones del equipo patrón con el sensor de temperatura como se observa en la Figura 47, donde se establece la media de las diferencias igual a -1.7, además se presentan un mínimo de valores atípicos que se encuentran fuera de los límites de concordancia. En base a lo descrito anteriormente con el sensor de humedad DHT11 utilizado en el nodo sensor se garantiza la naturaleza de la señal.

Figura 43*Curvas de Humedad*

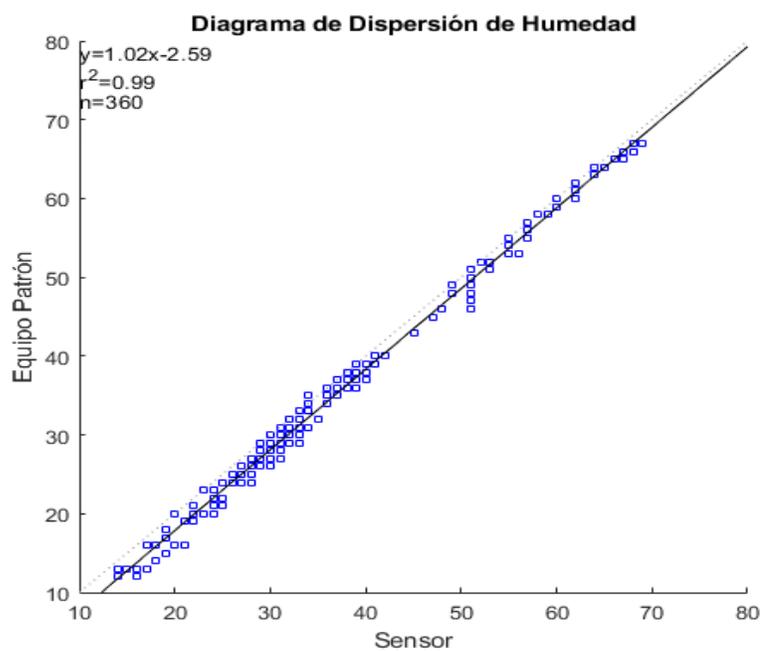
Nota. (Autores, 2021).

Figura 44*Curva de Error de Humedad*

Nota. (Autores, 2021).

Figura 45*Histograma de Error de Humedad*

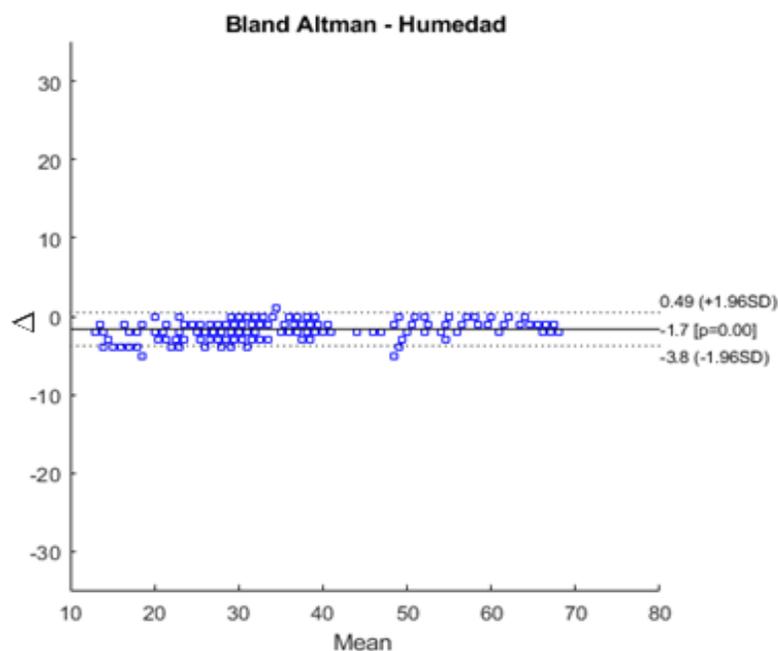
Nota. (Autores, 2021).

Figura 46*Diagrama de Dispersión de Humedad*

Nota. (Autores, 2021).

Figura 47

Método gráfico de Bland Altman para la humedad



Nota. (Autores, 2021).

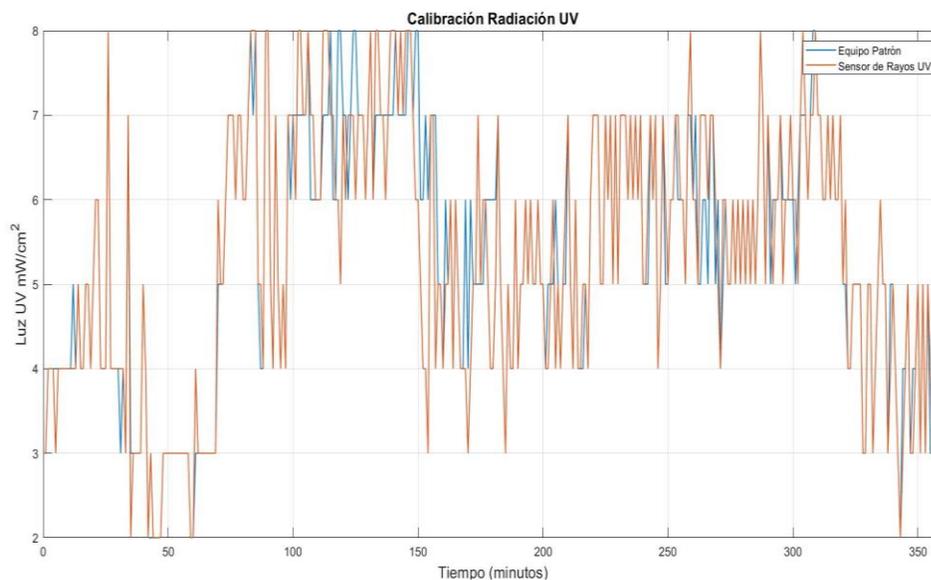
Variable Física de Radiación UV

La medición de radiación UV se encuentra en el rango de 0 a 15 mW/cm^2 , se utilizan los equipos General UV513AB como equipo patrón y el módulo ML8511 para analizar el comportamiento que tienen en función del tiempo como se indica en la Figura 48, se puede observar la inexistencia de grandes diferencias entre ambas curvas presentando similitud a pesar de la presencia de variaciones bruscas, esto se debe a que los datos sensados son discretos. En la Figura 49, se presenta la curva del error obtenida mediante la diferencia del sensor respecto al equipo patrón, esta tiene una gran cantidad de permanencia en 0, también presenta oscilaciones entre -1 y 1, por último, existen ciertas ocasiones en que la diferencia llega a valores de 3 y -2. En base a la curva del error se obtiene el histograma de la Figura 50 donde se pueden apreciar dos barras predominantes, la mayor de valor 0, seguido de una de valor -1, por lo tanto,

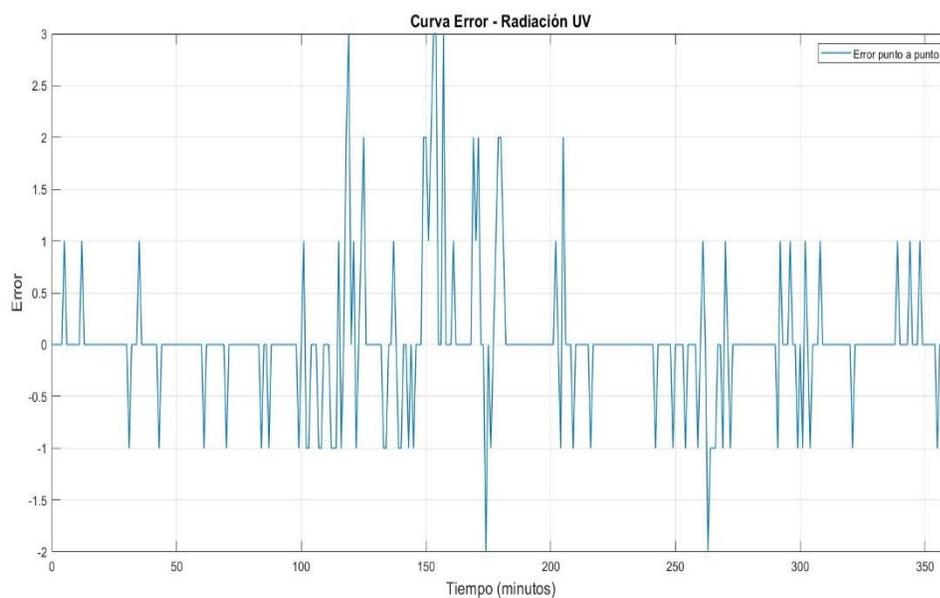
las medidas obtenidas por el sensor a comparación del equipo patrón en su gran mayoría no presentan diferencia. De igual manera se realizó el diagrama de dispersión de los datos del equipo patrón y del sensor como se muestra en la Figura 51 en la cual se determina que los datos toman una misma tendencia es decir los datos tomados por el sensor tienen relación con el equipo patrón es por esto que se evidencia que el factor de correlación de las dos señales es de 0.83. Por último, utilizando el método gráfico de Bland Altman se compararon las mediciones del equipo patrón con el sensor de Radiación UV como se observa en la Figura 52, donde se establece la media de las diferencias en 0.03 con la mayoría de valores dentro de los límites de concordancia. En base a lo descrito anteriormente con el sensor Radiación UV ML8511 implementado en el nodo sensor se garantiza la naturaleza de la señal.

Figura 48

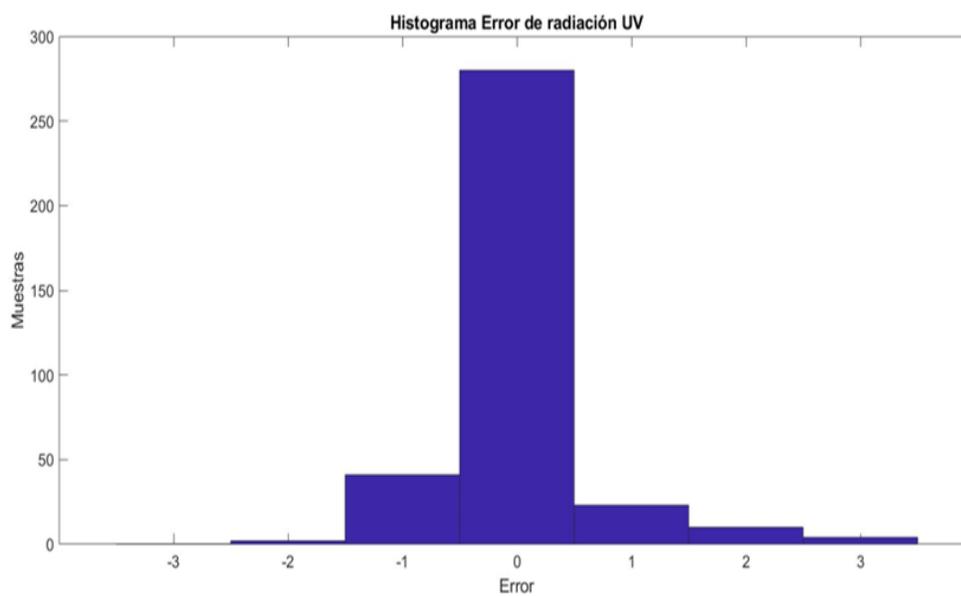
Curvas de Radiación UV



Nota. (Autores, 2021).

Figura 49*Curva de Error de Radiación UV*

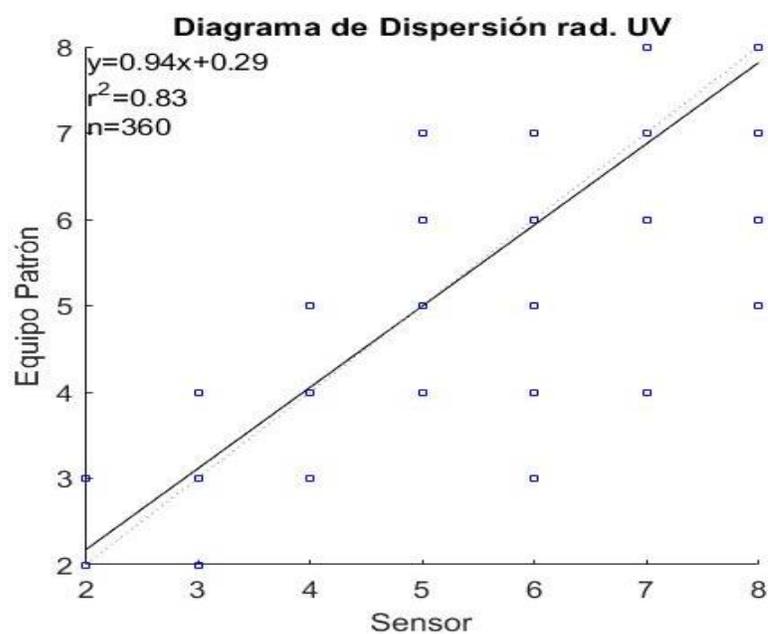
Nota. (Autores, 2021).

Figura 50*Histograma de Error de Radiación UV*

Nota. (Autores, 2021).

Figura 51

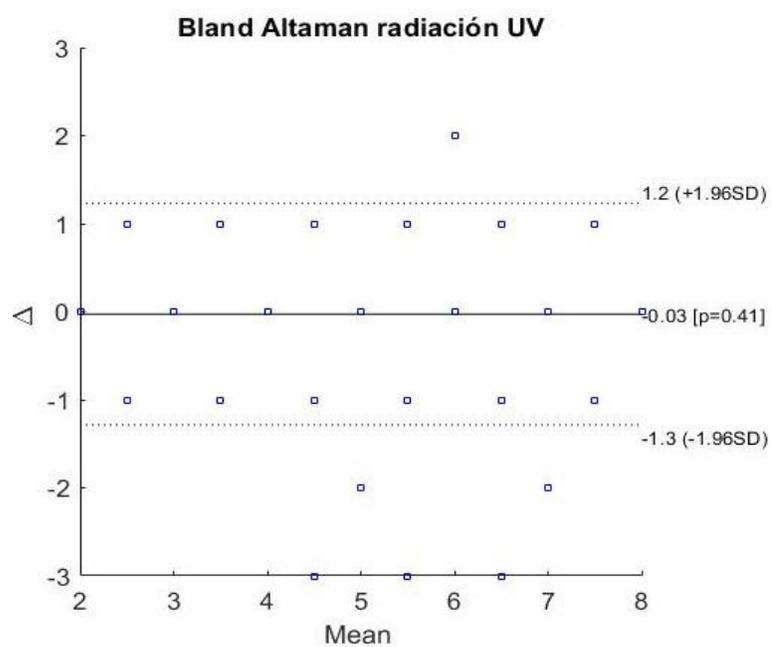
Diagrama de dispersión de Radiación UV



Nota. (Autores, 2021).

Figura 52

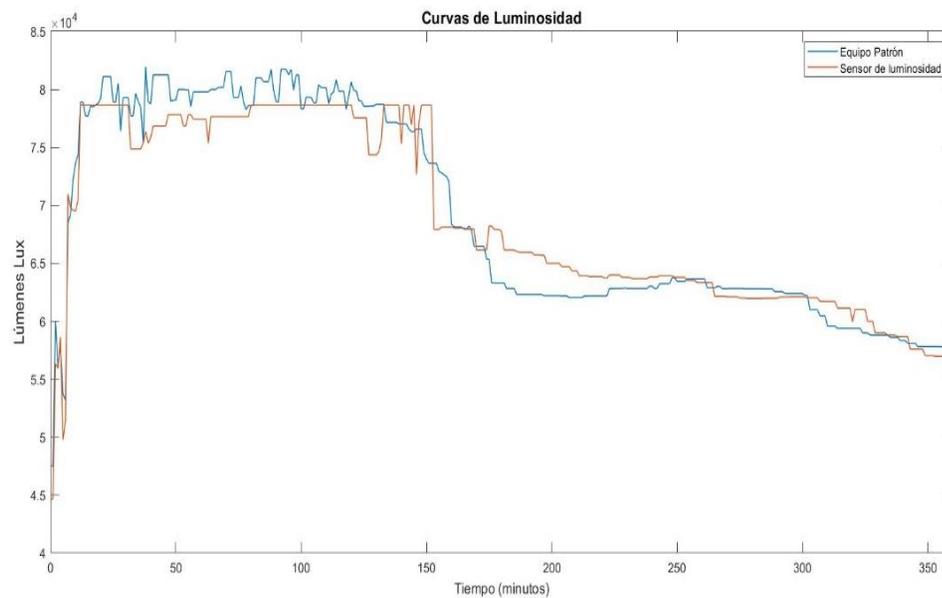
Método gráfico de Bland Altman para la Radiación UV



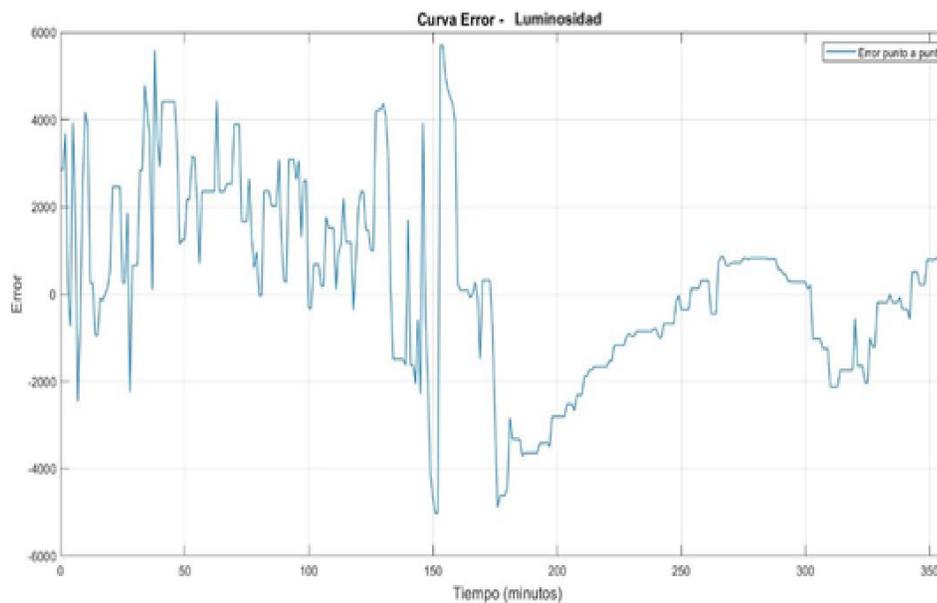
Nota. (Autores, 2021).

Variable Física de Luminosidad

La medición de luminosidad se encuentra en el rango de 0 a 100000 Lux respecto al dispositivo Reed SD-1128 considerado como equipo patrón y el módulo BH1750 que tiene el rango de medición de 0 a 79000 Lux se utilizan para analizar el comportamiento que tienen en función del tiempo como se indica en la Figura 53, se puede observar que la velocidad, así como también el rango del equipo patrón es mejor que la del sensor, ya que este último a grandes valores llega a saturarse, sin embargo, gráficamente no se encuentran grandes diferencias. En la Figura 54, se presenta la curva del error obtenida mediante la diferencia del sensor respecto al equipo patrón presentando variaciones máximas de entre +4000 y -4000 Lux, tomando en cuenta que esto ocurre únicamente cuando el sensor se satura, por lo general en condiciones estables no se presentan errores notables. En base a la curva del error se obtiene el histograma de la Figura 55 donde se pueden apreciar tres barras principales, la de mayor tamaño indica que en su mayoría el error es cercano a 0, la siguiente indica que el error puede llegar a +872, por último, la tercera indica que se encuentran errores de -1270, por lo tanto, la tendencia indica que el error al comparar ambas medidas es bajo. De igual manera se realizó el diagrama de dispersión de los datos del equipo patrón y del sensor como se muestra en la Figura 56 en la cual se determina que los datos toman una misma tendencia es decir los datos tomados por el sensor tienen relación con el equipo patrón es por esto que se evidencia que el factor de correlación de las dos señales es de 0.95. Por último, utilizando el método gráfico de Bland Altman se compararon las mediciones del equipo patrón con el sensor de Luminosidad como se observa en la Figura 57, donde se establece la media de las diferencias en -240, identificando la tendencia de ubicación de los puntos dentro de los límites de concordancia. En base a lo descrito anteriormente con el sensor de Luminosidad BH1750 implementado en el nodo sensor se garantiza la naturaleza de la señal.

Figura 53*Curvas de Luminosidad*

Nota. (Autores, 2021).

Figura 54*Curva de Error de luminosidad*

Nota. (Autores, 2021).

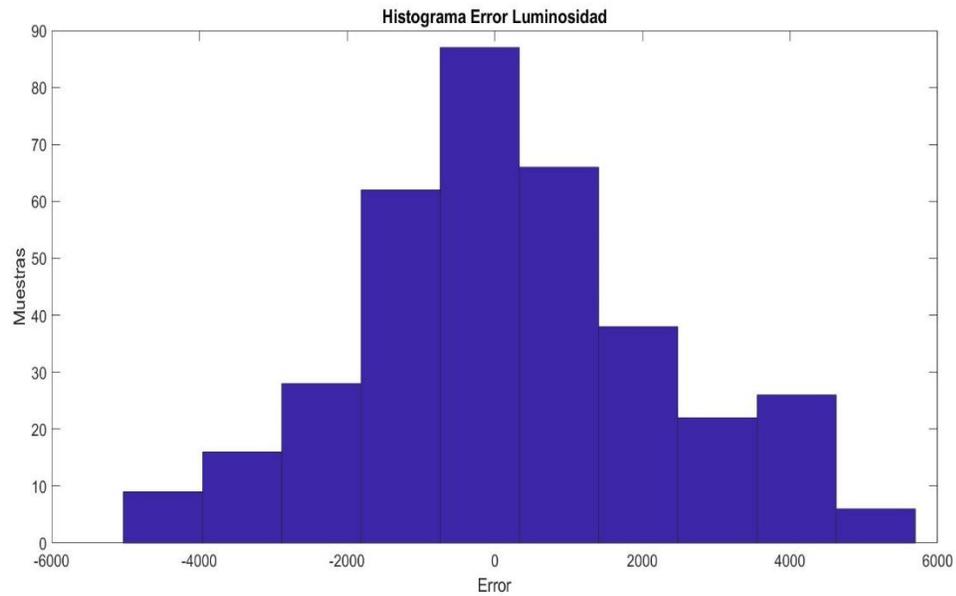
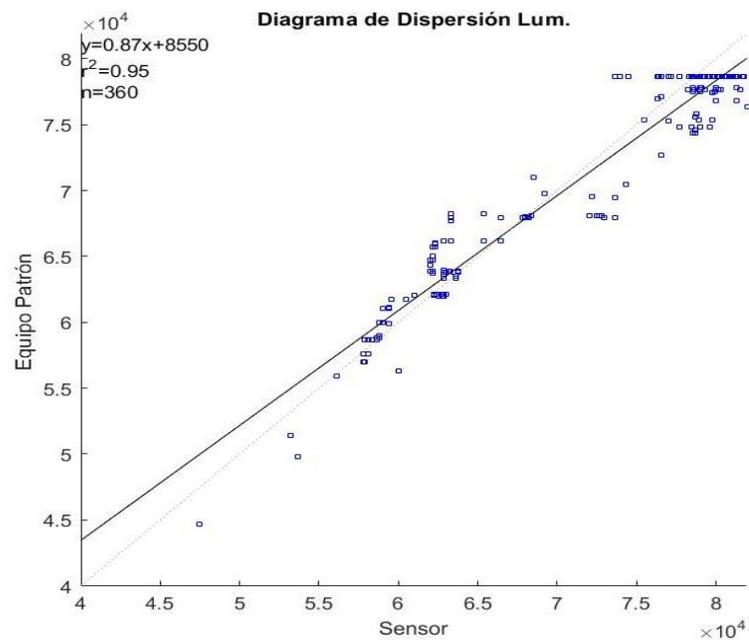
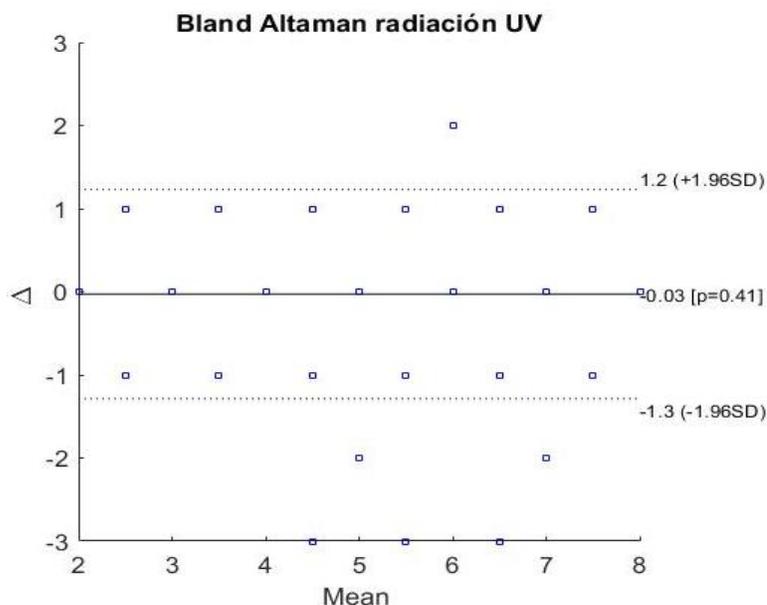
Figura 55*Histograma de Error de luminosidad**Nota. (Autores, 2021).***Figura 56***Diagrama de dispersión de Luminosidad**Nota. (Autores, 2021).*

Figura 57

Método gráfico de Bland Altman para la Luminosidad



Nota. (Autores, 2021).

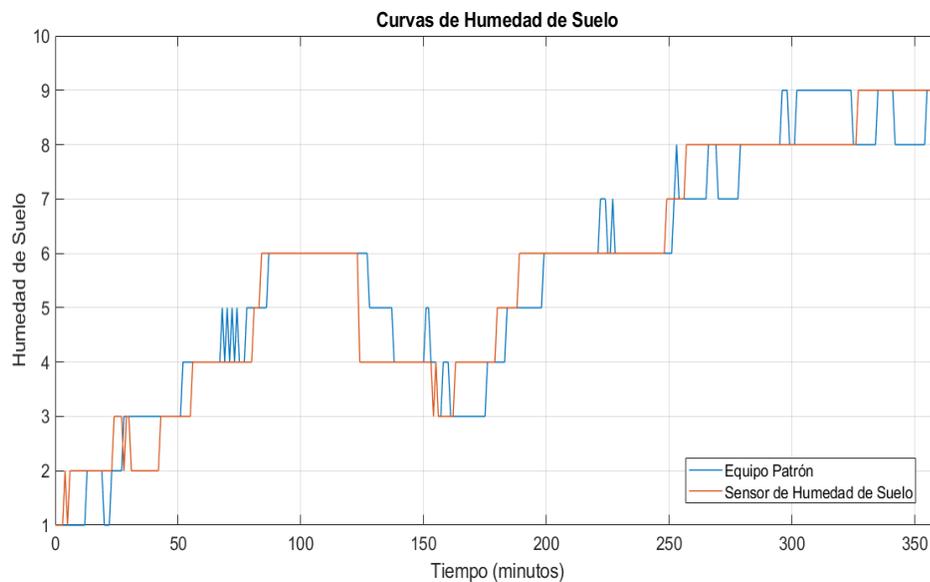
Variable Física de Humedad de Suelo

La medición de humedad de suelo se encuentra en el rango de 0 a 10 en la escala de humedad, se utiliza los equipos Dr. Meter como equipo patrón y el sensor HD-38 para evidenciar el comportamiento que tienen en función del tiempo como se indica en la Figura 58, se puede determinar que los datos sensados son discretos además, las dos curvas de humedad de suelo tienen la misma naturaleza sin embargo la curva del equipo patrón presenta mayores fluctuaciones en un menor tiempo dado que la respuesta del equipo es más rápida en comparación al sensor. En la Figura 59, se presenta la curva del error obtenida mediante la diferencia del sensor respecto al equipo patrón donde se observa que generalmente existe una variación en la escala humedad de -1 y 1, sin embargo, se presentan valores con mayor diferencia de hasta 2 en la escala de humedad. En base a la curva del error se obtiene el histograma de la Figura 60 donde se puede apreciar tres barras predominantes, la mayor una barra de error 0,

seguido de una barra de -1 en la escala de humedad y por último una barra de 1 en la escala de humedad, por lo tanto, hay una subestimación y sobrestimación de la variable de 1 y -1 por parte del sensor. De igual forma se realizó el diagrama de dispersión de los datos del equipo patrón y del sensor como se muestra en la Figura 61 en la cual se determina que los datos toman una misma tendencia de la variable de humedad de suelo es decir los datos tomados por el sensor tienen relación con el equipo es por esto que se evidencia que el factor de correlación de las dos señales es de 0.9. Asimismo, en base al método gráfico de Bland Altman se comparó las mediciones del equipo patrón con el sensor de humedad de suelo como se observa en la Figura 62, donde se establece la media de las diferencias igual a 0.02, además se presenta un solo valor atípico que se encuentra fuera de los límites de concordancia. En base a lo descrito anteriormente con el sensor de humedad de suelo HD-38 utilizado en el nodo sensor se garantiza la naturaleza de la señal.

Figura 58

Curvas de Humedad de Suelo



Nota. (Autores, 2021).

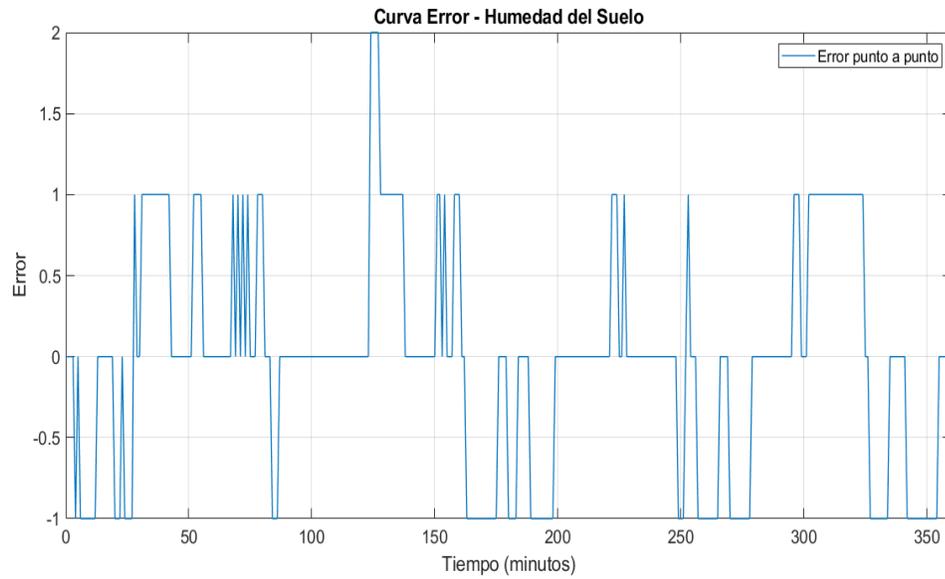
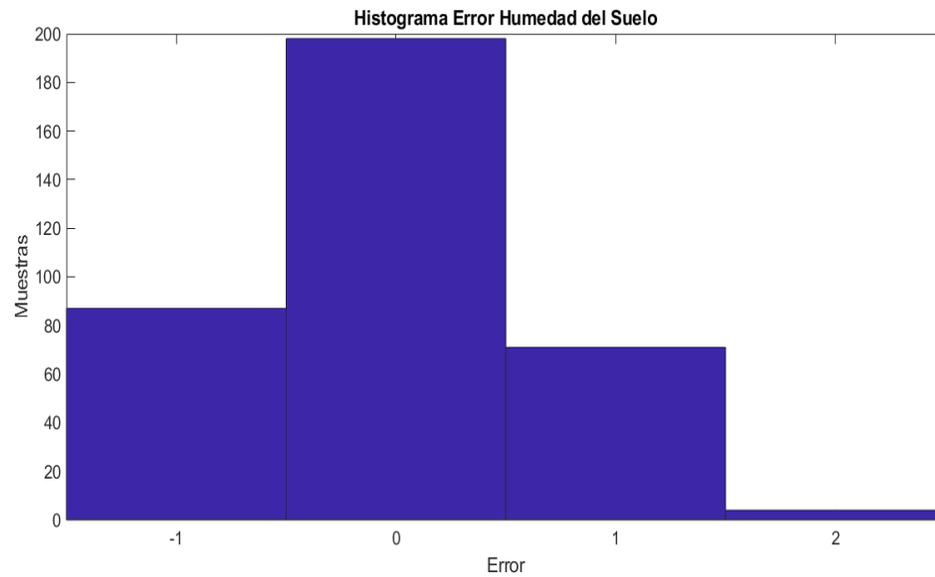
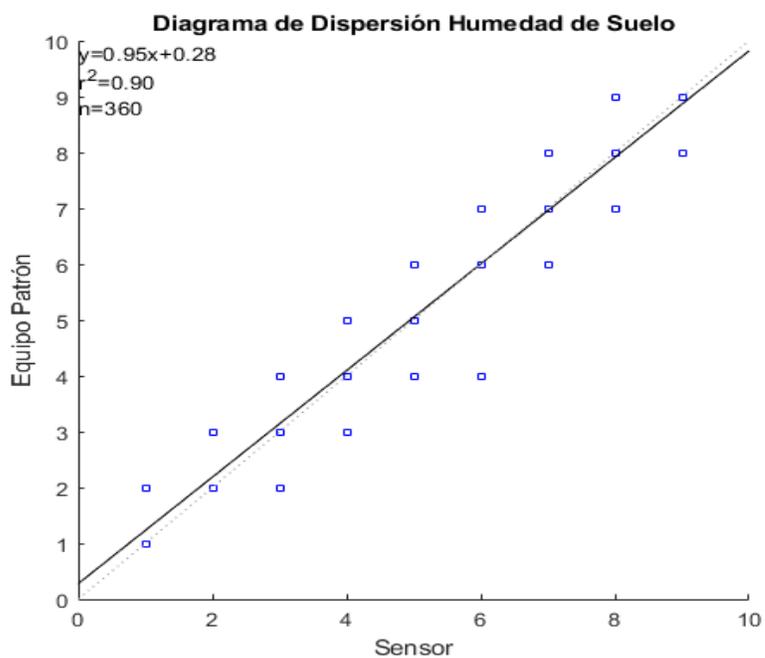
Figura 59*Curva de Error de Humedad del Suelo**Nota. (Autores, 2021).***Figura 60***Histograma de Error de Humedad de Suelo**Nota. (Autores, 2021).*

Figura 61

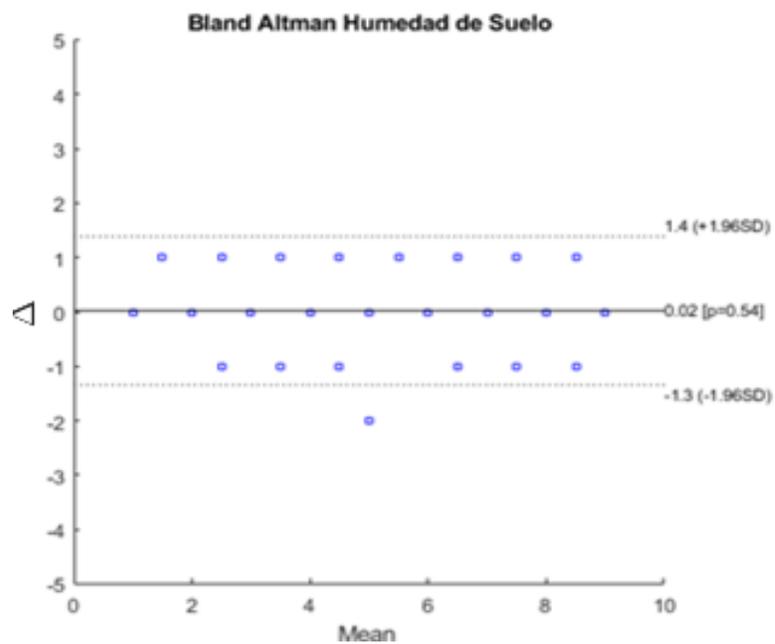
Diagrama de dispersión de Humedad de Suelo



Nota. (Autores, 2021).

Figura 62

Método gráfico de Bland Altman para la Humedad de Suelo



Nota. (Autores, 2021).

Implementación del Software

El software del sistema de monitorización se encuentra formado por las siguientes partes:

- Software de la placa de desarrollo
- Red de Sigfox
- Plataforma de registro y visualización de datos

Software de la placa de desarrollo

La placa de desarrollo es el núcleo del nodo sensor, inicializando los sensores, receptando sus lecturas y realizando un tratamiento de los datos para su posterior envío a la red de Sigfox, esta también se ocupa de la lectura del nivel de voltaje del banco de batería. Los parámetros considerados en el software de la placa de desarrollo son:

- Inicialización de los sensores.
- Cada sensor tomó 10 medidas y obtuvo un valor promedio final como resultado de la variable.
- El payload enviado a la red de Sigfox debió estar formado por las medidas de todas las variables y además del nivel de voltaje de la batería.
- El formato con el que se envió la información se puede observar en la Figura 63, de los 12 bytes disponibles se usan únicamente 10.
- El nodo sensor entró en modo reposo durante 15 minutos una vez enviado el payload a la red de Sigfox.

Figura 63

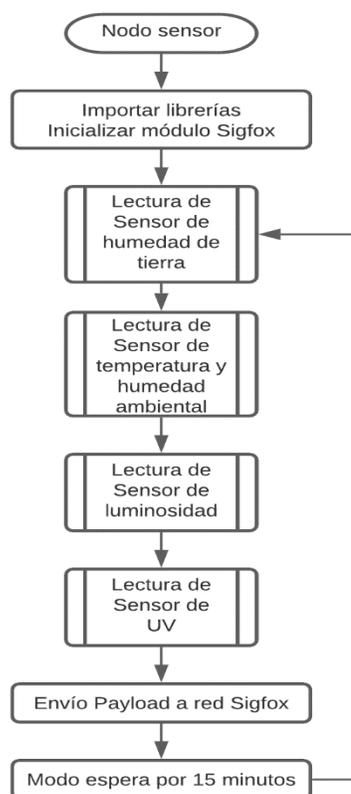
Payload formado por bytes de variables medidas



La Figura 64 muestra el diagrama de flujo de la programación de la placa de desarrollo, las funciones usadas en el mismo se detallan en el Anexo E.

Figura 64

Diagrama de flujo de programa de nodo sensor



La placa de desarrollo se programó en lenguaje Python en el software Visual Studio Code, antes de empezar a programar se debió seguir los pasos del fabricante para instalar el complemento del entorno de programación, así como también para la actualización del firmware de la placa. Una vez hecho esto se procedió a la programación como se indica en la Figura 64, esta constó de dos partes: la toma de datos de los sensores y el proceso de armado y envío del payload. Primero se importaron las librerías necesarias para el uso del sensor DHT11, BH1750 y la librería Iertools que permitió la utilización de iteraciones utilizadas en la formación del payload como se indica en las líneas 7,8 y 10, respectivamente. Además, en las líneas 1, 2, 11, 12 y 13 se inicializó el módulo de Sigfox, de la siguiente manera:

```

1  from network import Sigfox
2  import socket
3  import math
4  import pycom
5  import time
6  from machine import Pin, ADC, I2C
7  from dht import DHT
8  import bh1750fvi
9  from itertools import repeat
10 sigfox = Sigfox(mode=Sigfox.SIGFOX, rcz=Sigfox.RCZ4)
11 s = socket.socket(socket.AF_SIGFOX, socket.SOCK_RAW)
12 s.setblocking(True)
13 s.setsockopt(socket.SOL_SIGFOX, socket.SO_RX, False)

```

Posteriormente se procedió a la toma de datos de cada sensor tomando en cuenta que el sensor de luminosidad usa el protocolo de comunicación *I2C* por lo que fue necesaria su inicialización indicada en las líneas 14 y 15:

```

14 i2c = I2C(0, I2C.MASTER, baudrate=100000)
15 light_sensor = bh1750fvi.BH1750FVI(i2c, addr=i2c.scan()[0])

```

Se obtuvieron diez medidas separadas por un segundo y se calculó el promedio obteniendo un resultado final de cada variable, tomando dicho resultado se hizo un procedimiento para poder armar el payload convirtiendo los valores enteros a bytes. Se definió el límite máximo de cada variable para saber cuántos bytes necesitaban, no se

utilizó la función propia de Python para convertir un entero a byte ya que al usarla se agregan los caracteres “b\”x” al resultado, la solución que se planteó fue la transformación del promedio a binario, se hicieron grupos de ocho bits desde el bit menos significativo y en caso de faltar valores se rellenaron con ceros, obteniéndose los bytes a enviar, se ejemplifica este proceso en la Tabla 5.

Tabla 5

Ejemplo de conversión entero a bytes

Variable	Valor	Binario	Bytes
Luz	277	00000001 00010101	1 21
Suelo	3160	00001100 01011000	12 88
Humedad	52	00110100	52

Nota. Esta tabla presenta tres ejemplos de la conversión necesaria para el envío de variables a red Sigfox.

Por último, para el envío del payload a la red Sigfox se utiliza la instrucción send seguida de la información de cada sensor, como se indica en la línea 16:

```
s.send(bytes([luzSigfox[0], luzSigfox[1], signodec, decenadec,
16 unidaddec, humedadSigfox, SuelohSigfox[0], SuelohSigfox[1],
UVSigfox, batSigfox]))
```

Red de Sigfox

Para que el nodo sensor envíe los mensajes a la red de Sigfox es necesario registrar la tarjeta de desarrollo de Sigfox a la red, una vez el equipo se encuentra registrado se realiza la decodificación de la carga útil personalizada en el backend propio de la tecnología Sigfox y finalmente se configura los callbacks hacia la plataforma de registro y visualización de datos.

Registro del dispositivo

Para el registro de la tarjeta de desarrollo compatible con Sigfox es necesario dirigirse a la página principal y seleccionar la opción de *Activate my DevKit*, como se muestra en la Figura 65.

Figura 65

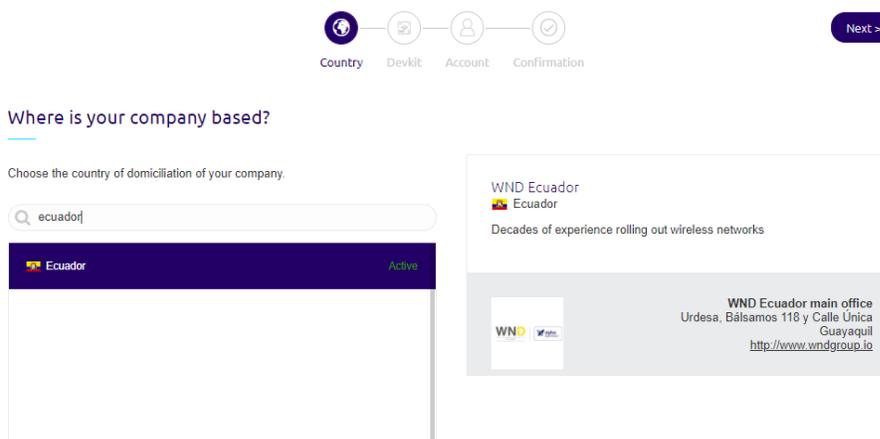
Página principal para el registro del dispositivo Sigfox



De esta manera comienza la activación del dispositivo como se indica en la Figura 66, es necesario seleccionar la zona horaria del usuario para este caso Ecuador, ya que es la referencia de tiempo para el backend de Sigfox.

Figura 66

Selección de la zona horaria para el registro Sigfox



Posteriormente se debe ingresar la información de ID y PAC de la placa de desarrollo como se observa en la Figura 67, los cuales son únicos para cada dispositivo compatible con Sigfox y se encuentran dentro de la caja de placa de desarrollo. Además, se escoge el propósito del proyecto y se coloca una descripción corta del mismo.

Figura 67

Información de ID y PAC de la placa de desarrollo

The screenshot shows a web form with two main sections. The first section is titled "Provide your DevKit's details for identification" and contains two input fields: "Device ID" with an example "123AB" and a note "Up to 8 numbers and letters (from A to F)", and "PAC" with an example "1234567890ABCDEF" and a note "Exactly 10 numbers and letters (from A to F)". The second section is titled "Tell us about your project" and contains a dropdown menu for "Purpose of your project" and a text area for "Description" with a placeholder "Tell us more about your project!".

Nota. La información del ID y PAC son exclusivos para cada equipo de Sigfox.

A continuación, es necesario ingresar información básica como la información del usuario y al grupo que pertenece el dispositivo, como se muestra en la Figura 68. Una vez finalizado este proceso se despliega una notificación de confirmación, la cual re direcciona al backend de Sigfox donde se visualiza el dispositivo registrado.

Figura 68

Información del usuario para registro del dispositivo

Create your account

Already have a partner account or a Sigfox backend account? [Log in](#)

User information

First Name *

Last Name *

Email *

Phone Number (international format) *

Company information

Business Name *

Street Address *

Country *

City *

Nota. El email se utiliza para ingresar al backend de Sigfox, la demás información permite identificar al equipo

Backend Sigfox

Una vez registrado el dispositivo se puede visualizar varias opciones en el backend de Sigfox como se indica en la Figura 69 tales como:

1. Dispositivo: indica los equipos que se encuentran registrados en el backend de Sigfox, además se encuentran diferenciados por un único identificador.
2. Tipo de dispositivo: de igual manera presenta un listado de los dispositivos que se encuentran registrados en el backend de Sigfox, de esta manera a cada grupo de equipos se les asigna un tipo para la gestión de los mismos.
3. Usuario: indica todos los usuarios que pertenecen a un grupo y a su vez tienen la capacidad de acceder al backend Sigfox.

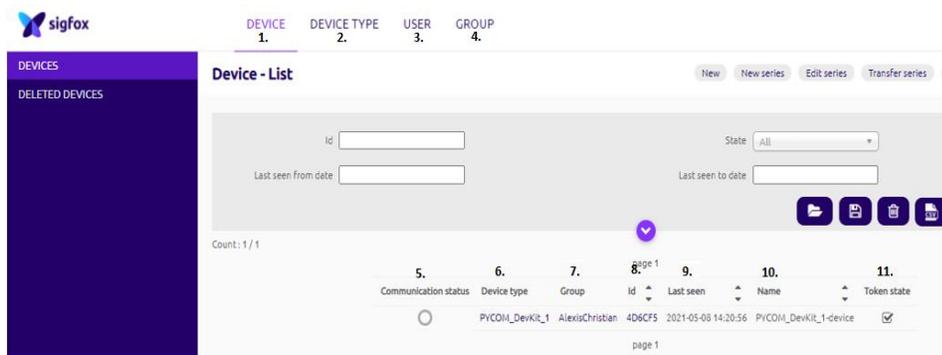
4. Grupo: permite la gestión de los grupos configurados para la separación de proyectos, además asocia dispositivos y usuarios.

En el backend de Sigfox en la opción de Dispositivos que se muestra en la Figura 69 se indica información importante como:

5. Estado de la comunicación.
6. Tipo de dispositivo.
7. Grupo.
8. ID del equipo.
9. Último acceso al dispositivo.
10. Nombre del equipo.
11. Estado de token.

Figura 69

Ventana de backend de Sigfox



Nota. La gráfica indica los dispositivos que se encuentran registrados con las respectivas características.

Al seleccionar el grupo que se encuentra registrado el dispositivo, se abre otra ventana como se señala en la Figura 70, donde se presentan varias opciones tales como:

1. Información: en esta opción se detalla los datos ingresados en el proceso de registro como el nombre, zona horaria, correo electrónico, tipo entre otros.
2. Usuarios asociados: se detalla el listado de los usuarios que han registrado los dispositivos, y se asocia al email y grupo que pertenece.
3. Tipos de dispositivos asociados: indica los dispositivos que han sido registrados, en esta opción pueden variar los tipos ya que existen diferentes placas de desarrollo para este caso el tipo del dispositivo es Pycom.
4. Contratos asociados: se muestra el nombre del contrato, el estado de la suscripción, fecha de activación y fecha de finalización de la suscripción.
5. Configuración de eventos: permite la configuración de eventos que se realizan en el instante que llegan mensajes al equipo de igual manera, es posible volver a enviar los datos al correo electrónico o un servidor.
6. Acceso a API: permite la asociación con una API o plataforma de IoT compatible con la tecnología Sigfox.

Figura 70

Ventana del Grupo, backend de Sigfox

The screenshot shows the Sigfox backend interface. On the left, there is a dark blue sidebar with a menu containing the following items, each with a small number next to it:

- INFORMATION 1
- ASSOCIATED USERS 2
- ASSOCIATED DEVICE TYPES 3
- ASSOCIATED CONTRACTS 4
- EVENT CONFIGURATION 5
- API ACCESS 6

The main content area is titled "Group 'AlexisChristian' - Information" and displays the following details:

- Type: Starter
- Name: AlexisChristian
- Description: customer created on 2021-04-01T03:21:35.573 (BSS Time)
- Timezone: America/Guayaquil
- Business contact email: christian_ruales@yahoo.com
- Technical contact email: christian_ruales@yahoo.com
- Billable: true
- Client name: AlexisChristian
- Client address: Quito, Barriónuevo - 593 - Quito - EC
- Parent group: SIGFOX_Ecuador_Semgroup
- Creation date: 2021-03-31 22:21:35
- Created by: BSS_API
- Last edition date: 2021-03-31 22:21:35
- Last edited by: BSS_API
- Max prototype allowed: 1000
- Current prototype count: 0

Al seleccionar el ID del dispositivo se despliega otra ventana como se observa en la Figura 71 en la cual se evidencia lo siguiente:

1. Información: se detalla información relevante del equipo como el nombre, estado activable, indicador de la calidad del enlace, estado de la comunicación entre otros.
2. Localización: se muestra el mapa en el cual se evidencia el área donde está ubicado el dispositivo, sin embargo, la precisión puede ser de hasta kilómetros como se indica en la Figura 72.
3. Mensajes: se presenta una tabla donde se evidencia los datos que llegan desde la placa de desarrollo hasta el backend de Sigfox como se observa en la Figura 73. También se indica la fecha y hora de recepción, la secuencia de número de mensaje, los datos en un valor hexadecimal los cuales son decodificados, el indicador de la calidad del enlace, los callbacks y la localización del dispositivo.
4. Eventos: son las notificaciones de error que es enviado por la red como puede ser que el dato no llegó completo o no recibió una confirmación.
5. Estadísticas: son representaciones gráficas de los mensajes enviados donde se puede visualizar cantidad de bytes, mensajes, la relación señal/ruido promedio y el indicador de fuerza de la señal recibida.
6. Configuración de eventos: permite la configuración de las devoluciones de llamadas que se efectúan cuando existe un evento.

Figura 71

Ventana de ID del dispositivo en el backend de Sigfox

Figura 72

Área de localización del dispositivo en el backend de Sigfox

Nota. La gráfica muestra la función de localización que proporciona la red de Sigfox en la cual se puede ubicar donde está situado el dispositivo.

Figura 73

Recepción de mensajes en el backend de Sigfox

The screenshot shows the 'Device 4D6CF5 - Messages' page. It features a sidebar on the left with navigation options: INFORMATION, LOCATION, MESSAGES (highlighted), EVENTS, STATISTICS, and EVENT CONFIGURATION. The main content area has search filters for 'From date' and 'To date'. Below the filters, there is a table of messages. Two messages are highlighted with a red box:

Time	Seq Num	Data / Decoding	LQI	Callbacks	Location
2021-05-08 20:50:22	683	00032b32313a00020164 Lut: 2 Temp: 21 Hum: 59 Suete: 3 UW: 1 Bat: 100			
2021-05-08 20:44:31	682	00022b32313800030164 Lut: 2 Temp: 21 Hum: 59 Suete: 3 UW: 1 Bat: 100			

Decodificación del mensaje

Los valores sensados se envían desde la placa de desarrollo en bytes, sin embargo, en el backend de Sigfox son recibidos como una trama hexadecimal como se indica en la Figura 74 es por esto que es necesario la decodificación del payload para poder enviar a la plataforma de registro y visualización, debido a que se utiliza una versión gratuita de dicha plataforma limitándose a receptor cada dato sin tener la posibilidad del manejo de los mismos. La decodificación se realiza en el propio backend de Sigfox en la ventana de tipo de dispositivo y se selecciona en *personalizado* de esta manera se despliega una nueva ventana, donde en la sección de la pantalla de carga útil se realiza la configuración personalizada.

A pesar de que en el backend de Sigfox se visualice como una trama en hexadecimal, la decodificación de los datos se los toma como bytes y es necesario seguir la gramática de decodificación del tipo de mensaje personalizado, es así que el campo se define por:

- Nombre: es el identificador en el cual puede incluir números, letras y caracteres.

- Índice de bytes: permite el desplazamiento en el búfer de mensajes desde el lugar donde se lee este campo empezando en cero.

Posteriormente va el nombre del tipo y los parámetros que cambian según el

tipo:

- Booleano (boolean): el parámetro se encuentra en la posición del bit dentro del byte de destino.
- Carácter (char): el parámetro es la cantidad de bytes que se deben agrupar en una cadena.
- Flotante (float): el parámetro es la longitud en bits del dato los cuales pueden ser de 32 o 64 bits.
- Entero sin signo (uint): los parámetros son directamente la cantidad de bits a introducir en el valor.
- Entero con signo (int): los parámetros son directamente la cantidad de bits a introducir en el valor.

De acuerdo a la Figura 63, se realiza la configuración personalizada tomando en cuenta los parámetros anteriormente explicados como se describe a continuación:

```
Luz::uint:16 Temp::char:3 Hum::uint:8 Suelo::uint:16 UV::uint:8
Bat::uint:8
```

- Para la luminosidad se configuró el nombre como *Luz* y se tomó dos bytes de la trama.
- Para la temperatura se configuró el nombre como *Temp* y se tomó tres bytes de la trama.
- Para la humedad se configuró el nombre como *Hum* y se tomó un byte de la trama.
- Para la humedad de suelo se configuró el nombre como *Suelo* y se tomó dos bytes de la trama.

- Para la radiación UV se configuró el nombre como *UV* y se tomó un byte de la trama.
- Para el nivel de batería se configuró el nombre como *Bat* y se tomó un byte de la trama.

Figura 74

Configuración de la carga útil personalizada

The screenshot displays the configuration page for a device. On the left is a dark blue sidebar with navigation options: INFORMATION, LOCATION, ASSOCIATED DEVICES, DEVICES BEING REGISTERED, STATISTICS, EVENT CONFIGURATION, CALLBACKS, and BULK OPERATIONS. The main content area is titled 'Device type PYCOM_DevKit_1 - Edition'. It contains several sections: 'Keep-alive (in minutes)' with a value of 0; 'Subscription automatic renewal' which is checked; 'Contracts' with a dropdown menu showing 'alexisch_9a28_1530b (no token left - geoloc: yes, end date: 2023-03-31)'; and 'Alert email' with an empty input field. Below this is the 'Downlink data' section, which is expanded to show 'Downlink mode' set to 'CALLBACK' and 'Downlink data in hexa' set to '[tapid]0000[rsst]'. The 'Payload display' section is also expanded, showing 'Payload parsing' set to 'Custom grammar' and a 'Custom configuration' field containing the expression 'Luz:uint:16 Temp:char:3 Hum:uint:8 Suelo:uint:16 UV:uint:8 E'. At the bottom of the configuration area are 'Ok' and 'Cancel' buttons.

Configuración del callback

Sigfox permite redirigir todo el volumen de los datos que ingresa al backend a cualquier aplicación que se ejecute en una plataforma de procesamiento de información o un servidor. La adquisición de los datos del backend de Sigfox se efectúa a través del reconocimiento de una URL hacia la aplicación web que se quiere transmitir los mensajes. Este proceso se lleva a cabo desde la sección de tipo de dispositivo y se selecciona la opción de callback, posteriormente se escoge nuevo y se despliega una nueva ventana, de esta manera es necesario llenar los siguientes parámetros:

1. Canal: para este caso se escogió URL para el envío de los datos a una única URL destino.
2. Configuración de carga personalizada: es necesario colocar los parámetros descritos en la sección anterior.

3. Patrón de URL: se define la solicitud de HTTP que se envía a la plataforma de registro y visualización de datos adicionando las variables disponibles, además es necesario colocar el puerto específico el cual es compatible con el canal URL, el mismo se encuentra ya determinado por la plataforma de registro y visualización de datos.
4. Método HTTP: para este caso se selecciona POST que se usa para crear un nuevo elemento.
5. Encabezado: es necesario colocar el token de la plataforma de registro y visualización de datos el cual es la clave única que permite al dispositivo ingresar datos a la cuenta.
6. Tipo de contenido: se coloca *application/json* debido a que la plataforma de registro y visualización de datos acepta ese tipo de datos como notación, finalmente es necesario colocar las variables que se enviarán en el cuerpo como se muestra en la Figura 75.

Figura 75

Configuración del Callback desde el backend de Sigfox

Device type PYCOM_DevKit_1 - Callback edition

Callbacks

Type: |

1. Channel:

2. Custom payload config: Luz:uint:16 Temp:char:3 Hum:uint:8 Suelo:uint:16 UV:uint:8 Bat:uint:8

URL syntax: `http://host/path?id={device}&time={time}&key1={var1}&key2={var2}...`
 Available variables: device, time, data, seqNumber, deviceTypeid
 Custom variables: customData#Luz, customData#Temp, customData#Hum, customData#Suelo, customData#UV, customData#Bat

3. Url pattern: `https://things.ubidots.com/api/v1.6/devices/{device}`

4. Use HTTP Method:

Send SNI: (Server Name Indication) for SSL/TLS connections

5. Headers: x-auth-token: BBFF-SH6vW0PluEk0JkH5gbeAGIKNlqVEw

header: value:

Content type:

6. Body:

```
{
  "Luz": {"value": "{customData#Luz}"},
  "Temp": {"value": "{customData#Temp}"},
  "Hum": {"value": "{customData#Hum}"},
  "Suelo": {"value": "{customData#Suelo}"},
  "UV": {"value": "{customData#UV}"},
  "Bat": {"value": "{customData#Bat}"}
```

Copyright © Sigfox - 10.3.1-4d3c1bb-20210415.002120 - 306 - Terms and conditions / Cookie policy.

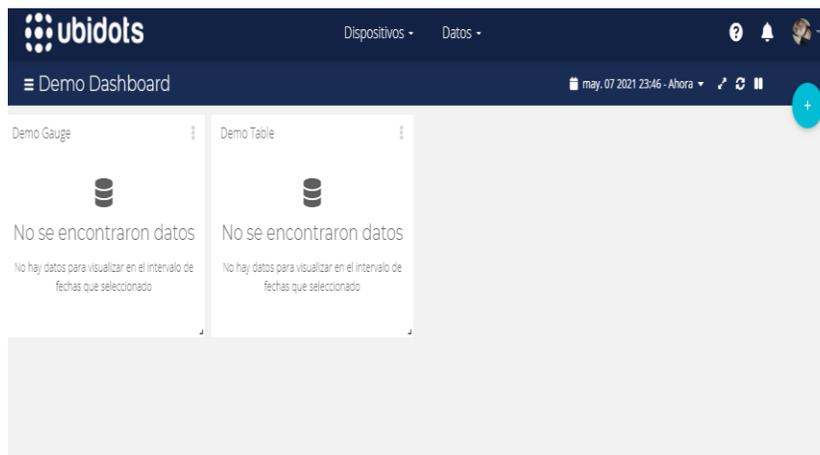
Nota. La configuración del cuerpo depende directamente de las variables que se está midiendo.

Plataforma de registro y visualización de datos

Se utiliza como plataforma de registro y visualización de datos a IoT Ubidots, al ser una plataforma certificada con Sigfox que permite el desarrollo de aplicaciones IoT fácil de integrar desde el hardware hasta la experiencia con el usuario final. Con esta premisa se crea una cuenta gratuita como se indica en la Figura 76, la cual sirve para la visualización de las variables en tableros, sin embargo, al disponer solamente de una cuenta de este tipo se tiene las limitaciones de no poder manejar los datos recibidos y tener un máximo de 10 tableros para usar. A pesar de lo mencionado anteriormente esta plataforma es apta para este trabajo de investigación en la monitorización de variables físicas en zonas agrícolas.

Figura 76

Plataforma de IoT Ubidots



Con la configuración realizada del callback en el backend de Sigfox se selecciona la opción de dispositivos para el cual se abre una nueva ventana donde se evidencia que la integración de los datos es correcta como se indica en la Figura 77, internamente se encuentran las variables sensadas las cuales se actualizan automáticamente cada vez que el dispositivo envíe los datos. Ver Figura 78.

Figura 77

Comprobación de la integración de los datos

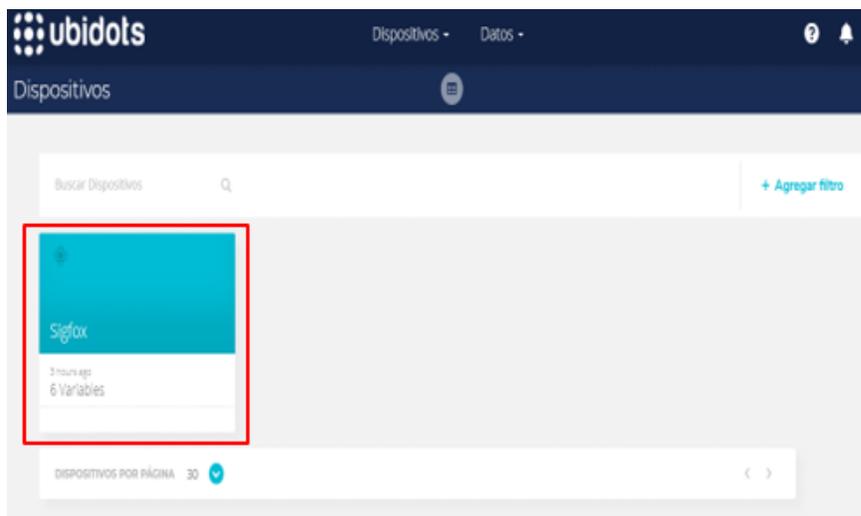
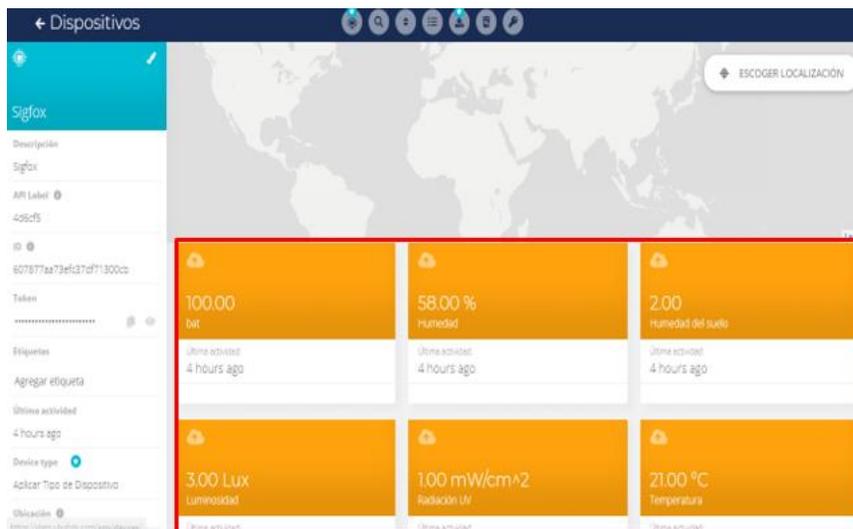


Figura 78

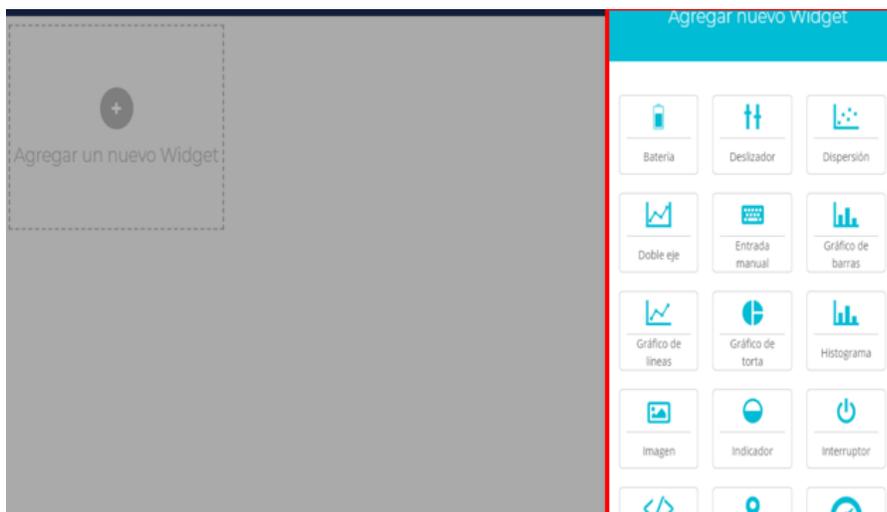
Recepción de los datos en la plataforma de Ubidots



Para tener una visualización óptima de los datos se crean tableros para cada variable, de esta manera en la página principal de Ubidots se selecciona datos y se escoge la opción de tableros, de esta forma Ubidots facilita agregar widgets para un mejor control y administración de las variables como se muestra en la Figura 79.

Figura 79

Creación de tableros en Ubidots



Capítulo V

Resultados

Integración del nodo sensor

Se desplegó el nodo sensor para la medición de variables ambientales como se muestra en la Figura 80, el cual se encuentra dotado con la placa de desarrollo Lopy con su respectiva antena para la transmisión de los datos, sensores de luminosidad, temperatura, humedad, radiación UV y humedad de suelo además cuenta con un banco de carga como se indicó en la representación esquemática y física del nodo sensor de las Figuras 34, 35 respectivamente. El dispositivo se encuentra dentro de una carcasa de resina que cumple la función de proteger a los elementos electrónicos del agua, polvo, radiación solar, entre otros que se pueden presentar en diversos escenarios en los que se lo sitúe como se indica en la Figura 81.

Figura 80

Sensores implementados en nodo sensor



Nota. La gráfica muestra la conexión de los sensores y placa de desarrollo dentro de la carcasa.

Figura 81

Nodo sensor final



Nota. La gráfica muestra el nodo sensor para monitorización de zonas agrícolas.

Despliegue de la red

Con el objetivo de habilitar el uso de la tecnología Sigfox en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo y sus alrededores, se realizó el pedido de instalación de una estación base al proveedor del servicio en el Ecuador siendo este WND Ecuador, en marco al convenio interinstitucional URCI-CNV-N-028-V1 Anexo F. En la Figura 82 y Figura 83, se puede observar el proceso de instalación de la estación base montada en el mástil de la azotea del edificio central del campus.

Figura 82

Instalación estación base en Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo

**Figura 83**

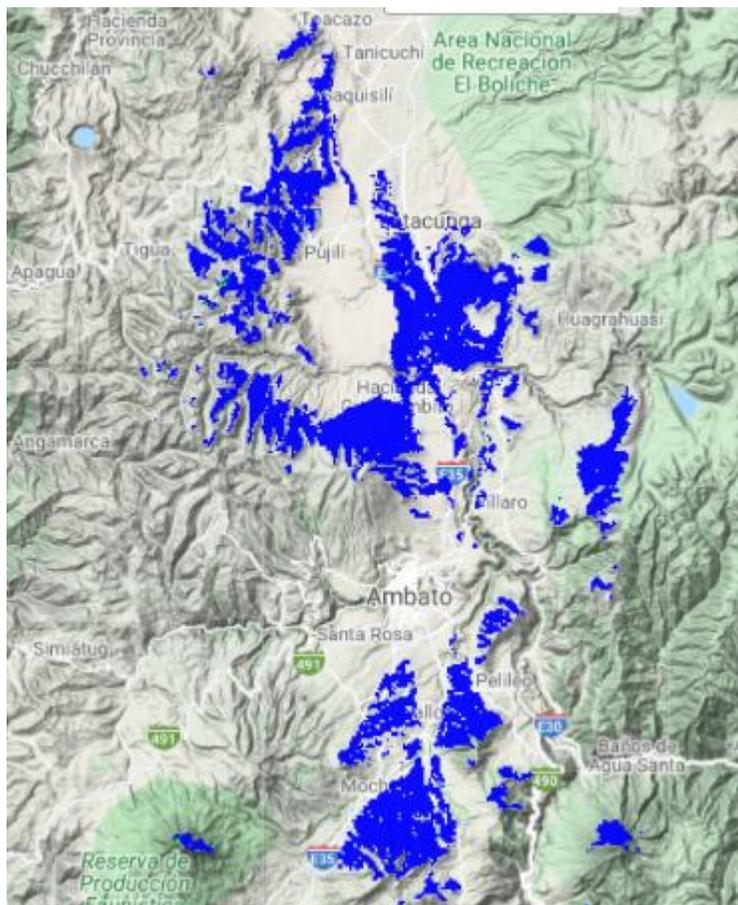
Radio base de Sigfox ubicada en edificio central de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo



Por último, se presenta en la Figura 84 la cobertura actualizada de la red Sigfox posterior a la instalación, en la cual se evidencia similitud con la simulación de cobertura radioeléctrica de la Figura 29.

Figura 84

Cobertura radioeléctrica de tecnología Sigfox de la radio base ubicada en el edificio central de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo



Nota. Tomado de (Sigfox, 2021).

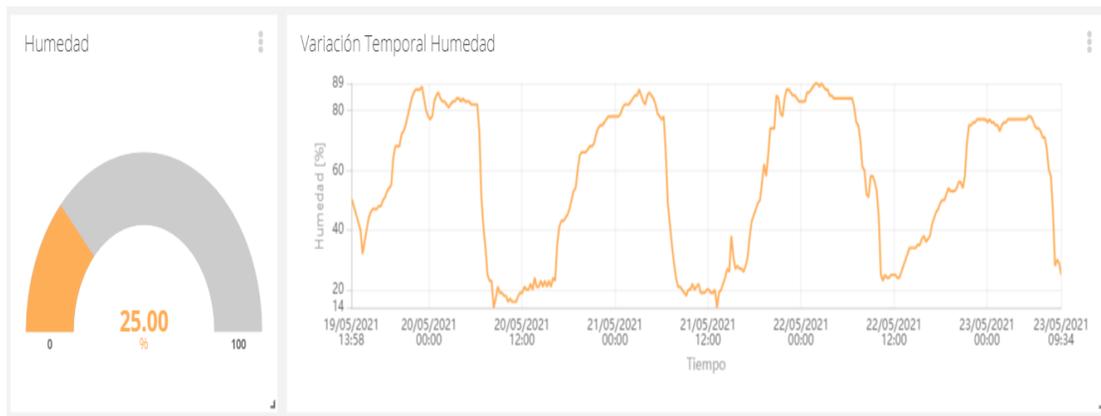
Integración del Dashboard

La medición de las variables se obtuvo de acuerdo a la duración del banco de carga, teniendo como resultado aproximadamente cuatro días de operación del nodo sensor, este corto tiempo se debe al número de sensores con los que se trabaja, al

intervalo de sensado de las variables y a la placa de desarrollo Lopy 4 que es un dispositivo de prueba para construir prototipos. En la Figura 85 se observa el comportamiento en el tiempo de la variable humedad en el cual este índice cambia en función de la hora del día, teniendo los valores más altos alrededor de la mañana y tarde en cambio los más bajos en la noche y madrugada. Además, se presenta un medidor gráfico limitado por las prestaciones del dispositivo siendo el mínimo 0 y el máximo 100 por ciento, el cual se encarga de indicar el último valor medido.

Figura 85

Representación de variable humedad en tableros de Ubidots

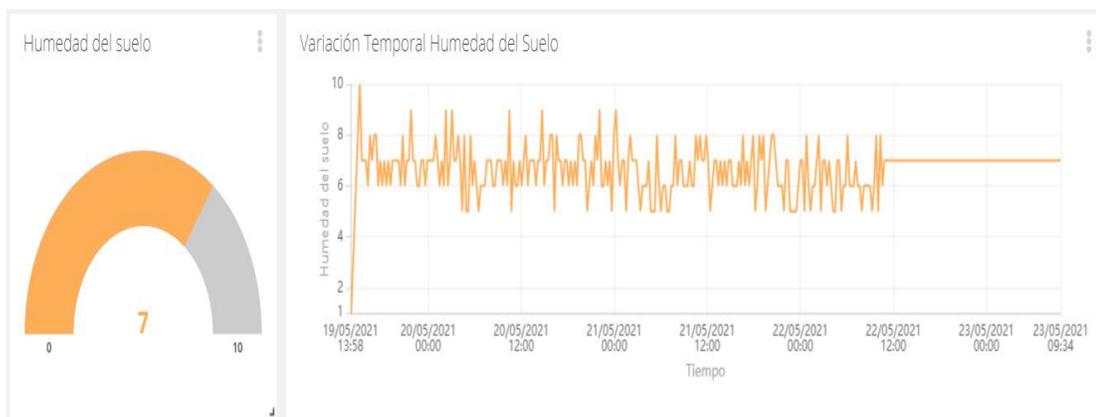


Nota. (Autores, 2021)

En la Figura 86 se observa el comportamiento en el tiempo de la variable humedad de suelo en el cual este índice cambia en función de la hora del día, se determina que se encuentra dentro de un rango de 5 a 8 en la escala de humedad, esto depende directamente de la climatología del día. Además, se presenta un medidor gráfico limitado por las prestaciones del dispositivo siendo el mínimo 0 y el máximo 100 por ciento, el cual se encarga de indicar el último valor medido.

Figura 86

Representación de variable humedad de suelo en tableros de Ubidots

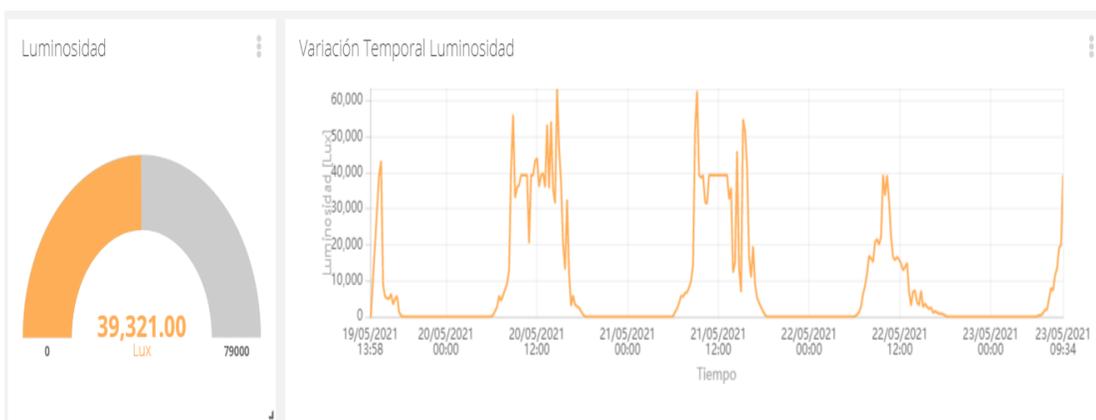


Nota. (Autores, 2021)

En la Figura 87 se observa el comportamiento en el tiempo de la variable luminosidad en el cual este índice cambia en función de la hora, teniendo sus valores más altos alrededor del mediodía y los más bajos en la noche y madrugada. También se presenta un medidor gráfico limitado por las prestaciones del dispositivo siendo el mínimo 0 y el máximo 79000 Lux, el cual se encarga de indicar el último valor medido.

Figura 87

Representación de variable luminosidad en tableros de Ubidots

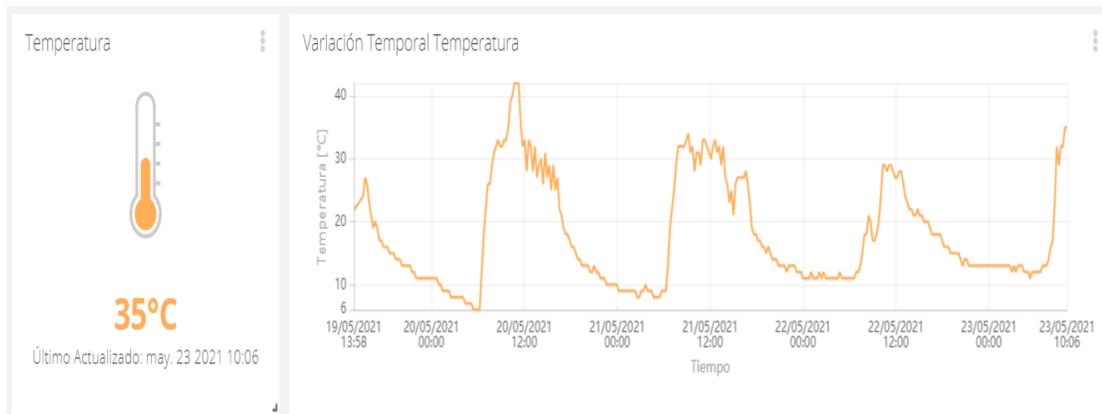


Nota. (Autores, 2021)

En la Figura 88 se observa el comportamiento en el tiempo de la variable temperatura ambiental evidenciando su directa relación con la variable luminosidad, es decir, presentando una tendencia creciente en horas cercanas al medio día con la presencia de luz solar y una tendencia decreciente en horas cercanas a la puesta de sol, manteniéndose baja durante la noche y madrugada. También se presenta un medidor gráfico en forma de termómetro configurado en grados centígrados, el cual se encarga de indicar el último valor medido.

Figura 88

Representación de variable temperatura en tableros de Ubidots

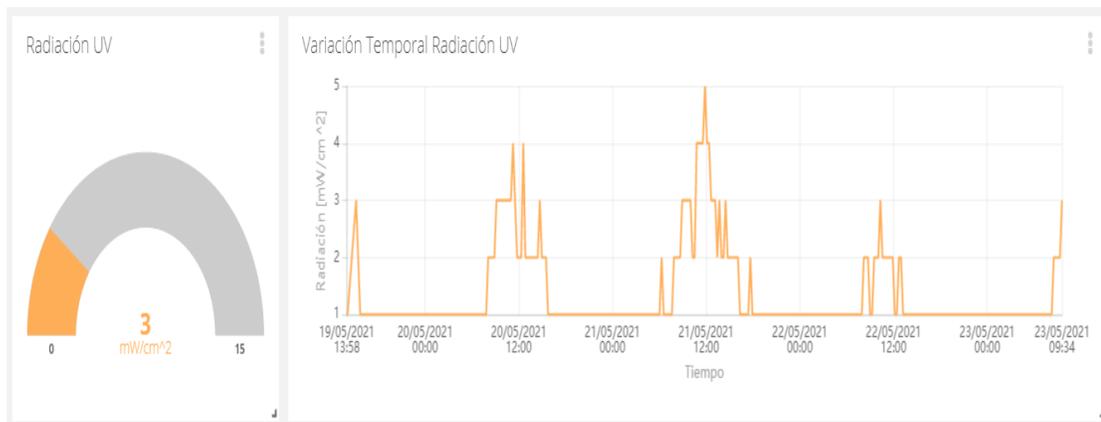


Nota. (Autores, 2021)

En la Figura 89 se observa el comportamiento en el tiempo de la variable radiación UV presentando variaciones en horas similares al de las variables luminosidad y temperatura, teniendo sus máximos picos al mediodía alcanzando valores de hasta 5 mW/cm^2 . También se obtiene una representación gráfica limitada por el rango máximo y mínimo del dispositivo sensor, este se encarga de indicar el último valor medido.

Figura 89

Representación de variable radiación UV en tableros de Ubidots



Nota. (Autores, 2021)

Información general del enlace

El backend de Sigfox permite identificar parámetros importantes acerca del enlace como son el número de mensajes, cantidad de bytes enviados y el indicador de fuerza de la señal recibida.

Mensajes

Considerando que el envío de los mensajes se realizó con un intervalo de 15 minutos esto con el fin de no sobrepasar el límite de los 140 mensajes diarios que permite la red de Sigfox, en la Figura 90 se observa que en las pruebas realizadas con el tiempo programado se tiene un máximo de 91 mensajes al día sin tener interrupciones o desconexiones del nodo sensor.

Figura 90

Representación gráfica del número de mensajes enviados

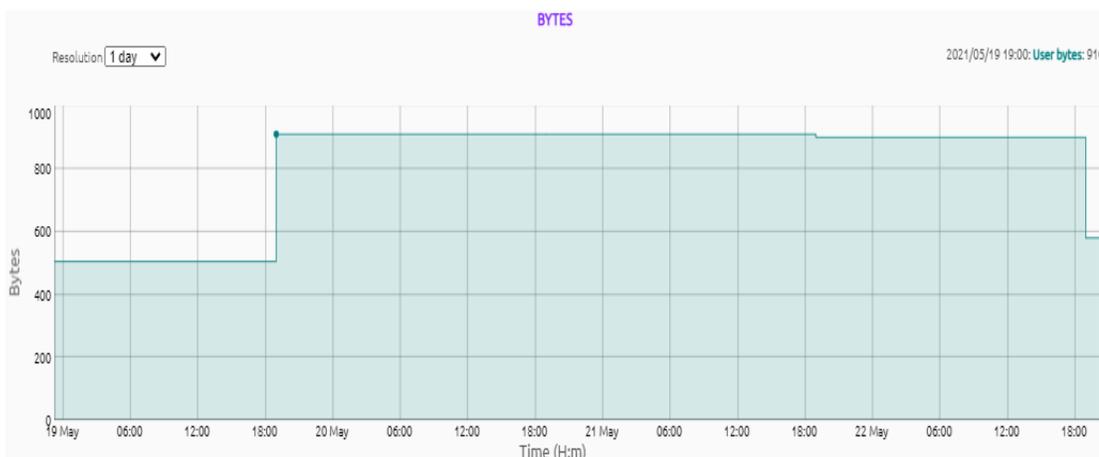


Bytes

La cantidad de bytes utilizados al día son directamente proporcional al número de mensajes enviados, sabiendo que para cada mensaje se utiliza 10 de los 12 bytes permitidos por la red de Sigfox, es así que en las pruebas realizadas con aproximadamente 91 mensajes se tiene un promedio de 910 bytes diarios como se indica en la Figura 91.

Figura 91

Representación gráfica de la cantidad de bytes enviados



Indicador de Fuerza de la Señal Recibida (RSSI)

Sigfox facilita un indicador de calidad de enlace que se basa en el RSSI, el número de estaciones que reciben el mensaje y la zona de configuración de radio (RC), teniendo en cuenta que el Ecuador se encuentra dentro de la zona RC4 la cual presenta parámetros que se detallan en la Tabla 6. En base a las pruebas realizadas se tiene un valor mínimo de -101 dBm como se observa en la Figura 92, siendo este mayor al que presenta Sigfox en la Tabla 6 de esta manera, el indicador de calidad del enlace es excelente para el nodo sensor.

Tabla 6

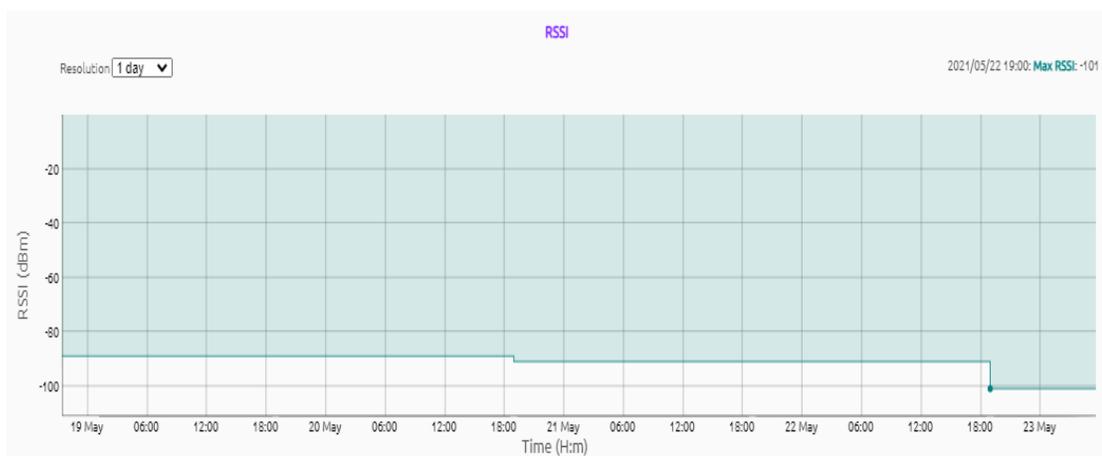
Indicador de calidad del enlace para zonas RC2 y RC4

RSSI	Número de estaciones base	Indicador de calidad de enlace
-114 dBm < RSSI	3	Excelente
-127 dBm < RSSI ≤ -114 dBm	3	Buena
-114 dBm < RSSI	1 o 2	Buena
-127 dBm < RSSI ≤ -114 dBm	1 o 2	Promedio
RSSI ≤ -127 dBm	alguna	Límite

Nota. Recuperado de (Sigfox, 2021).

Figura 92

Representación gráfica del RSSI



Análisis de Costos

El prototipo del sistema de monitorización de zonas agrícolas se ha desarrollado con software y hardware de prueba, es por esto que el valor del nodo sensor se eleva a comparación de utilizar el módulo de comunicación de radio Sigfox y un microcontrolador para el procesamiento y envío de datos. Las Tablas 7, 8 y 9 detallan los costos del nodo sensor, de la implementación de la red y de los servicios, respectivamente.

Tabla 7

Costos del prototipo de sistema de monitorización de zonas agrícolas

Dispositivo	Costo (\$)
Placa de desarrollo Lopy 4	83,00
Sensor DHT11	2,00
Sensor GY-30	6,00
Sensor ML8511	8,00
Sensor HD-38	8,00
Banco de batería	18,00
Carcasa	38,00
Total	163,00

Tabla 8

Costos de implementación de la red

Parámetro	Costo (\$)
Renta del espacio del mástil	667,70
Renta del servicio	0,84
Energía e Internet	100,00
Total	768,54

Tabla 9

Costos de servicios

Parámetro	Costo (\$)
Costo del equipo	1500,00
Instalación	500,00
Total	2000,00

Nota. El rubro considerado como costo del equipo e instalación hace referencia a un único pago.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

El estudio del estado del arte realizado con respecto a las comunicaciones implementadas en nodos sensores en zonas agrícolas permitió conocer que, a nivel mundial países como la India y Estados Unidos presentan mayores trabajos acerca de IoT y agricultura de precisión utilizando tecnologías de comunicación inalámbrica como las LPWAN. A nivel latinoamericano países como Colombia y Brasil se orientan en menor escala a las WSN con tecnología de comunicación WiFi y RFID, en Ecuador se evidenció interés en la medición de variables, cultivos de frutas y cambio climático todo esto con el uso de WSN y Sigfox como comunicación inalámbrica, con respecto a las tendencias de tecnologías de comunicación inalámbrica enfocadas a diferentes aplicaciones tales como agricultura de precisión o vehículos autónomos, predominarán en base al potencial de impacto y de innovación tecnológica como las LPWAN entre las que se encuentra Sigfox y LoRa, redes móviles 5G y WiFi.

En base al proceso de análisis jerárquico se determinó que las características de mayor importancia de las tecnologías de comunicación inalámbrica aplicadas a la monitorización de zonas agrícolas en el Ecuador son la disponibilidad en el país, el costo, el rango de cobertura y el consumo de energía. Considerando esta premisa se seleccionó a las tecnologías Sigfox, Zigbee y Lora como alternativas para las simulaciones de cobertura radioeléctrica.

La simulación de cobertura radioeléctrica realizada en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo permitió determinar que Sigfox y LoRa presentan un mayor alcance cubriendo poblaciones como Salcedo en su totalidad, Latacunga y Saquisilí parcialmente, por otro lado, Zigbee únicamente presenta cobertura en la ciudad de Salcedo. Debido a la zona geográfica en la que se desarrolló el análisis, los patrones de radiación para las tres tecnologías se

ven limitados en direcciones Este y Oeste, en base a las características y cobertura se seleccionó Sigfox como tecnología de comunicación del estudio teniendo cobertura en Saquisilí, Salcedo y Latacunga por parte de la provincia de Cotopaxi y Cevallos, Mocha y Ambato por parte de la provincia de Tungurahua, además, como solución a las limitaciones anteriormente mencionadas se realizó la reubicación de la estación base al cerro Nitón y Pilisurco obteniéndose mayor alcance para las dos provincias en estudio.

En base al estudio realizado se logró la instalación de la estación base y el despliegue de la red Sigfox en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE sede Latacunga campus Belisario Quevedo, además, se comprobó que el patrón de radiación simulado en el software Xirio Online es similar al proporcionado por el proveedor. El costo que representó la ejecución de la red fue asumido por la empresa representante de Sigfox en Ecuador debido al convenio existente con la Universidad, el único monto solventado por los autores fue la construcción del nodo sensor.

Se determinó que Sigfox es una tecnología de comunicación económica e idóneo para comunicaciones en las que se necesiten áreas amplias de cobertura, sin embargo es limitada por la propia empresa respecto al número de mensajes que se pueden transmitir admitiendo enviar un máximo de 140 mensajes de 12 bytes al día, es decir, se lo considera ideal en entornos que no necesiten la monitorización en tiempo real, además, presenta una ventaja para el usuario al operar en bandas no licenciadas permitiendo el uso libre del espectro.

El nodo sensor tiene la capacidad de medir variables ambientales como la temperatura, humedad, radiación UV, humedad de suelo y luminosidad enfocado en la monitorización de zonas agrícolas, además, presentó un error menor al 2% en comparación con los equipos patrones, de esta manera la información recogida por el dispositivo es considerada confiable para el usuario.

El desarrollo e implementación de un sistema de monitorización de zonas agrícolas es una herramienta que permite el control y visualización de variables medio ambientales mediante el uso de la plataforma de IoT Ubidots, que puede ser empleado por usuarios para generar una alerta temprana de heladas en las provincias de Cotopaxi y Tungurahua, así como también en poblaciones cercanas.

Recomendaciones

Se recomienda utilizar un diseño propio evitando el uso de placas de desarrollo con el objetivo de optimizar el consumo de energía desperdiciada por funcionalidades no requeridas. A su vez es necesario implementar un banco de batería con mayor capacidad amperio-hora con el fin de prolongar la autonomía energética del nodo sensor.

Como el nodo sensor se encuentra ideado para trabajar en lugares abiertos es recomendable utilizar una carcasa que garantice las protecciones necesarias frente a condiciones climáticas adversas.

En el envío de los datos del nodo sensor para la monitorización de zonas agrícolas se utilizaron 10 de los 12 bytes que permite Sigfox por cada mensaje, es por esto que se recomienda desarrollar un algoritmo de compresión de datos con el fin de optimizar la información.

Se recomienda la instalación de un servidor propio para la administración y visualización de la información, debido a que al utilizar una cuenta gratuita de Ubidots esta presenta limitaciones en el tratamiento de los datos y en el número de dashboards que se pueden emplear.

Trabajos Futuros

El desarrollo e implementación de una plataforma propia para la recepción de callbacks con información de los sensores se hace necesaria, esto debido a que

servicios como Ubidots tienen funcionalidades gratuitas limitadas haciendo imposible la manipulación de información receptada por la misma, hay que recalcar que es posible la suscripción a funcionalidades de pago, sin embargo, si el objetivo es abaratar los costos del proyecto esto no sería una solución viable.

Por otro lado, es evidente la necesidad del desarrollo de un algoritmo de compresión de datos el cual permita la optimización del payload de cada uno de los 140 mensajes diarios disponibles dentro de la red Sigfox permitiendo la generación de más información sin exceder dicho límite. También se consideraría parte del trabajo a la evaluación del uso de una placa con mayores prestaciones para toda la recepción y tratamiento de los datos generados por los sensores y el uso de las placas de desarrollo únicamente para el envío a la red.

Por último, es necesaria la optimización en la gestión de energía por parte del nodo sensor, tomando en cuenta el consumo que conlleva el uso de 4 diferentes sensores empleados para una medición constante, se precisa un diseño de carcasa de mayores proporciones que permita la implementación de bancos de baterías de mayor tamaño y amperaje logrando así extender el tiempo de trabajo del nodo sensor antes de necesitar una recarga de energía. También se debe considerar la posibilidad de la adquisición únicamente del módulo de radio de Sigfox y realizar el diseño necesario para su comunicación con un microcontrolador que limite el consumo de energía solamente para las funcionalidades necesarias y orientar el dispositivo para la certificación de Sigfox Ready.

Referencias Bibliográficas

- Abhishek, K., & Kaur, S. (2019). Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.039>
- AlFugaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- ARCOTEL. (2018). *Resolución ARCOTEL-2018* (A. de R. y de las T. Control (ed.)). www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2018/04/NORMA-ESPECTRO-DE-USO-LIBRE-Y-ESPECTRO-PARA-USO-DETERMINADO-EN-BANDAS-LIBRES.pdf
- Ashton, K. (2009). That “Internet of Things” Thing. *RFID Journal*, 1.
- Bandyopadhyay, D., & Sen, J. (2011). Internet of Things: Applications and Challenges in Technology and Standardization. *Wireless Personal Communications*, 58(1), 49–69. <https://doi.org/10.1007/s11277-011-0288-5>
- Bardyn, J., Melly, T., & Sornin, N. (2016). IoT : The Era of LPWAN is starting now. *ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference*. <https://doi.org/10.1109/esscirc.2016.7598235>
- Basantes, E. (2015). *Manejo de cultivos Andinos del Ecuador*. (Universida).
- Bouguera, T., Diouris, J.-F., Chaillout, J.-J., Jaouadi, R., & Guillaume, A. (2018). Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN. *Sensors*, 18(7), 2104. <https://doi.org/10.3390/s18072104>
- Bravo, V. (2017). *Evaluación de un sistema VBM384 para la aplicación práctica de internet de las cosas IoT, en el monitoreo automático de la humedad y temperatura del suelo*. Universidad de Cuenca.
- Brewster, C., Roussaki, I., Kalatzis, N., Doolin, K., & Ellis, K. (2017). IoT in agriculture:

- Designing a Europe-wide large-scale pilot. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 26–33. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600528>
- Brito, J. (2019). Evolución de las redes móviles. *Revista ReDTiS*.
- Carrion, G., Huerta, M., & Barzallo, B. (2018). Monitoring and irrigation of an urban garden using IoT. *2018 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/colcomcon.2018.8466722>
- Carvajal, J. (2009). *Soberanía alimentaria* (Colectivo).
- Casals, L., Mir, B., Vidal, R., & Gomez, C. (2017). Modeling the Energy Performance of LoRaWAN. *Sensors*, 17(10), 2364. <https://doi.org/10.3390/s17102364>
- Centaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60–67. <https://doi.org/10.1109/mwc.2016.7721743>
- Chacko, S., & Job, D. (2018). Security mechanisms and Vulnerabilities in LPWAN. *Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/396/1/012027>
- Challenger, I., Diaz, Y., & Becerra, R. (2014). El lenguaje de programación Python. *Ciencias Holguín*, XX(2), 1–13. www.redalyc.org/articulo.oa?id=181531232001
- Chaudhary, D., Nayse, S., & Waghmare, L. (2011). Application of wireless sensor networks for greenhouse parameter control in precision agriculture. *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*, 3(1), 140–149. <https://doi.org/10.5121/ijwmn.2011.3113>
- Chulbi, C. (2020). *CONTROL DEL CULTIVO DEL CAQUI MEDIANTE TECNOLOGÍA IOT* (Universida).
- Corkery, G., Ward, S., Kenny, C., & Hemmingway, P. (2013). Monitoring Environmental Parameters in Poultry Production Facilities. *Computer Aided Processing*

Engineering – CAPE Forum 2013, 1–11.

- Correia, F., Alencar, M., Carvalho, F., Leal, B., & Lopes, W. (2013). Propagation Analysis in Precision Agriculture Environment using XBee Devices. *2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/IMOC.2013.6646472>
- Deepa, B., Anusha, C., & Devi, C. (2020). Smart Agriculture Using IOT. *Intelligent System Design*, 11–19.
- Días, A., & Merino, P. (2017). The 3GPP NB-IoT system architecture for the Internet of Things. *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 277–282. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2017.7962670>
- Electronics, M. (2012). *Datasheet DHT11 Humidity & Temperature Sensor*. www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf
- Ergen, S. (2004). ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary. *University of Wisconsin-Madison*.
- FAO. (2017). *The future of food and agriculture* (FAO).
- Gaddam, S., & Rai, M. (2018). A comparative study on various LPWAN and cellular communication Technologies for IoT based Smart Applications. *In 2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations In Engineering And Technological Research (ICETIETR)*. *IEEE*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICETIETR.2018.8529060>
- Gaona, E., López, E., & Gómez, J. (2020). Modelos de predicción de propagación para señales de televisión en la banda UHF. *Información Tecnológica*, 31(4), 3–16. <https://doi.org/dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000400003>
- Gartner.Inc. (2019). *Gartner Top 10 Strategic Technology Trends 2021*. <https://www.gartner.com/en>
- Gerdsria, N., & Kocaoglu, D. (2007). Applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) to

- build a strategic framework for technology roadmapping. *Science Direct*, 46(8), 1071–1080. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.03.015>
- Gislason, D. (2008). *Zigbee wireless networking* (Newnes (ed.)).
- Hamidreza, S., Rapeepat, R., Sassan, I., Laya, A., Taleb, T., Riku, J., & Amitava, G. (2015). Machine-Type Communications: Current Status and Future Perspectives Towards 5G Systems. *IEEE Communications Magazine*, 53(9), 10–17. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7263367>.
- Ismail, D., Rahman, M., & Saifullah, A. (2018). *Low-Power Wide-Area Networks: Opportunities, Challenges, and Directions*. 1–6.
- ITU-T. (2012). *Series Y: Global Information Infrastructure, Internet Protocol Aspects And Next-Generation Networks*.
- Jaramillo, M. (2015). *Implementacion de red movil con tecnologia 4G LTE*. Escuela Politécnica del Litoral.
- Kahlert, T., & Giza, K. (2016). *Visual Studio Code Tips & Tricks* (M. Schiffer (ed.); 1st ed.). Microsoft.
- Karkouch, A., Hajar, M., Moatassime, H. Al, & Noel, T. (2016). Data Quality in Internet of Things: A state-of-the-art survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 57–81.
- Kaushik, S. (2012). An overview of technical aspect for WiFi networks technology. *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*, 1(01), 28–34. <https://doi.org/10.1.1.215.3126>
- Keçeci, B., Tansel, Y., & Eraslan, E. (2019). Development of a Spreadsheet DSS for Multi-Response Taguchi Parameter Optimization Problems Using the TOPSIS, VIKOR, and GRA Methods. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 18(5), 1501–1531. <https://doi.org/10.1142/S0219622019500317>
- Khot, S., & Gaikwad, M. (2016). Development of cloud-based Light intensity monitoring

system for green house using Raspberry Pi. *2016 International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA)*, 1–4.

<https://doi.org/10.1109/ICCUBEA.2016.7860128>

Kiani, F., & Seyyedabbasi, A. (2018). Wireless Sensor Network and Internet of Things in Precision Agriculture. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (Ijacs)*, 9(6), 99–103.

Kiruthika, M., Shweta, T., Mritunjay, O., & Kavita, S. (2015). Parameter Monitoring for the Precision Agriculture. *International Journal of the Research and Scientific Innovation*.

Kumar, A., & Hancke, G. (2014). Energy Efficient Environment Monitoring System Based on the IEEE 802.15.4 Standard for Low Cost Requirements. *IEEE Sensors Journal*, 14(8), 2557–2566. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2313348>

LAPIS, S. (2013). *ML8511 UV Sensor with Voltage Output*.

cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/LightImaging/ML8511_3-8-13.pdf

Leiden, U. (2021). *VOSviewer*. Visualizing Scientific Landscapes. www.vosviewer.com

Llaria, A., Terrasson, G., Arregui, H., & Hacala, A. (2015). Geolocation and monitoring platform for extensive farming in mountain pastures. *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2420–2425.

<https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125454>

Lysogor, I., Voskov, L., & Efremov, S. (2018). Survey of Data Exchange Formats for Heterogeneous LPWAN-Satellite IoT Networks. *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, 1–5.

<https://doi.org/10.1109/MWENT.2018.8337257>

Machado, M. (2019). *González, M. L. (2019). Estudio de NB-IoT y comparativa con otras tecnologías LPWAN. Catalunya: Universitat Oberta de Catalunya.*

(Universita).

- MAE-MAGAP. (2015). *Protocolo metodológico para la elaboración del mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador Continental 2013-2014, escala 1:100.000.*
- Mahmood, H., Nordin, R., Gharghan, S., Jawad, A., & Ismail, M. (2017). Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, *17*, 1781. <https://doi.org/10.3390/s17081781>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2018a). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, *5*(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2018b). Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT. *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (Percom Workshops)*, 197–202. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2018.8480255>
- Miles, B., Bourennane, E.-B., Boucherkha, S., & Chikhi, S. (2020). A study of LoRaWAN protocol performance for IoT applications in smart agriculture. *Computer Communications*, *164*, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.10.009>
- Navarro, H., Torres, R., Sotol, F., Albaladejo, C., López, J., & Domingo, M. (2015). A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management. *Agricultural Water Management*, *151*, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.022>
- Núñez, J., Fonthal, F., & Quezada, Y. (2018). Design and implementation of WSN and IoT for precision agriculture in tomato crops. *2018 IEEE ANDESCON*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/andescon.2018.8564674>
- Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, *118*(1), 66–84. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.011>
- Oliveira, K., Esgalha, H., Montebeller, S., & Montebeller, T. (2017). Wireless Sensor Network for Smart Agriculture using ZigBee Protocol. *2017 IEEE First Summer*

- School on Smart Cities (S3C)*, 61–66. <https://doi.org/10.1109/s3c.2017.8501379>
- Ossa, S. (2017). Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos. *Vector*, 12, 51–60. <https://doi.org/10.17151/vect.2017.12.6>
- Pascual, R., Sanchez, D., Naces, D., & Nuñez, W. (2015). A Wireless Sensor Network Using XBee for Precision Agriculture of Sweet Potatoes (*Ipomoea batatas*). *2015 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/hnicem.2015.7393212>
- Patel, D., & Won, M. (2017). Experimental Study on Low Power Wide Area Networks (LPWAN) for Mobile Internet of Things. *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108501>
- Pitu, F., & Gaitan, N. (2020). Surveillance of SigFox technology integrated with environmental monitoring. *In 2020 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*. *IEEE*, 69–72. <https://doi.org/10.1109/DAS49615.2020.9108957>
- Popli, S., Jha, R., & Jain, S. (2018). A survey on energy efficient narrowband internet of things (NBloT): Architecture, application and challenges. *IEEE Access*, 7, 16739–16776. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2881533>
- Portilla, F. (2018). *Agroclimatología del Ecuador* (1ra ed.). Editorial Universitaria Abya-Yala.
- Pycom. (2018a). *Fipy Datasheet* (2nd ed.).
- Pycom. (2018b). *GPY Datasheet* (1st ed.). docs.pycom.io
- Pycom. (2018c). *Lopy Datasheet* (1st ed.). docs.pycom.io
- Pycom. (2018d). *Sipy Datasheet*. docs.pycom.io
- Pycom. (2018e). *Wipy Datasheet* (1st ed.). www.pycom.io

- Quintana, R., López, R., & Sánchez, S. (2013). Estudio comparativo de los modelos de propagación de canal inalámbrico. *RIELAC*, XXXIV(1), 12–26.
scielo.sld.cu/pdf/eac/v34n1/eac02113.pdf
- Ramya, R., Shanmugaraj, M., & Prabakaran, R. (2011). STUDY ON ZIGBEE TECHNOLOGY. *2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*, 6, 297–301. <https://doi.org/10.1109/icectech.2011.5942102>
- Ratasuk, R., Vejlgard, B., Mangalvedhe, N., & Ghosh, A. (2016). NB-IoT System for M2M Communication. *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564708>
- Ray, P. (2017). Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Enviroments*, 9, 395–420. <https://doi.org/10.3233/AIS-170440>
- Rayes, A., & Salam, S. (2019). Internet of Things From Hype to Reality. *Springer International Publishing*, 1–35. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99516-8>
- ROHM, S. (2009). *Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC* (2nd ed.). www.rohm.com
- Rojas, D. (2009). *Telefonía móvil 3G: Una tecnología que avanza para quedarse atrás*.
- Routray, S., & Hussein, H. (2019). Satellite Based IoT Networks for Emerging Applications. *ArXiv Preprint ArXiv*.
- Sadowski, S., & Spachos, P. (2020). Wireless technologies for smart agricultural monitoring using internet of things devices with energy harvesting capabilities. *EI Sevier*, 172, 105338. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105338>
- Sahitya, G., Bajali, N., Naidu, D., & Abinaya, S. (2017). Designing a wireless sensor network for precision agriculture using ZigBee. *2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC)*., 287–291.
<https://doi.org/10.1109/iacc.2017.0069>

- Sakthipriya, N. (2014). An Effective Method for Crop Monitoring Using Wireless Sensor Network. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 20(9), 1127–1132.
<https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2014.20.09.114152>
- Shafi, U., Mumtaz, R., Nieto, J., Hassan, S., Zaidi, S., & Iqbal, N. (2019). Precision Agriculture Techniques and Practices: From Considerations to Applications. *Sensors*, 19(17), 3796. <https://doi.org/10.3390/s19173796>
- Shuker, M., & Auday, M. (2016). A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques/ Modules for Internet of Things (IoT) Applications. *SciRes*. <https://doi.org/10.4236/ait.2016.62002>
- Sigfox. (2021). Coverage. www.sigfox.com/
- Singh, R., Pappinisseri, P., Berkvens, R., & Weyn, M. (2020). Energy Consumption Analysis of LPWAN Technologies and Lifetime Estimation for IoT Application. *Sensors*, 20(17), 4794. <https://doi.org/10.3390/s20174794>
- Sohraby, K., Minoli, D., Occhiogrosso, B., & Wang, W. (2017). A Review of Wireless and Satellite-Based M2M/IoT Services in Support of Smart Grids. *Mobile Networks and Applications*, 23(4), 881–895. <https://doi.org/10.1007/s11036-017-0955-1>
- Song, S., & Issac, B. (2014). Analysis of WiFi and WiMAX and Wireless Network Coexistence. *International Journal of Computer Networks and Communications (IJCNC)*, 6(6), 63–78. <https://doi.org/10.5121/ijcnc.2014.6605>
- Srinivas, M., Roizen, M., Fleisher, L., Thisted, R., & Foss, J. (2000). Comparing Methods of Clinical Measurement: Reporting Standards for Bland and Altman Analysis. *Anesthesia & Analgesia*, 90(3), 593–602. <https://doi.org/10.1097/00000539-200003000-00018>
- Mantha, Srinivas; Roizen, Michael F.; Fleisher, Lee A.; Thisted, Ronald; Foss, Joseph (2000). Comparing Methods of Clinical Measurement: Reporting Standards for Bland and Altman Analysis. *Anesthesia & Analgesia*, 90(3), 593–602. doi:10.1097/00000539-200003000-00018

- Sultania, K., Zand, P., Blondia, C., & Famaey, J. (2018). Energy Modeling and Evaluation of NB-IoT with PSM and eDRX. *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2018.8644074>
- Takekar, S., & Takekar, S. (2017). Plant and taste to reap with Internet of Things implementation of IoT in agriculture to make it a parallel industry. *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, 101–106. <https://doi.org/10.1109/I-SMAC.2017.8058317>
- Tongke, F. (2013). Smart Agriculture Based on Cloud Computing and IOT. *Journal of Convergence Information Technology*, 8(2), 210–216. <https://doi.org/10.4156/JCIT.VOL8.ISSUE2.26>
- Treviño, J. (2003). *Propagación de RF en las bandas: LF, MF, HF, VHF, UHF y VHF*. Universidad de las Américas Puebla.
- Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 31–48.
- UIT. (2011). *Recomendación UIT-R P.526-11. Propagación por difracción*. www.itu.int/publ/R-REC/es
- Van Rossum, G. (2007). Lenguaje de programación Python. *En La Conferencia Técnica Anual de USENIX*, 41, 36.
- Varela, A., & Ron, S. (2018). *Geografía y Clima del Ecuador*. BIOWEB. Pontificia Universidad Católica Del Ecuador. bioweb.bio/geografiaClima.html/
- Vatari, S., Bakshi, A., & Thakur, T. (2016). Green house by using IOT and cloud computing. *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 246–250. <https://doi.org/10.1109/RTEICT.2016.7807821>
- Velazquez, E., Trejo, H., Sandoval, O., & Palacios, A. (2019). Internet de las Cosas (IoT)

para el Sector Agrícola. *Padi*, 62–67.

Vera, C., Barbosa, J., & Pabón, D. (2015). Parámetros de configuración en módulos XBEE-PRO ® S2B ZB paramedición de variables ambientales. *Tecnura*, 19(45), 141–157. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a11>

Wang, S., & Lee, K. (2012). *Application of wireless sensor network (WSN) to enhance dairy farm management efficiency*. 44–48.

Yim, D., Chung, J., Cho, Y., Song, H., Jin, D., Kim, S., Ko, S., Smith, A., & Riegsecker, A. (2018). An Experimental LoRa Performance Evaluation in Tree Farm. *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SAS.2018.8336764>

Zhao, J., Zhang, J., Feng, Y., & Guo, J. (2010). The Study and Application of the IOT Technology in Agriculture. *In 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology*, 2, 462–465. <https://doi.org/10.1109/ICCSIT.2010.5565120>

Zhiguo, S., Zhiqiang, J., Hongyan, W., He, H., Zheng, W., Yongbo, D., Tao, Y., & Chenxue, Y. (2020). Low-Power Wide Area Network Construction Method Based on LoRa Technology for Agricultural Science and Technology Parks. *2020 6th Annual International Conference on Computer Science and Applications*, 1673(1), 12066. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1673/1/012066>

Zulkifli, C., & Noor, N. (2017). Wireless Sensor Network and Internet of Things (IoT) Solution in Agriculture. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 25(1), 91–100.

Anexos