

Propuesta de diseño de red IoT con procesamiento en la nube para el monitoreo
del uso del espectro radioeléctrico en Bogotá

Angela Yulieth Rivera Gómez

Dayana Carolina Suarez Quintero

Directores:

Martha Isabel Villareal López

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE SERVICIOS DE TECNOLOGÍAS DE LA
INFORMACIÓN

BOGOTÁ, 2026

Dedicatoria

A nuestras familias, por su apoyo constante a lo largo de este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Santo Tomás y a su cuerpo docente por la formación recibida durante la especialización. De manera especial, agradecemos a nuestra directora, Martha Isabel Villareal López, por su orientación y acompañamiento en el desarrollo de este trabajo. Finalmente, agradecemos a nuestras familias y compañeros por su apoyo durante esta etapa.

TABLA DE CONTENIDO

1	PROBLEMA	9
1.1	ARBOL DE PROBLEMAS.....	9
1.2	QUE SE QUIERE SOLUCIONAR	10
2	IDEACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	11
2.1	POR QUÉ SE PLANTEA AHORA LA SOLUCIÓN	11
2.2	SECTOR OBJETIVO	12
2.3	TENDENCIAS DEL SECTOR	13
2.4	ANÁLISIS DE MERCADO	13
2.5	ARBOL DE OBJETIVOS	14
2.6	CUÁL ES LA SITUACIÓN DESEADA	15
2.7	INTRODUCCIÓN A LA SITUACIÓN DESEADA	15
2.8	PROPUESTA DE VALOR	16
2.9	PERFIL DEL CLIENTE	17
2.10	MAPA DE VALOR	18
3	ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS TÉCNICAS PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	20
3.1	Selección y localización de áreas críticas para el monitoreo del espectro en Bogotá	20
3.2	Topologías de red para IoT	22
3.3	Protocolos de comunicación IoT	24
3.4	Tecnologías de comunicación entre nodos	24

3.5	Dispositivos para Software-Defined Radio (SDR)	25
3.6	Antenas	26
3.6.1	Antenas para HF (AM)	26
3.6.2	Antenas para VHF (FM) y escalable a UHF	26
3.7	Dispositivos edge	27
3.8	Módulos de comunicación inalámbrica	28
3.9	Fuentes de alimentación	29
3.10	Arquitectura Cloud	31
3.10.1	Criterios de evaluación de los proveedores	31
3.10.2	Comparativa de proveedores por capa funcional	32
3.10.3	Análisis comparativo de costos	33
3.10.4	Matriz de decisión	34
4	MODELO DE NEGOCIO	36
4.1	PROPUESTA DE MODELO DE NEGOCIO	36
4.2	VALIDACIÓN DEL MODELO DE NEGOCIO	37
5	PROPUESTA DE LA SOLUCIÓN TECNOLÓGICA	39
5.1	BLOQUES FUNCIONALES DE LA SOLUCIÓN	39
6	ANÁLISIS DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DIGITAL	43
7	ASPECTOS LEGALES Y CONTRATACIÓN	44
	CONCLUSIONES	45
	REFERENCIAS	46
	LISTA DE FIGURAS	52
	LISTA DE TABLAS	53

ACRÓNIMOS

Sigla	Significado
AGM	Absorbent Glass Mat (batería de plomo-ácido sellada)
AM	Amplitude Modulation (modulación de amplitud)
ANE	Agencia Nacional del Espectro
AWS	Amazon Web Services
CAPEX	Capital Expenditure (gasto de capital)
CoAP	Constrained Application Protocol
CRC	Comisión de Regulación de Comunicaciones
DoD	Depth of Discharge (profundidad de descarga)
FM	Frequency Modulation (modulación de frecuencia)
GCP	Google Cloud Platform
GPS	Global Positioning System
GSMA	Global System for Mobile Communications Association
HAT	Hardware Attached on Top
HF	High Frequency (alta frecuencia)
IAM	Identity and Access Management
IED	Institución Educativa Distrital
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT	Internet of Things (internet de las cosas)
ISM	Industrial, Scientific and Medical (banda)
KMS	Key Management Service
LiFePO4	Litio-ferrofosfato (batería)
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
ML	Machine Learning (aprendizaje automático)
MinTIC	Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NoSQL	Not Only SQL (base de datos no relacional)
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
OPEX	Operational Expenditure (gasto operativo)

Sigla	Significado
RF	Radio Frequency (radiofrecuencia)
SDR	Software-Defined Radio (radio definida por software)
SlaaS	Spectrum Intelligence as a Service
TI	Tecnologías de la Información
TLS	Transport Layer Security
UHF	Ultra High Frequency (frecuencia ultraalta)
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UPS	Uninterruptible Power Supply (sistema de alimentación ininterrumpida)
USRP	Universal Software Radio Peripheral
VHF	Very High Frequency (frecuencia muy alta)
VPC	Virtual Private Cloud
X.509	Estándar de certificados de clave pública

RESUMEN

El aumento de dispositivos inalámbricos ha hecho más difícil gestionar el espectro radioeléctrico, y los esquemas de monitoreo centralizado que se usan hoy se quedan cortos. Esta monografía plantea una solución de monitoreo distribuido para la localidad de Fontibón, pensada para apoyar a la Agencia Nacional del Espectro (ANE). El diseño combina IoT, edge computing, Software Defined Radio (SDR) y servicios en la nube. Se propone una arquitectura híbrida con nodos basados en Raspberry Pi 4 y HackRF One, conectados por LoRaWAN y enlaces UHF, que procesan los datos en el borde y los envían a Amazon Web Services para su almacenamiento, análisis y visualización. El modelo se ajusta a los lineamientos de ciberseguridad del MinTIC y la CRC. Los resultados muestran que esta integración moderniza la supervisión del espectro, facilita decisiones basadas en datos reales y deja un esquema replicable en otras localidades.

Palabras clave: IoT, edge computing, espectro radioeléctrico, SDR, monitoreo distribuido, transformación digital, AWS, LoRaWAN.

ABSTRACT

The growing number of wireless devices has made radio spectrum management harder, and the centralized monitoring schemes used today fall short. This monograph proposes a distributed monitoring solution for the locality of Fontibón, designed to support the National Spectrum Agency (ANE). The design combines IoT, edge computing, Software-Defined Radio (SDR), and cloud services. It proposes a hybrid architecture with nodes based on Raspberry Pi 4 and HackRF One, connected through LoRaWAN and UHF links, which process data at the edge and send it to Amazon Web Services for storage, analysis, and visualization. The model follows the cybersecurity guidelines set by MinTIC and the CRC. The results show that this integration modernizes spectrum supervision, supports decisions based on real data, and leaves a scheme that can be replicated in other localities.

Keywords: IoT, edge computing, radio spectrum, SDR, distributed monitoring, digital transformation, AWS, LoRaWAN.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los entornos urbanos han sumado dispositivos inalámbricos y sistemas IoT a un ritmo acelerado [1]. Ese crecimiento presiona cada vez más al espectro radioeléctrico, un recurso que ya era limitado [2]. El monitoreo tradicional, apoyado en estaciones centrales y mediciones puntuales, tiene varias debilidades frente a este escenario: no cubre bien el territorio, no procesa datos en tiempo real y no escala cuando aumentan los emisores [3]. Diversos estudios señalan que estos modelos no logran responder de forma efectiva al uso actual del espectro, caracterizado por la presencia de múltiples transmisores, interferencias intermitentes y una alta variabilidad en el tiempo y el espacio. Por ello, surge la necesidad de implementar infraestructuras de monitoreo distribuidas y automatizadas [4].

Las redes de sensores basadas en IoT aparecen como una opción viable para caracterizar el entorno de radiofrecuencia de forma continua y con menor latencia. Cuando se les suma edge computing, los datos se procesan cerca de donde se generan, lo que reduce la latencia, baja el consumo de ancho de banda y disminuye la dependencia de infraestructuras centralizadas [4]. Así el espectro puede vigilarse sin interrupciones. Investigaciones recientes demuestran que las arquitecturas colaborativas cloud–edge mejoran significativamente la eficiencia del monitoreo espectral, ya que hacen posible el filtrado, el análisis preliminar y la detección temprana de eventos de interferencia directamente en los nodos locales. Este enfoque resulta especialmente relevante en entornos urbanos densos, donde el volumen de datos generado es elevado [5].

En el plano regulatorio, las autoridades encargadas de la gestión del espectro, como las agencias nacionales, consideran que la transición hacia sistemas de monitoreo basados en IoT representa un paso clave hacia una gestión más proactiva y sustentada en evidencia [2]. Organismos internacionales y estudios especializados coinciden en que estas arquitecturas permiten una supervisión continua, automatizan la detección de usos no autorizados y contribuyen a una utilización más eficiente del recurso espectral. Además, alinean la infraestructura tecnológica con principios de seguridad, escalabilidad y resiliencia. En este contexto, el uso de gateways seguros y jerárquicos se vuelve fundamental para garantizar la integridad, la confidencialidad y la trazabilidad de la información recolectada en redes de monitoreo distribuidas [6].

1 PROBLEMA

1.1 ARBOL DE PROBLEMAS

La gestión del espectro radioeléctrico en Bogotá enfrenta un desafío creciente debido al aumento sostenido de la demanda de servicios inalámbricos, la rápida evolución tecnológica y las limitaciones de los métodos tradicionales de monitoreo empleados por entidades como la ANE, adscrita al Ministerio de las TIC. Estos factores han generado una saturación progresiva del recurso, lo que dificulta su administración eficiente y repercute en la calidad y estabilidad de las comunicaciones en la ciudad [7]. Asimismo, la disponibilidad restringida de espectro, junto con procesos regulatorios y tecnológicos que avanzan con menor rapidez que las necesidades del entorno digital, impacta de manera significativa el despliegue de infraestructura moderna. En consecuencia, se configura un escenario marcado por interferencias, disminución en el rendimiento de los servicios y retrasos en la adopción de tecnologías emergentes, lo cual compromete la competitividad tecnológica y limita la capacidad de innovación en este campo [8].

En la Figura 1 se muestra la representación gráfica del árbol de problemas que sintetiza las causas y efectos nombrados anteriormente.

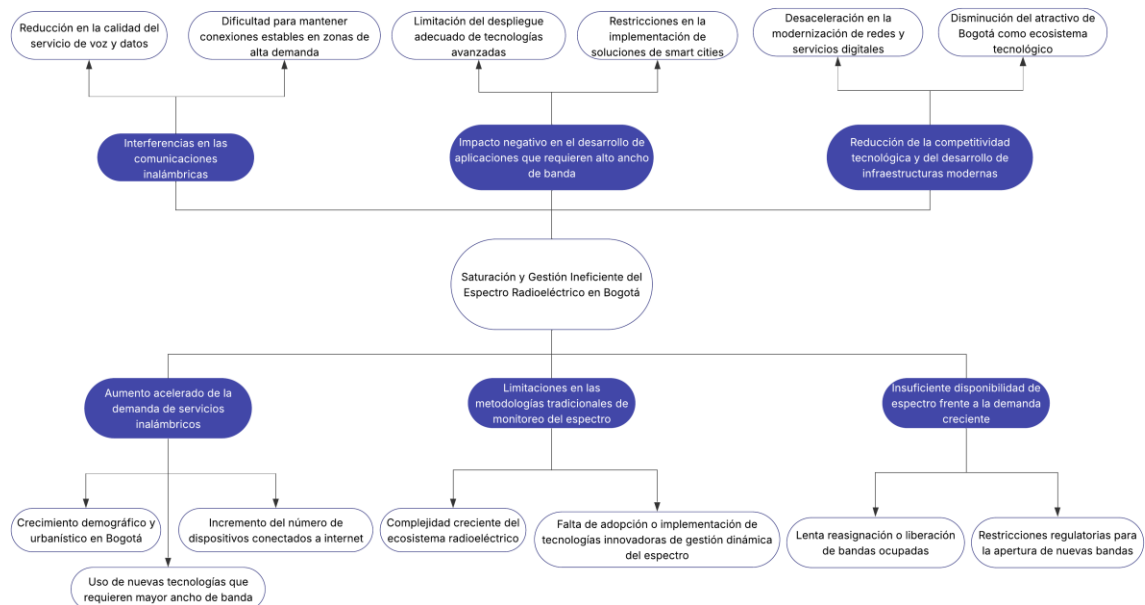


Figura 1. Árbol de problemas. Fuente: Elaboración propia.

1.2 QUE SE QUIERE SOLUCIONAR

En el sector de las telecomunicaciones, el crecimiento de dispositivos conectados y la expansión de tecnologías como 5G e Internet de las Cosas han incrementado la presión sobre el uso del espectro radioeléctrico, especialmente en entornos urbanos. Esta situación resulta crítica en las bandas de AM y FM, destinadas a la radiodifusión sonora, que enfrentan una creciente competencia por el espacio disponible [9]. En este contexto, la supervisión precisa y en tiempo real se vuelve esencial para determinar la ocupación del espectro y garantizar la continuidad y calidad de los servicios.

En Bogotá, esta problemática se intensifica debido a la alta densidad poblacional, la concentración de servicios digitales y el aumento de dispositivos operando en múltiples bandas. La coexistencia de emisoras formales e informales, el incremento de interferencias y la falta de estudios actualizados dificultan la gestión de la banda de radiodifusión sonora. A esto se suman restricciones operativas y una limitada capacidad institucional para el monitoreo continuo, lo que genera vacíos en la planificación y regulación del espectro [10].

El análisis evidencia como principal desafío la saturación y perturbación recurrente de las bandas de frecuencia en zonas críticas de la ciudad. Entre las problemáticas destacan la presencia de señales no autorizadas, interferencias causadas por equipos defectuosos o mal instalados y la falta de herramientas con suficiente precisión para analizar entornos radioeléctricos dinámicos. Estas limitaciones dificultan la detección de anomalías, la identificación de usos indebidos y la toma de decisiones regulatorias oportunas [10].

Ante este contexto, surge la necesidad de desarrollar una propuesta metodológica que permita caracterizar con mayor precisión el estado del espectro radioeléctrico en Bogotá y fortalecer su gestión. El proyecto busca definir criterios técnicos clave e identificar los factores del entorno que inciden en la supervisión de estas bandas. Su objetivo es establecer una base conceptual sólida para diseñar una estrategia integral que responda a las demandas actuales del sector y a las particularidades de la ciudad, especialmente en un escenario marcado por tecnologías emergentes como IoT y la migración hacia servicios en la nube.

2 IDEACIÓN DE LA SOLUCIÓN

El espectro radioeléctrico vive un cambio acelerado en cómo se ocupan las bandas de radiodifusión, sobre todo en AM (535–1705 kHz) y FM (88–108 MHz), reservadas tradicionalmente al servicio sonoro. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) advierte que la expansión de servicios móviles, tecnologías IMT, comunicaciones satelitales y aplicaciones IoT presiona estas bandas y vuelve más exigente la convivencia entre los servicios de siempre y los nuevos sistemas inalámbricos, en especial en ciudades densas [11]. Gestionar el espectro implica entonces sostener un equilibrio: atender la demanda de los servicios emergentes sin descuidar la calidad de los que cumplen fines culturales, educativos e informativos.

En Colombia, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) y la Agencia Nacional del Espectro (ANE) han identificado retos asociados a interferencias, ocupación irregular y coexistencia con otros servicios en las bandas de radiodifusión sonora; por ejemplo, han desarrollado herramientas como el “Visor de Espectro” para facilitar el acceso a información técnica sobre ocupación e interferencias en bandas de AM y FM y mejorar la supervisión espectral en todo el país [12]. Estos desafíos son más evidentes en ciudades como Bogotá, donde la presión espectral es mayor. Informes recientes destacan que la transición tecnológica, incluyendo la migración a estándares digitales, la reorganización de bandas y la necesidad de datos precisos sobre su uso, exige herramientas de monitoreo más avanzadas. Conviene, por tanto, mirar las tendencias globales y nacionales que explican por qué la ocupación de AM y FM merece atención ahora.

2.1 POR QUÉ SE PLANTEA AHORA LA SOLUCIÓN

Las tendencias internacionales evidencian que las bandas de radiodifusión sonora enfrentan transformaciones por la convergencia de servicios inalámbricos y la transición digital. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) advierte que el uso intensivo del espectro por sistemas móviles y aplicaciones emergentes incrementa la presión sobre las bandas tradicionales, lo que exige revisar su coexistencia con servicios en bandas adyacentes [13]. Asimismo, la GSMA señala que, aunque las bandas de AM y FM no están destinadas a 5G, se ven afectadas por la saturación del espectro y por emisiones no deseadas, lo que hace necesario fortalecer su monitoreo [14].

En Colombia, estas dinámicas se reflejan en interferencias, ocupación desigual y congestión en entornos urbanos. La Política de Espectro 2025–2029 del MinTIC plantea la necesidad de evaluar el uso real y la calidad de las bandas de radiodifusión sonora, así como su posible reorganización en el marco de la modernización tecnológica [7]. Además, se reconoce que la falta de mediciones continuas limita la planificación eficiente del espectro. Por consiguiente, la Agencia Nacional del Espectro (ANE) destaca la importancia de basar la gestión en datos reales de ocupación, especialmente en ciudades como Bogotá, donde la saturación dificulta garantizar la calidad del servicio [10]. Esto exige esquemas de monitoreo continuo capaces de identificar interferencias y usos irregulares.

Finalmente, diversos estudios coinciden en que los métodos tradicionales son insuficientes para analizar entornos radioeléctricos complejos. Por eso el uso de análisis espectral avanzado, mediciones con IoT y técnicas de muestreo dinámico se consolida como una alternativa para mejorar la caracterización del espectro y apoyar la toma de decisiones regulatorias [15]. En conjunto, este panorama evidencia la necesidad de un análisis integral de las bandas AM y FM que garantice la continuidad y calidad de la radiodifusión sonora.

2.2 SECTOR OBJETIVO

El sector objetivo corresponde a las entidades públicas encargadas de la gestión del espectro radioeléctrico en Colombia, particularmente aquellas responsables de su planificación, monitoreo y regulación. Aquí la Agencia Nacional del Espectro (ANE) ocupa un lugar central: vigila, analiza técnicamente y administra la ocupación de las bandas, incluidas AM y FM [16].

Este sector es clave para garantizar la conectividad y evitar interferencias entre servicios, en un entorno marcado por la coexistencia de tecnologías, la congestión espectral y la transición tecnológica. Estas condiciones exigen información precisa y actualizada para una adecuada toma de decisiones [17].

Las funciones principales incluyen la detección de interferencias, el análisis de ocupación, la verificación técnica y la identificación de transmisiones no autorizadas, especialmente en entornos urbanos complejos como Bogotá [16]. Estos procesos son fundamentales para asegurar la calidad de la radiodifusión sonora.

La propuesta busca fortalecer la caracterización del espectro mediante información confiable, contribuyendo a optimizar el monitoreo, mejorar el análisis técnico y

apoyar decisiones regulatorias, un objetivo que ha sido reflejado también en la actualización de la Política de Espectro 2025-2029 que impulsa la ANE para promover gestión técnica avanzada y uso inteligente del espectro en el país [18]. Así, se alinea con las necesidades del sector y aporta a una gestión más eficiente del espectro radioeléctrico.

2.3 TENDENCIAS DEL SECTOR

En la gestión del espectro radioeléctrico se observa una tendencia hacia la modernización de los sistemas de vigilancia y análisis, impulsada por la proliferación de tecnologías inalámbricas y el aumento de dispositivos que operan en múltiples bandas. Esta situación ha incrementado la complejidad en la administración del recurso, incluso en bandas tradicionalmente estables como AM y FM, lo que ha llevado a los reguladores a fortalecer metodologías de monitoreo continuo y de mayor precisión [17].

A nivel regional y nacional, se adoptan esquemas de supervisión basados en datos de alta granularidad y herramientas capaces de identificar interferencias y patrones de uso en tiempo real. En Colombia, este proceso se acentúa en entornos urbanos como Bogotá, donde la densidad de emisiones y la diversidad de servicios incrementan la complejidad del entorno radioeléctrico [19].

A la par, las discusiones sobre digitalización, reorganización y uso compartido de bandas han resaltado la necesidad de contar con información actualizada sobre la ocupación real del espectro. Esto permite tanto proteger los servicios de radiodifusión como sustentar decisiones futuras sobre asignación y transición tecnológica [20].

Por tal razón, el sector avanza hacia modelos de gestión basados en evidencia, donde el monitoreo especializado y el análisis del comportamiento espectral en bandas AM y FM resultan fundamentales para prevenir interferencias, optimizar el uso del recurso y garantizar la continuidad de servicios esenciales.

2.4 ANALISIS DE MERCADO

La proliferación de ecosistemas IoT y la adopción de redes inalámbricas críticas han generado una presión sin precedentes sobre el espectro radioeléctrico en Colombia. En sectores estratégicos como la industria, la salud y la logística, la congestión y las

interferencias representan un alto riesgo de disrupción operativa, exigiendo una modernización urgente de los esquemas de monitoreo [21].

Al mismo tiempo, la ANE enfrenta el reto técnico de ejercer su labor de vigilancia y control oficial sobre un espectro cada vez más denso. El problema radica en que las soluciones de monitoreo tradicionales son centralizadas, presentan brechas de cobertura en tiempo real y exigen altísimos costos de implementación (CAPEX/OPEX), lo que dificulta su despliegue masivo tanto para uso regulatorio como corporativo [14].

Ahí se abre un espacio para una arquitectura distribuida, ágil y de menor costo. Al juntar edge computing, analítica en la nube y automatización, el modelo propuesto sorteas esas barreras. Termina funcionando como una plataforma que apoya las decisiones con datos: mejora la supervisión técnica de la ANE y, a la vez, ayuda al sector privado a mantener sus redes operando sin sobresaltos [15].

2.5 ARBOL DE OBJETIVOS

El árbol de objetivos presenta la estructura de la problemática identificada en una serie ordenada de metas con el fin de fortalecer las capacidades institucionales de la ANE en materia de monitoreo del espectro radioeléctrico, especialmente en las bandas de radiodifusión sonora AM y FM. Este esquema organiza de manera jerárquica el propósito central del proyecto y lo descompone en objetivos específicos y medios asociados que permiten visualizar cómo cada componente contribuye al diseño conceptual de un sistema integral de medición, análisis y visualización. De este modo, el árbol facilita comprender la relación lógica entre los distintos elementos de la propuesta y muestra la ruta metodológica que guía el desarrollo del proyecto sin implicar la construcción de un prototipo, sino la formulación detallada de una solución aplicable al ámbito de la gestión pública del espectro.

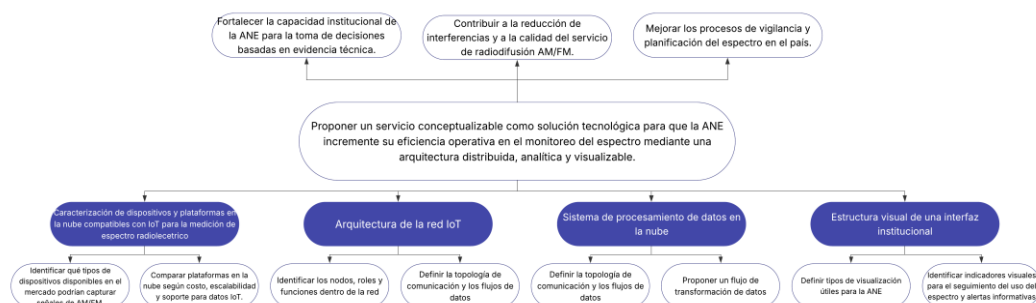


Figura 2. Árbol de objetivos. Fuente: Elaboración propia.

2.6 CUÁL ES LA SITUACIÓN DESEADA

La situación deseada plantea pasar de la supervisión tradicional a un monitoreo del espectro más automático y anticipado. Con tantos ecosistemas IoT y la densificación de las redes inalámbricas en ciudades e industrias, los métodos de siempre se quedan cortos: cubren poco, responden tarde y procesan poco. Por eso se busca un modelo automatizado, fácil de ampliar y orientado al análisis en tiempo real, que cierre esas brechas y mantenga el entorno de radiofrecuencia bajo control.

En este sentido, el estado esperado (o *To-Be*) del sistema habilitará la telemetría continua del espectro, facilitando la identificación de patrones de uso, la generación de alertas tempranas ante interferencias o anomalías, y la trazabilidad integral de los eventos. Al integrar herramientas avanzadas de visualización, la plataforma brindará el soporte necesario para una toma de decisiones técnicas y regulatorias fundamentada en datos. Al final, la solución gana eficiencia, acorta los tiempos de respuesta ante incidentes y se conecta con la agenda de transformación digital, dejando la base tecnológica para gestionar el espectro de forma más inteligente en Colombia.

2.7 INTRODUCCIÓN A LA SITUACIÓN DESEADA

La Figura 3 muestra el proceso actual de monitoreo del espectro radioeléctrico en las bandas AM y FM, caracterizado por una secuencia lineal de actividades que depende principalmente de estaciones de medición fijas, recolección limitada de datos y procedimientos manuales. Este flujo refleja un modelo de operación con baja capacidad de actualización, escasa integración tecnológica y respuesta reactiva ante eventos de interferencia. La representación evidencia la rigidez y fragmentación del proceso actual.

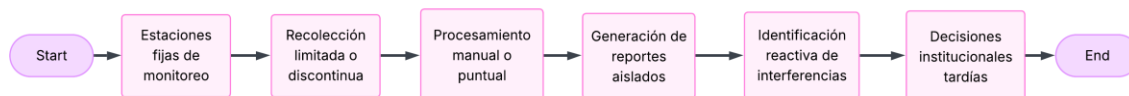


Figura 3. Diagrama de Bloques de la situación actual. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la Figura 4 presenta un diagrama de procesos que representa la situación deseada a partir de la solución planteada para la ANE. Este modelo incorpora un flujo dinámico que combina la captura continua de datos por nodos IoT, su procesamiento en la nube y la toma de decisiones a través de bloques de verificación que permiten identificar anomalías o interferencias en las bandas AM y

FM. La estructura incluye etapas de alerta, visualización y retroalimentación, lo que refleja un sistema institucional capaz de operar de manera proactiva, automatizada y orientada al análisis técnico. El uso de decisiones dentro del flujo evidencia que el proceso esperado no es lineal, sino adaptativo y construido para apoyar la respuesta oportuna de la entidad frente a condiciones variables del entorno radioeléctrico.

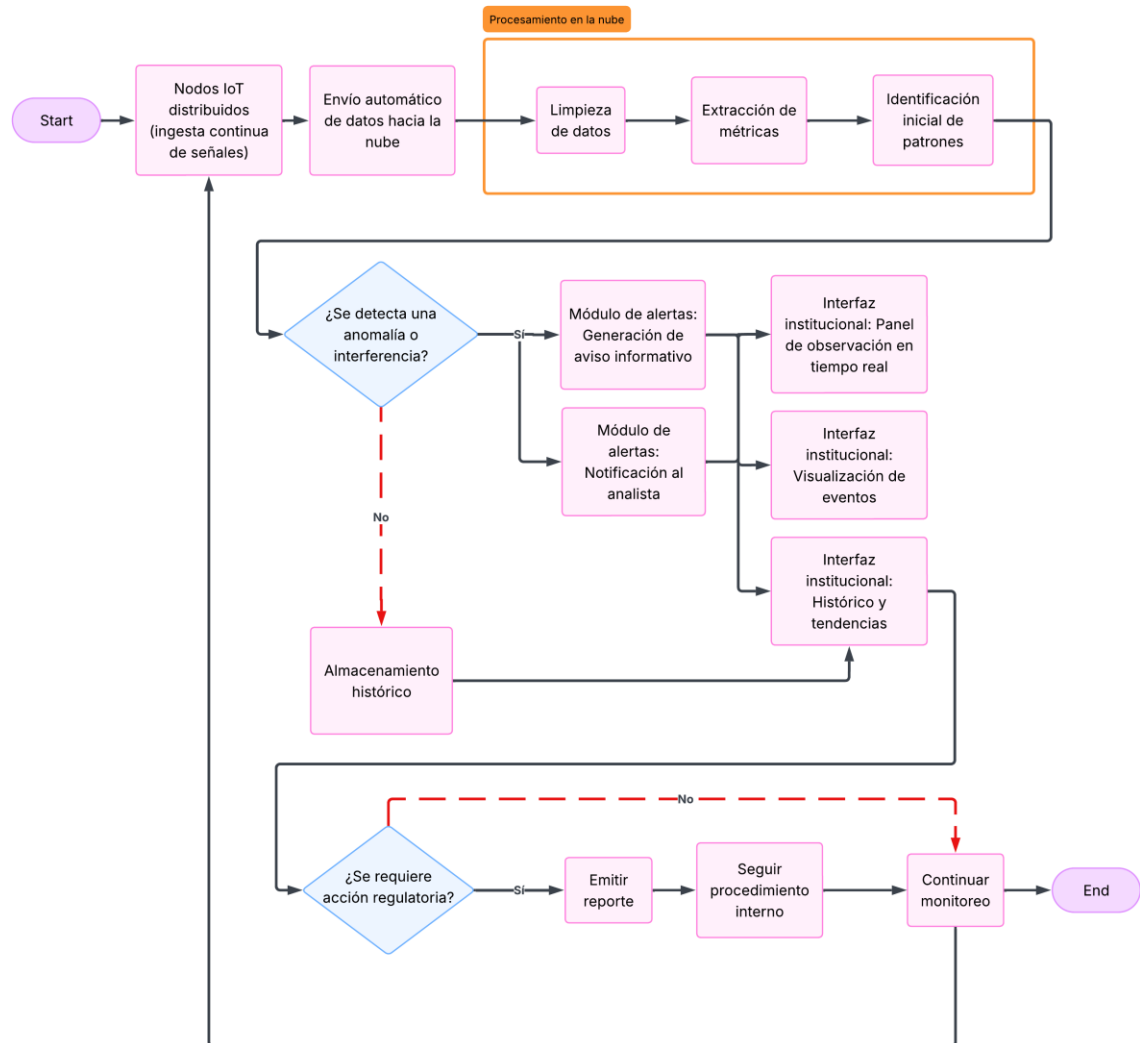


Figura 4. Diagrama de Bloques de la situación esperada. Fuente: Elaboración propia.

2.8 PROPUESTA DE VALOR

La propuesta de valor radica en la capacidad de transformar la supervisión del espectro radioeléctrico en un proceso continuo, proactivo y basado en datos. Frente a la densificación de redes IoT y la saturación de los entornos inalámbricos

industriales y urbanos, tanto las entidades regulatorias como las organizaciones privadas enfrentan severos "puntos ciegos". Las soluciones tradicionales carecen de la cobertura, los tiempos de respuesta y la capacidad analítica en tiempo real necesarios para garantizar la estabilidad de las comunicaciones de misión crítica. Para resolver estas deficiencias, el proyecto ofrece un enfoque de modernización apalancado en tecnologías emergentes [11].

El núcleo de esta propuesta es la evolución de un modelo de monitoreo reactivo hacia una arquitectura automatizada y altamente escalable. Esto permite implementar la detección temprana de interferencias, maximizar la visibilidad del espectro y habilitar una toma de decisiones técnicas y operativas mucho más ágil y precisa. El gran diferenciador de esta solución es su capacidad para convertir la telemetría cruda en inteligencia operativa y estratégica [3].

Al proporcionar información confiable y continua, la plataforma no solo apoya la gestión regulatoria y el control de frecuencias, sino que fortalece la resiliencia de las infraestructuras tecnológicas corporativas. De esta manera, el modelo asegura la continuidad de los servicios inalámbricos y se posiciona como un catalizador indispensable para la transformación digital en múltiples sectores económicos [8].

2.9 PERFIL DEL CLIENTE

El cliente principal y usuario estratégico de este proyecto es la Agencia Nacional del Espectro (ANE), entidad gubernamental responsable de la planeación, gestión y vigilancia técnica del espectro radioeléctrico en Colombia. Ante la rápida densificación de ecosistemas IoT y la proliferación de redes inalámbricas urbanas, la ANE enfrenta el reto misional de adaptar sus mecanismos de supervisión a un entorno de radiofrecuencia cada vez más complejo, dinámico y saturado [18].

Para hacer frente a esta realidad, la entidad demanda una modernización crítica de sus capacidades operativas. El cliente requiere herramientas tecnológicas que superen las limitaciones de latencia y cobertura de los esquemas tradicionales, con el fin de optimizar los tiempos de respuesta, garantizar un flujo continuo de información y habilitar un control proactivo en la detección de interferencias.

Alineado con las directrices nacionales de gobierno digital, el perfil de la ANE corresponde al de una entidad que busca trascender las metodologías convencionales. Su visión institucional demanda la adopción de infraestructuras

tecnológicas innovadoras que automaticen la recolección de métricas y permitan escalar la vigilancia técnica, consolidando así un modelo de supervisión verdaderamente inteligente y proactivo.

La incorporación de analítica avanzada y trazabilidad histórica facultará a la entidad para anticiparse a la congestión de frecuencias, optimizar sus resoluciones técnicas y garantizar un entorno inalámbrico confiable, indispensable para el despliegue de redes de próxima generación y ecosistemas de ciudades inteligentes (*Smart Cities*) en el territorio nacional [22].

2.10 MAPA DE VALOR

El mapa de valor presentado en la Figura 5 ilustra cómo la ANE puede fortalecer su capacidad de supervisión y análisis del espectro radioeléctrico en Colombia mediante la adopción de tecnologías emergentes y procesos de monitoreo en tiempo real. Este enfoque no solo identifica los retos y frustraciones del cliente, como la limitada cobertura, los altos costos operativos y la complejidad de los entornos urbanos, sino que también destaca las oportunidades de transformación: desde la automatización de procesos y la generación de alertas hasta la toma de decisiones basada en datos. Al conectar las necesidades del cliente con soluciones estratégicas y beneficios concretos, el mapa de valor refleja un camino claro hacia una gestión más eficiente, proactiva y resiliente del espectro, alineando los objetivos regulatorios con la modernización tecnológica y la mejora de la infraestructura crítica en el país.

MAPA DE VALOR

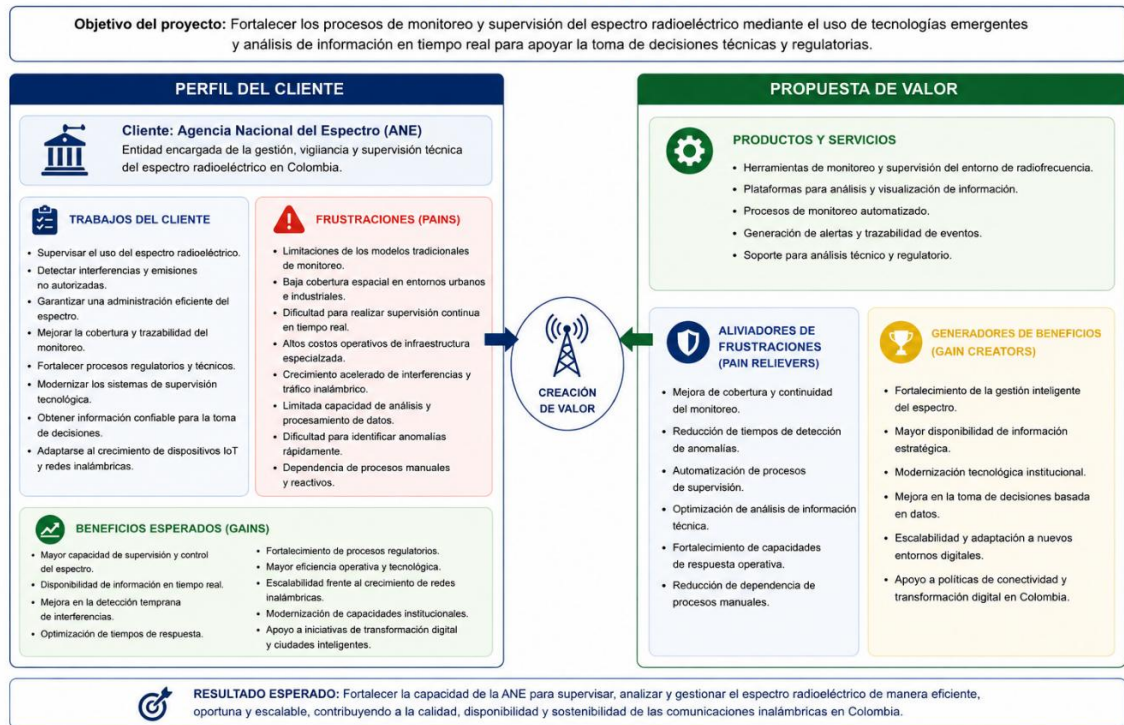


Figura 5. Mapa de valor. Fuente: Elaborado con IA (ChatGPT Plus)

3 ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS TÉCNICAS PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

3.1 Selección y localización de áreas críticas para el monitoreo del espectro en Bogotá

Según las prioridades establecidas por la Agencia Nacional del Espectro, entre todas las localidades de Bogotá se selecciona la localidad de Fontibón como área crítica de implementación para el sistema de monitoreo del espectro radioeléctrico. Esta decisión se fundamenta en la proximidad del aeropuerto internacional, donde las interferencias en señales cercanas, especialmente aquellas generadas por frecuencias ocupadas de manera ilegal o que se superponen con espectro asignado, pueden afectar de forma directa la operación del aeropuerto y comprometer la seguridad aérea [23].

Fontibón cuenta con una extensión aproximada de 33,28 km² y una población estimada en 444.951 habitantes, con alta concentración de infraestructura gubernamental, educativa y de salud [24]. Para el despliegue de nodos de monitoreo, se consideró un nodo por cada 75.000 habitantes, determinando la necesidad de 6 nodos estratégicos.

Los nodos fueron asignados respetando la zona de exclusión de 5 km alrededor del aeropuerto El Dorado, conforme a la normativa de la Aerocivil y la ANE, considerando recomendaciones de la OACI/GREPECAS para restringir antenas y transmisores en áreas próximas a aeropuertos para minimizar interferencias perjudiciales en las comunicaciones aeronáuticas [25]. Además, se ubican edificios públicos específicos, priorizando criterios de seguridad, cobertura de población, accesibilidad y disponibilidad de infraestructura.

Teniendo en cuenta estas limitaciones se establecen entonces las siguientes ubicaciones como puntos estratégicos para el despliegue de los nodos en la Tabla 1.

Nodo	Ubicación específica	Justificación
1	Alcaldía Local de Fontibón, Cra. 99 #19-43	Nodo central de la red; permite monitorear el área urbana central; infraestructura estable y seguridad física garantizada

2	Estación de Policía Fontibón, Cra. 98 #16B-50	Cobertura sector norte; nodo seguro para proteger equipos; fortalece la vigilancia de interferencias críticas
3	Hospital Fontibón, Cra. 99 #16 I - 41	Nodo de cobertura sanitaria y banda FM; garantiza presencia de red en sectores residenciales cercanos al aeropuerto
4	Dirección Local de Educación, Calle 25B #81-55	Cobertura educativa y administrativa; nodo fuera del radio de exclusión aeroportuaria; conecta con Nodo 1 y 6
5	Colegio Integrado de Fontibón (IED), Cra. 106 #18-77	Cobertura sector suroccidental; nodo educativo estratégico para monitorear interferencias en bandas bajas y urbanas
6	Colegio Costa Rica (IED), Cra. 101 #23-42	Cobertura entre centro y occidente; asegura redundancia y conectividad con Nodos 1, 3 y 5 para topología mesh

Tabla 1. Ubicación de los nodos y su justificación.

La selección se basó en maximizar cobertura urbana, asegurar redundancia de la red, mantener nodos fuera de zona de riesgo aeroportuaria y garantizar acceso a infraestructura existente.

Posteriormente se calcularon distancias aproximadas entre nodos utilizando direcciones oficiales y mapas esquemáticos. La cobertura se estimó según radios de antenas omnidireccionales (1–1,5 km) y topografía urbana como se evidencia en la Tabla 2.

Nodo origen	Nodo destino	Distancia (km)
1	2	~1
1	3	~1,2
1	4	~2,0
4	5	~1,5
5	6	~2,0

Tabla 2. Distancia entre los nodos en kilómetros.

La superposición de radios de cobertura garantiza redundancia para la red mesh y asegura vigilancia efectiva de la ocupación espectral en la localidad.

Utilizando el análisis geográfico establecido se elaboró posteriormente un mapa esquemático preliminar de Fontibón con la ubicación de nodos numerados y clasificados por tipo de infraestructura, escala gráfica y rosa de los vientos presentado en la Figura 6. La zona de precaución aeroportuaria se visualiza en el

mapa preliminar mediante un sombreado ámbar translúcido con línea discontinua para la planificación conceptual.



Figura 6. Mapa preliminar nodos de monitoreo de espectro. Fuente: Elaborado con IA (ChatGPT Plus)

3.2 Topologías de red para IoT

Topología	Ventajas	Desventajas	Escalabilidad	Consumo energético	Robustez
Mesh (malla) [26]	Red redundante; cada nodo puede retransmitir paquetes; tolerancia a fallos de nodos	Complejidad de routing y gestión; mayor consumo que estrella simple	Alta: se agregan nodos fácilmente	Medio-alto: cada nodo retransmite paquetes	Muy alta: tolera fallos de nodos

	individuales; adaptable a cambios de topografía urbana				
Estrella extendida [27]	Fácil de implementar; control centralizado; menor consumo por nodo	Nodo central crítico; si falla, toda la red se afecta	Media: nodo central limitado	Bajo por nodo, alto en nodo central	Baja: dependencia nodo central
Cluster híbrido [28]	Combina malla y estrella; balance entre control y redundancia	Complejidad media; requiere planificación	Alta	Medio	Alta
Peer-to- peer [29]	Distribución totalmente autónoma; robusta frente a fallos	Difícil de gestionar; requiere routing complejo	Muy alta	Medio-alto	Muy alta

Tabla 3. Comparación entre topologías de red para IoT

En cuanto a la topología de red como se indica en la Tabla 3, la opción más adecuada es la topología Mesh, ya que garantiza máxima redundancia en entornos urbanos densos como Fontibón. Cada nodo puede retransmitir información, lo que asegura que los nodos cercanos al aeropuerto mantengan la comunicación incluso si algún nodo falla. Además, la topología Mesh permite la incorporación de nodos adicionales de forma flexible, facilitando la expansión futura a otras áreas de Bogotá o a bandas adicionales (UHF, VHF), manteniendo la continuidad operativa. Como segunda opción se propone la topología de Cluster híbrido, que combina control central parcial para nodos críticos, como la Alcaldía, la Estación de Policía y el Hospital, con redundancia local en nodos periféricos (colegios). Esta alternativa ofrece un balance entre control centralizado y robustez, mejorando la transmisión de datos y consumo energético dentro de subclusters específicos.

3.3 Protocolos de comunicación IoT

Protocolo	Latencia	Ancho de banda	Consumo energético	Alcance	Compatibilidad con SDR
MQTT [30]	Baja (ms a decenas de ms)	Bajo/medio (1–100 kbps)	Bajo	Depende de la red subyacente	Alta
CoAP [31]	Baja	Bajo (10–50 kbps)	Muy bajo	10–100 m típico, puede aumentar con gateways	Media
LoRaWAN [32]	Media (100–500 ms)	Muy bajo (0,3–50 kbps)	Muy bajo	2–5 km urbano, hasta 15 km rural	Media
Zigbee [33]	Media	Bajo (20–250 kbps)	Bajo	10–100 m urbano	Baja
Wi-Fi 802.11 [34]	Muy baja	Alta (Mbps)	Alto	50–100 m típico	Alta

Tabla 4. Comparación entre protocolos de comunicación IoT

En relación con los protocolos de comunicación IoT como se muestra en la Tabla 4, la opción principal es MQTT, un protocolo ligero basado en publicación-suscripción, ideal para nodos con conectividad estable (Wi-Fi o Ethernet). MQTT proporciona baja latencia, compatibilidad con SDR, y facilita la integración con sistemas cloud. La alternativa más viable es LoRaWAN, que permite nodos autónomos con muy bajo consumo energético, cobertura urbana de 2–5 km y conexión de nodos periféricos con nodos centrales, asegurando redundancia y resiliencia de la red mesh, especialmente en sectores alejados del centro urbano y del aeropuerto.

3.4 Tecnologías de comunicación entre nodos

Tecnología	Frecuencia	Ancho de banda	Alcance real	Tipo de red	Consumo
LoRaWAN (Semtech) [32]	868 / 915 MHz	0,3–50 kbps	2–5 km urbano, hasta 15 km rural	Mesh con gateways	Muy bajo

Wi-Fi 802.11ac [34]	2,4 / 5 GHz	54 Mbps – 1 Gbps	50–100 m urbano; hasta 500 m con antenas direccionales	Estrella extendida o P2P	Alto
Zigbee (IEEE 802.15.4) [33]	2,4 GHz	20–250 kbps	10–100 m	Mesh	Bajo
RF punto a punto (UHF 400–470 MHz) [35]	902–928 MHz (ISM)	125–225 kbps	~300 m urbano; hasta 64 km línea de vista	P2P / Punto- multipunto / DigiMesh	Medio- alto (Tx ~900 mA)
5G NR banda C [36]	3,5 GHz	100 Mbps – 1 Gbps	1–5 km urbano	Estrella extendida / Mesh	Alto

Tabla 5. Comparación entre tecnologías de comunicación para IoT.

Tras evaluar alcance, consumo y compatibilidad en la Tabla 5, las dos opciones más viables son LoRaWAN y RF punto a punto UHF. LoRaWAN permite nodos autónomos de bajo consumo, con cobertura urbana de 2–5 km, suficiente para los 6 nodos en Fontibón [32]. La topología mesh mediante gateways facilita que nodos periféricos transmitan datos hacia nodos centrales sin depender de energía constante. Esta opción es ideal para nodos residenciales y educativos, asegurando redundancia y resiliencia en la red. RF punto a punto UHF proporciona enlaces confiables con alcance real ≥ 5 km urbano, ancho de banda suficiente (1–5 Mbps) para transmisión de datos SDR [35] Es ideal para nodos centrales (Alcaldía, Policía, Hospital), permitiendo retransmisión de datos críticos y conectividad confiable en la red mesh.

3.5 Dispositivos para Software-Defined Radio (SDR)

Dispositivo	Rango frecuencia	Ancho de banda	Sensibilidad	Offset	Precio aproximado
HackRF One [37]	1 MHz – 6 GHz	20 MHz	N/E (ADC 8 bits, 48 dB rango dinámico)	± 20 ppm	~\$299 USD
RTL-SDR V3 [38]	500 kHz – 1,7 GHz	3,2 MHz	–96 dBm	± 25 ppm	~\$30 USD

USRP B210 [39]	70 MHz – 6 GHz	56 MHz	–92 dBm	±2 ppm	~\$1,099 USD
Airspy HF+ Discovery [40]	9 kHz – 31 MHz / 60–260 MHz	600 kHz / 10 MHz	–120 dBm	±2 ppm	~\$199 USD
BladeRF 2.0 micro [41]	47 MHz – 6 GHz	56 MHz	–95 dBm	±2 ppm	~\$420 USD

Tabla 6. Comparación de dispositivos para SDR.

La opción más viable para los nodos de monitoreo de espectro en Fontibón es el HackRF One, ya que ofrece un rango de frecuencia muy amplio (1 MHz – 6 GHz) que cubre HF, VHF y es escalable a UHF, lo cual es fundamental para un sistema que inicialmente monitoreará AM y FM pero que puede expandirse a bandas superiores como se evidencia en la Tabla 6. Su ancho de banda de 20 MHz es suficiente para detectar ocupación de espectro y análisis de interferencias en tiempo real. Además, el HackRF One es compatible con sistemas de edge computing, permitiendo integración directa con el procesamiento en cada nodo [37]. Como alternativa se mantiene el USRP B210 que, aunque es más caro, ofrece mayor ancho de banda y sensibilidad, ideal para escenarios donde se requiere precisión en la detección de señales débiles y análisis dedicado de espectro [39].

3.6 Antenas

3.6.1 Antenas para HF (AM)

Referencia	Tipo	Frecuencia	Ganancia	Cobertura	Costo
Aaronia MDF 930X [42]	Loop activa magnética	9 kHz – 30 MHz	Preamp. 35 dB	Local / urbana	~\$600 USD
MLA-30+ [43]	Loop activa receptora	0,5 – 30 MHz	Amplificador bajo ruido integrado	Local / suburbana	~\$40 USD

Tabla 7. Comparación de antenas para HF.

3.6.2 Antenas para VHF (FM) y escalable a UHF

Referencia	Tipo	Frecuencia	Ganancia	Cobertura	Costo
Diamond D-130J / D-130NJ [44]	Discono (banda ancha)	25 – 1300 MHz (RX)	~2 dBi	1–2 km urbano	~\$120 USD
Comet DS-150S [45]	Discono (banda ancha)	75 – 1500 MHz (RX)	~2 dBi	1–2 km urbano	~\$110 USD

Tabla 8. Comparación de antenas para VHF.

Después del análisis de la Tabla 7, para HF (banda AM), se elige como opción más apta la Aaronia MDF 930X, una antena loop activa magnética que cubre de 9 kHz a 30 MHz e incorpora un preamplificador de 35 dB, lo que permite captar señales AM débiles con alta sensibilidad. Su diseño está orientado específicamente al rastreo de señales y al monitoreo de espectro, ya que puede conectarse directamente a analizadores de espectro o equipos SDR, lo que la hace idónea para un despliegue institucional en entornos urbanos [42]. Como alternativa más económica se considera la MLA-30+, una loop activa receptora de 0,5 a 30 MHz con amplificador de bajo ruido integrado, ampliamente utilizada en proyectos de SDR y adecuada para los nodos periféricos donde se priorice la reducción de costos [43].

Por otro lado, teniendo en cuenta los datos de la Tabla 8, para VHF y UHF, incluida la banda de radiodifusión FM (88–108 MHz), se selecciona como opción principal la antena discono Diamond D-130J, que ofrece recepción continua de banda ancha de 25 a 1300 MHz sin necesidad de sintonizador. Su patrón omnidireccional y su respuesta plana en frecuencia la hacen ideal para el monitoreo simultáneo de múltiples bandas con una sola antena, además de ser plenamente compatible con los SDR seleccionados (HackRF One y USRP B210) [44]. Como alternativa se considera la antena discono Comet DS-150S, que cubre el mismo rango de recepción (25–1300 MHz), es económica y de fácil instalación, lo que la convierte en una opción equivalente para garantizar redundancia en la red de nodos [45].

3.7 Dispositivos edge

Dispositivo	CPU	RAM	Conectividad	Consumo
Raspberry Pi 4 Model B [46]	Quad-core Cortex-A72 1,5 GHz	1/2/4/8 GB	Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth	3–7 W
Raspberry Pi 5 [47]	Quad-core Cortex-A76 2,4 GHz	2/4/8/16 GB	Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth 5.0	5–12 W
NVIDIA Jetson Orin Nano Super [48]	6-core Arm Cortex-A78AE	8 GB	Ethernet, Wi-Fi (M.2)	7–25 W
ODROID-C4 [49]	Quad-core Cortex-A55 2 GHz	4 GB	Ethernet, Wi-Fi (USB)	3–6 W
Raspberry Pi Zero 2 W [50]	Quad-core Cortex-A53 1 GHz	512 MB	Wi-Fi, Bluetooth	1–3 W

Tabla 9. Comparación de dispositivos Edge.

El Raspberry Pi 4 Model B se selecciona como opción principal debido a que combina CPU y RAM suficientes para ejecutar el procesamiento SDR en edge, permite integrar comunicación Wi-Fi 802.11 y LoRaWAN mediante HAT, y su consumo de 3–7 W lo hace compatible con alimentación solar como se denota en la Tabla 9. Además, es totalmente compatible con HackRF One y USRP B210, permitiendo conectividad con las antenas seleccionadas para medición HF/VHF. Su compatibilidad, bajo costo y respaldo vigente del fabricante lo convierten en la mejor opción para nodos centrales y periféricos [46].

Como alternativa se propone el NVIDIA Jetson Orin Nano Super, sucesor del Jetson Nano y que ofrece una capacidad de procesamiento considerablemente mayor para tareas de machine learning en el edge, con un rendimiento de hasta 67 TOPS de IA, lo que resulta útil si se requieren análisis avanzados de espectro en tiempo real o la ejecución de modelos predictivos directamente en el nodo. Sin embargo, su consumo más elevado (entre 7 y 25 W según el perfil de potencia) y la necesidad de una alimentación más robusta lo hacen menos flexible para nodos autónomos en zonas residenciales [48].

3.8 Módulos de comunicación inalámbrica

Módulo / Gateway	Tecnología	Frecuencia	Alcance real urbano	Consumo	Precio aprox.
RAKwireless RAK2245 Pi HAT [51]	LoRaWAN (gateway/concentrador)	433 / 470 / 868 / 915 MHz	2–5 km urbano	<1 W	~\$60 USD
Dragino LoRa/GPS HAT [52]	LoRaWAN + GPS	433 / 868 / 915 MHz	2–5 km urbano	<1 W	~\$35 USD
Digi XTend 900 MHz [35]	RF punto a punto / DigiMesh	902–928 MHz	~300 m urbano (hasta 64 km LOS)	Medio-alto	~\$275 USD
Digi XBee-PRO 900HP [35]	RF punto a punto / DigiMesh	902–928 MHz	305–610 m urbano	Bajo-medio (Tx 250 mW)	~\$45 USD

Tabla 10. Comparación de módulos de comunicación inalámbrica compatibles con Raspberry Pi.

Para garantizar la comunicación entre nodos y tras el análisis de la Tabla 10, la opción más viable es utilizar el RAKwireless RAK2245 Pi HAT, un módulo concentrador LoRaWAN que se integra directamente como HAT en la Raspberry Pi. Este módulo proporciona cobertura urbana de 2–5 km, muy bajo consumo (<1 W) y soporte para topología mesh mediante gateways, lo que permite que los nodos periféricos transmitan datos hacia los nodos centrales sin depender de energía constante [51]. Esta opción es ideal para nodos residenciales y educativos, asegurando redundancia en la red.

Como alternativa, se propone el módulo RF punto a punto Digi XBee-PRO 900HP, que opera en la banda de 902–928 MHz y ofrece enlaces confiables con alcance urbano de 305 a 610 metros, ampliable hasta varios kilómetros en línea de vista con antenas de alta ganancia. Gracias a su soporte para la topología DigiMesh, resulta adecuado para los nodos centrales (Alcaldía, Estación de Policía y Hospital) que requieren retransmisión de datos confiable. Su consumo es bajo (potencia de transmisión configurable de hasta 250 mW) y permite conexión directa con la Raspberry Pi mediante adaptador USB, garantizando compatibilidad con los SDR seleccionados [35].

3.9 Fuentes de alimentación

Los nodos se alimentarán directamente desde la red eléctrica de cada edificio, aprovechando la infraestructura confiable de los edificios gubernamentales. Esto permite reducir significativamente el tamaño y costo de las baterías, ya que no es necesario dimensionarlas para operar varios días de manera autónoma. La batería de respaldo se mantiene para cubrir cortes temporales, asegurando que los nodos continúen midiendo el espectro las 24 horas durante períodos críticos, incluyendo la alimentación de la Raspberry Pi, el SDR, las antenas y el módulo de comunicación (LoRaWAN o RF punto a punto).

Asumiendo que los cortes de energía no deberían superar las 48 horas, se puede optimizar el costo utilizando baterías de menor capacidad. El dimensionamiento de la batería de respaldo se realiza siguiendo la metodología estándar de cálculo de sistemas de almacenamiento de energía [53], que parte del consumo total del nodo y los días de autonomía requeridos, e incorpora la profundidad de descarga (DoD) y la eficiencia del sistema.

Dado que cada nodo (Raspberry Pi 4, SDR, antenas y módulo de comunicación) consume aproximadamente 8 W, la energía requerida para 48 horas de operación continua se calcula como:

$$E = P \times t = 8W \times 48h = 384Wh$$

Considerando una batería LiFePO4 con una profundidad de descarga (DoD) del 80% y una eficiencia del sistema del 90%, la capacidad real requerida es:

$$E_{bat} = \frac{E}{DoD \times \eta E} = \frac{384 Wh}{0,80 \times 0,90} \approx 533Wh$$

Para una batería de 12 V, la capacidad necesaria en amperios-hora (Ah) se obtiene dividiendo la energía entre el voltaje del sistema:

$$C = \frac{E_{bat}}{V} = \frac{533 Wh}{12 V} \approx 44 Ah$$

Con base en el cálculo de capacidad anterior, se evaluaron tres alternativas de almacenamiento de energía capaces de cubrir las 48 horas de autonomía requeridas por cada nodo. La Tabla [X] compara las opciones según su tipo, capacidad, tiempo de respaldo y costo aproximado, considerando tecnologías de litio (LiFePO4), plomo-ácido sellada (AGM) y sistemas UPS con gestión integrada.

Fuente	Tipo	Capacidad	Tiempo respaldo	Costo aproximado
Batería LiFePO4 12 V 50 Ah [54]	Litio (estándar)	640 Wh	~48 h	~\$160 USD
Batería plomo-ácido (AGM) 12 V 50 Ah [55]	Plomo-ácido sellada	600 Wh	~48 h	~\$120 USD
UPS / batería de respaldo 12 V 50 Ah [56]	Híbrido (gestión integrada)	640 Wh	~48 h	~\$200 USD

Tabla 11. Comparación de baterías como fuente de alimentación alterna.

Con esta configuración, los nodos se alimentan principalmente desde la red eléctrica, y las baterías cubren cortes temporales de hasta 48 horas, reduciendo el

costo y tamaño del respaldo. La batería plomo-ácido de 35 Ah es la opción más económica, teniendo en cuenta los datos de la Tabla 11, y suficiente para la operación urbana de los nodos. La LiFePO₄ se puede elegir si se requiere mayor ciclo de vida o menor mantenimiento, y el UPS compacto puede usarse para nodos críticos donde se prefiere gestión integrada de respaldo.

3.10 Arquitectura Cloud

El sistema de monitoreo distribuido del espectro radioeléctrico en la localidad de Fontibón requiere una infraestructura en la nube capaz de recibir, almacenar, procesar y analizar los datos de ocupación espectral, interferencias y estado de los nodos en tiempo casi real. Los objetivos principales de esta capa son tres: garantizar la conectividad segura de los nodos IoT hacia el centro de procesamiento, habilitar la analítica y la predicción mediante aprendizaje automático, y proporcionar tableros de visualización y alertas a la Agencia Nacional del Espectro (ANE).

En la arquitectura propuesta, cada nodo IoT —compuesto por una Raspberry Pi 4, un SDR (HackRF One o USRP B210), antenas de medición y un módulo de comunicación (LoRaWAN o RF punto a punto)— realiza un procesamiento previo en el borde (edge computing) y transmite únicamente métricas y eventos ligeros mediante el protocolo MQTT hacia un servicio gestionado en la nube que centraliza la recepción y el tratamiento de los datos.

3.10.1 Criterios de evaluación de los proveedores

Para seleccionar el proveedor de servicios en la nube se definieron seis criterios técnicos, alineados con los requisitos del proyecto y con los principios de Gestión de Servicios de TI (disponibilidad, seguridad y continuidad operativa) como se muestra en la Tabla 12:

Criterio	Descripción	Relevancia
Conectividad IoT nativa	Soporte directo de MQTT y autenticación de dispositivos sin infraestructura adicional	Alta
Servicios de analítica y ML	Procesamiento en streaming, almacenamiento y modelado predictivo integrados	Alta
Seguridad	Cifrado, control de acceso granular y gestión de certificados	Alta

Escalabilidad	Crecimiento de 6 a cientos de nodos sin rediseñar la arquitectura	Alta
Costo	Modelo de pago por uso y costo estimado para la muestra del proyecto	Media
Madurez del ecosistema	Documentación, soporte y compatibilidad con edge computing	Media

Tabla 12. Criterios de evaluación de los proveedores de servicios en la nube.

3.10.2 Comparativa de proveedores por capa funcional

Se evaluaron los tres principales proveedores del mercado: Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure y Google Cloud Platform (GCP); comparando los servicios equivalentes que cubren cada capa funcional de la solución.

a. Capa de conectividad IoT

Capa / Servicio	AWS [57]	Azure [58]	GCP [59]
Ingesta IoT (MQTT)	AWS IoT Core	Azure IoT Hub	Pub/Sub (adaptado)
Autenticación de dispositivos	Certificados X.509	Device Twins / X.509	IAM (sin servicio IoT nativo)
Escalado automático	Sí, nativo	Sí, nativo	Requiere capa adicional

Tabla 13. Comparativa de la capa de conectividad IoT.

AWS IoT Core y Azure IoT Hub ofrecen conectividad IoT nativa con MQTT, autenticación por certificados y escalado automático. GCP discontinuó su servicio IoT Core en 2023, por lo que la ingesta debe implementarse mediante Pub/Sub con adaptaciones, lo que incrementa la complejidad de la arquitectura.

b. Capa de analítica y machine learning

Función	AWS [60]	Azure [61]	GCP [62]
Procesamiento en streaming	Amazon Kinesis	Azure Stream Analytics	Dataflow
Funciones serverless	AWS Lambda	Azure Functions	Cloud Functions / Run
Almacenamiento histórico	DynamoDB	Azure Synapse	BigQuery

Machine learning	Amazon SageMaker	Azure Machine Learning	Vertex AI
Visualización	Amazon QuickSight	Power BI	Looker

Tabla 14. Comparativa de la capa de analítica y machine learning.

c. Capa de seguridad

Mecanismo	AWS [63]	Azure [64]	GCP [65]
Identidad y acceso	IAM	Active Directory	IAM
Gestión de claves	AWS KMS	Key Vault	Cloud KMS
Seguridad de red	VPC + Security Groups	Network Security Groups	VPC Service Controls
Cifrado en tránsito	TLS sobre MQTT, X.509	TLS / Azure Defender	TLS / IAM

Tabla 15. Comparativa de la capa de seguridad.

3.10.3 Análisis comparativo de costos

El costo constituye uno de los criterios de selección. Para evaluarlo de forma objetiva se estimó el costo mensual de la solución en los tres proveedores, utilizando las tarifas oficiales de sus calculadoras de precios y aplicando los mismos supuestos de carga para esta muestra del proyecto: seis (6) nodos en la localidad de Fontibón operando de forma continua (24/7) durante un mes. Los supuestos comunes a las tres estimaciones son:

- Número de nodos: 6, con conexión permanente (24 horas, 30 días).
- Frecuencia de mensajes: un mensaje de métricas/eventos cada 10 segundos por nodo (≈ 51.840 mensajes/día; $\approx 1,56$ millones/mes), de tamaño inferior a 5 KB gracias al procesamiento en el borde.
- Almacenamiento: ≈ 5 GB de datos históricos en base de datos NoSQL.
- Analítica y visualización: un modelo de ML con entrenamiento periódico y un usuario autor para los tableros de la ANE.

La Tabla 16 compara el costo mensual estimado por capa funcional en cada proveedor, con sus servicios equivalentes.

Capa funcional	AWS (USD) [66]	Azure (USD) [67]	GCP (USD) [68]
Ingesta IoT	\$2.07	\$25.00	\$8.00
Almacenamiento NoSQL	\$3.32	\$5.00	\$6.00

Procesamiento en streaming	\$10.95	\$80.30	\$115.00
Machine learning	\$37.50	\$38.00	\$40.00
Visualización (1 usuario)	\$24.00	\$14.00	\$9.00
TOTAL MENSUAL	≈ \$77.84	≈ \$162.30	≈ \$178.00
TOTAL ANUAL	≈ \$934	≈ \$1.948	≈ \$2.136

Tabla 16. Comparación de costos mensuales por proveedor para la muestra de 6 nodos.

3.10.4. Matriz de decisión

Aplicando los criterios definidos, la siguiente matriz de la Tabla 17 resume la evaluación cualitativa de cada proveedor. La valoración emplea una escala simple: Alta, Media o Baja.

Criterio	AWS	Azure	GCP
Conectividad IoT nativa	Alta	Alta	Baja
Analítica y ML	Alta	Alta	Alta
Seguridad	Alta	Alta	Alta
Escalabilidad	Alta	Alta	Media
Costo (muestra del proyecto)	Media	Media	Media
Madurez y soporte edge	Alta	Media	Media
Valoración global	Alta	Media-Alta	Media

Tabla 17. Matriz de decisión para la selección del proveedor cloud.

Con base en la comparativa por capas, el análisis de costos y la matriz de decisión, se selecciona AWS como el proveedor más adecuado para la solución, debido a que ofrece:

- Conectividad IoT nativa mediante MQTT seguro y certificación X.509.
- Integración directa con servicios de streaming, almacenamiento, machine learning y tableros.
- Seguridad robusta, con cifrado, IAM y control de acceso granular.
- Escalabilidad nativa de 6 a cientos de nodos sin rediseño de la arquitectura.
- Ecosistema maduro, con amplia documentación y soporte para edge computing.

Adicionalmente, el análisis comparativo de costos confirma que AWS no solo es la opción técnicamente más completa, sino también la más económica para la muestra del proyecto (≈ \$78 USD mensuales para los 6 nodos, frente a ≈ \$162 de Azure y ≈ \$178 de GCP), siendo además reducible a ≈ \$29 USD en una configuración básica

con Free Tier. Esto confirma la viabilidad económica de la solución y su capacidad de escalar de forma controlada hacia otras localidades.

4 MODELO DE NEGOCIO

El modelo de negocio se basa en ofrecer un servicio inteligente de monitoreo del espectro radioeléctrico, apoyado en IoT, edge computing y analítica en la nube. Aunque la solución atiende primero las necesidades de la ANE; tales como supervisar, detectar interferencias y gestionar las frecuencias, el análisis muestra que también puede crecer hacia otros sectores que dependen de comunicaciones inalámbricas estables. La idea es pasar del monitoreo tradicional a un servicio continuo, automatizado y con capacidad de predicción, montado sobre una arquitectura distribuida (nodos SDR y ecosistema AWS) que cuesta menos que los despliegues convencionales.

Para materializar esta visión, el modelo adopta el enfoque de Spectrum Intelligence as a Service (SlaaS). Bajo este esquema de suscripción, las organizaciones acceden a una plataforma administrada de monitoreo y analítica, sustituyendo las altas inversiones en infraestructura especializada (CAPEX) por gastos operativos predecibles (OPEX). Esta flexibilidad facilita la adopción de la solución no solo por parte de entidades regulatorias, sino también en entornos corporativos de misión crítica, tales como complejos industriales, infraestructuras hospitalarias, puertos, operadores logísticos y municipios que exigen una supervisión ininterrumpida de sus redes.

El principal diferenciador competitivo de este modelo radica en la consolidación progresiva de un dataset nacional sobre el comportamiento del espectro. Este repositorio se proyecta como un activo estratégico de alto valor para el entrenamiento de modelos de Machine Learning y el desarrollo de analítica predictiva de interferencias. En consecuencia, la propuesta trasciende el monitoreo técnico convencional para evolucionar hacia una plataforma integral de inteligencia de conectividad, plenamente articulada con los paradigmas de transformación digital y el desarrollo de ciudades inteligentes (Smart Cities).

4.1 PROPUESTA DE MODELO DE NEGOCIO

La propuesta consiste en desplegar una plataforma para supervisar y analizar entornos inalámbricos privados, apoyada en IoT, edge computing y cloud computing. Aunque toma como referencia metodológica los procesos de control técnico de la ANE, la solución se dirige solo al sector corporativo. Esta delimitación responde al marco legal colombiano, que reconoce a la ANE como la única autoridad facultada para vigilar oficialmente el espectro. Por eso la propuesta se enfoca en organizaciones que quieren gestionar de forma activa la calidad y estabilidad de sus propias redes.

El mercado objetivo abarca entornos de misión crítica, tales como complejos industriales, infraestructuras hospitalarias, puertos, operadores logísticos y

empresas cuyas operaciones diarias dependen de la conectividad inalámbrica. En estos casos, las interferencias internas, la atenuación de la señal o las fallas de red pueden desencadenar interrupciones operativas (downtime) y cuantiosas pérdidas económicas. Frente a este panorama, la solución garantiza un monitoreo continuo, la emisión de alertas tempranas y la aplicación de analítica predictiva, con el propósito de maximizar la disponibilidad y la resiliencia de las telecomunicaciones corporativas.

A nivel comercial, el servicio se estructura bajo un esquema de suscripción periódica, el cual incluye el aprovisionamiento de nodos IoT, el acceso a dashboards interactivos, el almacenamiento histórico de datos, soporte técnico especializado y la gestión automatizada de incidentes. La integración de hardware de bajo costo y alto rendimiento como unidades Raspberry Pi y receptores SDR HackRF One reduce drásticamente las barreras de entrada financieras frente a los equipos de medición tradicionales. Esta eficiencia en la estructura de costos facilita la adopción de herramientas de monitoreo avanzado en múltiples sectores y regiones del país.

Con el tiempo, la propuesta prevé madurar sus servicios sumando algoritmos de Machine Learning y analítica en la nube. Esas capacidades permitirán reconocer patrones de comportamiento y detectar anomalías difíciles de ver en las redes inalámbricas privadas. Así el modelo pasa de ser una herramienta de supervisión a una plataforma de inteligencia de conectividad, útil para la transformación digital y la continuidad operativa de las organizaciones.

4.2 VALIDACIÓN DEL MODELO DE NEGOCIO

La validación del modelo de negocio se fundamentó en un análisis exhaustivo del contexto regulatorio colombiano y las demandas tecnológicas de las organizaciones dependientes de redes inalámbricas. En esta fase, se evidenció que, si bien la potestad de vigilancia y control oficial del espectro radioeléctrico recae de manera exclusiva en la Agencia Nacional del Espectro (ANE), existe una demanda latente en el sector corporativo por herramientas que permitan auditar y supervisar proactivamente la calidad de sus propios ecosistemas de conectividad.

El análisis estratégico determinó que sectores de misión crítica, como la manufactura, el ámbito hospitalario y la operación portuaria, enfrentan desafíos significativos para detectar interferencias internas, atenuación de señales o caídas de red en tiempo real. Esta brecha operativa representa una oportunidad clave para la introducción de soluciones de monitoreo inteligente, diseñadas específicamente para mitigar los riesgos de indisponibilidad de red y garantizar la continuidad del negocio.

Desde una perspectiva técnica y financiera, la validación corroboró que la integración de hardware de bajo costo y alto rendimiento, como las unidades Raspberry Pi y los dispositivos SDR HackRF One, viabiliza el despliegue de arquitecturas altamente escalables. Esta optimización de la estructura de costos resulta altamente competitiva frente a los tradicionales equipos de medición especializados; un factor determinante para democratizar el acceso a estas tecnologías en Colombia y acelerar los procesos de transformación digital empresarial.

También se confirmó que el valor de la propuesta no está solo en capturar telemetría inalámbrica, sino en procesar esos datos para generar información útil mediante edge computing, analítica en la nube y Machine Learning. Esa combinación convierte la solución en una plataforma para gestionar redes privadas de forma activa, en línea con las tendencias de automatización, arquitecturas orientadas a datos y ciudades inteligentes.

El análisis demuestra que el modelo de negocio propuesto goza de plena viabilidad y escalabilidad. Su implementación promete aportar un valor sustancial a múltiples sectores económicos, operando en estricto cumplimiento del marco normativo nacional y salvaguardando en todo momento las competencias constitucionales de la ANE.

5 PROPUESTA DE LA SOLUCIÓN TECNOLÓGICA

La solución tecnológica propuesta consiste en un servicio de monitoreo del espectro radioeléctrico para la localidad de Fontibón, orientado a la Agencia Nacional del Espectro (ANE). Este servicio permite la detección continua de ocupación de frecuencias AM (HF) y FM (VHF), identificación de interferencias en bandas autorizadas y no autorizadas, y generación de alertas y predicciones sobre el uso del espectro. La propuesta se basa en la integración de tecnologías IoT, Software Defined Radio (SDR) y cloud computing, estructurada para garantizar cobertura urbana y escalabilidad.

5.1 BLOQUES FUNCIONALES DE LA SOLUCIÓN

Nodos de monitoreo distribuidos

Cada nodo está compuesto por un dispositivo Raspberry Pi 4, un SDR HackRF One o USRP B210, antenas activas para HF (AM) y VHF (FM), y un módulo de comunicación inalámbrica (principalmente LoRaWAN para nodos residenciales y RF punto a punto UHF para nodos críticos). Los nodos permiten la captura continua de señales del espectro, procesando datos localmente en modo edge computing antes de enviarlos a la nube. La alimentación se realiza principalmente mediante red eléctrica de los edificios gubernamentales, complementada con batería de respaldo LiFePO4 de 35 Ah, suficiente para cubrir hasta 48 horas de operación continua ante cortes eléctricos.

Red de comunicación híbrida

Los nodos se conectan mediante una topología de red híbrida, que combina mesh con LoRaWAN para cobertura amplia de áreas residenciales y enlaces punto a punto UHF para nodos centrales (Alcaldía, Estación de Policía y Hospital), garantizando redundancia y confiabilidad de los datos críticos.

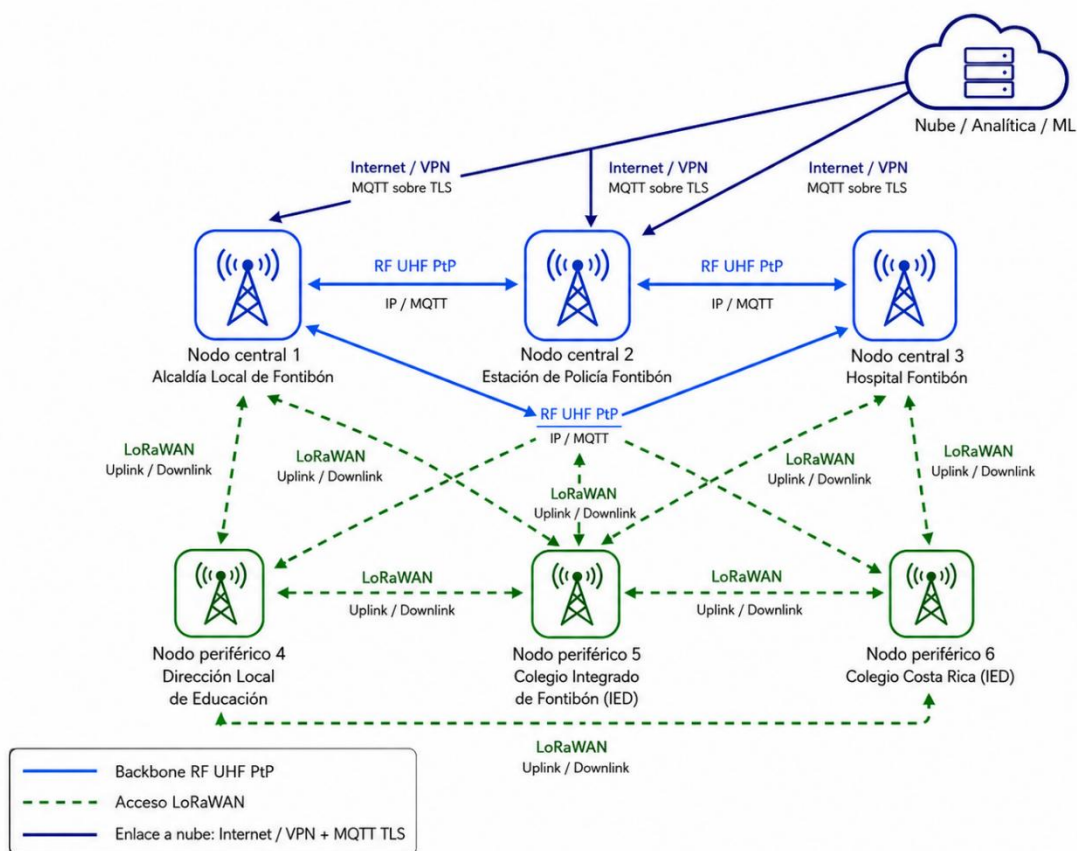


Figura 7. Topología de red de nodos IoT para monitoreo del espectro en Fontibón.
Fuente: Elaborado con IA (ChatGPT Plus)

La figura muestra la disposición de los seis nodos planificados, indicando su ubicación en edificios gubernamentales, colegios y hospitales, y los enlaces de comunicación entre ellos. La topología combina mesh LoRaWAN para nodos periféricos y enlaces RF punto a punto UHF para nodos críticos, asegurando redundancia, cobertura urbana completa y resiliencia frente a fallos de nodos o enlaces. Esta estructura permite la transmisión de datos del SDR y antenas hacia los gateways de la red para su posterior procesamiento en la nube.

Procesamiento y almacenamiento en la nube

La solución cloud está basada en AWS IoT Core para la recepción de datos, utilizando MQTT seguro con certificados X.509 para garantizar integridad y autenticación. Los datos se enrutan hacia Amazon Kinesis para procesamiento en tiempo real y DynamoDB para almacenamiento histórico. Los modelos de machine learning se entrenan y despliegan con Amazon SageMaker, permitiendo predicción de interferencias y ocupación espectral futura. Finalmente, Amazon QuickSight

proporciona dashboards interactivos y alertas configurables para el equipo de la ANE. La Figura [X] presenta la arquitectura cloud completa, desde la ingestión de datos en nodos IoT hasta la visualización y analítica avanzada.

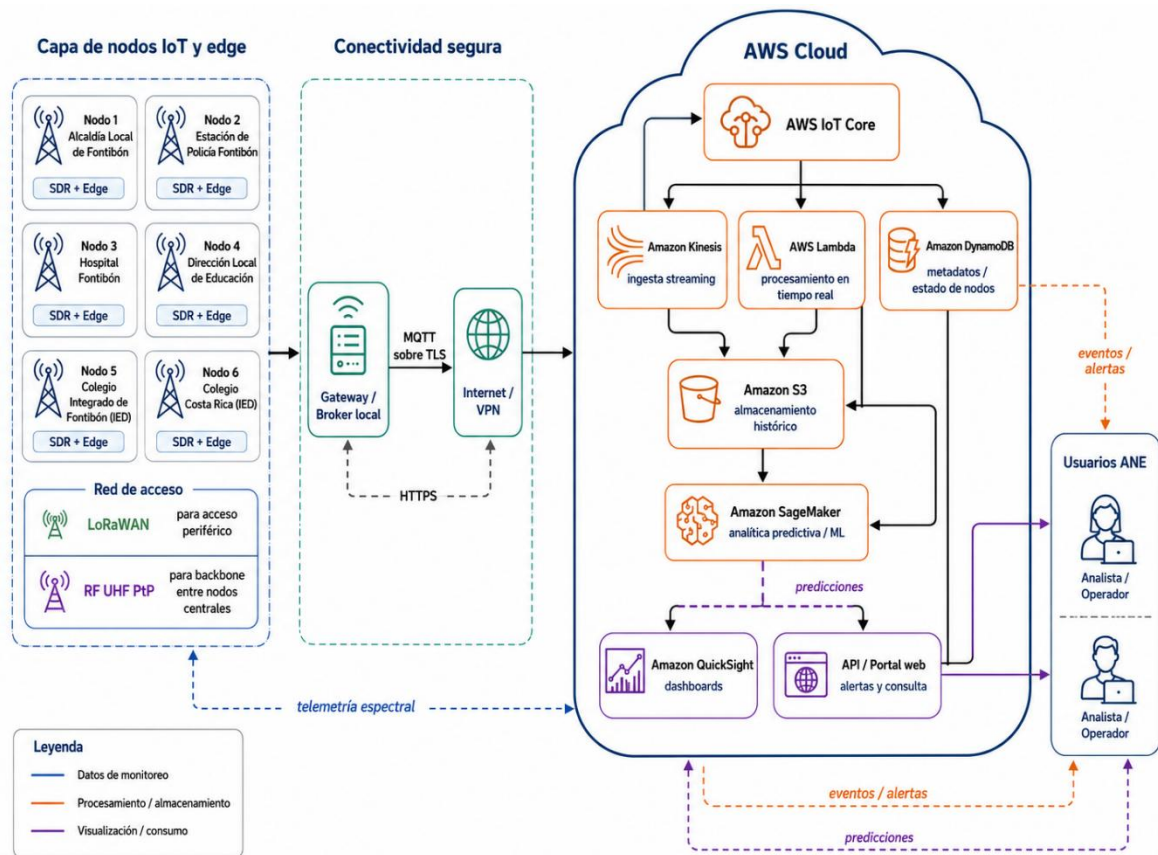


Figura 8. Arquitectura cloud del sistema de monitoreo del espectro basada en AWS. Fuente: Elaborado con IA (ChatGPT Plus)

5.2 Justificación de la selección tecnológica

La elección de Raspberry Pi 4 se debe a su compatibilidad con los SDR seleccionados, bajo consumo energético y capacidad de procesamiento para edge computing. La selección de HackRF One y USRP B210 permite cubrir rangos de frecuencia desde HF hasta UHF, asegurando la escalabilidad futura. Las antenas activas Wellbrook ALA1530LN (HF) y Diamond X-50A (VHF/UHF) proporcionan cobertura suficiente y sensibilidad para monitoreo urbano. La red híbrida garantiza redundancia: LoRaWAN permite comunicación confiable de nodos periféricos de bajo consumo, mientras que los enlaces RF UHF aseguran conectividad de datos críticos con los nodos centrales.

En la nube, AWS ofrece la combinación más completa de servicios IoT, analítica y machine learning, con seguridad robusta, escalabilidad nativa y soporte de MQTT. Esto permite que el sistema pueda crecer en nodos o bandas de frecuencia sin necesidad de rediseñar la arquitectura, y que se generen predicciones y alertas de forma eficiente.

5.3 Características y restricciones de la solución

La solución tecnológica propuesta garantiza cobertura completa del área de Fontibón mediante la implementación de seis nodos estratégicamente ubicados en edificios gubernamentales, colegios y hospitales. Cada nodo cuenta con batería de respaldo LiFePO4, capaz de sostener hasta 48 horas de operación en caso de cortes temporales de energía, asegurando la continuidad del monitoreo. La comunicación entre nodos se realiza mediante los protocolos MQTT sobre LoRaWAN para nodos periféricos y RF punto a punto UHF para los nodos críticos, asegurando redundancia y confiabilidad de la transmisión de datos. El procesamiento de la información se realiza de manera distribuida mediante edge computing en los dispositivos Raspberry Pi, mientras que el análisis en tiempo real y el almacenamiento histórico se ejecuta en la nube a través de AWS, incluyendo la generación de dashboards y alertas mediante Amazon QuickSight con acceso web seguro. Entre las restricciones, se destaca que los nodos dependen de la infraestructura eléctrica de los edificios para su operación continua, aunque cuentan con respaldo temporal, y que la cobertura de los enlaces UHF está condicionada a la línea de vista entre los nodos críticos.

Con esta integración, la propuesta tecnológica permite un servicio escalable de monitoreo del espectro radioeléctrico, cumpliendo los objetivos de la ANE y sentando bases para expansión futura a otras localidades o bandas de frecuencia.

6 ANÁLISIS DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DIGITAL

El proyecto planteado evidencia un proceso de transformación digital aplicado a la gestión del espectro radioeléctrico, debido a que propone migrar desde modelos tradicionales de monitoreo centralizado hacia arquitecturas distribuidas basadas en tecnologías IoT y edge computing.

Actualmente, el crecimiento acelerado de dispositivos inalámbricos y sistemas conectados ha generado nuevas necesidades en términos de supervisión, capacidad de procesamiento y análisis en tiempo real. Frente a este escenario, las metodologías convencionales presentan limitaciones relacionadas con la cobertura espacial, la escalabilidad y la capacidad de respuesta ante interferencias o usos no autorizados del espectro. Al combinar redes IoT con arquitecturas cloud–edge, la operación gana eficiencia y las decisiones se apoyan mejor en datos. Procesar la información cerca de donde se genera baja la latencia, reduce el consumo de ancho de banda y ayuda a detectar pronto los eventos críticos, algo que pesa mucho en ciudades muy conectadas. Además, automatizar el monitoreo moderniza los procesos regulatorios y técnicos, y permite una gestión más activa del recurso. Este enfoque también facilita ampliar la infraestructura y adaptarla a escenarios futuros de ciudades inteligentes.

Adicionalmente, el proyecto incorpora elementos clave de gobernanza y seguridad digital, los cuales son indispensables dentro de cualquier proceso de transformación tecnológica. El uso de gateways seguros y arquitecturas jerárquicas fortalece la integridad, confidencialidad y trazabilidad de la información recolectada por los nodos distribuidos. De igual manera, desde el enfoque de Gestión de Servicios de TI, esta propuesta se relaciona con principios de disponibilidad, continuidad operativa y mejora continua, alineándose con prácticas modernas de gestión tecnológica. El desarrollo de esta infraestructura no solo representa una innovación técnica, sino también una oportunidad para fortalecer las capacidades organizacionales y regulatorias mediante el uso estratégico de tecnologías emergentes.

7 ASPECTOS LEGALES Y CONTRATACIÓN

El diseño de una red distribuida para monitorear el espectro radioeléctrico, utilizando tecnologías como IoT y edge computing, requiere tener muy claro el marco legal y regulatorio colombiano. Cumplir con estas normas no solo es un requisito legal, sino que es clave para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

En este escenario, la Agencia Nacional del Espectro (ANE) juega un papel central, pues es la entidad encargada de gestionar y vigilar el espectro en el país. Por lo tanto, el proyecto debe alinearse con sus lineamientos para asegurar un uso eficiente de las frecuencias y facilitar la detección de interferencias no autorizadas. De igual forma, esta iniciativa se conecta directamente con los objetivos del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), el cual busca impulsar la transformación digital y fortalecer la conectividad nacional.

Por otro lado, la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) establece las normas sobre la calidad y seguridad de los servicios. Dado que el sistema manejará redes IoT, múltiples dispositivos y datos en tiempo real, es indispensable contemplar aspectos de ciberseguridad y protección de la información. Para esto, el uso de *gateways* seguros y mecanismos de autenticación es fundamental, ya que garantizan que los datos recolectados no sean alterados y se mantengan confidenciales.

Finalmente, la viabilidad de este proyecto depende de contar con contratos muy claros con los proveedores de hardware, servicios en la nube (cloud) y conectividad. Estos acuerdos deben definir cómo será el soporte técnico, el mantenimiento y la disponibilidad de la red. Asimismo, es vital incluir cláusulas de confidencialidad para reducir riesgos operativos. Desde la gestión de servicios de TI, organizar bien esta base legal y contractual fortalece la estructura del proyecto, asegurando que la solución sea sostenible y pueda crecer en el tiempo.

CONCLUSIONES

- La delimitación de Fontibón como zona de monitoreo y la definición de seis nodos sobre edificaciones públicas confirman que es posible diseñar un despliegue territorial guiado por criterios de riesgo concretos, como la cercanía aeroportuaria y la densidad poblacional, y no por una distribución uniforme. Este enfoque aporta un método replicable para priorizar dónde monitorear en ciudades donde los recursos de vigilancia son limitados.
- La selección de las alternativas técnicas a partir del análisis comparativo demuestra que el monitoreo del espectro ya no depende de equipos especializados de alto costo. La combinación de un SDR como el HackRF One con procesamiento en el borde sobre Raspberry Pi 4 muestra que componentes accesibles pueden sostener una función que tradicionalmente se reservaba a infraestructura costosa, lo que abre la puerta a que más entidades adopten este tipo de soluciones.
- La elección de AWS frente a Azure y GCP, sustentada en criterios técnicos y en un costo mensual sensiblemente menor, evidencia que la viabilidad de una arquitectura en la nube no se decide solo por su robustez técnica, sino por el equilibrio entre capacidad y costo operativo. Este hallazgo resulta especialmente relevante para proyectos del sector público, donde la sostenibilidad económica condiciona la continuidad del servicio.
- La formulación del modelo de negocio bajo el esquema SaaS aporta una reflexión sobre los límites entre la función regulatoria del Estado y la oferta privada de servicios tecnológicos. Al orientarse al sector corporativo sin invadir las competencias de la ANE, la propuesta muestra que las soluciones de monitoreo pueden generar valor económico respetando el marco normativo, un punto poco explorado en la literatura técnica sobre el tema.

REFERENCIAS

- [1] ITU, “Y.2060 : Overview of the Internet of things.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I/en>
- [2] Agencia Nacional de Espectro, “Espectro para atender el crecimiento futuro y la masificación de aplicaciones IOT,” Jun. 2022. Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: <https://www.ane.gov.co/Sliders/archivos/GestionTecnica/Estudios%20de%20gesti%C3%B3n%20y%20planeaci%C3%B3n/Espectro%20para%20IoT/Documentos%20para%20consulta/DocumentoEspectroIoT.pdf>
- [3] D. Wang, J. Chen, Y. Zhou, and P. Li, “Spectrum monitoring system based on edge computing and application,” in 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Automation, and High-Performance Computing (AIAHPC 2022), L. Zhu, Ed., SPIE, Nov. 2022, p. 97. doi: 10.1117/12.2641520.
- [4] F. C. Andriulo, M. Fiore, M. Mongiello, E. Traversa, and V. Zizzo, “Edge Computing and Cloud Computing for Internet of Things: A Review,” *Informatics*, vol. 11, no. 4, p. 71, Sep. 2024, doi: 10.3390/informatics11040071.
- [5] D.-W. Yun and W.-C. Lee, “Intelligent Dynamic Real-Time Spectrum Resource Management for Industrial IoT in Edge Computing,” *Sensors*, vol. 21, no. 23, p. 7902, Nov. 2021, doi: 10.3390/s21237902.
- [6] K. Boeckl et al., “Considerations for managing Internet of Things (IoT) cybersecurity and privacy risks,” Gaithersburg, MD, Jun. 2019. doi: 10.6028/NIST.IR.8228.
- [7] CRC, “Resolución 746 de 2026 MTIC.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://normograma.crcom.gov.co/crc/compilacion/docs/resolucion_mintic_0746_2026.htm?utm_source=chatgpt.com
- [8] OECD, OECD Digital Connectivity Review of Colombia. OECD Publishing, 2026. doi: 10.1787/bff5d25a-en.
- [9] MinTIC, “Plan Técnico Nacional.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Micrositios/Sector-de-Radiodifusion-Sonora/Plan-Tecnico-Nacional/?utm_source=chatgpt.com
- [10] L. F. Pedraza, F. Forero, and I. P. Paez, “Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico en Bogotá-Colombia,” *Ing. Cienc.*, vol. 10, no. 19, pp. 127–143, Jan. 2014, doi: 10.17230/ingciencia.10.19.6.
- [11] ITU, “Spectrum management: Key applications and regulatory considerations driving the future use of spectrum | Digital Regulation Platform.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: <https://digitalregulation.org/spectrum->

management-key-applications-and-regulatory-considerations-driving-the-future-use-of-spectrum-2/?utm_source=chatgpt.com

- [12] MinTIC, “Nueva herramienta digital del Ministerio TIC y la ANE permitirá identificar la disponibilidad de espectro en Colombia .” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://www.mintic.gov.co/portal/historico/w3-article-162009.html?utm_source=chatgpt.com
- [13] ITU, “La UIT publica un tratado mundial actualizado para optimizar la gestión del espectro radioeléctrico e impulsar la innovación tecnológica.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: <https://www.itu.int/es/mediacentre/Pages/PR-2024-07-04-ITU-Radio-Regulations.aspx?>
- [14] GSMA, “Spectrum Management in Americas.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://www.gsma.com/connectivity-for-good/spectrum/gsma_resources/spectrum-management-in-latin-america/
- [15] L. A. Fletscher, A. Zuleta, A. Galvis, D. Quintero, J. F. Botero, and N. Gaviria, “A Techno-Economic Analysis of New Market Models for 5G+ Spectrum Management,” *Information*, vol. 15, no. 4, p. 197, Apr. 2024, doi: 10.3390/info15040197.
- [16] MinTIC, “Agencia Nacional del Espectro (ANE) .” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: <https://www.mintic.gov.co/portal/historico/w3-propertyvalue-6179.html>
- [17] MinTIC, “Proyecto Vigilancia y Control Eficiente del Espectro.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: <https://mintic.gov.co/portal/vivedigital/612/w3-propertyvalue-646.html>
- [18] MinTIC, “ANE presenta balance 2024 y su propuesta de Política de Espectro 2025 – 2029.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/406133:ANE-presenta-balance-2024-y-su-propuesta-de-Politica-de-Espectro-2025-2029>
- [19] MinTIC, “Sistema de Gestión del Espectro - SGE.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: <https://mintic.gov.co/portal/inicio/Glosario/S/6525:Sistema-de-Gestion-del-Espectro-SGE>
- [20] MinTIC, “MinTIC publica el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora AM y FM.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: <https://mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/77536:MinTIC-publica-el-Plan-Tecnico-Nacional-de-Radiodifusion-Sonora-AM-y-FM>
- [21] ANE, “Plan Mestro de Gestión de Espectro 2026 - 2030.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available:

- <https://www.ane.gov.co/Sliders/Publicaciones/PMGE20262030yAgendaRegulatoriaANEMar2026.pdf>
- [22] Alcaldía de Bogotá, “Smart City Bogotá 2024 temas ciencia tecnología y movilidad urbana.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: <https://bogota.gov.co/internacional/smart-city-bogota-2024-temas-ciencia-tecnologia-y-movilidad-urbana>
 - [23] MinTIC, “ANE y Aeronáutica Civil frenan interferencia que afectó comunicaciones aeronáuticas en Cartagena.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/404011:ANE-y-Aeronautica-Civil-frenan-interferencia-que-afecto-comunicaciones-aeronauticas-en-Cartagena>
 - [24] Alcaldía de Bogotá, “Fontibón.” Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/localidades/fontibon>
 - [25] ICAO, “Handbook on Radio Frequency Spectrum Requirements for Civil Aviation,” ICAO spectrum strategy, policy statements and related information, vol. 1, 2026, Accessed: May 22, 2026. [Online]. Available: https://www.icao.int/sites/default/files/FSMP/Doc9718_Voll_4th_Edition_2026_Advance_Unedited_Version.pdf
 - [26] S. Arar, “Star vs. Mesh Networking Topology: IoT Wireless Connectivity Fundamentals.” Accessed: May 23, 2026. [Online]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/star-vs-mesh-networking-topology-internet-of-things-wireless-connectivity-fundamentals/>
 - [27] Link Labs, “Mesh, Star and Point-To-Point Topology In IoT .” Accessed: May 23, 2026. [Online]. Available: <https://www.link-labs.com/blog/iot-topology>
 - [28] S. Effenberger, “Network Topologies: All Types, Pros & Cons Compared.” Accessed: May 23, 2026. [Online]. Available: <https://www.docusnap.com/en/it-documentation/network-topology-why-choosing-the-right-structure-is-crucial>
 - [29] N. Shivaraman, S. Ramanathan, S. Shanker, A. Easwaran, and S. Steinhorst, “DeCoRIC: Decentralized Connected Resilient IoT Clustering,” 2020.
 - [30] M. Trigka and E. Dritsas, “Wireless Sensor Networks: From Fundamentals and Applications to Innovations and Future Trends,” IEEE Access, vol. 13, pp. 96365–96399, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3572328.
 - [31] IETF, “RFC 7252 - The Constrained Application Protocol (CoAP).” Accessed: May 23, 2026. [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252>
 - [32] LoRA Alliance, “About LoRaWAN.” Accessed: May 23, 2026. [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>

- [33] IEEE SA, "IEEE SA - IEEE 802.15.4-2020." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4/7029/>
- [34] IEEE SA, "IEEE SA - IEEE 802.11-2020." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/ieee/802.11/7028/>
- [35] Digi International, "RF Modules | Wireless Connectivity Solutions for Remote, Low-power, Secure IoT Product Designs | Digi International." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/rf-modules>
- [36] "3GPP – The Mobile Broadband Standard," 3GPP. Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/>
- [37] Great Scott Gadgets, "HackRF One - Great Scott Gadgets." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/>
- [38] RTL-SDR Blog, "Buy RTL-SDR Dongles (RTL2832U)." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.rtl-sdr.com/buy-rtl-sdr-dvb-t-dongles/>
- [39] Ettus Research (National Instruments), "USRP B210 USB Software Defined Radio (SDR) ." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>
- [40] Airspy HF+ Discovery, "AIRSPY." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://airspy.com/airspy-hf-discovery/>
- [41] Nuand, "bladeRF 2.0 micro." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.nuand.com/bladerf-2-0-micro/>
- [42] Aaronia AG, "Aaronia MDF 930X (9kHz - 30MHz) ." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://aaronia.com/en/active-magnetic-tracking-antenna>
- [43] Passion-Radio, "MLA-30 Plus Loop active HF antenna MegaLoop SDR." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.passion-radio.com/hf/megaloop-968.html>
- [44] Diamond Antenna Corporation, "D130J - Diamond Antenna." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.diamondantenna.net/d130j.html>
- [45] Comet Antenna, "Comet - DS150S ." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.cometantenna.com/product/comet-ds150s/>
- [46] Raspberry Pi Ltd., "Raspberry Pi 4 Model B," 2026, Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://pip-assets.raspberrypi.com/categories/545-raspberry-pi-4-model-b/documents/RP-008344-DS-5-raspberry-pi-4-product-brief.pdf>
- [47] Raspberry Pi, "Raspberry Pi 5 ." Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/>

- [48] NVIDIA, “Jetson Orin Nano Super Developer Kit.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-orin/nano-super-developer-kit/>
- [49] Hardkernel, “ODROID.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.hardkernel.com/>
- [50] Raspberry Pi, “Buy a Raspberry Pi Zero 2 W .” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-2-w/>
- [51] RAKwireless, “RAK2245 Pi HAT WisLink LPWAN Concentrator.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://docs.rakwireless.com/product-categories/wislink/rak2245-pi-hat/overview/>
- [52] Dragino Technology, “10 channels - LoRaWAN GPS Concentrator for Raspberry Pi.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.dragino.com/products/lora/item/149-lora-gps-hat.html>
- [53] G. M. . Masters, Renewable and efficient electric power systems, 2nd ed. IEEE Press, Wiley, 2013.
- [54] Redodo, “Redodo 12V 50Ah LiFePO4 Lithium Battery.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.redodopower.com/products/12v-50ah-lithium-ion-battery-640wh>
- [55] UPG (Universal Power Group), “Universal UB12500-I6 Battery 12v 50Ah Sealed Lead Acid.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.osibatteries.com/universal-ub12500-i6-battery-12v-50ah-sealed-lead-acid>
- [56] APC by Schneider Electric, “APC Back-UPS Pro, 1500VA/865W, Tower, 120V, 10x NEMA 5-15R outlets, AVR, LCD, User Replaceable Battery .” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.apcguard.com/br1500g.asp>
- [57] Amazon Web Services, “What is AWS IoT? - AWS IoT Core.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://docs.aws.amazon.com/iot/latest/developerguide/what-is-aws-iot.html>
- [58] Microsoft, “¿Qué es Azure IoT Hub? - Azure IoT Hub.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/es-mx/azure/iot-hub/iot-concepts-and-iot-hub>
- [59] Google Cloud, “Arquitectura de productos de la plataforma de IoT en Google Cloud .” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://docs.cloud.google.com/architecture/connected-devices/iot-platform-product-architecture?hl=es-419>
- [60] AWS, “Welcome to AWS Documentation.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://docs.aws.amazon.com/>

- [61] Microsoft, “documentación de Azure | Microsoft Learn.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/es-mx/azure/?product=popular>
- [62] Google Cloud, “Documentación de Google Cloud | Google Cloud Documentation.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://docs.cloud.google.com/docs?hl=es-419>
- [63] Amazon Web Services, “Seguridad en la nube .” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/security/>
- [64] Microsoft, “Documentación de seguridad de Azure.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/es-mx/azure/security/>
- [65] Google Cloud, “Soluciones de ciberseguridad: SecOps, inteligencia, IA y seguridad en la nube .” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://cloud.google.com/security>
- [66] Amazon Web Services, “Precios de AWS IoT Core.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/iot-core/pricing/>
- [67] Microsoft, “Azure Pricing Overview.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://azure.microsoft.com/en-us/pricing/>
- [68] Google Cloud, “Descripción general de los precios.” Accessed: Jun. 05, 2026. [Online]. Available: <https://cloud.google.com/pricing>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Árbol de problemas. Fuente: Elaboración propia.	9
Figura 2. Árbol de objetivos. Fuente: Elaboración propia.	14
Figura 3. Diagrama de Bloques de la situación actual. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 4. Diagrama de Bloques de la situación esperada. Fuente: Elaboración propia.	16
Figura 5. Mapa de valor. Fuente: Elaborado con IA (ChatGPT Plus)	19
Figura 6. Mapa preliminar nodos de monitoreo de espectro. Fuente: Elaborado con IA (ChatGPT Plus)	22
Figura 7. Topología de red de nodos IoT para monitoreo del espectro en Fontibón. Fuente: Elaborado con IA (ChatGPT Plus)	40
Figura 8. Arquitectura cloud del sistema de monitoreo del espectro basada en AWS. Fuente: Elaborado con IA (ChatGPT Plus)	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación de los nodos y su justificación.	21
Tabla 2. Distancia entre los nodos en kilómetros.....	21
Tabla 3. Comparación entre topologías de red para IoT.....	23
Tabla 4. Comparación entre protocolos de comunicación IoT	24
Tabla 5. Comparación entre tecnologías de comunicación para IoT.	25
Tabla 6. Comparación de dispositivos para SDR.....	26
Tabla 7. Comparación de antenas para HF.	26
Tabla 8. Comparación de antenas para VHF.....	26
Tabla 9. Comparación de dispositivos Edge.	27
Tabla 10. Comparación de módulos de comunicación inalámbrica compatibles con Raspberry Pi.	28
Tabla 11. Comparación de baterías como fuente de alimentación alterna.	30
Tabla 12. Criterios de evaluación de los proveedores de servicios en la nube.....	32
Tabla 13. Comparativa de la capa de conectividad IoT.	32
Tabla 14. Comparativa de la capa de analítica y machine learning.	33
Tabla 15. Comparativa de la capa de seguridad.....	33
Tabla 16. Comparación de costos mensuales por proveedor para la muestra de 6 nodos.....	34
Tabla 17. Matriz de decisión para la selección del proveedor cloud.	34