



Pontificia Universidad  
Católica del Ecuador

SEDE  
ESMERALDAS

**CARRERA DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA  
INFORMACIÓN**

**TESIS DE GRADO**

**“REDES DE COMUNICACIÓN IoT EN CIUDADES INTELIGENTES  
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA LORA”**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

**REDES Y COMUNICACIONES**

**AUTOR**

**LUIGUI JOAN CASTILLO SANCAN**

**ASESOR**

**MGT. MANUEL NEVÁREZ TOLEDO**

**Esmeraldas, 2023**

Trabajo de tesis luego de haber dado cumplimiento a los requisitos exigidos por el reglamento de grado de la PUCE-Esmeraldas, previo a la obtención del título de Ingeniero en tecnología de la información y comunicación.

**Presidente de tribunal de graduación**

PhD. Pablo Pico Valencia

**Lector 1**

Mgt. Homero Velastegui Izurieta

**Lector 2**

Coordinador del área Industria, Tecnología y Comunicación.

Mgt. Xavier Quiñones Ku

**Director de tesis**

Mgt. Manuel Nevárez Toledo

Esmeraldas, marzo del 2023

## **AUTORÍA**

Yo, **Luigi Joan Castillo Sancan**, declaro que la presente investigación enmarcada en el actual trabajo de tesis es absolutamente original, auténtica y personal.

En virtud que el contenido de esta investigación de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor y de la PUCE-Sede Esmeraldas.

Luigi Joan Castillo Sancan

C.I. 0850115775

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco infinitamente la gratitud de Dios que por medio de unos guerreros como mis padres a quienes admiro por su apoyo en las circunstancias más difíciles en este camino de mi preparación como persona y profesional, así como sus fortalezas, inteligencias, humildad y corazón. Ellos son y serán mis pilares fundamentales, muy agradecido por confiarme este gran desafío que en un principio fue un tanto complicado adaptarme, pero no imposible.

A mis familiares, por aconsejarme en mantener la perseverancia para no rendirme y seguir adelante, como no agradecer a la excelente promoción de colegas y compañeros por hacer la vida en la universidad un tanto más dinámica y divertida a pesar de las adversidades, a los docentes por impartirnos sus conocimientos y experiencias.

Culmino agradeciendo a el escuadrón canino que me acompañó en esta larga travesía, en cada recibimiento con un inmenso amor y cariño incondicional en cada llegada a casa, transmitiéndome esa sintonía de alegría liberándome de toda las malas energías y desgaste, y poder conversar con ellos en largas madrugadas las posibles soluciones a los problemas que se me presentaban.

Luigui

## **DEDICATORIA**

Dedico todo el proceso de este trabajo con todo mi cariño a mi padre Luis Castillo y a mi madre Mirella Sancan, por ser mi mayor ejemplo de trabajo duro y perseverancia. Gracias por ese apoyo incondicional, ejemplo, amor y por todo su trabajo y sacrificio para que culmine mi formación académica.

A mi hermano esperando ser un buen ejemplo para él, que siga estudiando y preparándose que en el conocimiento está el verdadero éxito y que para llegar hasta ahí hay que tener esa fuerza de voluntad para afrontar los obstáculos, muchos de ellos serán más grandes que otros, pero al fin y al cabo se los puede superar si uno mismo se lo propone en hacerlo. Además, a mis tíos, abuelos que los quiero mucho y gracias por esos sabios consejos que me motivaron a seguir y no rendirme.

Luigui

## ÍNDICE DE CONTENIDO

AUTORÍA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
Descripción del problema .....	11
Planteamiento del problema.....	12
Justificación.....	13
Objetivos .....	14
<b>CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
1.1. Base teórica científica .....	15
1.2. Antecedentes (Estudios Previos).....	22
1.3. Fundamentación legal .....	27
<b>CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>28</b>
2.1. Delimitación espacio/temporal del estudio .....	28
2.2. Tipo de investigación .....	28
2.3. Método de investigación .....	29
2.4. Definición conceptual y operacionalización de las variables .....	30
2.5. Población y muestra .....	31
2.6. Técnicas e instrumentos .....	31
<b>CAPITULO III. RESULTADOS.....</b>	<b>33</b>
<b>CAPITULO IV. DISCUSIÓN.....</b>	<b>41</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>43</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>44</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>45</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>48</b>
Anexo 1. Ficha de observación científica .....	48

Anexo 2. Cuestionario de entrevista encargado del proyecto Ciudad Inteligente – Esmeraldas .....	49
Anexo 3. Implementación del prototipo de red de sensores ambientales utilizando la tecnología LoRaWAN.....	50
Anexo 4. Lecturas de los sensores ambientales .....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de mensajes MAC .....	21
Tabla 2. Registro De Soluciones – Plataforma IoT .....	22
Tabla 3. Variable - Redes de comunicación en ciudades inteligentes .....	30
Tabla 4. Variable - Prototipo de red LoRa.....	31
Tabla 5. Descripción de los componentes red de sensores ambientales utilizando la tecnología LoRaWAN .....	35
Tabla 6. Intervalo de confianza del sensor CO2 .....	37
Tabla 7. Intervalo de confianza del sensor de Temperatura .....	38
Tabla 8. Intervalo de confianza del sensor de Humedad .....	38
Tabla 9. Costos de componentes de la red LoRa.....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura del Internet de las Cosas (IoT) .....	16
Figura 2. Representación LPWAN, ZIGBEE, 3G/4G/5G en la red IOT .....	17
Figura 3, Arquitectura LoRa-LoRaWAN .....	19
Figura 4. Modulación CSS de tecnología LoRa .....	20
Figura 5. Esquema de trama física de LoRa .....	21
Figura 6. Diagrama caso de uso LoRa - Esmeraldas .....	33
Figura 7. Arquitectura de red de 3 capas de sensores ambientales utilizando la tecnología LoRaWAN.....	34
Figura 8. Nodo LoRa PUCESE, sensor temperatura .....	36
Figura 9. Nodo LoRa PUCESE, sensor humedad .....	36
Figura 10. Nodo LoRa PUCESE, sensor CO2.....	37
Figura 11. Pruebas de conexión en la red de sensores LoRa.....	39

Figura 12. Creación de una aplicación en la plataforma TTN.....	50
Figura 13. Registro de dispositivos.....	51
Figura 14. Configuración del dispositivo final .....	51
Figura 15. Conexiones de los sensores y la placa LoRa hacia placa Arduino mega uno 2560 .....	52
Figura 16. Cargas de los sensores (datos).....	54

## **RESUMEN**

Una de las tecnologías más importantes que se ha desarrollado en la actualidad es el internet de las cosas (IoT) la cual permite conectar a internet objetos como autos, componentes industriales, sensores y otros elementos de uso diario, los cuales pueden enviar instrucciones a otro objeto o recopilar los datos y luego enviarlos. Este estudio surge por la necesidad de implementar una red de sensores ambientales utilizando la tecnología LoRaWAN, para su aplicación en el proyecto ciudad inteligente – Esmeraldas. Para ello se realizó un estudio diseño cuantitativo, cuasi experimental y descriptivo lo cual permitió establecer cada uno de los elementos requeridos para levantar una red IoT con tecnología LoRa, es decir, los sensores calidad del aire, temperatura y humedad, un gateway de LoRa, un microcontrolador Arduino con su respectiva placa de comunicación a larga distancia LoRa el cual envía las magnitudes obtenidas por los sensores ambientales hacia el servidor The Things Network donde se almacenan. Se logró implementar la red de sensores mediante la tecnología LoRaWAN y se obtuvieron datos que se pueden observar y analizar mediante la plataforma Thing Speak. Se puede afirmar en base a las mediciones y pruebas realizadas, que no existe pérdida de información durante el envío de datos desde los sensores ambientales hacia el servidor The Things Network, además la seguridad de la información está asegurada mediante cifrado de 128 bits que es una característica de la tecnología LoRaWAN. Se recomienda usar dispositivos de una gama superior los cuales poseen mayor sensibilidad y mantener actualizados con última versión del protocolo sensores y gateways para la fiabilidad de la red LoRaWAN.

**Palabras Clave:** Red de comunicación, Internet de las cosas, LoRa, ciudad inteligente.

## ABSTRACT

One of the most important technologies that has been developed today is the Internet of Things (IoT) which allows objects such as cars, industrial components, sensors and other elements of daily use to be connected to the Internet, which can send instructions to another object or collect the data and then send it. This study arises from the need to implement a network of environmental sensors using LoRaWAN technology, for its application in the smart city project - Esmeraldas. For this, a quantitative, quasi-experimental and descriptive design study was carried out, which allowed establishing each of the elements required to build an IoT network with LoRa technology, that is, the air quality, temperature and humidity sensors, a LoRa gateway, an Arduino microcontroller with its respective LoRa long-distance communication board which sends the magnitudes obtained by the environmental sensors to The Things Network server where they are stored. It was possible to implement the sensor network through LoRaWAN technology and data that can be observed and analyzed through the Thing Speak platform was obtained. It can be affirmed based on the measurements and tests carried out, that there is no loss of information during the sending of data from the environmental sensors to the The Things Network server, in addition, the security of the information is ensured by means of 128-bit encryption, which is a feature of LoRaWAN technology. It is recommended to use devices of a higher range which have greater sensitivity and keep sensors and gateways updated with the latest version of the protocol for the reliability of the LoRaWAN network.

**Keywords:** Communication network, Internet of things, LoRa, smart city.

# INTRODUCCIÓN

## Descripción del problema

Parte esencial de la revolución industrial 4.0 son redes inalámbricas las cuales han evolucionado notablemente, este progreso es gracias a los diseñadores de esta rama los cuales buscan conectar tecnologías inalámbricas a internet de forma óptima [1], por consiguiente, la revolución de las redes de comunicación basadas en el Internet of Things (IoT) o internet de las cosas no solo favorece a las grandes industrias, sino también a la vida moderna de las ciudades. Actualmente en muchas metrópolis se puede observar sobrepoblación, generando un sinnúmero de malestares, como son: alto consumo de energía, generación de mayor cantidad de residuos, congestión en las zonas céntricas de las ciudades, entre otras problemáticas [2].

La ciudad inteligente surgió como una solución a los problemas que se dan con el crecimiento de las urbes y su población. Sin embargo, este término todavía está en evolución debido a limitantes, entre ellos se puede citar: limitantes tecnológicos, económicos y gubernamentales que se presentan en cada ciudad. No obstante, a pesar de las barreras hay ciudades que aplican el IoT con la finalidad de garantizar: desarrollo sostenible, mejora de la calidad de vida de los ciudadanos, además de eficacia de los recursos disponibles [2], [3].

En su mayoría las grandes metrópolis a nivel mundial están dotadas de muchas innovaciones por las cuales son clasificadas como ciudades inteligentes, esto gracias a que se presentan muchas mejoras con el uso de tecnología con lo cual dan soluciones a problemas cotidianos [4].

Con la aplicación de tecnología es factible que las ciudades mejoren los servicios que ofertan a sus habitantes, considerando los beneficios y la estabilidad que brindan actualmente las nuevas tendencias tecnológicas. Hace 2 décadas era impensable vivir en una ciudad inteligente debido a las limitaciones tecnológicas, sin embargo, hoy es una era diferente en donde se busca facilitar la vida de los ciudadanos, puesto que son considerados como un elemento fundamental dentro de las ciudades. Actualmente se intenta minimizar el uso de recursos no renovables y es algo que se está logrando de a poco mediante la disposición de sensores y objetos inteligentes los cuales permiten recopilar datos de manera rápida y eficaz. La miniaturización de este tipo de equipos

electrónicos, el desarrollo de diferentes protocolos de comunicación y la rebaja de los precios en la tecnología permiten el aumento de los sistemas IoT basados en redes de sensores inalámbricos [4], [5], lo cual ofrece diversas alternativas para convertir ciudades tradicionales en ciudades inteligentes o como se denominan smart cities.

## **Planteamiento del problema**

La ciudad de Esmeraldas está tratando en lo posible de mostrar avances tecnológicos, actualmente se puede observar la aplicación de IoT en distintas áreas como: salud, seguridad y educación. Pero aún existen limitantes como por ejemplo el despliegue de una red de dispositivos conectados por lo que conlleva el uso excesivo de recursos económicos y equipos para gestionar redes IoT. Además, se necesitaría más nodos de acceso a internet para poder transmitir los datos de un punto a otro en grandes distancias. Considerando que las poblaciones alejadas de la ciudad son las que menos cobertura tienen, existen actividades laborales que no se beneficiarán de esta revolución de comunicación IoT [6].

Es sumamente importante contar con información referente al clima para la toma de decisiones oportuna en el ámbito de gestión del riesgo, salud pública, gestión del agua, pesca, agricultura, turismo, transporte y energía. Una alternativa es en base a datos obtenidos mediante una red de sensores inalámbrica LoRa, dicha información podría servir para plantear correctivos precisos a través de notificaciones o capacitaciones de cómo proceder para salvaguardar la salud de los habitantes de la ciudad.

En lo relacionado al proyecto: “Esmeraldas, ciudad inteligente”, se entrevistó a su encargado de donde se expresó que no existen registro de lecturas de datos en tiempo real de los objetos IoT, a esto se suma el limitado alcance de la red IoT provoca exclusión de las comunidades, donde no se pueden dar seguimiento a actividades como: la ubicación del recolector de basura o el monitoreo de la calidad del aire. Además, la mensualidad del servicio de internet es otro de los temas que se trataron ya que es importante para poder mantener en línea los objetos IoT. En base a las limitaciones planteadas en cuanto a comunicación, surge la necesidad de un método o protocolo que permita a los dispositivos tener mayor alcance de comunicación, sea de bajo costo y larga vida útil. Además, de ahorrar recursos económicos en soluciones poco productivas.

Esta investigación se planteó en base a los limitantes en el proyecto “Esmeraldas, ciudad inteligente” y se implementó un prototipo de red de sensores ambientales utilizando la tecnología LoRa. Los indicadores permiten medir tanto el rendimiento de la red como el funcionamiento de los nodos finales (sensores), además de la latencia y el tiempo que tarda la red mediante un protocolo en darle una respuesta al usuario. Otros aspectos que importantes en este estudio es la compatibilidad de la plataforma a donde apunta el gateway para almacenar los datos, la seguridad en los sensores de modo que no atenten contra la salud de los usuarios, animales y plantas. Por último, entre las magnitudes física que medirían los sensores están: la temperatura, humedad y dióxido de carbono.

Con la finalidad de explotar todo el potencial de las IoT y hacer una ciudad inteligente inclusiva, que de paso a que las poblaciones alejadas de la ciudad sean partícipes de la conectividad a los servicios IoT. Siendo ellos los principales beneficiados del presente proyecto, es apropiado una tecnología que permita conectividad a larga distancia y bajo costo, para ello la tecnología LoRa cuenta con las características apropiadas con un alcance promedio de 5-15 Km y transmisión a bajo costo, mediante esta tecnología se otorgaría un mayor beneficio tanto a las personas ubicadas en las afueras de la ciudad, como a las personas ubicadas en la parte céntrica de la misma.

## **Justificación**

El presente proyecto se orienta a la tecnología inalámbrica de comunicación LoRa sobre una ciudad inteligente con dispositivos inalámbricos IoT, con el propósito de elaborar un escenario de prueba que cumpla con los conceptos de comunicación IoT.

Al implementar la red de dispositivos IoT se obtienen beneficios como recibir y enviar datos en tiempo real, además, se tiene el control de los sensores en modo ejecución, lo cual permite una mejor gestión sobre los servicios que disponen los sensores.

El escenario se elaboró en base de las realidades de los problemas identificados junto a las características que propone la tecnología Long Range (LoRa), entre las que se puede mencionar, la conexión se da con una topología estrella con un alcance de 5 km en áreas urbanas, y 10 km en zonas suburbanas, con tasa de datos de 50 Kbps, así como una alta capacidad de nodos con una sensibilidad de -168dBm, y un bajo consumo de energía siendo una característica que hace sobresalir la tecnología LoRa en cuanto a comunicación de dispositivos IoT [6].

Este proyecto de red de comunicación IoT con tecnología LoRa, favorece a los ciudadanos ubicados tanto en los exteriores (rural), como a las zonas céntricas (urbana) de la ciudad de Esmeraldas, pueden tener información acerca de magnitudes físicas como la humedad, temperatura o dióxido de carbono, de manera que aquellas personas que puedan usarlas para su beneficio en los diferentes aspectos de su vida cotidiana, o en caso de que se presenten incidentes como incendios o forestales se pueda conocer los índices de dióxido de carbono y las personas puedan tomar precauciones.

A raíz de las características presentadas sobre la red LoRa, hace a esta tecnología ideal para conexiones a grandes distancias y para redes de IoT que se pueden utilizar en ciudades inteligentes, lugares con poca cobertura celular o redes privadas de sensores o actuadores, por otro lado, los equipos tendrán una larga vida útil, debido al bajo consumo de energía que se requiere para su funcionamiento (10 aproximadamente) a diferencia de otras soluciones IoT y así aprovecharían más de los servicios de la red.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Implementar una red de sensores ambientales mediante la utilización de la tecnología LoRaWAN, para su aplicación en el proyecto ciudad inteligente – Esmeraldas.

### **Objetivos Específicos**

- Identificar los tipos de redes de comunicación inalámbrica en ciudades inteligentes basadas en tecnología LoRa.
- Analizar los tipos de plataformas para la integración de sensores ambientales de bajo consumo.
- Desplegar los sensores ambientales en un entorno de prueba con la tecnología LoRa.
- Configurar la plataforma IoT para el análisis de datos obtenidos de la red de sensores inalámbricos compatible con el estándar LoRa.
- Medir los aspectos de comunicación del prototipo de red de sensores ambientales de la ciudad inteligente Esmeraldas.

# CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

## 1.1. Base teórica científica

### Internet de las cosas (IoT)

Al reducir las intervenciones humanas en cuanto a procesos de actividades diarias se está hablando de lo que hoy día se conoce como IoT, y se puede encontrar diversas áreas. El término IoT hace referencia a una red de objetos físicos (cosas) a través de internet, incorporando sensores, software y otras tecnologías con el fin de intercambiar y consumir datos, además de poder ejecutar acciones mediante estos objetos con una mínima intervención por parte del usuario [7]. En esa misma línea, Gokhale et al. plantean que “el internet de los objetos es la red de objetos físicos - dispositivos, instrumentos, vehículos, edificios y otros elementos- dotados de electrónica, circuitos, software, sensores y conectividad de red que permiten a estos objetos recoger e intercambiar datos” [8].

Por su parte, Buestán considera pertinente entender a la IoT como: “Un sistema de dispositivos de computación interrelacionados, máquinas mecánicas y digitales, objetos, animales o personas que tienen identificadores únicos y la capacidad de transferir datos a través de una red, sin requerir de interacciones humano-humano o humano-computador” [1].

En pocas palabras las investigaciones propuestas por Buestán y Gokhale dan a conocer a la IoT como una red o sistema de dispositivos / objetos físicos interconectados mediante internet como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Dicha red tiene la capacidad de generar y transferir datos sin necesidad de la intervención humana. Resulta oportuno indicar que la comprensión de este término en esta investigación, debido a que el objetivo que se pretende alcanzar está enfocado a una arquitectura IoT [1] [8].

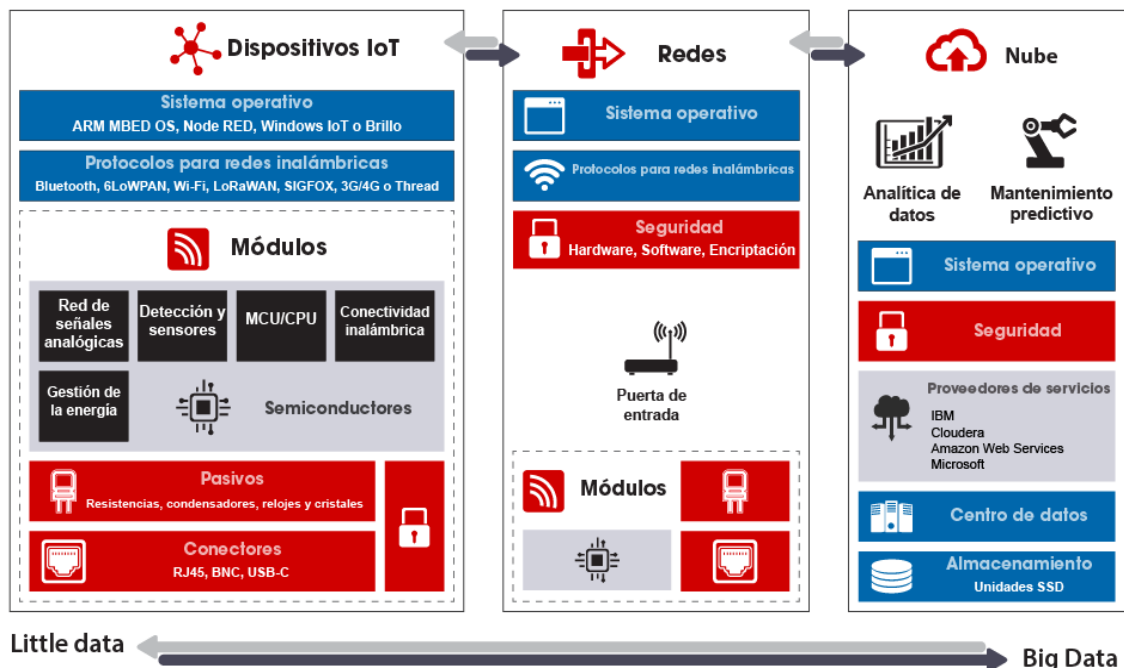


Figura 1. Arquitectura del Internet de las Cosas (IoT) [1]

Mayoritariamente las infraestructuras de redes IoT se establecen mediante el protocolo de control de comunicación y de internet (TCP/IP), lo que significa que para una red LoRa este protocolo tiene una elevada complejidad y requieren de un consumo de energía y memoria elevado, en efecto este protocolo no cumple con las expectativas para una red IoT con tecnología LoRa, provocando que varios proveedores plantean diversos sistemas de comunicación inalámbrica de bajo consumo como LPWAN la cual cumplan las expectativas de una red de sensores interconectados [6].

### Redes de bajo consumo y de área extensa (LPWAN)

De igual forma que las redes de área metropolitana o extensa (WAN), LPWAN es un tipo de red extensa, pero de baja energía que surge como necesidad para las redes de dispositivos IoT de sensores y actuadores, con la finalidad de que tengan conectividad a grandes distancias con un consumo de energía mínimo, sin embargo, su velocidad de transmisión de los datos es baja, como indican varios estudios [6], [1].

Las tecnologías Sigfox, LoRa y NB-IoT son las más usadas en redes de tipo LPWAN, y cumplen con las exigencias de las redes IoT, a diferencia de las redes con protocolos de comunicación como ZigBee, Bluetooth, entre otros., que son tecnologías de corto alcance en cuanto a comunicación, las cuales no se acoplan a las necesidades para la comunicación de área extensa [6]. Por otro lado, existe la alternativa sobre la

implementación de los estándares de telecomunicación móvil como: 2G, 3G y 4G, que pueden proporcionar una amplia cobertura, pero debido a su uso excesivo de energía se mantiene al margen su incorporación en las redes IoT, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** complementa gráficamente lo antes mencionado en cuanto a los alcances de cada tecnología.

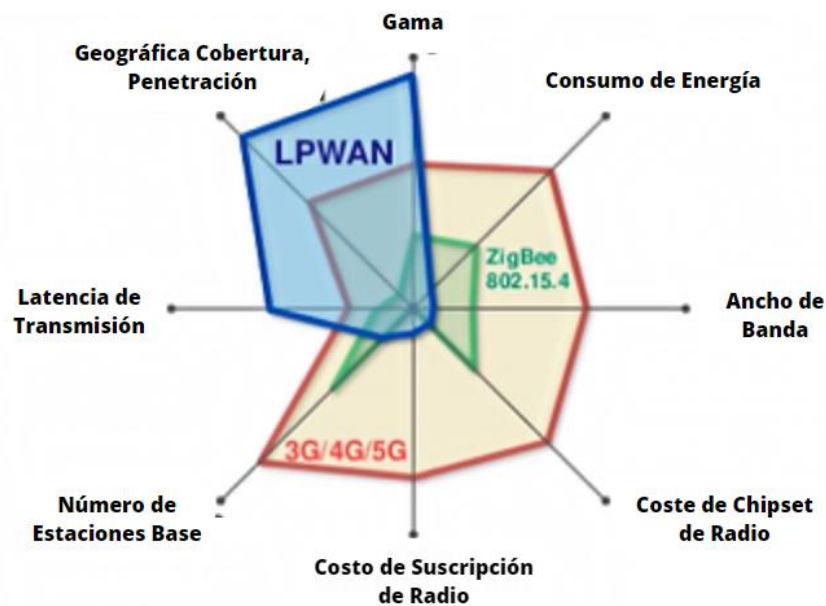


Figura 2. Representación LPWAN, ZIGBEE, 3G/4G/5G en la red IOT [1]

LPWAN está ganando terreno en las comunidades industriales y de investigación debido a sus ventajosas características de comunicación, en concreto proporciona una comunicación hasta de 10-15 km en zonas rurales y 2-5 km en zonas urbanas, además de ser eficiente energéticamente y poco costosa; la batería puede tener una duración de más de 10 años. En síntesis, LPWAN es altamente adecuado para aplicaciones de IoT que solamente necesitan transmitir pequeñas cantidades de datos a larga distancia [9].

Es evidente entonces considerar a la tecnología LPWAN en este estudio, debido a las ventajosas características de comunicación que ésta proporciona. LPWAN es el punto de inflexión para llevar a cabo el despliegue de la red de sensores por medio del protocolo de red LoRaWAN, que es el más apropiado para establecer una red de bajo consumo y largo alcance.

## LoRaWAN

Es un protocolo de red de área amplia de baja potencia diseñado para conectar de forma inalámbrica "cosas" con la topología de red tipo estrella, operadas por batería a Internet en redes regionales, nacionales o globales. Este protocolo incluye funciones que admiten comunicaciones bidireccionales de bajo costo, móviles y seguras para Internet de las Cosas (IoT), máquina a máquina (M2M), ciudad inteligente y aplicaciones industriales, sin embargo, LoRa tiene el deber de habilitar el vínculo de comunicación de largo alcance dentro de la capa física y como consecuencia de esto, el protocolo de LoRaWAN utiliza un cifrado AES-128 que es AppsKey y Nwkkey, para la seguridad de las redes como se aprecia en la donde se detalla la estructura de red especificando el tipo de encriptación de datos [1], [6], [9], [10].

Además, LoRa trabaja en las bandas de frecuencias de Industria, Científica y Médica que en sus siglas en inglés corresponde a (ISM), las cuales son bandas libres en la que básicamente no se requiere de algún tipo de licencia para aplicarlas, debido a que son bandas destinadas para la investigación y estudio. Según Gaybor y Maridueña la región de la banda ISM varía según los países, en Europa se trabaja con una banda que va desde los 863 MHz hasta los 870 MHz con 8 canales y cada canal con un ancho de banda de 0,3 MHz, mientras que, en Estados Unidos, Israel, Singapur, Australia, Canadá y otros, la banda ISM opera desde los 902 MHz a 928 MHz con 13 canales y cada uno con un ancho de banda de 2.16 MHz [11].

A través de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar que LoRaWAN se compone simplemente de un gateway (antenas) y nodos (dispositivos sensoriales o actuadores), elementos que permiten levantar una red IoT de carácter LPWAN. Es considerable el alcance que puede tener una red con tan solo esos dos componentes, es por tal razón que las grandes industrias optan por esta nueva tendencia de redes IoT. No obstante, es importante mencionar que la estructura de red a alcanzar; es similar a la de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con las respectivas seguridades de encriptación que el protocolo de red LoRaWAN respalda los datos que se trasladan a través de la red por medio de la modulación LoRa, tecnología de comunicación inalámbrica por el cual los nodos podrán comunicarse y enviar información a las puertas de enlaces o gateways.

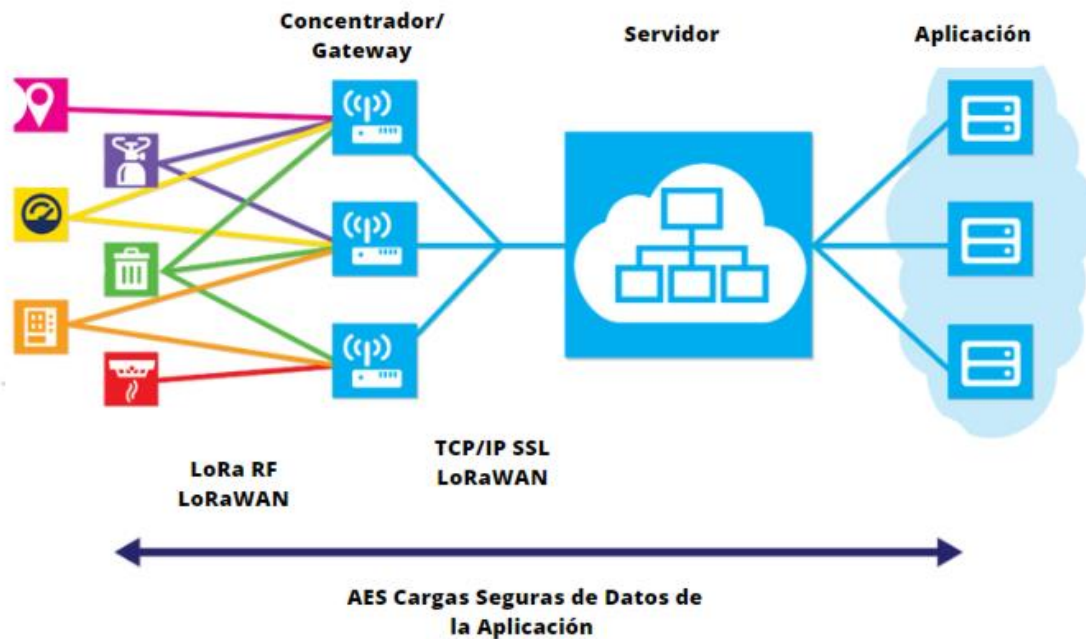


Figura 3, Arquitectura LoRa-LoRaWAN [6]

### Comunicación de largo alcance (LoRa)

Según Huh y Kim, LoRa se refiere a una especificación de capa física desarrollada por SemTech, basada en el espectro ensanchado chirp (CSS). Long Range aborda muchos retos en los casos de uso del IoT empleando CSS. Otra característica es que LoRa consume menos energía debido a la constante envolvente del CSS. Además, proporciona comunicación de largo alcance con un mayor presupuesto y una alta sensibilidad del receptor, la función de CSS hace que la señal a mandar utilice más ancho de banda de lo que la información necesita, esta característica permite una recepción segura de múltiples señales. En este orden de ideas se puede citar a Zourmand, et al. en la que interpretan que la técnica de modulación utilizada en LoRa la hace robusta al ruido del canal, ya que todo el ancho de banda asignado se usa para transmitir una señal (información o datos) [10], [12].

Es importante mencionar que la seguridad del sistema LoRa puede garantizarse debido a que la transmisión se propaga de forma pseudoaleatoria que se presenta como un ruido, por lo que la técnica de modulación ha proporcionado la seguridad básica del sistema LoRa, como se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, siendo esta la primera tecnología en implementar esta modulación de comunicación especial de forma comercial [1], [10].

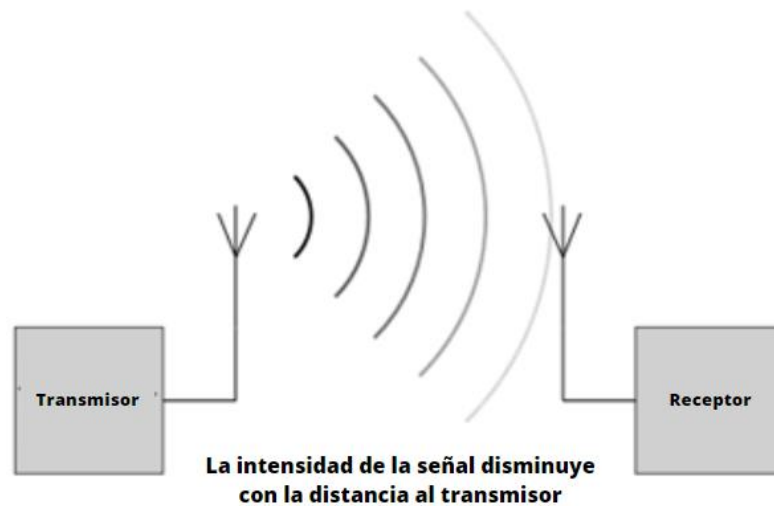


Figura 4. Modulación CSS de tecnología LoRa [12]

De los anteriores planteamientos, LoRa es la tecnología de comunicación idónea cuando se quiere construir una red de sensores LPWAN, a pesar de que existen otras tecnologías como Sigfox y NB-IoT que podrían suplantar a LoRaWAN, pero estas no cuentan con las características de comunicación y seguridad. Por ende, según lo estudiado, en lo que comprende a las redes LPWAN, LoRaWAN usando LoRa cubriría los requerimientos de una red que permitirá medir la calidad del aire enviando tramas de paquetes con la importancia de establecer comunicación entre el emisor (nodo/sensor) y receptor (gateway), esto evitará la pérdida y desvío de datos.

### **Formato de trama física de LoRa**

Castro et al. en su investigación sostiene que. la modulación LoRa se puede usar para transmitir tramas arbitrarias, donde se implementa un formato de trama física en los transmisores y receptores, no obstante, el ancho de banda (BW) y el factor de dispersión (SF) son constantes para una trama, el factor de dispersión (SF) es la invariable que permite que un emisor pueda ser escuchado por un determinado receptor [13]. Por otro lado, Buestán describe que, los paquetes de datos siguen una estructura definida por el protocolo LoRaWAN que cuentan con: Preámbulo de 8 bytes de longitud, cabecera (PHDR), payload y CRC (Cadena Radio Centro) [1].

Con base en las ideas anteriormente descritas se puede establecer los parámetros individualmente para cada paquete. Esto indica que el tiempo de transmisión, el modelado basado en la distancia y el consumo de energía, son importantes en las implementaciones de una red IoT. El encabezado se identifica por un solo byte en el marco (PHDR) [1].

Como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, una trama de LoRa tiene un payload de un tamaño máximo de 255 bytes y contiene la capa de acceso al medio de Lora WAN.

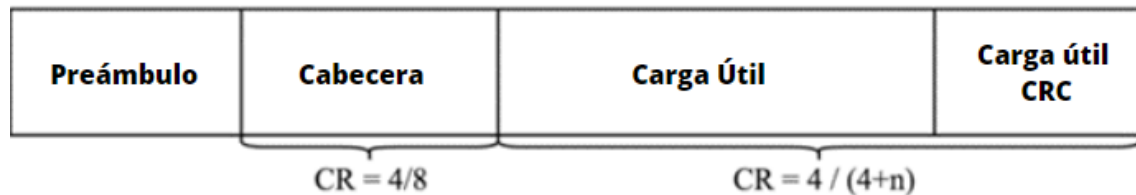


Figura 5. Esquema de trama física de LoRa [6]

El encabezado MAC detecta el tipo de mensaje (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y el formato de la trama dentro de la capa LoRaWAN con la que ha sido asociada [1].

Tabla 1. Tipos de mensajes MAC [1]

Tipo	Descripción
000	Solicitud de unión
001	Aceptación de la unión
010	datos no confirmados arriba
011	datos no confirmados abajo
100	Datos confirmados Arriba
101	Datos confirmados abajo
110	RFU
111	Prioritario

La sincronización de los paquetes está formada por un byte que se utiliza para diferenciar las redes LoRa que usan las mismas bandas de frecuencia. Un nodo configurado con una palabra de sincronización establecida dejaría de escuchar una transmisión si la palabra de sincronización descodificada no coincide con su configuración, una vez que los nodos se sincronizan correctamente los datos pasan por el gateway y posteriormente pasan a un servidor web donde se almacena y mediante una plataforma de análisis IoT se analiza los datos [13].

### The Thing Network y Helium



The Thing Network es un servidor que tiene la misión de permitir que las personas puedan interconectar cosas libremente, abierta y descentralizada. Haciendo la comunidad de TTN un esfuerzo de desarrollo en la parte de servidor, creando el lado del backend de la red.

Ésta da soporte a los gateways distribuidos por el globo, siendo el backend el que lidia con las duplicidades de mensajes, la orquestación de mensajes de bajada, la gestión de integración con plataformas, además de poseer las capacidades de integrarse por HTTP y MQTT, así como una serie de APIs en distintos lenguajes tales como: Go, Java, Node-RED y Node.js [14].

Helium es la nueva tendencia en plataforma IoT para la gestión de dispositivos de redes LPWAN con la tecnología LoRa, en síntesis, es una plataforma respaldada por la red basada en blockchain en la cual conecta dispositivos IoT. LoRaWAN al ser un protocolo de control por capas para el acceso a medios, tiene una nube como componente con el cual las plataformas como Helium pueden conectarse. Los nodos o sensores que componen una red de Helium se los denomina hostpots en la cual combinan el poder de LoRaWAN y un dispositivo de minado que se basa en tecnología de blockchain [15].

Actualmente las dos tendencias de servidores IoT para la gestión de redes con tecnología LoRa son: The Thing Network y Helium, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se describe una breve comparativa entre las plataformas antes mencionadas, no obstante, según la tabla de registro de soluciones – Plataforma IoT, The Thing Speak (TTN) es la plataforma más asociada para las redes LPWAN con tecnología LoRa, en la que se caracteriza por ser centralizada a comparación de Helium, pero con la ventaja de tener una facilidad en cuanto a la programación.

Tabla 2. Registro De Soluciones – Plataforma IoT [16]

Alternativa solución	de	Definición	Ventajas	Desventajas
The Things Network (TTN) 		Es un conjunto de herramientas abiertas global que permite despliegues de soluciones IOT de bajo costo y alta seguridad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo</li> <li>• Alta seguridad</li> <li>• Respaldo de comunidad Intuitivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No posee sistemas de recompensa</li> <li>• para los usuarios</li> </ul>
Helium 		Es una plataforma respaldada por la Blockchain de Helium para la creación de infraestructura inalámbrica descentralizada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto grado de descentralización - Alta seguridad - Respaldo de comunidad</li> <li>• Posee un sistema de recompensas que permite genera ingresos pasivos por el uso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solo admite OTAA (Over the air activation) Mayor dificultad de programación</li> <li>• Menor grado de documentación.</li> <li>• -Requiere Gateway</li> </ul>

## **1.2. Antecedentes (Estudios Previos)**

El IoT tiene sus inicios en la década de los 90 con Weiser y posteriormente Kevin Ashton quien empleo por primera vez el término internet de las cosas. No obstante, el IoT tomó fuerza en el momento en el que eran muchos más los objetos conectados a internet que las personas de tal manera que cambia su forma de vida, así como los ecosistemas o campos como: la educación, transporte, salud, energía, industria, entre otros [16]. Sin embargo, existen investigaciones en la que se ha determinado a las ciudades como el segmento del mercado con proyecciones futuras según el crecimiento poblacional.

En su investigación, Gaybor y Maridueña, diseñaron una red basada en la tecnología LoRa el cual sirve para comunicar sensores montados en boyas capaces de medir variables oceanográficas, para la obtención de datos en tiempo real, debido a que no existe un manejo de los proyectos de medición de variables oceanográficas donde no cuentan con un procedimiento de operación óptimo dado que incurren en métodos poco tecnológicos. Para llevar a cabo esta investigación emplearon la siguiente metodología: definieron las variables oceanográficas a medir, usaron un software de propagación para comparar resultados (Radio Mobile). Sobre la base de las consideraciones anteriores, obtuvieron como resultado una red de largo alcance y bajo consumo de energía; así como un monitoreo actualizado de las condiciones de las playas del Ecuador mejorando así el turismo y la pesca. Además de encontrar una alternativa más económica a los sistemas de comunicación actuales y conocer de nuevas tecnologías LPWAN como parte del paradigma IoT. Gaybor y Maridueña concluyeron en que la tecnología LoRa presenta ventajas como el rango de cobertura, la diferencia de costos frente a comunicaciones satelitales o enlaces de radio, así como un gasto energético elevado [11].

En otro estudio, Buestán desarrolló una red IoT con tecnología LoRa para la ubicación de automóviles y medición de algunos parámetros como cantidad de combustible, temperatura y agua. Esto debido a que dentro de las autopistas, existen varios inconvenientes y factores al momento de conducir un vehículo sin tener idea el estado del transporte utilizado. En la actualidad, hay varias formas de mantener la estabilidad vehicular, en el caso de supervisar los parámetros mecánicos básicos y que el usuario esté al tanto de cómo se encuentra el automotor a utilizar. Para lograr el desarrollo de la red IoT se realizó una investigación cuantitativa, obteniendo como resultados el almacenamiento de los datos mediante el sitio web ThingSpeak en el cual se puede dar

seguimiento a ciertos parámetros de un vehículo como la temperatura, velocidad, nivel del agua, por otro lado, la aplicación mencionada consta de una API que permite transmitir y almacenar los datos en el protocolo HTTP, y al ser un código abierto, puede ser público y privado ya que se pueden crear y eliminar los datos adquiridos. A su vez, al pertenecer a Mathworks, empleó Matlab para simular mediante esta plataforma los datos para ser manejados visualmente por el internet de las cosas; concluyendo así que el desarrollo IoT con tecnología LoRa/LoRaWAN, representa una red vehicular de baja potencia que cubre un alto rango de cobertura. Ésta busca cumplir el objetivo de brindar datos reales al usuario mediante una nueva tecnología implementada en las ciudades de mayor desarrollo tecnológico [1].

Mientras tanto, Mejía realizó un sistema de parqueadero inteligente mediante una red IoT con la tecnología LoRaWAN, dado que el parque automotor del país ha crecido de manera desproporcionada en los últimos años, tanto es así que para la última década se tuvo un incremento de más de 1.4 millones de vehículos. Para llevar a cabo este sistema se definió los parámetros a tomar en cuenta en el parqueadero inteligente y así poder gestionar de una mejor manera los espacios. Posteriormente se evaluó el funcionamiento del sistema durante aproximadamente un mes, tiempo en el que se pudo evidenciar las bondades de diseñar un sistema IoT aplicando una arquitectura por capas, esto permitió como resultado de la investigación que los módulos LoRa Shield dispongan del mismo tipo de radio Transmisor/Receptor que el de los gateways para definir el mínimo número de gateways necesarios para proporcionar una correcta cobertura del SPI (Interfaz Periférica Serial) para los parqueaderos de visita de ambos subsuelos. Por otro lado, uno de los resultados alcanzados es un servidor que procede a controlar la visualización del estado actual de los parqueaderos de visita y posteriormente se enviarán los respectivos comandos de regreso hacia los nodos para controlar el estado actual de los parqueaderos de visita y de ser el caso activar las distintas matrices de leds de visualización para señalar los parqueaderos asignados a los visitantes. En este estudio se concluye que la utilización de un modelo de arquitectura IoT facilita enormemente el diseño de soluciones IoT, debido a que permite identificar los parámetros, atributos y requerimientos necesarios para cumplir con los objetivos planteados que se desean monitorear o controlar con la solución IoT planteada [17].

Por su parte Cevallos y Rubio desarrollaron un prototipo de Internet de las Cosas (IoT) enfocado a invernaderos, mediante la tecnología de LoRa, para la medición de algunos

parámetros como son: humedad de la tierra, temperatura, luminosidad, nivel de agua de los reservorios, consumo de luz, y consumo de agua. Esto dado a que los agricultores en su mayoría en el sector rural se ven en la necesidad de movilizarse grandes distancias para mantener un conocimiento del estado de sus cultivos, lo cual limita la productividad del agricultor, y además por la dificultad de acceso o imprevistos, su movilidad puede ser restringida lo cual lo vuelve vulnerable a pérdidas parciales o totales, es por ello, que para el cumplimiento de este proyecto se estudió las características y beneficios de la red LPWAN mediante la tecnología LoRa, obteniendo como resultado el prototipo de invernadero planteado, en la cual conlleva todos los elementos necesarios para realizar las mediciones establecidas en los objetivos, como son: sensor de humedad de tierra, sensor de luminosidad, sensor de temperatura y humedad del ambiente, sensor de corriente para obtener el consumo eléctrico y sensor de caudal para obtener el consumo de agua. Por otro lado, realizaron el análisis de la recepción de paquete recibidos en el servidor TTN (The Things Network), mediante este análisis pudieron conocer qué porcentaje de paquetes han sido recibidos, y cuantos se han perdido. Por último, pudieron visualizar cada uno de los datos enviados en una gráfica histórica, de un tiempo aproximado de 2 horas, con un tiempo de envío entre paquetes de aproximadamente 10 minutos. El autor determinó de que LoRa es la mejor opción, debido a que sus características técnicas satisfacen los requerimientos de esta aplicación, además es de bajo costo [6].

De manera semejante, Heredia y Lucero implementaron un sistema de redes de sensores inalámbricos para el monitoreo de procesos industriales usando una arquitectura de red LoRaWAN, dado a la necesidad de incrementar eficiencia, productividad, seguridad y transparencia por lo que, Wireless Fidelity (WiFi) es una opción para implementarse en ambientes comerciales e industriales, sin embargo, requiere un considerable uso de energía y puede entrar en conflicto con redes Wireless Local Area Network (WLAN) existentes, por lo que tecnologías enfocadas en aplicaciones IoT e Industrial Internet of Things (IIoT) (LoRa, ZigBee, Highway Addressable Remote Transducer Protocol (HART)) pueden adaptarse a sistemas industriales tradicionales sin entrar en conflicto con las transmisiones de radio existentes. Para el cumplimiento de este proyecto el autor realizó un estudio sobre las características técnicas de los dispositivos empleados en la red LoRaWAN, tanto en la capa física como en la de enlace de datos MAC, se describe la configuración y disposición física de cada equipo, llegando a tener como resultados

una conexión entre servidor y cliente OPC-UA (Open Protocol Connectivity-Unified Architecture), donde observó que existe un retardo considerable en el proceso de envío de solicitudes y en la transmisión del mensaje, utilizando la tecnología LoRa. El envío de información por medio del puerto I2C (Inter-Integrated Circuit) es otra fuente importante de retardo. Este puerto es el encargado de comunicar el nodo con el PLC (Programmable Logic Controller). Se observó que, a la WSN (Wireless Sensor Networks), le toma cerca de siete segundos en actualizar los valores de la interfaz gráfica, con los valores obtenidos de los sensores conectados al PLC. Concluyendo que es importante la aplicabilidad de la tecnología LoRa y la arquitectura LoRaWAN en comunicaciones de corto alcance, para ambientes industriales [18].

En el mismo contexto anterior, Henao construyó un sistema mecatrónico aplicado al sector agrícola, basado en la tecnología Blockchain y protocolos de comunicación a larga distancia que sea capaz de representar un activo digital conectado a un activo físico, en este caso un dispositivo IoT capaz de adquirir, transmitir y visualizar datos provenientes de sensores en contacto directo con macetas de cultivo, involucrando las variables de temperatura, humedad y foto detección, dado a que la adquisición de datos para el procesamiento previo y posterior a una cosecha, todavía se siguen realizando con metodologías tradicionales para rastrear, contar, almacenar y publicar datos agrícolas. Por ello este autor utilizó la metodología Karl T. Ulrich, llegando a tener un sistema que cumple con el propósito de monitorear las plantas y representarlas como un activo digital, además pudo probar la transacción de dicho activo basado en una tecnología ciertamente disruptiva en un tema no solo en términos de valor sino en cuanto a seguridad de la información, llegando a la conclusión de que Blockchain es una tecnología muy poderosa que integrada con este tipo de sistemas que utiliza el hardware y las variables físicas como parte del internet de las cosas IoT, tiene el potencial de resolver muchos otros problemas que posee no solo la actividad industrial sino también la actividad humana en temas donde la transparencia y la confianza son elementos fundamentales para su resolución [19].

En base a los estudios encontrados con relación a la tecnología de comunicación LoRa, en cada proyecto indican las ventajosas funciones que les proporcionó este mecanismo de comunicación ante otras tecnologías, pudiendo llevar a cabo cada proyecto destinado y planificado. Entre esas ventajosas funciones está el rango de cobertura, costos de comunicación satelitales o enlaces de radio, brindar datos casi que en tiempo real, entre otras características; por su parte mencionan la importancia de generar un modelo de

arquitectura IoT y de esta manera facilitar el diseño de las soluciones IoT para cada respectivo contexto de investigación, debido a que permite identificar los parámetros, atributos y requerimientos necesarios para cumplir con los propósitos y/o objetivos planteados.

### **1.3. Fundamentación legal**

Esta investigación se fundamenta legalmente en:

La Constitución de la República en su Art.- 3 Son deberes primordiales del Estado garantiza sin discriminación alguna el efectivo goce de los derechos establecidos en dicha Norma Suprema, y en los instrumentos internacionales, en particular la educación, la salud, la alimentación, la seguridad social y el agua para sus habitantes [20].

Convenio específico de cooperación para investigación y desarrollo, entre la Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Esmeraldas (PUCESE) y el Gobierno autónomo descentralizado del cantón Esmeraldas (GADMCE).

*“3.1. Obligaciones específicas de la PUCESE – Carrera de Ingeniería en Tecnologías de la Información [21].*

*3.1.1. Ejecutar el proyecto de investigación y desarrollo “Contaminación atmosférica y sus efectos en la salud de los habitantes de la provincia de Esmeraldas” de conformidad con los objetivos del Programa Aire y Salud [21].*

*3.1.10. Utilizar los datos que capturen los sensores con la posibilidad de agregar nuevos nodos a la infraestructura tecnológica del proyecto ciudad inteligente, entregados por el GADMCE exclusivamente para la ejecución del proyecto de investigación y desarrollo [21].”*

## **CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS**

El objetivo principal de esta sección es describir el proceso metodológico utilizado en esta investigación, esto es, los procedimientos, métodos y técnicas que permitieron recopilar información para cumplir con los objetivos planteados

### **2.1. Delimitación espacio/temporal del estudio**

El prototipo planteado en este proyecto se estableció en las inmediaciones de Santa Cruz pertenecientes a la PUCESE. Se emplearon sensores para medir temperatura y humedad, la puerta de enlace para los nodos se colocó en un área despejada para poder tener excelente cobertura de la tecnología LoRa.

Se obtuvieron datos generados por las mediciones que realizaron los sensores de temperatura, humedad y calidad de aire en tiempo real desde 11h45 hasta 23h49 del 08/03/2023, las lecturas se realizaron desde el interior de una oficina en las instalaciones de la PUCESE.

### **2.2. Tipo de investigación**

El diseño cuantitativo de esta investigación es debido a que la información extraída de los sensores es de carácter numérica y luego fue analizada mediante métodos estadísticos para una comprensión más profunda.

El tipo cuasi experimental de esta investigación permite probar el rendimiento de la red IoT-LoRa, además del funcionamiento de los sensores quienes envían los datos y estos pasan por todo el esquema de red llegando hasta una plataforma determinada para este estudio The Thing Network, donde se pueden visualizar y gestionar en tiempo real. En otro aspecto, se puede medir el tiempo que tarda la red a través su protocolo en darle una respuesta al usuario.

El alcance descriptivo de este estudio permite detallar las características de los elementos empleados en este proyecto como por ejemplo sensores, placa LoRa que funciona como con un transceptor de radio de largo alcance, así como las especificaciones de la tecnología LoRa con la que se trabajó en el prototipo.

### **2.3. Método de investigación**

En esta sección se detalla cómo se diseñó la propuesta tecnológica y para ello se aplicó el método deductivo de investigación con el propósito de establecer los elementos que se requieren para levantar una red IoT con tecnología LoRa en un contexto de monitoreo ambiental. Sin embargo, es importante conocer estos elementos que forman parte en el desarrollo de la propuesta, la cual se utilizó un sensor DHT22 (temperatura y humedad) y un sensor MQ135 (calidad del aire), un gateway de LoRa de la marca RAK7289, además de, un microcontrolador Arduino mega 2560 junto a la placa de comunicación a larga distancia RFM9X LoRa, para el envío de las magnitudes obtenidas por los sensores ambientales y posterior a ello el almacenamiento de dichos valores a la plataforma TTN.

Para implementar el prototipo de red IoT con la tecnología LoRa programó los sensores conectados al microcontrolador Arduino mega 2560. Una vez programados y luego de realizadas las pruebas necesarias se procedió a colocarlo en un punto estratégico de la zona de Santa Cruz-PUCESE, y se estableció una conexión con el gateway más cercano que se encuentra ubicado en la plaza cívica de la ciudad de Esmeraldas (1,20 Km aproximadamente), los datos que llegan al gateway a través de la comunicación LoRa, procesan las cargas (payload's) de los sensores y por medio del protocolo de internet TCP/IP los almacena en el servidor The Things Network (Ver anexo 3).

Cabe mencionar que esta tecnología de comunicación utiliza un sistema encapsulamiento seguro por medio del algoritmo AES (Advanced Encryption Standard) para la encriptación y desencriptación de payload's de los sensores ambientales desde la salida hasta la llegada al servidor.

Sin embargo, la plataforma TTN solo permitió almacenar o recoger datos de los sensores, por ende, esa información estática e incomprensible se la procesó mediante la plataforma de análisis IoT Thing Speak con la finalidad de proyectar la información en datos estadísticos y propiciar una comprensión más compacta de la información que es generada por los sensores, así el usuario tiene la posibilidad de estimar pronósticos en base a los datos estadísticos.

A través de la metodología de intervalo de confianza se realizó una estimación la cual permitió determinar la oscilación de lecturas (uno superior y otro inferior) de los sensores,

por medio de una muestra seleccionada de datos para llevar a cabo el análisis, se utilizó la ecuación 1.

$$(IC_{95} \approx \bar{x} \pm 1.96 \frac{s}{\sqrt{n}}) \quad (1)$$

Para el cálculo del intervalo de confianza depende de los siguientes parámetros; tamaño de la muestra seleccionada, nivel de confianza, margen de error de la muestra estimada, lo estimado en la muestra (media, varianza, diferencia de medias...). Por otro lado, se estableció un intervalo de confianza del 95%, esto permitió asegurar que la media de la lectura de los sensores estará entre un valor superior y un valor inferior. El intervalo de confianza permite cuantificar la confianza que podemos sentir de un grupo de datos es de su valor medio.

## 2.4. Definición conceptual y operacionalización de las variables

En este estudio se analizaron dos variables que son: redes de comunicación en ciudades inteligentes y prototipo de red LoRa, en la Tabla 3 y Tabla 4 cada una de las variables, sus dimensiones además de sus indicadores.

Tabla 3. Variable - Redes de comunicación en ciudades inteligentes

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Descripción
Redes de comunicación en ciudades inteligentes	Este tipo de redes crean una interconexión entre distintos dispositivos (objetos) y las personas	Protocolos	Seguridad	Numero de afectaciones a la integridad de la red LoRA
			Envío de datos	Cantidad de datos enviados y recibidos
			Latencia	Tiempo que tarda la red en dar respuesta al usuario
		Tipo de red	Escalabilidad	Capacidad de adaptación y respuesta en la red de una ciudad.
			Conectividad	Calidad de la conexión de la red IoT
		Costos de Implementación	Dispositivos	Precio de cada componente red IoT
	Instalación y configuración	Costo de instalación y configuración sensores y gateway.		

Tabla 4. Variable - Prototipo de red LoRa

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Descripción
Prototipo de red LoRa	Tecnología para conexiones a grandes distancias y para redes de IoT	Plataforma de datos	Seguridad	Admite cifrado de extremo a extremo
			Compatibilidad	Plataformas IoT que acepta Arduino
			Conectividad	Facilidad de conexión entre la plataforma, los sensores y el usuario
		Sensores	Seguridad	Los datos son confiables
			Intervalo de confianza	Aproximación al verdadero valor poblacional
		Gateway	Tiempo de respuesta	Tiempo en que tarda el sensor para obtener datos de ambiente
			Escalabilidad	Capacidad de adaptación y respuesta en la red.
			Conectividad	Conectividad con el microcontrolador aplicado al prototipo electrónico
Microcontrolador	Disponibilidad en el mercado	Facilidad en la adquisición de este microcontrolador.		

## 2.5. Población y muestra

Por la naturaleza y por los objetivos planteados en esta investigación no se tiene población ni muestra.

## 2.6. Técnicas e instrumentos

### Técnicas de investigación

Con la finalidad de garantizar la operatividad del proyecto se aplicó la técnica de la entrevista de tipo estructurada con preguntas abiertas al especialista de la red LoRa del proyecto ciudad inteligente administrado por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Esmeraldas el (GADME), quien es el encargado del proyecto IoT de la ciudad de Esmeraldas. Independientemente de la problemática encontrada por medio de la entrevista, también permitió definir los factores que componen la red IoT aplicando la tecnología LoRa.

Adicionalmente, se empleó la técnica de la observación, lo cual ayudó a ver los hechos que ocurren al instante en que se implementaron los componentes del prototipo de red, y con ello validar si estos cumplen con las características solicitadas. Esta técnica se la formuló de manera estructurada usando la ficha de observación del anexo 1.

### **Instrumentos de recolección de datos**

En esta investigación se utilizaron los siguientes instrumentos de recolección de datos: una ficha de observación corresponde a la técnica de observación (Ver Anexo 1. Ficha de observación científica), sin embargo, esta ficha no permite evaluar la exactitud de los componentes que comprenderá el prototipo de red LPWAN con protocolo de red LoRaWAN y comunicación inalámbrica LoRa. Además, se empleó un cuestionario de entrevista con preguntas abiertas para el encargado del proyecto Ciudad Inteligente – Esmeraldas (Ver Anexo 2).

## CAPÍTULO III. RESULTADOS

### 3.1. Diseño e implementación del prototipo de red de sensores ambientales utilizando la tecnología LoRaWAN, para su aplicación en el proyecto ciudad inteligente – Esmeraldas

#### 3.1.1 Requerimientos

##### (Caso de uso de la red)

Se identificaron los actores que participan en los prototipos de red LoRaWAN, por ende, es fundamental establecer los actores y las acciones que realizarán dentro de la arquitectura. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se visualiza como actores a los dispositivos finales (sensores), gateway, The Thing Network y a los usuarios.

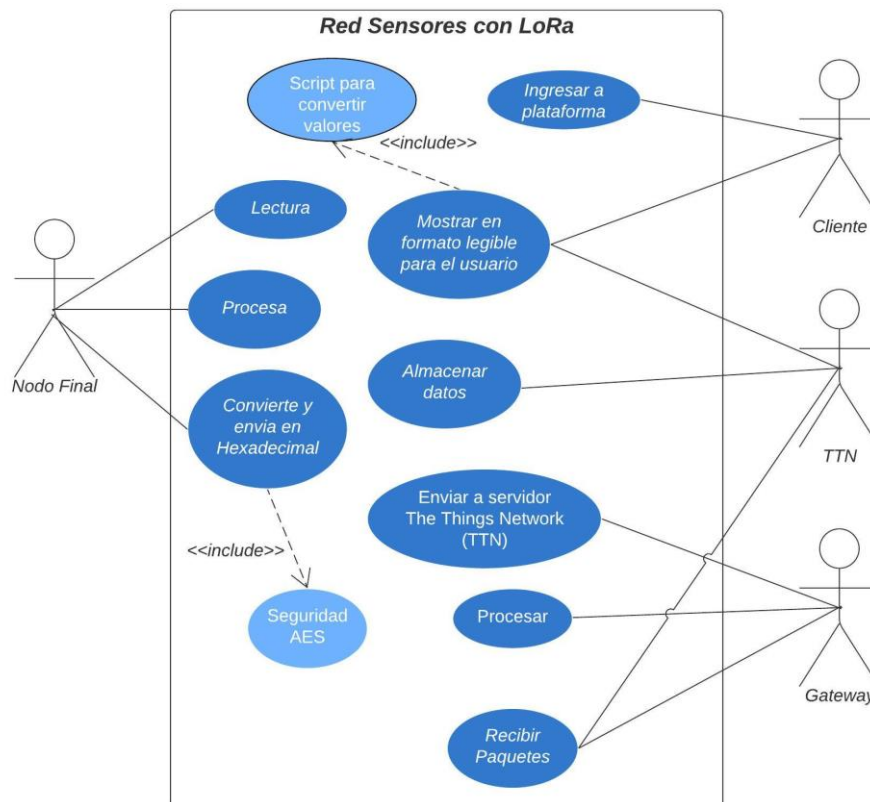


Figura 6. Diagrama caso de uso LoRa - Esmeraldas

En la figura 6 se describe las actividades a cada actor realiza en el esquema de red LPWAN, y es importante recalcar que desde la salida de datos de los sensores hasta el

almacenamiento en la plataforma web, estarán protegidos por medio del algoritmo de encriptación AES.

### 3.1.2 Arquitectura del sistema

Basado en la tecnología LoRa a continuación en la figura 7 se presenta el esquema de la red en base a una arquitectura de 3 capas de sensores ambientales utilizando la tecnología LoRaWAN, para su aplicación en el proyecto ciudad inteligente – Esmeraldas, en donde se utilizan elementos como: sensores, gateway, placa LoRa y el servidor en la nube The Things Network.



Figura 7. Arquitectura de red de 3 capas de sensores ambientales utilizando la tecnología LoRaWAN

La implementación de la arquitectura de tres capas en un contexto de Internet de las cosas (IoT) implica una adaptación de la arquitectura tradicional para incluir la capa de dispositivos, que es la encargada de capturar y enviar datos desde los sensores.

**Capa de dispositivos:** Esta capa incluyó los sensores de humedad y temperatura, así como el sensor de dióxido de carbono y la placa LoRa. Estos conectados a un microcontrolador Arduino y posterior a ello con su respectivo código que permitió capturar magnitudes y por medio del protocolo LoRa enviarlo al enrutador.

**Capa de conectividad:** Para esta capa se utilizó e implemento el protocolo LoRa y un gateway LoRa en cual es el responsable de la conectividad y la comunicación entre la capa de dispositivos y capa de aplicación.

**Capa de aplicación:** Esta capa es responsable del procesamiento y análisis de los datos recibidos de los dispositivos de IoT. En esta capa se utilizó la plataforma The Things Network que permitió traducir los paquetes cifrados provenientes de los sensores para que puedan ser legible.

### 3.1.3 Aspectos generales de los nodos de la red

El gateway debe recibir las lecturas recibidas por los sensores ambientales conectados a la red mediante el protocolo de comunicación LoRa y los reenviará al servidor en la nube The Things Network el cual debe permitir almacenar los datos para luego ser analizados.

En la tabla 5 se describen los componentes de la red de sensores ambientales utilizando la tecnología LoRaWAN

Tabla 5. Descripción de los componentes red de sensores ambientales utilizando la tecnología LoRaWAN

<b>Cant.</b>	<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>
1	Arduino Mega 2560	Placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega2560.
1	Placa LoRa RFM9x	Es una tarjeta que cuenta tanto con un microcontrolador como con un transceptor de radio “de largo alcance (LoRa).
1	DHT22	Sensor digital de temperatura y humedad relativa.
1	Mg811	Basado en el chip MG-811, capaz de medir la concentración de CO2 en el ambiente.
16	Pines	Terminal o patilla de cada uno de los contactos metálicos de un conector o de un componente fabricado de un material conductor de la electricidad.
1	ProtoBoard	Placa de pruebas en los que se pueden insertar elementos electrónicos y cables con los que se arman circuitos.
1	Gateway RAK7289 V2	Es la puerta de enlace LoRaWAN para exteriores.
1	The Things Stack v3	Es un servidor de red LoRaWAN que permite la conectividad, la gestión y la supervisión de dispositivos, puertas de enlace y aplicaciones de usuario final.

Una vez que la conexión entre los componentes de la red de sensores ambientales mediante la tecnología LoRaWAN fue establecida los campos que representan a los sensores humedad, temperatura y calidad del aire muestran las cargas (datos) obtenidas de los mismos. Lo que prueba que existe conexión y se están recibiendo datos (ver anexo 3). Las cargas (payload's) de los sensores por medio del protocolo de internet TCP/IP se envían al servidor The Things Network el cual permite ver en texto claro permitiendo al usuario la posibilidad de estimar pronósticos de tiempo en base a los datos estadísticos. En la figura 8, 9 y 10 se puede observar datos de los sensores humedad, temperatura y calidad del aire. Para ver mediciones en tiempo real (ver anexo 4).

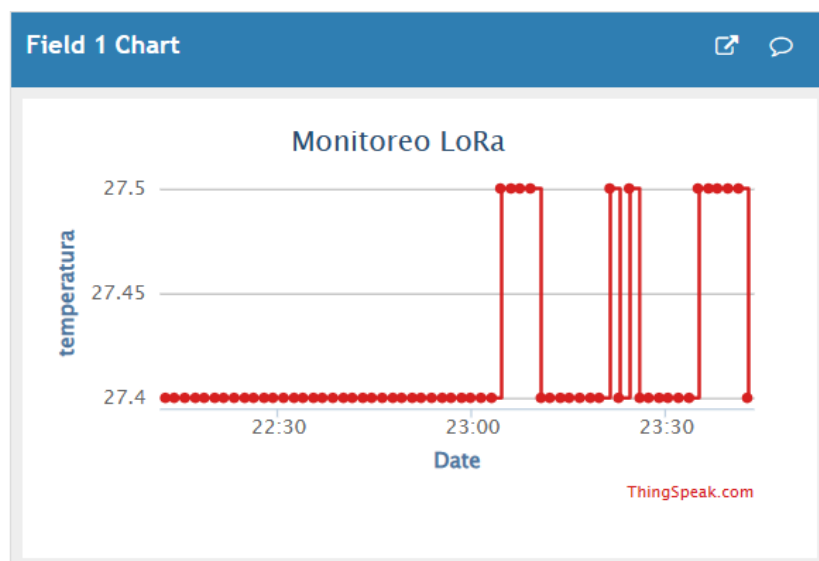


Figura 8. Nodo LoRa PUCESE, sensor temperatura

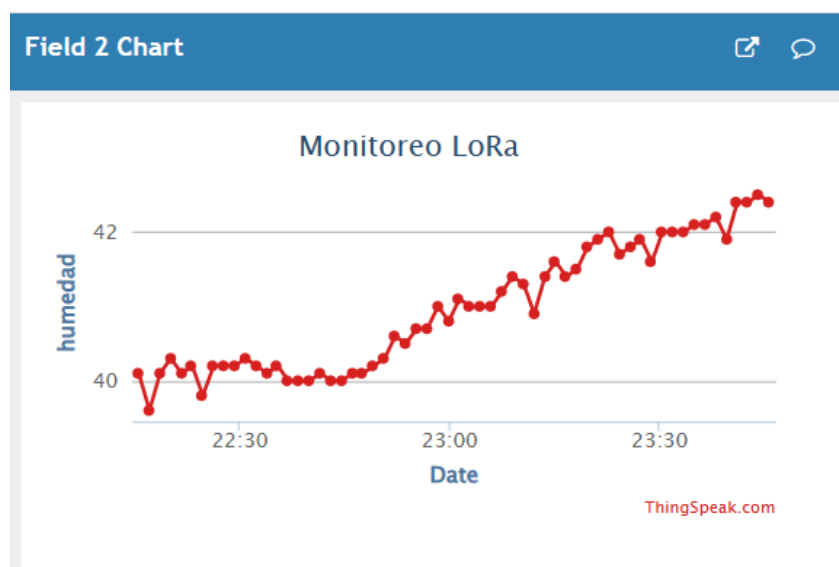


Figura 9. Nodo LoRa PUCESE, sensor humedad

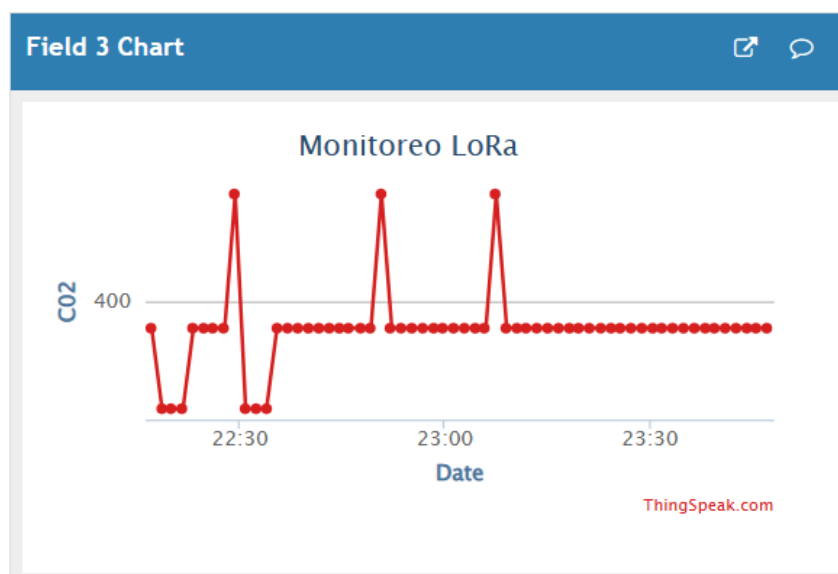


Figura 10. Nodo LoRa PUCESE, sensor CO2

### 3.1.4 Evaluación de los datos monitoreado por la red

Los datos fueron recopilados desde 11h45 hasta 23h49, las lecturas se dieron desde el interior de una oficina de las instalaciones de la PUCESE evento que tuvo lugar el día del 08/03/2023, (ver Anexo 4).

Con el intervalo de confianza establecido, se aseguró en un 95% en base a las lecturas obtenidas, que la medición del sensor CO2 (mg811) oscila entre 399.8 y 398.68 ppm como se detalla en la tabla 6.

Tabla 6. Intervalo de confianza del sensor CO2

CO2			
<b>Promedio</b>	x	399,24	
<b>Nivel de confianza</b>	alfa	95,00	
<b>Coefficiente de confianza</b>	z	1,96	Límite superior= 399.24 + 0.56 = 399.8
<b>Tamaño de la muestra</b>	n	50,00	Límite inferior= 399.24 - 0.56 = 398.68
<b>Desviación estándar</b>	s	2,03	
<b>Error standard</b>	e	0,56	

Por otra parte, en cuanto a la magnitud de la temperatura. Se determinó que el sensor se encuentra calibrado y en base al intervalo de fiabilidad con un 95%, como se describe en la tabla 7.

Tabla 7. Intervalo de confianza del sensor de Temperatura

<b>Temperatura</b>			
<b>Promedio</b>	x	23,55	
<b>Nivel de confianza</b>	alfa	95,00	
<b>Coefficiente de confianza</b>	z	1,96	Límite superior = $23.55 + 0.31 = 23.86$ Límite inferior = $23.55 - 0.31 = 23.24$
<b>Tamaño de la muestra</b>	n	50,00	
<b>Desviación estándar</b>	s	1,13	
<b>Error standard</b>	e	0,31	

Sin embargo, para el aspecto de la humedad casi en el mismo contexto que en el de temperatura, pero con diferente muestreo, según como se detalla en la tabla 8.

Tabla 8. Intervalo de confianza del sensor de Humedad

<b>Humedad</b>			
<b>Promedio</b>	x	26,86	
<b>Nivel de confianza</b>	alfa	95,00	
<b>Coefficiente de confianza</b>	z	1,96	Límite superior = $26.86 + 0.14 = 26.99$ Límite inferior = $26.86 - 0.14 = 26.72$
<b>Tamaño de la muestra</b>	n	50,00	
<b>Desviación estándar</b>	s	0,49	
<b>Error standard</b>	e	0,14	

Se puede apreciar que la temperatura y humedad varían en función del aire acondicionado desde antes y después de encenderlo, en cuanto al CO2 no hubo una excesiva variación sobre dióxido de carbono debido a la temperatura que se encontraba entre  $25\text{ }^{\circ}\text{C} - 21\text{ }^{\circ}\text{C}$  hace que las partículas de dióxido en el aire sea casi una constante.

### 3.1.5 Evaluación de la comunicación en la red

En lo relacionado con en el envío de datos a través de sensores ambientales utilizando la tecnología LoRaWAN en el proyecto ciudad inteligente – Esmeraldas se puede verificar mediante el comando ping que desde un usuario al gateway de 790 paquetes enviados no se ha perdido ningún paquete, por lo que se puede afirmar que todos los datos enviados desde el gateway son recibidos satisfactoriamente por los usuarios. Además, también se verifica en ese mismo segmento, es decir, de un usuario al gateway que la latencia mínima = 0ms, máxima = 15ms y media = 1ms, como se puede ver en la Figura 11.

```

Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo<1m TTL=64
Respuesta desde 10.0.10.116: bytes=32 tiempo<1m TTL=64

Estadísticas de ping para 10.0.10.116:
  Paquetes: enviados = 790, recibidos = 790, perdidos = 0
  (0% perdidos),
  Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
  Mínimo = 0ms, Máximo = 15ms, Media = 1ms

```

Figura 11. Pruebas de conexión en la red de sensores LoRa

En cuanto a la seguridad de la red de sensores se puede afirmar que es altamente segura puesto que The Things Network admite cifrado de extremo a extremo y soporte para diferentes claves de cifrado de 128 bits para cada dispositivo final, conjuntamente LoRaWAN emplea comprobaciones de integridad de mensajes con cifrado AES de 128 bits, además el proceso de acceso a la plataforma es mediante nombre de usuario y contraseña.

Dado que la estructura de la red de sensores es muy sencilla es fácil implementar nuevos gateways y sensores lo que asegura su escalabilidad. En el anexo 3 se muestra el proceso de cómo se implementa nuevos elementos en la red

### **Costos de implementación del prototipo de red de sensores con tecnología LoRaWAN**

Otro aspecto relevante en el uso de la tecnología LoRaWAN es su bajo costo, en la tabla 9 se puede observar el precio unitario de los componentes empleados para implementar el prototipo de red de sensores ambientales mediante la utilización de la tecnología LoRaWAN, para su aplicación en el proyecto ciudad inteligente – Esmeraldas.

Tabla 9. Costos de componentes de la red LoRa

<b>Equipos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Precio (USD)</b>
Sensor DHT22	1	4,25

Sensor MG811	1	81,90
Microcontrolador Arduino Mega 2560	1	25
Gateway LoRa RAK 7289 v2 outdoor	1	700
Modulo LoRa RFM9X LoRa Packet Radio Breakouts by Adafruit	1	20
Servidor LoRaWAN The Things Network	1	0
Aplicación de monitoreo Thing Speak	1	0
Programación y configuración de dispositivos	1	100
<b>Total</b>		<b>931.15</b>

---

## **CAPITULO IV. DISCUSIÓN**

En esta sección se discute sobre los resultados obtenidos luego de implementar una red de sensores ambientales para el proyecto ciudad inteligente – Esmeraldas, contrastándolos con los resultados de los trabajos relacionados con este estudio.

En esta investigación al igual que en los trabajos relacionados que sirvieron como antecedentes para la implementación del prototipo de red de sensores ambientales aplicados en el proyecto ciudad inteligente – Esmeraldas, se empleó la tecnología LoRaWAN, debido a que esta tecnología es la mejor opción, gracias a que sus características técnicas son suficientes para esta aplicación, además su costo es de bajo comparándola con las comunicaciones satelitales o enlaces de radio como afirman Gaybor y Maridueña, mientras que los precios varían en comparación con los trabajos relacionados, debido a que los equipos empleados en cada uno de los prototipos siendo de la misma tecnología tienen características diferentes, por ejemplo en este estudio se calculó el costo del prototipo en 931,15 mientras que en las investigaciones de Buestán y Cevallos & Rubio 842,83 y 261 respectivamente, de modo que es factible económicamente [1], [11], [6], [19], [18], [17].

Durante las pruebas de conexión realizadas desde un cliente al servidor se muestra que todos los paquetes enviados fueron recibidos satisfactoriamente, confirmándose que no existe pérdida significativa en el envío de datos, al igual que en las investigaciones de Buestán y Heredia & Lucero donde el porcentaje de pérdidas de paquetes se mantuvo por debajo del 6 %, además, se verificó que la que la latencia media es de 1ms siendo aceptable [1], [11], [6], [19], [18], [17].

Gracias a que el servidor The Things Network emplea cifrado de extremo a extremo de 128 bits y que la tecnología LoRaWAN aplica cifrado AES de 128 bits para la comprobación de la integridad de los mensajes la seguridad en la transmisión los datos desde los nodos (sensores) hasta los usuarios está garantizada en el prototipo de red de sensores ambientales planteado en esta investigación y en las investigaciones previas a este estudio puesto que plantearon en uso de la misma tecnología [1], [11], [6], [19], [18], [17].

Con respecto a la plataforma IoT, en este estudio se utilizó Thing Speak para conectar personas con objetos (sensores) por ser más sencilla en cuanto a la programación, de igual

forma que lo hicieran Gaybor & Maridueña, Buestán, y Henao en sus respectivas investigaciones [11], [1]. A diferencia de Mejía que en su estudio utilizó la plataforma M2MLight para monitorear su sistema de parqueadero inteligente [17]. Otra plataforma es Ubidots herramienta de analítica y capaz de mostrar mapas de datos en tiempo real, la cual fue utilizada por Cevallos & Rubio en su investigación [6]. Mientras que por su parte Heredia configuro OPC UA (OPC Unified Architecture) plataforma que permite el intercambio seguro de información en sistemas industriales. Esta diferencia se debe al tipo de sensores que en cada proyecto se debía monitorear [18].

En cuanto al hardware IoT para desarrollar el prototipo planteado en esta investigación se necesitó sensores de temperatura, humedad y de CO2 un gateway de LoRa, además de un microcontrolador Arduino, junto a la placa de comunicación a larga distancia LoRa. La diferencia con los trabajos relacionados con este estudio radica en el tipo y marca de los componentes que emplearon puesto que cada desarrollo de prototipo tiene sus propias características específicas [1], [11], [6], [19], [18], [17].

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. Conclusiones**

Existen varios tipos de redes de comunicación inalámbrica en ciudades inteligentes basadas en tecnología LoRa, entre ellas se puede mencionar Low Power Wide Area Networks (LPWAN) y LoRaWAN. Para implementar la red de sensores ambientales del proyecto ciudad inteligente – Esmeraldas se escogió LoRaWAN por adaptarse de mejor manera a las características requeridas.

Entre los tipos de plataformas para la integración de sensores ambientales de bajo consumo se analizaron The Things Network (TTN) y Helium una vez analizadas sus características individuales, se escogió The Things Network por su facilidad de configuración y programación.

Se logró desplegar los sensores DHT22 (temperatura y humedad) y MQ135 (calidad del aire), conectados a un Gateway de LoRa RAK7289 por medio de un microcontrolador Arduino mega 2560 que junto a la placa de comunicación a larga distancia RFM9X LoRa, permitió el envío de las magnitudes obtenidas por los sensores ambientales.

Se configuró la plataforma Open Source ThingSpeak la cual permite conectar personas con objetos, la cual cuenta con una API para almacenar y recuperar datos de los objetos usando el protocolo HTTP para el análisis de datos obtenidos de la red de sensores inalámbricos (objetos).

En base a las mediciones realizadas, se puede asegurar que la pérdida de información durante el envío de datos desde los sensores ambientales hacia el servidor The Things Network es inferior al 5% por lo que se afirma que no existe pérdida de datos, además la seguridad de la información está asegurada mediante cifrado de 128 bits gracias a la utilización de la tecnología LoRaWAN.

## **5.2. Recomendaciones**

Se recomienda para la fiabilidad de la red LoRaWAN tener actualizados con última versión del protocolo sensores y gateways, si es posible hacerlo de forma remota mejor.

Puesto que el almacenamiento en la nube es limitado (Thingspeak) se recomienda contar con un servidor local con la capacidad suficiente para almacenar y procesar los datos enviados por los nodos.

Para el diseño del prototipo de red de sensores ambientales del proyecto ciudad inteligente – Esmeraldas se utilizó dispositivos de bajo costo con características limitadas, por tal razón, se recomienda usar dispositivos de una gama superior los cuales poseen mayor sensibilidad.

Mantener actualizadas las librerías que permiten la conectar a los objetos (sensores - Arduino) con la plataforma The Things Network

## REFERENCIAS

- [1] J. Buestán Vera, «Desarrollo de una red IoT con tecnología lora para detección de automóviles,» Quito, 2019.
- [2] G. Mercado, L. Álvarez y L. Bocaccini, «Diagnóstico y Metodología para la Implementación de “Internet of Things” en el Planeamiento y Desarrollo de Ciudades Inteligentes,» *XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, pp. 1-5, 2017.
- [3] S. Gramajo , R. Scappini , D. Bolatti y F. Aguirre , «Análisis y Aplicaciones de Internet de las Cosas y Ciudades,» *XXIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, pp. 2-5, 2021.
- [4] M. Marca Carrillo y J. Saldaña Tacuri, «Análisis y evaluación de la implementación del modelo de ciudad inteligente en la ciudad de Guayaquil,» Guayaquil, 2018.
- [5] L. Liya y M. Aswathy, «LoRa technology for Internet of Things(IoT):A brief Survey,» de *2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, Palladam, India, 2020.
- [6] B. Cevallos García y S. Rubio Echeverría,, «Desarrollo de una red IoT con tecnología LoRa para gestión de invernaderos,» Quito, 2021.
- [7] Oracle, «¿Qué es el IoT?,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.oracle.com/ar/internet-of-things/what-is-iot/>.
- [8] P. Gokhale, O. Bhat y S. Bhat, «Introduction to IoT,» *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, vol. 5, nº 1, 2018.
- [9] M. Dhaval Patel, «Experimental Study on Low Power Wide Area Networks (LPWAN) for Mobile Internet of Things,» *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1-5, 2017.
- [10] A. Zourmand, A. Lai Kun Hing y C. Wai Hung, «Internet of Things (IoT) using LoRa technology,» *IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems*, pp. 1-7, 2019.
- [11] M. A. Gaybor Murillo y . M. Maridueña Chunga, «Diseño de un sistema de adquisición de datos de una red de sensores inalámbricos que miden variables oceanográficas en el perfil costanero de Santa Elena, usando tecnología LoRa.,» Guayaquil, 2017.

- [12] J. Bustamante Narvaez, «Dispositivo logger IoT con tecnologías de comunicación Sigfox y Lora,» uenos Aires, 2019.
- [13] M. Castro Espinoza, D. González Cosio, J. Reyes Gracia, J. Morales Álvarez y D. Hiraes Valles, «Red de comunicación para mensajería sin cobertura de Internet o red móvil a través de dispositivos móviles,» *evista De difusión científica, ingeniería Y tecnologías*, vol. 13, n° 3, pp. 2-8, 2019.
- [14] E. Medina, «The Thing Network,» 27 09 2019. [En línea]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/community/barranquilla/post/the-things-network>. [Último acceso: 29 08 2022].
- [15] Kriptomat , «KRIPTOMAT,» 2022. [En línea]. Available: [https://kriptomat.io/es/criptomonedas/helium/que-es-helium/#%C2%BFQue\\_es\\_Helium\\_HNT](https://kriptomat.io/es/criptomonedas/helium/que-es-helium/#%C2%BFQue_es_Helium_HNT). [Último acceso: 19 08 2022].
- [16] C. Espinoza Carrión, M. J. Pérez Espinoza y M. B. Peralta Mocha, «El Internet de las cosas: Antecedentes, conceptualización y riesgos,» *Conference Porceedings*, vol. 1, n° 1, 2017.
- [17] F. X. Mejía Tamayo, «Propuesta de solución Internet of Things (IoT) con tecnología LoRaWAN, para un Sistema de Parqueadero Inteligente (SPI). Caso de estudio Conjunto Habitacional Parque Real (CHPR),» Quito, 2020.
- [18] E. Heredia Rivadeneira y P. Lucero Andrade, «Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada,» Cuenca, 2021.
- [19] C. Henaó Gómez, «Sistema mecatrónico para el monitoreo de plantas vegetales ubicadas en campo e identificadas como un activo digital,» Universidad EIA, 2022.
- [20] «Constitución de la república del Ecuador 2008,» Registro Oficial 449 de 20-oct.-2008, 2008.
- [21] «Convenio específico de cooperación para investigación y desarrollo, entre la Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Esmeraldas (PUCESE) y el Gobierno autónomo descentralizado del cantón Esmeraldas (GADMCE),» Esmeraldas , 2022.
- [22] Oracle, «Oracle,» [En línea]. Available: <https://www.oracle.com/ar/internet-of-things/what-is-iot/>. [Último acceso: 10 07 2022].

[23] H. Huh y J. Y. Kim, «LoRa-based Mesh Network for IoT Applications,» Limerick, Ireland, 2019.

## ANEXOS.

### Anexo 1. Ficha de observación científica

Objetivo: validar si los componentes de la red LoRaWAN cumplen con las características solicitadas.

Parámetros de evaluación

1	2	3	4	5
Insuficiente	Regular	Aceptable	Bueno	Excelente

	Sensor DHT11					Sensor MQ135					Gateway LoRa				
Aspectos	Valoración					Valoración					Valoración				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Conectividad															
Compatibilidad															
Disponibilidad															

## **Anexo 2. Cuestionario de entrevista encargado del proyecto Ciudad Inteligente – Esmeraldas**

**Objetivo:** Definir los factores que componen la red IoT aplicando la tecnología LoRa

1. ¿Qué tipo de tecnología se usa en la ciudad para la comunicación inalámbrica de los dispositivos IoT?
2. ¿Qué protocolo de comunicación se usa para la comunicación inalámbrica de los dispositivos IoT?
3. ¿Por qué se usa este protocolo y que tan eficiente es para la comunicación?
4. ¿Existe accesibilidad a Internet en diferentes puntos de la ciudad? ¿cuáles son esos puntos?
5. ¿Cuáles son las alternativas de conexión a largas distancias que se aplica en la ciudad? ¿cómo la utilizan?

### Anexo 3. Implementación del prototipo de red de sensores ambientales utilizando la tecnología LoRaWAN

Paso 1: se prepara los elementos necesarios en la plataforma TTN, primero se crea una cuenta, para que el nodo pueda conectarse a esta plataforma por medio de unas credenciales dadas por la propia plataforma y una vez validadas dichas credenciales, el nodo ha registrado los payload en la plataforma.

Paso 2: Se crea una aplicación en la plataforma TTN como se muestra en la figura 12.

The screenshot shows the 'Create application' page on the TTN platform. At the top, there is a heading 'Create application' followed by a sub-heading: 'Within applications, you can register and manage end devices and their network data. An integration options to pass relevant data to your external services. Learn more in our guide on [Adding Applications](#).' Below this, a red error message box states 'Submit failed' and 'Already exists'. The form fields are: 'Owner' with a dropdown menu showing 'proyectoslot2022'; 'Application ID' with a text input containing 'applications-node-Esme' and a red error message below it: 'Application ID must contain only lowercase letters, numbers and dashes (-)'; 'Application name' with a text input containing 'Aplicaciones para nodos LoRa'; and 'Description' with a text area containing 'Description for my new application'. At the bottom, there is a blue 'Create application' button.

Figura 12. Creación de una aplicación en la plataforma TTN

Luego dentro de la aplicación crea los devices o dispositivos por nodos con el plan de frecuencia 902-928 MHz, se confirma en el JoinEUI agregado aleatoriamente, seguido a eso se termina de llenar los campos y generar los datos restantes de forma automática y se registra el nodo. Como se puede observar en la figura 13

## Register end device

Does your end device have a QR code? Scan it to speed up onboarding.

### End device type

Input Method

- Select the end device in the LoRaWAN Device Repository  
 Enter end device specifics manually

Frequency plan

United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN)

LoRaWAN version

LoRaWAN Specification 1.0.1

Regional Parameters version

TS001 Technical Specification 1.0.1

[Show advanced activation, LoRaWAN class and cluster settings](#)

### Provisioning information

JoinEUI

58 7C 89 7D 8C 7E 63 78

Figura 13. Registro de dispositivos

Paso 3: se configuró el dispositivo final creado en TTN, con el modo de activación ABP, versión de LoRa 1.0.3 con clase A. en la figura 14 se muestra dicha configuración

## Network layer

LoRaWAN network-layer settings, behavior and session

Frequency plan

United States 902-928 MHz, FSB 2 (used by TTN)

LoRaWAN version

LoRaWAN Specification 1.0.3

Regional Parameters version

RP001 Regional Parameters 1.0.3 revision A

LoRaWAN class capabilities

- Supports class B  
 Supports class C

Activation mode

- Over the air activation (OTAA)  
 Activation by personalization (ABP)  
 Define multicast group (ABP & Multicast)

Figura 14. Configuración del dispositivo final

Es importante mencionar que existen dos formas de activación para que los nodos puedan conectarse a la red y registrar los payloads en TTN, estos son abp y otaa. Para OTAA, el dispositivo realiza un procedimiento de unión con la red, el cual DevAddr se asigna una dinámica y se negocian claves de seguridad con el dispositivo. Mientras que para la configuración con ABP, es posible que deba codificar el DevAddr, así como las claves

de seguridad en el dispositivo. Esto significa activar un dispositivo por personalización (ABP).

Paso 4: se realizó un esquematizado sobre las conexiones de los sensores y la placa LoRa hacia placa Arduino mega uno 2560.

Paso 5: se procedió a realizar las conexiones físicamente en base a lo esquematizado, como se puede observar en la figura 15.

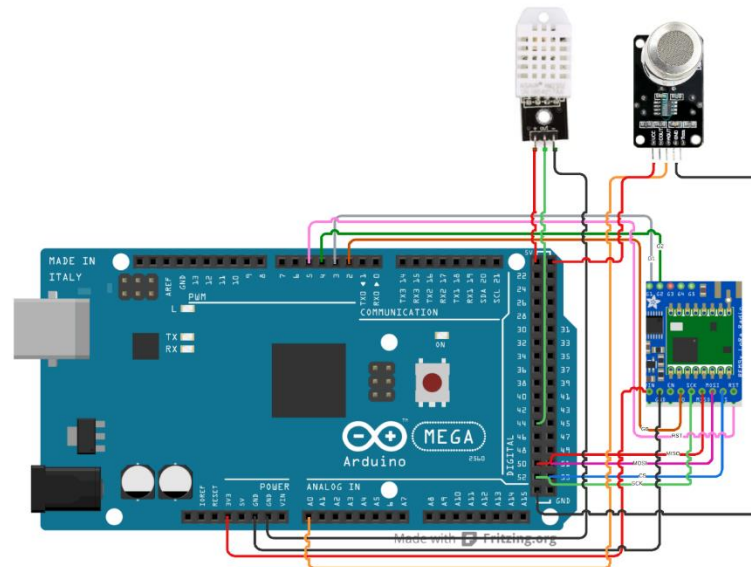


Figura 15. Conexiones de los sensores y la placa LoRa hacia placa Arduino mega uno 2560

Paso 6. Se realizo las pruebas correspondientes de cada sensor, para confirmar su funcionalidad por medio de las correspondientes librerías, para el sensor DHT22 se instaló la librería dht creado por adafruit, mientras que para el sensor mg811 se tuvo que descargarlo de forma externa del IDE Arduino como se aprecia en el siguiente código.

```
#include "CO2Sensor.h"  
#include <lmic.h>  
#include <hal/hal.h>  
#include <SPI.h>  
//librerias sensores
```

### MCCI LoRaWAN LMIC library

by Terry Moore Versión 4.1.1 **INSTALLED**

**Arduino port of the LMIC (LoRaWAN-MAC-in-C) framework provided by IBM.** Supports LoRaWAN 1.0.2/1.0.3 Class A devices implemented using the Semtech SX1272/SX1276 (including HopeRF RFM92/RFM95 and Murata modules). Support for EU868, US, AU, AS923, KR and IN regional plans. Untested support for Class B and FSK operation. Various enhancements and bug fixes from MCCI and The Things Network New York. Original IBM URL <http://www.research.ibm.com/labs/zurich/ics/lrsc/lmic.html>.  
[More info](#)

### DHT sensor library

by Adafruit Versión 1.4.4 **INSTALLED**

**Arduino library for DHT11, DHT22, etc Temp & Humidity Sensors** Arduino library for DHT11, DHT22, etc Temp & Humidity Sensors

[More info](#)

Seleccione versión ▾

Paso 7: se reemplazó las credenciales de NWKSKKEY, APPSKEY y DEVADDR en base las credenciales dadas por el nodo de la plataforma, como se muestra en el siguiente código.

```
// LoRaWAN NwkSKey, network session key
// This should be in big-endian (aka msb).
static const PROGMEM u1_t NWKSKKEY[16] = {0x51, 0xB8, 0xE4, 0x12, 0x2B, 0xCB, 0x82,
0x81, 0x2B, 0xB1, 0xE6, 0x19, 0xC7, 0xC9, 0xC9, 0x28};

// LoRaWAN AppSKey, application session key
// This should also be in big-endian (aka msb).
static const u1_t PROGMEM APPSKEY[16] = {0xDE, 0x8F, 0xB2, 0xB6, 0xD6, 0xEF, 0xC1,
0xF8, 0x47, 0x9B, 0x66, 0x8F, 0x82, 0x07, 0x96, 0x32};

// LoRaWAN end-device address (DevAddr)
// See http://thethingsnetwork.org/wiki/AddressSpace
// The library converts the address to network byte order as needed, so this should
be in big-endian (aka msb) too.
static const u4_t DEVADDR = 0x260CD6CA; // <-- Change this address for every node!
```

Paso 8: Se estableció los pines con los que trabaja la placa LoRa, para poder procesar la información y enviarla por medio de espectros de 915 MHz. A continuación, se muestra dicho procedimiento.

```

// Pin mapping
// Adapted for Feather M0 per p.10 of [feather]
const lmic_pinmap lmic_pins = {
    .nss = 53, // chip select on feather (rf95module) CS
    .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
    .rst = 5, // reset pin
    .dio = {2, 3, 4}, // assumes external jumpers [feather_lora_jumper]
        // DIO1 is on JP1-1: is io1 - we connect to GP06
        // DIO1 is on JP5-3: is D2 - we connect to GP05
};

```

Luego de eso se establece la conexión entre los componentes de la red de sensores ambientales mediante la tecnología LoRaWAN. Como se puede observar en la figura 16 en donde se observa que en el parámetro payload los campos que representan a los sensores humedad, temperatura y calidad del aire muestran las cargas (datos) obtenidas de los mismos. Lo que prueba que existe conexión y se están recibiendo datos.

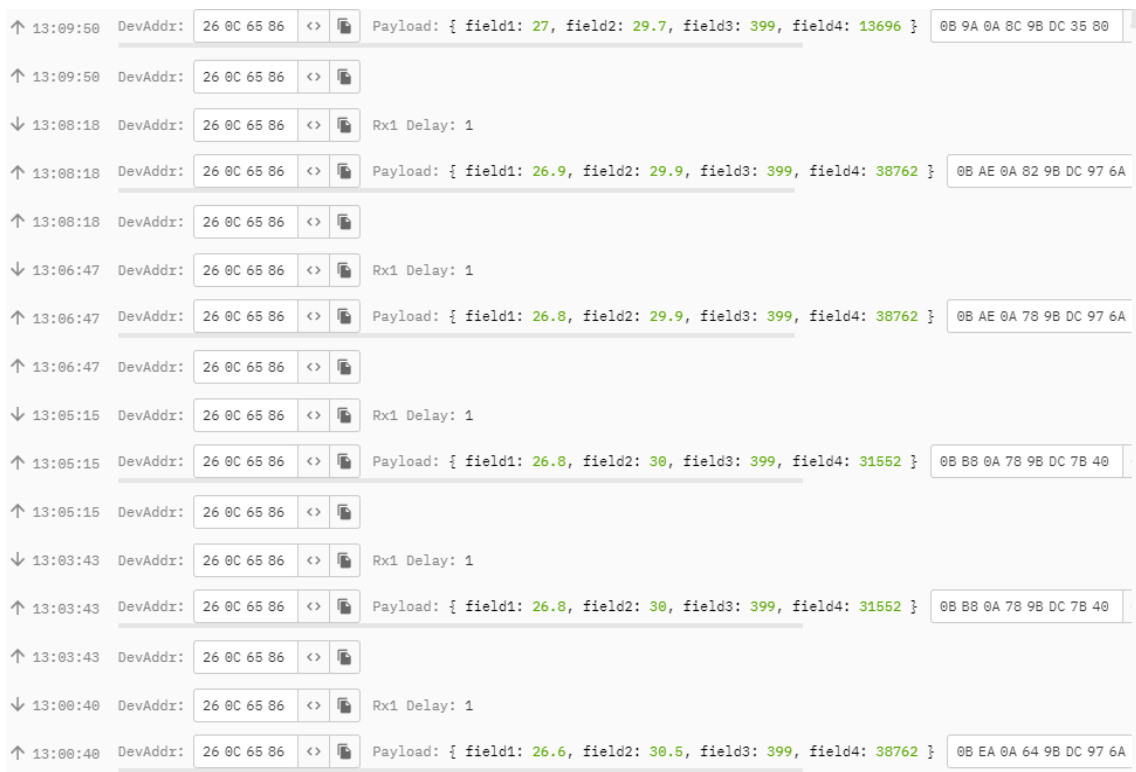


Figura 16. Cargas de los sensores (datos)

#### **Anexo 4. Lecturas de los sensores ambientales**

Para ver las lecturas de los sensores ambientales, hacer clic en el link que se muestra a continuación

[https://pucesedu-my.sharepoint.com/:x/g/personal/luigui\\_castillo\\_pucesedu\\_ec/EX7F7VI4dhtEs4ArFZUZ9TkBwvqRzfQNm\\_vkdp7mKgKouw?e=DftkVx](https://pucesedu-my.sharepoint.com/:x/g/personal/luigui_castillo_pucesedu_ec/EX7F7VI4dhtEs4ArFZUZ9TkBwvqRzfQNm_vkdp7mKgKouw?e=DftkVx)

para ver en texto claro las lecturas de los sensores desde el servidor ambientales The Things Network, hacer clic en el link que se muestra a continuación

<https://thingspeak.com/channels/2031149>