

**CONVOCATORIA - REDES DE MONITOREO MULTIPROPÓSITO A PARTIR DE  
RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE EN COMPUTADORAS DE BAJO COSTO O  
DISPOSITIVOS AFINES - 2023**

**TÍTULO DEL PROYECTO**

**PROTOTIPO COSTO-EFICIENTE Y ESCALABLE PARA EL MONITOREO DEL  
ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN COLOMBIA MEDIANTE RADIO DEFINIDO POR  
SOFTWARE Y APRENDIZAJE PROFUNDO**

**ENTIDAD POSTULANTE**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MANIZALES**

## Tabla de Contenido

<b>Equipo del proyecto.....</b>	<b>3</b>
<b>Publicaciones relacionadas con la convocatoria.....</b>	<b>5</b>
<b>Resumen ejecutivo.....</b>	<b>6</b>
<b>Palabras claves.....</b>	<b>8</b>
<b>Planteamiento del problema.....</b>	<b>8</b>
<b>Justificación.....</b>	<b>9</b>
<b>Objetivos:.....</b>	<b>10</b>
Objetivo general.....	10
Objetivos específicos.....	10
<b>Marco teórico.....</b>	<b>11</b>
<b>Metodología.....</b>	<b>15</b>
<b>Productos y resultados esperados.....</b>	<b>24</b>
<b>Cronograma.....</b>	<b>26</b>
<b>Presupuesto discriminado.....</b>	<b>28</b>
<b>Mecanismos de Verificación y Validación de resultados.....</b>	<b>28</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>29</b>

### Equipo del proyecto

NOMBRES Y APELLIDOS DE PROFESIONALES	ROL	GRUPO DE INVESTIGACIÓN ASOCIADO	FUNCIONES	ENLACE CvLAC (HOJA DE VIDA)
CESAR GERMAN CASTELLANOS DOMINGUEZ	INVESTIGADOR PRINCIPAL INVESTIGADOR SENIOR MINCIENCIAS	GRUPO DE CONTROL Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑAL (A1 MINCIENCIAS)	Investigador principal del proyecto, se encargará del acompañamiento científico y administrativo durante el desarrollo del proyecto.	<a href="https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000043222">https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000043222</a>
ANDRES MARINO ALVAREZ MEZA	GERENTE DEL PROYECTO INVESTIGADOR SENIOR MINCIENCIAS	GRUPO DE CONTROL Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑAL (A1 MINCIENCIAS)	Dirigir y apoyar la Fase 2: Implementación y Configuración de Sensores SDR y la Fase 3: Implementación de Técnicas de Deep Learning para Análisis Predictivo y Clasificación.	<a href="https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001330950">https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001330950</a>
NEIL GUERRERO GONZALEZ	CO-INVESTIGADOR INVESTIGADOR SENIOR MINCIENCIAS	PROPAGACIÓN ELECTROMAGNÉTICA APLICADA (PROPELA)	Dirigir y apoyar la Fase 1: Diseño Conceptual y Especificación de Requerimientos y Fase 4: Integración con Infraestructuras de Monitoreo Existentes y Procesamiento de Datos y Fase 5: Diseño de Interfaz de Usuario y Herramientas de Visualización Avanzadas.	<a href="https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000300500">https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000300500</a>
DIEGO FABIAN COLLAZOS HUERTAS	DOCTOR EN INGENIERIA AUTOMATICA INVESTIGADOR JUNIOR MINCIENCIAS	GRUPO DE CONTROL Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑAL (A1 MINCIENCIAS)	Dirigir actividades de proceso e implementación de algoritmos de Deep Learning para la identificación de señales. Además, apoyar durante la Fase 3: Implementación de Técnicas de Deep Learning para Análisis Predictivo y Clasificación.	<a href="https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000017335">https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000017335</a>
CARLOS ENRIQUE MOSQUERA TRUJILLO	INGENIERO ELECTRONICO	GRUPO DE CONTROL Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑAL (A1 MINCIENCIAS)	Desarrollar e implementar red de monitoreos para el control del espectro radioeléctrico, interfaz gráfica, plataforma de datos y adquisición.	<a href="https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001997126">https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001997126</a>
YEISON NOLBERTO CARDONA ALVAREZ	MAGISTER EN INGENIERIA AUTOMATIZACION INDUSTRIAL	GRUPO DE CONTROL Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑAL (A1 MINCIENCIAS)	Apoyar la fase 1: Diseño Conceptual y Especificación de Requerimientos y la Fase 2: Implementación y Configuración de Sensores SDR.	<a href="https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000128391">https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000128391</a>

YESSICA ALEJANDRA GOMEZ RIVERA	MAGISTER EN INGENIERIA AUTOMATIZACION INDUSTRIAL	GRUPO DE CONTROL Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑAL (A1 MINCIENCIAS)	Apoyo en la Fase 3: Implementación de Técnicas de Deep Learning para Análisis Predictivo y Clasificación	<a href="https://scienti.minciencias.gov.co/cvl/ac/visualizador/generarCurriculoCy.do?cod_rh=0001715899">https://scienti.minciencias.gov.co/cvl/ac/visualizador/generarCurriculoCy.do?cod_rh=0001715899</a>
MARIA ISABEL GARCIA QUIMBAYO	INGENIERA FÍSICA	GRUPO DE CONTROL Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑAL (A1 MINCIENCIAS)	Apoyo administrativo: realizar seguimiento del presupuesto, apoyar la elaboración de informes financieros, realizar la logística necesaria para la adquisición de datos y productos académicos. Apoyar los procesos de compras, cotizaciones, vinculación del personal, solicitud de documentos y gestión de correspondencia. Entrega de informes en el marco del proyecto de investigación.	<a href="https://scienti.minciencias.gov.co/cvl/ac/visualizador/generarCurriculoCy.do?cod_rh=0001671810">https://scienti.minciencias.gov.co/cvl/ac/visualizador/generarCurriculoCy.do?cod_rh=0001671810</a>

### GrupLac

**Grupo de Control y Procesamiento Digital de Señales - A1 Minciencias:**  
<https://scienti.minciencias.gov.co/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000001375>

### **Publicaciones relacionadas con la convocatoria**

Calvo-Salcedo, A. F., Guerrero-González, N., & Jaramillo-Villegas, J. A. (2023). Multi-Tone Optical Source Generation for Applications in Next-Generation Passive Optical Networks using Photonic Structures. *Ingeniería e Investigación*, 43(2), e98975-e98975.

Cortés Cortés, C. L., Montaña Argote, M. A., Osorio, A. M., & Guerrero González, N. (2022). Systemic design and analysis of a self-managed backhaul network in star and ring topologies for rural connectivity in Caldas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 32(1), 43-57.

Cortés, C. L., Montaña-Argote, M. A., & Guerrero-González, N. (2022). Spectral Map-Based Tool for Backhaul Rural Network Optimization and Indirect Estimation of Demographic Behaviors. *Applied Sciences*, 12(5), 2508.

Cortés, C. L., & González, N. G. (2021). Constellation diagram processing with convolutional neural networks for channel phase response estimation. *Computer Communications*, 180, 89-96.

Pérez, A. E., Zabala-Blanco, D., Meza, C. A. A., González, N. G., & Torres, J. J. G. (2021). Training strategies to minimize interchannel interference effects using supervised learning in gridless Nyquist-WDM systems. *Applied Optics*, 60(28), 8939-8948.

Pérez, A. E., González, N. G., Ralph, S. E., & Torres, J. J. G. (2021, July). Spectral Spacing Estimation using Fuzzy Logic and KNN algorithms in Gridless Nyquist-WDM Systems. In *Signal Processing in Photonic Communications* (pp. SpTh1D-7). Optica Publishing Group.

Cortés, C. L. C., QUINTERO, S. X. C., & GONZÁLEZ, N. G. (2021). Demand side management system characterization for residential users in manizales city. *IEEE Latin America Transactions*, 19(3), 378-384.

Marquez-Viloria, D., Castano-Londono, L., & Guerrero-Gonzalez, N. (2021). A modified knn algorithm for high-performance computing on fpga of real-time m-qam demodulators. *Electronics*, 10(5), 627.

Serna-Serna, W., de Bodt, C., Alvarez-Meza, A. M., Lee, J. A., Verleysen, M., & Orozco-Gutierrez, A. A. (2023). Semi-supervised t-SNE with multi-scale neighborhood preservation. *Neurocomputing*, 126496.

Triana-Martinez, J. C., Gil-González, J., Fernandez-Gallego, J. A., Álvarez-Meza, A. M., & Castellanos-Dominguez, C. G. (2023). Chained Deep Learning Using Generalized Cross-Entropy for Multiple Annotators Classification. *Sensors*, 23(7), 3518.

Gil-Gonzalez, J., Giraldo, J. J., Alvarez-Meza, A. M., Orozco-Gutierrez, A., & Alvarez, M. A. (2021). Correlated Chained Gaussian Processes for Datasets with Multiple Annotators. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*.

Valencia-Marin, C. K., Pulgarin-Giraldo, J. D., Velasquez-Martinez, L. F., Alvarez-Meza, A. M., & Castellanos-Dominguez, G. (2021). An Enhanced Joint Hilbert Embedding-Based Metric to Support Mocap Data Classification with Preserved Interpretability. *Sensors*, 21(13), 4443.

Gil-González, J., Valencia-Duque, A., Álvarez-Meza, A., Orozco-Gutiérrez, Á., & García-Moreno, A. (2021). Regularized chained deep neural network classifier for multiple annotators. *Applied Sciences*, 11(12), 5409.

Hoyos-Osorio, J., Alvarez-Meza, A., Daza-Santacoloma, G., Orozco-Gutierrez, A., & Castellanos-Dominguez, G. (2021). Relevant information undersampling to support imbalanced data classification. *Neurocomputing*, 436, 136-146.

Gil-Gonzalez, J., Orozco-Gutierrez, A., & Alvarez-Meza, A. (2021). Learning from multiple inconsistent and dependent annotators to support classification tasks. *Neurocomputing*, 423, 236-247.

Jimenez-Castano, C., Alvarez-Meza, A., & Orozco-Gutierrez, A. (2020). Enhanced automatic twin support vector machine for imbalanced data classification. *Pattern recognition*, 107, 107442.

## Resumen ejecutivo

La Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia desempeña un papel fundamental en la gestión y supervisión del espectro radioeléctrico como recurso esencial para las comunicaciones. Por esta razón, la utilización de la Radio Definido por Software (SDR Software-Defined Radio) en equipos de cómputo de bajo costo, busca respaldar la adquisición de datos relacionados con el espectro radioeléctrico, así como llevar a cabo el procesamiento y análisis de señales (emisiones) identificadas como parte de la ocupación de las bandas de frecuencia.

En este contexto, la ANE en Colombia enfrenta desafíos sustanciales en la gestión del espectro radioeléctrico, motivando la propuesta de un prototipo innovador. A pesar de contar con una red de monitoreo robusta, la dispersión de datos plantea la necesidad de adaptarse a los avances tecnológicos, especialmente ante el despliegue de redes 5G. En particular, la eficiencia del monitoreo del espectro radioeléctrico es un factor crucial. A pesar de su evolución a herramientas precisas y versátiles en industrias como manufactura e investigación, la implementación de redes de monitoreo distribuido sigue siendo prohibitiva, especialmente debido a la necesidad de hardware y software costosos. Este desafío se ve agravado por las limitaciones de las soluciones de proceso convencional en entornos dinámicos y por la creciente demanda de gestión integral del espectro para aplicaciones como radiodifusión y telefonía móvil. Además, se identifica un desafío tecnológico en la clasificación y detección de señales, donde los enfoques convencionales enfrentan limitaciones en el manejo de características de alta dimensión. Por consiguiente, el aprendizaje automático y profundo emergen como una solución potencial, aunque con sus propios retos en la extracción de características y el manejo de la ambigüedad en la clasificación de señales. Por otro lado, la reciente aparición de SDR ofrece una oportunidad para superar los obstáculos económicos, dada su baja inversión inicial y la flexibilidad de programación.

La propuesta de solución de este proyecto se centra en el desarrollo e implementación de una red avanzada, multibanda y económica de monitoreo del espectro radioeléctrico, adaptándose eficientemente a las necesidades y desafíos actuales. Para lograrlo, se planea desarrollar un prototipo integral de monitoreo del espectro radioeléctrico mediante aprendizaje profundo, SDR y computadoras de bajo costo. El enfoque se centra en la Radiodifusión sonora en FM, Cubrimiento, TDT, Banda L y redes 5G. Se llevará a cabo una evaluación de la ocupación del espectro y la exposición a Campos Electromagnéticos, integrándose con las redes de monitoreo existentes de la ANE, incluyendo la incorporación de la Banda L y dos sensores adicionales. Cada sensor estará compuesto por un dispositivo Jetson Nano, una Antena de banda ancha y un SDR Hack RF One.

Consecuentemente, se busca proporcionar una supervisión del espectro más efectiva y flexible, capaz de ajustarse a las fluctuaciones y demandas cambiantes del entorno, superando así las restricciones de los sistemas centralizados tradicionales. La estrategia incluye la unificación de la información recolectada en forma cooperativa por las estaciones locales y su posterior análisis centralizado. Se emplearán modelos avanzados de aprendizaje profundo para una detección y clasificación de señales más precisa y eficiente, lo que no solo mejorará la operatividad del sistema sino que también facilitará la toma de decisiones centralizada y garantizará el cumplimiento de las normativas vigentes. Este enfoque integral destaca la relevancia del aprendizaje profundo en la clasificación de señales y la implementación de una red de monitoreo distribuido de bajo costo.

El prototipo a desarrollar representará un impacto significativo en las funciones de la ANE, promoviendo una gestión del espectro radioeléctrico eficaz y adaptable, alineada con las



regulaciones actuales y beneficiosa para los usuarios. Se espera construir una red de monitoreo operativa y multifuncional, junto con una interfaz de usuario intuitiva para su gestión. La ANE podrá mejorar su capacidad de monitoreo, lo que facilitará un análisis preciso y eficiente del espectro. Además, no solo atiende a las necesidades contemporáneas, sino que también establece una plataforma para el monitoreo continuo y la adaptabilidad a futuras innovaciones tecnológicas en el campo de las radiocomunicaciones.

### **Palabras claves**

- Prototipo Costo-eficiente
- Red de Monitoreo
- Radio Definido por Software
- Detección multibanda y cooperativa
- Aprendizaje profundo
- Banda L

### **Planteamiento del problema**

Los sensores de espectro proveen los parámetros básicos de detección, cuya complejidad de estimación depende del formato de la señal que ocupa un canal de interés. Así, el posible desconocimiento del tipo de modulación es un primer factor de dificultad, aunque esta situación no es frecuente en la mayoría de los servicios regulados por el Ministerio, que estipulan los tipos de modulación. Por lo tanto, los métodos de aprendizaje convencional pueden implementarse y se ven favorecidos en la medida en que se conozcan los parámetros concretos de transmisión de la señal, al menos, para la detección de usuarios con banda angosta. Sin embargo, la detección de formatos con banda ancha implica mucho mayor complejidad derivada de la captura y análisis de datos correspondientes.

Una primera estrategia para aumentar el rendimiento de los detectores está en desarrollar métodos cooperativos de adquisición de datos en ambientes heterogéneos de emisión espectral [1] cuando se puede obtener mayor información de cada usuario a través de varias fuentes de captura de datos. De todas maneras, los requerimientos del hardware para la implementación de los sensores múltiples de espectro implican condicionales adicionales, tales como, sistemas depurados de sincronización y enganche entre diferentes receptores para una misma banda de emisión [2], [3] vulnerabilidad en la seguridad del sistema, por cuanto los usuarios primarios no conocen concretamente que usuarios secundarios acceden a la información [4], [5] No obstante, una de las mayores restricciones está en la necesidad de implementar ADC con alta resolución y valores altos de muestreo, [6] Como resultado, los volúmenes de muestra son enormes y crecen con el ancho de banda, demandando hardware de adquisición más elaborado, recursos computacionales y almacenamiento de datos más potentes y bastante costosos. En este sentido, una primera manera de disminuir la complejidad del modelo de inferencia está en utilizar espacios de representación con submuestreo; aunque la pérdida de información generada implica la inferencia mediante modelos con mayor complejidad. Las anteriores limitaciones, en general, conllevan a sensores de espectro con soluciones de hardware dependiente que restringen su flexibilidad y capacidad de reconfiguración para el monitoreo de los servicios de telecomunicaciones en tiempo real [7].

Una vez de captura un suficiente número de características, independiente de cuál sea su método de extracción, los algoritmos de aprendizaje máquina se entrenan para implementar la decisión sobre el estado de ocupación del canal. Sin embargo, el monitoreo con redes



con múltiples sensores de espectro cooperativos se dificulta enormemente debido al problema de volúmenes altísimos de datos de discretización, por lo cual estas técnicas se acompañan con la división por frecuencias (bancos/bandas de frecuencias [8] cuyo proceso puede ser en paralelo, con espacios de submuestras por debajo del valor de Nyquist [9], o incluyendo el análisis de bandas conjuntas [10] En este sentido, la implementación de redes distribuidas también puede apoyarse en el aprendizaje reforzado que resuelve la fusión de datos entre usuarios con diferentes valores de relevancia en concordancia con las medidas de rendimiento impuesta sobre el monitoreo de frecuencia [11]. En general, los métodos de aprendizaje profundo difícilmente pueden aplicarse a condiciones de tiempo real, además de tener alta complejidad computacional [12]., por lo que el diseño de redes cooperativas con múltiples sensores de espectro que tengan un solo dispositivo de bajo costo en cada estación de monitoreo sigue siendo un problema abierto de diseño. Teniendo en cuenta los aspectos descritos anteriormente, se define la siguiente pregunta de investigación:

***¿Cómo puede la Agencia Nacional del Espectro en Colombia desarrollar un prototipo para el monitoreo multipropósito del espectro radioeléctrico costo-eficiente y escalable, utilizando sistemas de Radio Definido por Software y modelos de Aprendizaje Profundo, para mejorar la eficiencia operativa, la toma de decisiones centralizada, y garantizar el cumplimiento de las normativas vigentes en el control y supervisión del espectro?***

## **Justificación**

De acuerdo con lo establecido en la Ley 1341 de 2009, modificada por el Decreto 4169 de 2011 y la Ley 1978 de 2019, la Agencia Nacional del Espectro (ANE) es una Unidad Administrativa Especial de orden nacional, con personería jurídica, autonomía técnica, administrativa, financiera y patrimonio propio. Está adscrita al Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), y su objetivo es brindar soporte técnico para la gestión, planificación y ejercicio de la vigilancia y control del espectro radioeléctrico en coordinación con otras autoridades relacionadas.

Conforme al numeral 4 del artículo 26 de la Ley 1341 de 2009 y el numeral 1 del artículo 36 de la Ley 1978 de 2019, la ANE tiene funciones que incluyen ejercer vigilancia y control del espectro radioeléctrico, incluido el servicio de televisión. El Decreto 93 de 2010 establece que la Subdirección de Vigilancia y Control tiene la responsabilidad de realizar la comprobación técnica de emisiones e inspección de estaciones radioeléctricas.

La Ley 1978 de 2019, al suprimir la Autoridad Nacional de Televisión (ANTV), transfirió las funciones de regulación y de inspección, vigilancia y control en materia de contenidos a la Comisión de Regulación de Comunicaciones, mientras que las funciones restantes son responsabilidad del MinTIC.

Para cumplir con sus funciones, la ANE ha adquirido estaciones de monitoreo de espectro radioeléctrico diseñadas según las recomendaciones técnicas de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Estas estaciones, distribuidas en las principales ciudades colombianas, han garantizado un sistema robusto de comprobación técnica durante la última década. No obstante, se han identificado desarrollos recientes en sistemas de monitoreo que buscan reducir tamaño, peso y aumentar la versatilidad sin comprometer la rigurosidad de las comprobaciones en diferentes bandas o servicios de radiocomunicaciones.

En este contexto, la ANE busca apoyarse en la radio definida por software en computadoras de bajo costo para capturar datos del espectro radioeléctrico, así como procesar y analizar señales identificadas como parte de la ocupación de frecuencias. Este enfoque se alinea con la evolución de las redes 5G y la necesidad de replantear la arquitectura de las redes de monitoreo a medio plazo para hacerlas más versátiles y fáciles de gestionar.

En vista de los avances tecnológicos en monitoreo de espectro radioeléctrico, se busca maximizar el bienestar de los usuarios del espectro con el menor costo posible, sin perder precisión en las mediciones. El proyecto de la ANE tiene como objetivo obtener un prototipo de solución que aborde la unificación local de información en las ubicaciones de los sistemas de monitoreo de la entidad, así como una red de sensores de bajo costo con computadoras tipo Jetson Nano, antenas o transductores y radio definido por software para la verificación flexible y reconfigurable de la ocupación de las bandas del proyecto.

## Objetivos:

### Objetivo general

Desarrollar un prototipo de monitoreo multipropósito de espectro radioeléctrico utilizando aprendizaje profundo, tecnología de radio definida por software y computadoras de bajo costo, para realizar el escaneo y análisis de los servicios de Radiodifusión sonora en FM, Cubrimiento, TDT, Banda L y redes 5G, evaluando la ocupación del espectro y los niveles de exposición a Campos Electromagnéticos, operando de manera holística con las actuales redes de monitoreo de la ANE.

### Contribución de la propuesta desde lo técnico:

- **Nueva banda de frecuencia:** Banda L
- **Sensores adicionales:** 2 sensores adicionales para un total de 10 sensores. Cada sensor está compuesto por un dispositivo Jetson Nano, una Antena de banda ancha y un SDR Hack RF One.

### Objetivos específicos

1. Desarrollar un sistema de sensores de espectro radioeléctrico basado en tecnología de Radio Definida por Software, Aprendizaje Profundo y dispositivos embebidos, siendo flexibles y reconfigurables, permitiendo el monitoreo eficiente de los servicios de telecomunicaciones en las bandas FM, UHF-VHF, TDT, L y 5G.
2. Desarrollar e implementar un dispositivo costo-eficiente que posibilite la convergencia de los datos recopilados por la ANE en las estaciones de monitoreo, utilizando dispositivos de procesamiento de datos como Jetson Nano y SDR, integrando y procesando eficientemente la información capturada en las estaciones de monitoreo de la ANE.
3. Establecer y desarrollar una metodología de procesamiento de datos que permita la integración efectiva del sistema de sensores propuesto con las estaciones de monitoreo actualmente en funcionamiento por la ANE,

asegurando la interoperabilidad y sincronización adecuada entre el sistema de sensores y las plataformas existentes para un monitoreo integral del espectro radioeléctrico.

4. Diseñar e implementar una interfaz de usuario intuitiva y funcional que facilite la gestión eficiente de la red de monitoreo del espectro radioeléctrico, permitiendo el análisis de los datos recolectados por el sistema de monitoreo, brindando herramientas útiles para la visualización, interpretación y gestión de la información capturada.

## Marco teórico

La Agencia Nacional del Espectro (ANE) tiene asignada la vigilancia y el control del espectro radioeléctrico, incluyendo la realización de comprobaciones técnicas de emisiones e inspección de estaciones radioeléctricas [13]. No obstante, existen algunos desafíos relacionados en la monitoreo y gestión de las emisiones radioeléctricas, por ejemplo, el desarrollo de sistemas de multipropósito y de bajo costo para realizar el escaneo y análisis efectivo de los servicios evaluando aspectos fundamentales como la ocupación del espectro y los niveles de exposición a Campos Electromagnéticos.

El primer aspecto para optimizar el uso del espectro electromagnético consiste en el monitoreo efectivo de emisión y compatibilidad electromagnética mediante los sensores de espectro como parámetro esencial en el mejoramiento de la calidad del servicio en las comunicaciones modernas [14]. Los sensores de espectro son el mecanismo principal de adquisición de información sobre la ocupación espectral de canales de interés, sobre la cuales se determinan los parámetros básicos de detección (probabilidades de presencia de señal y falsa alarma, respectivamente). De acuerdo con los formatos de transmisión, la detección espectral se realiza mediante dos categorías separadas: métodos para servicios de banda angosta y para servicios de banda ancha [15]. En los primeros formatos, ambos parámetros pueden ser derivados o medidos mediante técnicas de moderada dificultad, mientras en los últimos, la detección implica mucho mayor complejidad derivada de la captura y análisis de datos. En este sentido, la dificultad en la detección depende también de la presencia de canales de transmisión altamente no lineales (troposféricos, satelitales, propagación de múltiples caminos, desvanecimientos, etc.). Otro aspecto metodológico es la cantidad de usuarios, diferenciando métodos de detección para canales de usuario único y múltiples [16].

A su vez, las técnicas usadas en banda angosta suele suplirse de información capturada mediante un único receptor de cada usuario por aparte (única o no cooperativa). Sin embargo, la detección no cooperativa tiende a ser bastante en casos de muy baja relación S/R, canales no lineales y otros aspectos que degradan seriamente su rendimiento [17]. En cambio, los métodos de diversidad (o cooperativos) incluyen múltiples receptores para inferir los parámetros básicos de detección por cada usuario primario [18]. Sin embargo, la presencia de múltiples fuentes implica de forma inmediata el aumento en la complejidad de los métodos de detección en términos de los modelos de inferencia, así como de su proceso computacional [19]. En ambos casos, la detección puede realizarse sobre los momentos de segundo orden (potencia de la señal en casos no cooperativos [20] o covarianza en casos cooperativos [21] cuando no la estructura de modulación de la señal es desconocida. Cuando se tiene conocimiento parcial del formato de señal [22] se pueden detectar fiducias de sincronización o ciclo estacionalidad, por ejemplo, [23] o con filtros acoplados, asumiendo la forma de la señal conocida [24]. Sin embargo, la detección cooperativa

mediante modelos de aprendizaje que implica la captura de una mayor y variada cantidad de información presenta muy prometedores resultados [25],[26].

En el caso de señales de banda ancha, la detección con múltiples sensores de espectro cooperativos se desarrolla mediante sistemas basados en radio definida por software, por su capacidad para implementar novedosos y complejos métodos de proceso (incluido el aprendizaje máquina) que puedan adaptarse dinámicamente y reconfigurar a ambientes más realistas de monitoreo [27]. El aprendizaje máquina tiene la habilidad para inferir conocimiento nuevo (aprender) ganada en diferentes casos de entrenamiento directamente de los datos medidos, sin asumir modelos que simplifiquen las condiciones reales de monitoreo [28]. En términos de inferencia estadística, la detección mediante métodos de aprendizaje máquina suele configurarse como una tarea de clasificación, que en su versión más simple contempla dos clases: canal ocupado o canal desocupado [29]. La clasificación usando métodos de aprendizaje máquina implica el entrenamiento mediante diversos escenarios (supervisado, no supervisado y con aprendizaje con reforzamiento; cada uno brindando mayor flexibilidad a diferentes escenarios de medida en las redes cooperativas con múltiples sensores. En particular, el aprendizaje por refuerzo desarrolla métodos de decisión de umbral que aprende de los datos dispuestos y se adapta a los cambios de escenario en el monitoreo de emisiones tales como la no estacionariedad y baja coordinación entre los múltiples sensores de espectro cooperativos [30].

Una estrategia de solución con creciente uso consiste en el empleo de métodos de aprendizaje profundo por refuerzo que pueden permitir la inclusión de métricas de rendimiento más complejas, por ejemplo, se puede maximizar el compromiso entre la sensibilidad de recepción y el descubrimiento de más canales desocupados sujeto a un valor mínimo de probabilidad de falsa alarma como se describe en [30].

La expansión de las técnicas de aprendizaje en la detección de señales de banda ancha, particularmente en el contexto de múltiples sensores de espectro cooperativos, resalta una evolución significativa en las estrategias de monitoreo y gestión del espectro radioeléctrico. Este enfoque avanzado, que se basa en la radio definida por software, es crucial para abordar los desafíos inherentes a la detección en entornos complejos y no lineales. La capacidad de los sistemas SDR para adaptarse y reconfigurar en respuesta a las condiciones cambiantes del entorno de monitoreo proporciona una plataforma flexible y robusta para la implementación de métodos de aprendizaje automático [30].

El monitoreo multibanda en el contexto del espectro radioeléctrico se centra en la capacidad de observar y analizar simultáneamente una variedad de bandas de frecuencia. Esta técnica permite capturar y procesar señales en un rango más amplio del espectro, ofreciendo una visión integral de la utilización del espacio radioeléctrico. Al emplear múltiples sensores SDR, cada uno sintonizado a diferentes segmentos del espectro, se consigue una cobertura exhaustiva y se mejora la capacidad de detectar señales variadas, desde transmisiones de banda angosta hasta complejas emisiones de banda ancha. Este enfoque multibanda es especialmente valioso para identificar y caracterizar una gama más amplia de usuarios del espectro, desde estaciones de radiodifusión hasta comunicaciones de emergencia, optimizando así la gestión y asignación del espectro [10].

A continuación se definen los términos relevantes asociados a la descripción técnica de la actual propuesta:

- **Regulación del Espectro Radioeléctrico en Colombia:** En Colombia, la regulación del espectro radioeléctrico es administrada por la Agencia Nacional del Espectro (ANE), una entidad responsable de planificar, coordinar, y controlar el uso del espectro. La ANE se encarga de garantizar una distribución eficiente y equitativa del

espectro, prevenir y resolver interferencias, y cumplir con las normativas internacionales. La regulación incluye la asignación de licencias, la supervisión del cumplimiento de las normas técnicas y legales, y la implementación de políticas para promover el uso eficiente del espectro [31].

- **Demodulador HACK RF ONE:** El HACK RF ONE es un demodulador versátil y potente utilizado en aplicaciones de radio definida por software (SDR). Este dispositivo es capaz de recibir y transmitir señales en un amplio rango de frecuencias, desde 1 MHz hasta 6 GHz, lo que lo hace adecuado para una variedad de aplicaciones de RF [32]. Su diseño abierto y flexible permite a los usuarios experimentar con RF y desarrollar sus propios sistemas de comunicación.
- **Características del Demodulador HACK RF ONE:** El HACK RF ONE destaca por su amplio rango de frecuencias operativas, alta sensibilidad y capacidad de transmisión bidireccional. Puede ser utilizado tanto para recibir como para transmitir señales, lo que le otorga una gran flexibilidad. Además, es compatible con una amplia gama de software SDR, lo que facilita su integración en diferentes proyectos y aplicaciones. Su diseño abierto y la comunidad activa que lo respalda ofrecen un vasto recurso para el aprendizaje y la experimentación en el campo del SDR.
- **Aplicaciones del Demodulador HACK RF ONE:** Las aplicaciones del HACK RF ONE son variadas y abarcan desde la investigación y desarrollo en comunicaciones inalámbricas hasta la enseñanza y el hobby en radioafición. En el ámbito profesional, se utiliza para el análisis de espectro, pruebas de sistemas de comunicación y desarrollo de nuevos protocolos [33]. En la educación, sirve como una herramienta práctica para enseñar conceptos de RF y SDR. También es popular entre los entusiastas de la radioafición para explorar una amplia gama de frecuencias y experimentar con diferentes modos de transmisión.
- **Jetson Nano:** Jetson Nano es una plataforma de computación pequeña y potente diseñada por NVIDIA, orientada principalmente hacia aplicaciones de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático en dispositivos de borde (edge devices). Este sistema en un chip (SoC) incluye una CPU, una GPU, y una serie de otros componentes necesarios para ejecutar tareas de procesamiento intensivo en un formato compacto y eficiente en energía. Jetson Nano es popular en el ámbito de la robótica, IoT (Internet de las Cosas), y proyectos de IA debido a su capacidad para ejecutar modelos de aprendizaje profundo en tiempo real y su accesibilidad para desarrolladores y aficionados [34].
- **Generalidades Técnicas de una Jetson Nano:** La Jetson Nano de NVIDIA es una plataforma de desarrollo que cuenta con una CPU Quad-core ARM Cortex-A57 y una GPU NVIDIA Maxwell con 128 núcleos CUDA. Generalmente viene con 4 GB de memoria LPDDR4 RAM y soporta una gama de interfaces de entrada/salida, incluyendo USB, HDMI, GPIO, entre otros. Su capacidad de procesamiento gráfico y la inclusión de aceleradores de IA la hacen ideal para aplicaciones de visión por computadora y procesamiento de datos en tiempo real. La Jetson Nano es capaz de ejecutar múltiples redes neuronales en paralelo y procesar datos de varios sensores de alta resolución, lo que la convierte en una solución potente para proyectos de IA en el borde.
- **Modelos de Jetson Nano:** NVIDIA ha lanzado diferentes modelos de Jetson Nano, cada uno orientado a diferentes necesidades y aplicaciones. Los modelos más conocidos son Jetson Nano Developer Kit y Jetson Nano 2GB Developer Kit.



Mientras que el primero ofrece 4 GB de RAM y soporte completo para la cámara Raspberry Pi, el segundo es una versión más accesible con 2 GB de RAM, dirigida a entusiastas y educadores. Ambos modelos comparten la mayoría de las características técnicas, como la CPU y la GPU, pero difieren en términos de capacidad de memoria y algunas funcionalidades de conectividad.

- **Software Compatible con Jetson Nano:** Jetson Nano es compatible con una amplia gama de software, incluyendo sistemas operativos basados en Linux, como Ubuntu. También es compatible con herramientas y frameworks de IA y aprendizaje automático, como TensorFlow, PyTorch, CUDA, y cuDNN. NVIDIA proporciona JetPack SDK, que incluye el sistema operativo, bibliotecas y APIs necesarias para desarrollar aplicaciones de IA. Además, debido a su popularidad en la comunidad de desarrolladores, existe una amplia variedad de software de terceros y proyectos de código abierto disponibles para Jetson Nano.
- **Aplicaciones de Jetson Nano:** La Jetson Nano se utiliza en una variedad de aplicaciones que requieren procesamiento de IA en el borde. Esto incluye proyectos de robótica, drones autónomos, sistemas de vigilancia con visión artificial, asistentes personales inteligentes, y dispositivos IoT. Su capacidad para procesar y analizar imágenes y vídeos en tiempo real la hace ideal para aplicaciones de visión por computadora. Además, se utiliza en la educación y la investigación para enseñar y desarrollar proyectos de IA y aprendizaje automático como por ejemplo agricultura de precisión [35].
- **Software GNU Radio:** GNU Radio es un proyecto de software libre y de código abierto que proporciona un conjunto de herramientas para el diseño y la implementación de sistemas de radio definidos por software (SDR) [36]. Este framework permite a los usuarios crear, simular y desplegar aplicaciones de procesamiento de señales de radiofrecuencia sin necesidad de hardware especializado. GNU Radio se utiliza ampliamente en investigación, educación y en el desarrollo de aplicaciones comerciales y amateurs. Facilita la manipulación de señales de radio, desde la captura hasta la decodificación, y es compatible con una variedad de dispositivos de hardware SDR, permitiendo una amplia gama de experimentación y desarrollo en el campo de las comunicaciones inalámbricas.
- **Características del Software GNU Radio:** GNU Radio se caracteriza por su flexibilidad y versatilidad. Ofrece una amplia biblioteca de componentes modulares (bloques) que pueden ser combinados para crear flujos de procesamiento de señales complejos. Estos bloques incluyen funcionalidades para filtrado, modulación/demodulación, codificación/decodificación y otras operaciones de procesamiento de señal. GNU Radio es capaz de procesar tanto señales en tiempo real como datos almacenados. Su naturaleza de código abierto fomenta la colaboración y la innovación continua, permitiendo a los usuarios modificar y mejorar el software según sus necesidades. Además, su interfaz gráfica, GNU Radio Companion, facilita la creación y visualización de flujos de trabajo de señales mediante una interfaz de arrastrar y soltar.
- **Integración con Modelos de Redes Neuronales y Aprendizaje Profundo del Software GNU Radio:** La integración de GNU Radio con modelos de redes neuronales y aprendizaje profundo representa un avance significativo en el campo de las comunicaciones inalámbricas y el procesamiento de señales. Esta integración permite a los usuarios aplicar técnicas avanzadas de IA para mejorar la clasificación de señales, la detección de anomalías, y la optimización del espectro. Por ejemplo,

las redes neuronales pueden ser entrenadas para identificar tipos específicos de señales de radio o para realizar tareas complejas de demodulación que serían difíciles de lograr con métodos tradicionales [36]. La capacidad de GNU Radio para procesar señales en tiempo real combinada con el poder de las redes neuronales y el aprendizaje profundo abre nuevas posibilidades para sistemas de comunicación más inteligentes y eficientes.

## Metodología

La metodología propuesta se centra en la implementación de un sistema de monitoreo del espectro radioeléctrico multi-banda que emplea la tecnología SDR y se ejecuta a través de la plataforma Jetson Nano como se muestra en la imagen 1. Este sistema utilizará una colección de 10 dispositivos SDR para capturar señales en tiempo real, con cada dispositivo configurado y adaptada con una antena para cubrir una banda específica del espectro, la integración de todos los datos permitirá cubrir las bandas FM, UHF-VHF, TDT, L y 5G. La información recopilada por estos dispositivos será procesada en tiempo real para estimar la densidad espectral de potencia (PSD) de las señales capturadas.

El proceso comienza con una ventana de tiempo deslizante que actualiza los datos del espectro, asegurando que la información esté constantemente renovada y sea relevante. A continuación, se aplican algoritmos de aprendizaje profundo para analizar la PSD modificada y determinar la presencia de usuarios primarios (PUs). Estos algoritmos se beneficiarán de la capacidad de procesamiento en paralelo de la Jetson Nano para llevar a cabo cálculos complejos de manera eficiente. Además, se desarrollará una interfaz gráfica que permitirá a los usuarios visualizar e interactuar con los datos espectrales procesados.

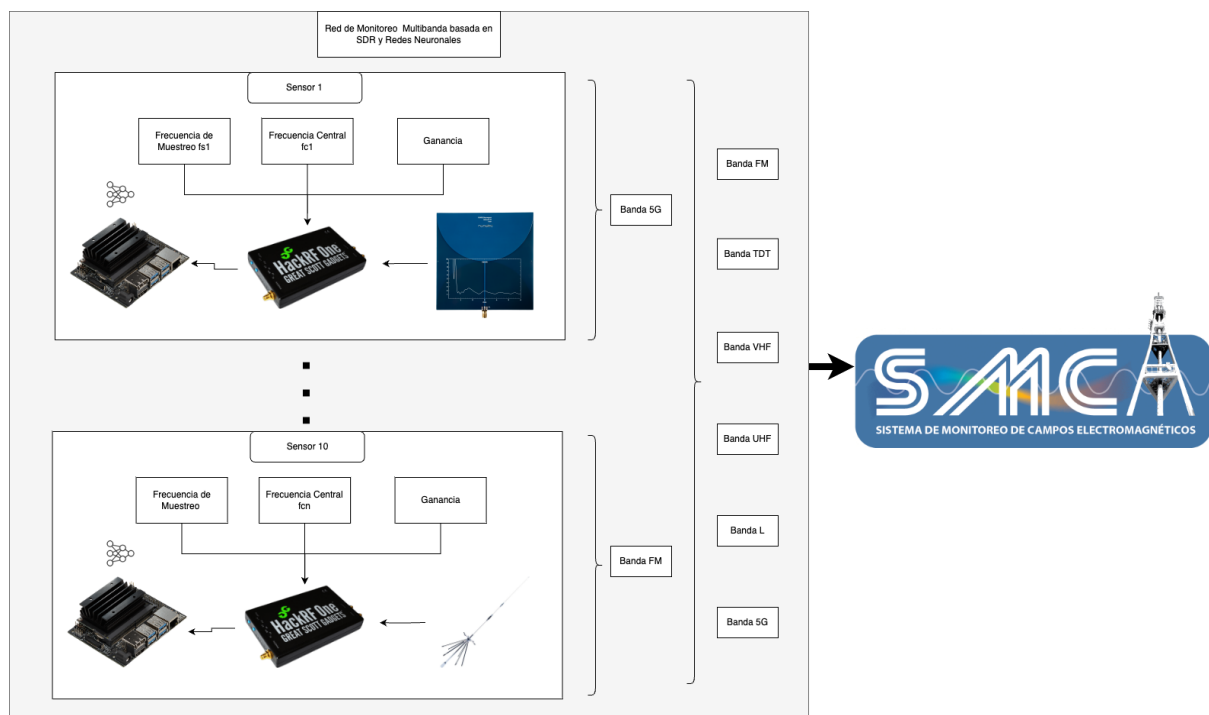


Imagen 1: Esquema conceptual de la metodología propuesta



La integración con la red de monitoreo de la Agencia Nacional del Espectro permitirá que el sistema contribuya a un esfuerzo más amplio de gestión del espectro, posibilitando una respuesta rápida a los cambios en la utilización del espectro y apoyando la toma de decisiones informadas sobre la asignación y regulación del espectro en Colombia.

A continuación, se describe las actividades necesarias para desarrollar el prototipo de red monitorio espectral multibanda basado en SDR y redes neuronales:

### Fase 1: Diseño Conceptual y Especificación de Requerimientos

- **Actividad 1: Recolección y Análisis de Datos del Espectro:** Recopilación de información sobre las características del espectro radioeléctrico, particularmente en las bandas de servicios de telecomunicaciones como FM, VHF, UHF, TDT, redes 5G y la banda L. Analizar los patrones de uso, frecuencias de operación, tipos de señales y anchos de banda asociados.
  - **Responsables:** Investigador principal, co-investigador y magíster en ingeniería - automatización industrial.
  - **Tareas:** Recopilación de información a partir de la regulación del espectro en Colombia y perfilamiento de los datos de acuerdo a los servicios de interés.
  - **Resultados esperados:** Perfilamiento de los datos de servicios.
  - **Medios de verificación:** Documento de perfilamiento de los datos de servicios.
- **Actividad 2: Evaluación de Requerimientos Técnicos y Operativos:** Determinar los requerimientos técnicos para el monitoreo de estas bandas, enfocándose en la sensibilidad, la cobertura de frecuencias, servicios y la capacidad de capturar y procesar señales complejas. Considerar la banda L por su relevancia en aplicaciones de comunicaciones móviles y satelitales.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigador y magíster en ingeniería - automatización industrial.
  - **Tareas:** Análisis técnicos de la información en las bandas de frecuencia de interés y la banda L.
  - **Resultados esperados:** Evaluación de la viabilidad del monitoreo de las bandas específicas desde los componentes técnicos y operativos.
  - **Medios de verificación:** Documento de cumplimiento de los requerimientos.
- **Actividad 3: Diseño Esquemático Integral del Sistema:** Desarrollar un esquema detallado del sistema, incluyendo la integración de plataformas de procesamiento con módulos SDR, y el diseño de la infraestructura necesaria para la captura y análisis de señales de las bandas objetivo.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores y magíster en ingeniería - automatización industrial.
  - **Tareas:** Diseño de arquitectura de hardware y software a emplear en la solución.
  - **Resultados esperados:** Arquitectura de hardware y software diseñada.
  - **Medios de verificación:** Diagrama de arquitectura de hardware y software.

### Fase 2: Implementación y Configuración de Sensores SDR

- **Actividad 4: Programación de Sensores SDR:** Desarrollar el software necesario para operar los sensores SDR. Esto implica la creación de scripts y aplicaciones que permitan la captura, procesamiento y análisis de señales en las bandas de FM, TDT, 5G y la banda L. Se utilizarán entornos de desarrollo especializados como GNU Radio y lenguajes como Python para implementar flujos de trabajo eficientes y modulares en la captura de señales.
  - **Responsable:** Investigador principal, gerente del proyecto y magíster en ingeniería - automatización industrial.
  - **Tareas:** Instalación de sistema operativo y software en Jetson Nano, instalación de GNU Radio y articulación con HackRF One y antenas.
  - **Resultados esperados:** Sensores SDR programados.
  - **Medios de verificación:** Instantánea de sistema con software pre-instalado.
- **Actividad 5: Integración de Algoritmos de Procesamiento de Señales:** Incorporar algoritmos avanzados de procesamiento de señales en el software de los sensores SDR. Estos algoritmos se enfocarán en técnicas de detección de energía y análisis espectral para identificar y caracterizar las señales dentro de las bandas objetivo.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto, magíster en ingeniería - automatización industrial e ingenieros.
  - **Tareas:** Selección e integración de algoritmos de procesamiento de señales en software SDR. Pruebas y optimización de algoritmos para detección de energía y análisis espectral.
  - **Resultados esperados:** Algoritmos efectivos para identificar y caracterizar señales integrados en sensores SDR.
  - **Medios de verificación:** Informes técnicos de pruebas y documentación de algoritmos.
- **Actividad 6: Configuración de Módulos SDR:** Configurar los módulos SDR, como el HackRF One, para sintonizar eficientemente las bandas de interés. Esto incluye ajustar parámetros como frecuencia central, ancho de banda y modos de operación para capturar señales de manera óptima en las bandas de FM, TDT, 5G y L.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto, magíster en ingeniería - automatización industrial e ingeniera física.
  - **Tareas:** Ajuste de frecuencia central, ancho de banda y modos de operación en módulos SDR como HackRF One. Optimización de la configuración para captura óptima en bandas de FM, TDT, 5G y L.
  - **Resultados esperados:** Configuración efectiva de módulos SDR para una sintonización precisa en bandas de interés.
  - **Medios de verificación:** Informes de configuración y pruebas de sintonización.
- **Actividad 7: Calibración de Sensores:** Realizar una calibración de los sensores SDR para garantizar la precisión en la captura de señales. Esta calibración debe considerar factores como la sensibilidad del sensor, el ruido de fondo y las posibles interferencias en el entorno operativo y la calidad de las antenas.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto, magíster en ingeniería - automatización industrial e ingenieros.
  - **Tareas:** Implementación de ajustes para mejorar la precisión en la captura de señales.
  - **Resultados esperados:** Sensores SDR calibrados para una captura precisa y confiable de señales.

- **Medios de verificación:** Informes de calibración y pruebas de precisión en la captura de señales.
- **Actividad 8: Pruebas de Funcionamiento:** Llevar a cabo pruebas de los sensores SDR para verificar su correcto funcionamiento. Estas pruebas deben incluir la captura de señales en diferentes condiciones ambientales y de señal para evaluar la robustez y fiabilidad del sistema.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto, magíster en ingeniería - automatización industrial e ingenieros.
  - **Tareas:** Crear marco experimental para la generación y recepción de servicios sobre las bandas seleccionadas. Analizar parámetros de rendimiento para las antenas seleccionadas articuladas con el software SDR
  - **Resultados esperados:** Parámetros de las antenas validadas y rendimiento correcto para las bandas seleccionadas
  - **Medios de verificación:** Informe de rendimiento de antenas para servicios seleccionados y conjunto de datos de señales.
- **Actividad 9: Análisis de Datos Capturados:** Analizar los datos capturados por los sensores SDR para evaluar la calidad de la captura y la eficacia del procesamiento de señales. Utilizar esta información para identificar áreas de mejora y realizar ajustes en la configuración del hardware y software.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto, magíster en ingeniería - automatización industrial e ingenieros.
  - **Tareas:** Análisis exploratorio y evaluación de rendimiento sobre datos de señales recopiladas
  - **Resultados esperados:** SDR y antenas calibradas.
  - **Medios de verificación:** Repositorio de scripts para la recopilación de datos e informe de análisis exploratorio y evaluación de rendimiento
- **Actividad 10: Optimización de la Captura de Señales:** Ajustar y optimizar la captura de señales en las bandas objetivo, basándose en los resultados del análisis de datos. Esto puede incluir cambios en la configuración del hardware, la afinación de los algoritmos de procesamiento de señales o la mejora de las técnicas de filtrado y reducción de ruido.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto y magíster en ingeniería - automatización industrial.
  - **Tareas:** **Reconfiguración del hardware SDR según análisis de datos, Afinación de algoritmos de procesamiento de señales.**
  - **Resultados esperados:** Mejora en la eficacia de captura de señales en las bandas objetivo.
  - **Medios de verificación:** Registro de cambios implementados y evaluación de rendimiento post-ajuste. Repositorio de scripts para toma y captura de datos
  -
- **Actividad 11: Diseño de Estrategias de Captura de Datos:** Desarrollar metodologías para la captura sistemática de señales para servicios en las bandas de interés. Esto incluirá la definición de parámetros como la duración de la captura, la diversidad de condiciones de señal y los intervalos de frecuencia.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto y magíster en ingeniería - automatización industrial.

- **Tareas:** Diseñar protocolos para captura sistemática en diferentes condiciones ambientales y operativas.
- **Resultados esperados:** Metodología establecida para la captura eficiente y sistemática de señales en las bandas de interés
- **Medios de verificación:** Documentación de las metodologías desarrolladas y registros de capturas realizadas.
- **Actividad 12: Recopilación de Conjuntos de Datos:** Capturar una amplia gama de señales utilizando los sensores SDR configurados, asegurando que los datos recopilados cubran espectro representativo de las condiciones de señal en las bandas FM, TDT, 5G y L.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto y magíster en ingeniería - automatización industrial.
  - **Tareas:** Operar sensores SDR para capturar señales en bandas FM, TDT, 5G y L.
  - **Resultados esperados:** Conjunto de datos diverso y representativo de las condiciones de señal en las bandas objetivo.
  - **Medios de verificación:** Base de datos de señales capturadas y análisis de cobertura del espectro.
- **Actividad 13: Preprocesamiento y Anotación de Datos:** Procesar los datos capturados para convertirlos en un formato adecuado para el entrenamiento de redes neuronales. Esto incluirá la limpieza de datos, la extracción de características relevantes y la anotación de los datos con etiquetas correspondientes a diferentes tipos de señales y condiciones de espectro.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto y magíster en ingeniería - automatización industrial.
  - **Tareas:** Limpieza y pre-procesamiento de los datos capturados. Anotación y etiquetado de datos para diferentes tipos de señales y condiciones de espectro.
  - **Resultados esperados:** Datos procesados listos para ser utilizados en el entrenamiento de redes neuronales.
  - **Medios de verificación:** Conjunto de datos procesados y documentación del proceso de preparación de datos.
- **Actividad 14: Creación de un Repositorio de Datos:** Almacenar los datos recopilados y procesados en un repositorio estructurado y accesible, garantizando que los datos estén organizados de manera que faciliten el entrenamiento y la validación de modelos de Deep Learning.
  - **Responsable:** Investigador principal, gerente del proyecto y magíster en ingeniería - automatización industrial.
  - **Tareas:** Desarrollo de repositorio de datos
  - **Resultados esperados:** Datos para el entrenamiento y validación de modelos de aprendizaje profundo organizados
  - **Medios de verificación:** Repositorio de datos

### Fase 3: Implementación de Técnicas de Deep Learning para Análisis Predictivo y Clasificación

- **Actividad 15: Selección de Arquitecturas de Red:** Evaluar y seleccionar las arquitecturas de redes neuronales adecuadas para el análisis del espectro radioeléctrico [39-41].
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto, doctor en ingeniería - ingeniería automática y magíster en ingeniería - automatización industrial.
  - **Tareas:** Desarrollar arquitectura de modelo para el monitoreo del espectro radioeléctrico
  - **Resultados esperados:** Arquitectura de aprendizaje profundo seleccionada
  - **Medios de verificación:** Descripción de la arquitectura de aprendizaje profundo
- **Actividad 16: Desarrollo de Modelos de Aprendizaje Profundo:** Implementar y configurar los modelos seleccionados utilizando plataformas como TensorFlow o PyTorch. Ajustar hiperparámetros como el número de capas, neuronas y tasas de aprendizaje para optimizar el rendimiento de los modelos.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto, doctor en ingeniería - ingeniería automática, magíster en ingeniería - automatización industrial e ingenieros.
  - **Tareas:** Implementación de modelos de redes neuronales en plataformas como TensorFlow o PyTorch.
  - **Resultados esperados:** Algoritmos de Procesamiento de Señales integrados
  - **Medios de verificación:** Informes de configuración de modelos y registros de pruebas de rendimiento.
- **Actividad 17: Implementación de Modelos para Análisis en Tiempo Real:** Integrar los modelos de Deep Learning entrenados en el sistema de monitoreo para realizar análisis y clasificaciones en tiempo real de las señales capturadas, en marcos de desarrollo SDR como GNU-RADIO.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto, doctor en ingeniería - ingeniería automática y magíster en ingeniería - automatización industrial.
  - **Tareas:** Integración de modelos de Deep Learning entrenados en el sistema de monitoreo SDR.
  - **Resultados esperados:** Sistema de monitoreo SDR capaz de realizar análisis y clasificaciones en tiempo real con modelos de Deep Learning.
  - **Medios de verificación:** Repositorio de scripts actualizado

### Fase 4: Integración con Infraestructuras de Monitoreo Existentes y Procesamiento de Datos

- **Actividad 18: Evaluación de Infraestructuras Existentes:** Realizar un análisis de las redes de monitoreo actuales de la ANE. Esta evaluación debe centrarse en la comprensión de la arquitectura actual, las capacidades de monitoreo existentes y las limitaciones de los sistemas en uso.



- **Responsable:** Investigador principal, co-investigador e ingenieros.
  - **Tareas:** Evaluación detallada de la arquitectura actual de las redes de monitoreo de la ANE. Análisis de las capacidades y funcionalidades de los sistemas de monitoreo existentes. Identificación y documentación de limitaciones y áreas de mejora en los sistemas actuales.
  - **Resultados esperados:** Comprensión profunda de la infraestructura de monitoreo existente, con enfoque en oportunidades de integración y actualización tecnológica.
  - **Medios de verificación:** Informe de análisis técnico y evaluativo de las redes de monitoreo actuales.
- **Actividad 19: Mapeo de Integración de Sistemas:** Desarrollar un mapa detallado de cómo los nuevos sensores SDR y el sistema basado en Deep Learning se integrarán con la infraestructura de monitoreo existente. Identificar puntos de conexión, interfaces de datos y requisitos de comunicación.
  - **Responsable:** Investigador principal y co-investigadores.
  - **Tareas:** Diseño de un mapa de integración para nuevos sensores SDR y sistemas basados en Deep Learning con la infraestructura de monitoreo existente. Definición de requisitos de comunicación y protocolos para la integración efectiva.
  - **Resultados esperados:** Mapa detallado de integración que facilite la incorporación efectiva de nuevas tecnologías en el sistema de monitoreo existente.
  - **Medios de verificación:** Documento técnico que describe el mapa de integración y las especificaciones de conexión e interfaz.
- **Actividad 20: Diseño de Interfaces de Comunicación:** Crear interfaces de comunicación para la transmisión y recepción de datos entre los sensores SDR y la infraestructura de monitoreo existente. Estas interfaces deben ser robustas, seguras y capaces de manejar altos volúmenes de datos.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores e ingenieros.
  - **Tareas:** Diseño y desarrollo de interfaces de comunicación para conectar sensores SDR con la infraestructura de monitoreo.
  - **Resultados esperados:** Interfaces de comunicación confiables y eficientes establecidas para la transmisión y recepción de datos entre sensores SDR y la infraestructura de monitoreo.
  - **Medios de verificación:** Informes de diseño y pruebas de las interfaces, incluyendo análisis de rendimiento y seguridad.
- **Actividad 21: Creación de Sistemas de Almacenamiento de Datos:** Desarrollar un sistema robusto para el almacenamiento de los datos recopilados. Este sistema debe ser escalable y tener una estructura que facilite el acceso y análisis de los datos.
  - **Responsable:** Investigador principal y co-investigadores.
  - **Tareas:** Diseño de un sistema de almacenamiento y arquitectura de datos que garantice escalabilidad y accesibilidad.
  - **Resultados esperados:** Sistema de almacenamiento seguro y escalable que facilite el acceso y análisis eficiente de los datos recopilados.
  - **Medios de verificación:** Documentación del sistema de almacenamiento y registros de pruebas de funcionalidad.

## Fase 5: Diseño de Interfaz de Usuario y Herramientas de Visualización Avanzadas

- **Actividad 22: Análisis de Requisitos de Usuario:** Iniciar con la recopilación y análisis de los requisitos de los usuarios finales, incluyendo operadores de monitoreo y analistas de datos. Esto implica comprender sus necesidades específicas en términos de funcionalidades, accesibilidad y preferencias de visualización.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores e ingenieros.
  - **Tareas:** Analizar y documentar las funcionalidades, accesibilidad y preferencias de visualización requeridas por los usuarios finales.
  - **Resultados esperados:** Comprensión clara y documentada de las necesidades y requisitos de los usuarios finales para guiar el desarrollo del sistema de monitoreo.
  - **Medios de verificación:** Informe de requisitos de usuario con análisis detallado y especificaciones derivadas.
- **Actividad 23: Desarrollo del Diseño de Interfaz:** Crear mockups de diseño de la interfaz de usuario, centrándose en la usabilidad y la experiencia del usuario. La interfaz deberá permitir un fácil acceso a las funciones clave del sistema, incluyendo el monitoreo en tiempo real, el análisis histórico y la gestión de alertas.
  - **Responsable:** Investigador principal y co-investigadores.
  - **Tareas:** Diseño de prototipos iniciales para la interfaz de usuario, enfocándose en la usabilidad y la experiencia del usuario.
  - **Resultados esperados:** Los prototipos de diseño de interfaz de usuario ofrecen fácil acceso a las funciones principales y una experiencia de usuario optimizada.
  - **Medios de verificación:** Maquetas o prototipos de la interfaz de usuario
- **Actividad 24: Programación de la Interfaz de Usuario:** Implementar la interfaz utilizando tecnologías web modernas como HTML5, CSS3 y JavaScript, o frameworks de desarrollo de aplicaciones como React o Angular. Garantizar que la interfaz sea responsiva y compatible con diferentes dispositivos y navegadores.
  - **Responsable:** Investigador principal y co-investigadores.
  - **Tareas:** Implementar la interfaz de usuario. Desarrollar una interfaz responsiva que asegure compatibilidad con distintos dispositivos y navegadores.
  - **Resultados esperados:** Interfaz de usuario desarrollada con tecnologías web modernas, asegurando responsividad y compatibilidad.
  - **Medios de verificación:** Código fuente de la interfaz
- **Actividad 25: Implementación Final y Lanzamiento:** Tras realizar los ajustes necesarios, implementar la versión final de la interfaz y las herramientas analíticas. Lanzar el sistema para su uso operativo, asegurando que todos los componentes funcionen de manera integrada y eficiente.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores e ingenieros.
  - **Tareas:** Realizar los ajustes finales en la interfaz de usuario y en las herramientas analíticas basándose en pruebas y retroalimentación previas. Implementar la versión final de la interfaz y las herramientas analíticas en el sistema de monitoreo. Lanzar el sistema para su uso operativo, asegurando la integración y eficiencia de todos los componentes.



- **Resultados esperados:** Sistema de monitoreo operativo con una interfaz de usuario y herramientas analíticas integradas y funcionando eficientemente.
- **Medios de verificación:** Informes de implementación y pruebas de lanzamiento del sistema, incluyendo registros de rendimiento y funcionalidad integrada.

## Fase 6: Validación, Capacitación y Evaluación Integral del Sistema

- **Actividad 26: Realización de Pruebas de Campo:** Llevar a cabo pruebas en diversos entornos operativos para validar la efectividad del sistema, incluyendo la precisión de los sensores SDR y la eficacia de los modelos de Deep Learning.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto, ingeniero electrónico e ingenieros.
  - **Tareas:** Planificar y ejecutar pruebas del sistema en diferentes entornos operativos. Validar la eficacia de los modelos de Deep Learning en el análisis y clasificación de señales.
  - **Resultados esperados:** Confirmación de la efectividad y fiabilidad del sistema en entornos operativos variados.
  - **Medios de verificación:** Informes detallados de pruebas y análisis de resultados que validen la precisión y eficacia del sistema.
- **Actividad 27: Elaboración de Documentación Técnica:** Desarrollar manuales detallados y guías de usuario para el sistema, abarcando desde la operación de los sensores SDR hasta la utilización de la interfaz de usuario y las herramientas analíticas.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto e ingenieros.
  - **Tareas:** Creación de manuales detallados para la operación de los sensores SDR. Inclusión de secciones de solución de problemas, preguntas frecuentes y mejores prácticas.
  - **Resultados esperados:** Conjunto completo de manuales y guías de usuario que faciliten la operación eficiente y efectiva del sistema.
  - **Medios de verificación:** Documentos de manuales y guías disponibles para usuarios finales y registros de su distribución o accesibilidad en línea.
- **Actividad 28: Programas de Capacitación:** Implementar sesiones formativas para el personal de la ANE, asegurando que adquieran las habilidades y conocimientos necesarios para manejar eficientemente el sistema y analizar los datos recopilados.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto e ingenieros.
  - **Tareas:** Diseñar un programa de capacitación adaptado a las necesidades y niveles de habilidad del personal de la ANE. Desarrollar materiales y recursos de apoyo para facilitar el aprendizaje y la práctica
  - **Resultados esperados:** Personal de la ANE capacitado y competente en el manejo eficiente del sistema y en el análisis de datos recopilados.
  - **Medios de verificación:** Registro de asistencia y participación en las sesiones formativas, junto con evaluaciones y feedback de los participantes.

- **Actividad 29: Evaluación Integral del Sistema:** Realizar una evaluación completa del sistema implementado, verificando el cumplimiento de los objetivos planteados y evaluando el impacto en las operaciones de monitoreo de la ANE.
  - **Responsable:** Investigador principal, co-investigadores, gerente del proyecto, ingeniero electrónico e ingenieros.
  - **Tareas:** Comparar los resultados y rendimientos del sistema con los objetivos iniciales planteados.
  - **Resultados esperados:** Confirmación del cumplimiento de los objetivos planteados y evaluación positiva del impacto en las operaciones de monitoreo.
  - **Medios de verificación:** Informe de evaluación que incluya análisis de cumplimiento, impacto operativo y retroalimentación de los usuarios.

### Productos y resultados esperados

Objetivo específico	Tipo Producto	Producto	Cantidad
OE1: Desarrollar un sistema basado en Radio definida por software que permita la generación de sensores de espectro radioeléctrico flexibles y reconfigurables para el monitoreo de los servicios de telecomunicaciones.	Productos de generación de nuevo conocimiento	Artículo científico publicado en revista indexada relacionados con la presente convocatoria.	Uno (1)
OE2: Analizar la forma en la que actualmente se capturan los datos (infraestructura actual de la ANE) para realizar propuesta de cómo estos datos pueden converger en un solo dispositivo de bajo costo en cada estación de monitoreo.	Productos de apropiación social del conocimiento	Documento con la descripción detallada de la arquitectura de la red de monitoreo, configuración, plataformas de programación, requisitos del sistema, entre otros.	Uno (1)

OE3: Articular la operación del sistema de sensores flexibles y reconfigurables con las actuales estaciones de monitoreo de la ANE.	Productos de actividades de investigación, desarrollo tecnológico e innovación:	Prototipo de red de monitoreo multipropósito (mínimo 8 sensores) operando con los cuales se realice monitoreo y análisis de ocupación de los servicios de RDS FM, Cubrimiento (VHF-UHF), TDT, 5G y los valores de campo electromagnético. Incluye instalación.	Uno (1)
	Productos de apropiación social del conocimiento	Documentación de las pruebas operativas realizadas al prototipo.	Uno (1)
OE4:Diseñar e implementar una interfaz de usuario desde la cual se pueda realizar la gestión de la red de monitoreo multipropósito y el análisis de los datos recolectados por esta.	Productos de apropiación social del conocimiento	Participación en simposios, conferencias, ferias o congresos de Ciencia, Tecnología e Innovación.	Uno (1)
	Productos de apropiación social del conocimiento	Documento con el manual de programador, manual de administrador y manual de usuario	Uno (1)

## Cronograma

Fase	Actividad	Mes									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	Recolección y Análisis de Datos del Espectro	X									
	Evaluación de Requerimientos Técnicos y Operativos	X	X								
	Diseño Esquemático Integral del Sistema	X	X								
II	Programación de Sensores SDR		X	X							
	Integración de Algoritmos de Procesamiento de Señales		X	X							
	Configuración de Módulos SDR		X	X							
	Calibración de Sensores		X	X							
	Pruebas de Funcionamiento:		X	X							
	Análisis de Datos Capturados		X	X							
	Optimización de la Captura de Señales		X	X							
	Diseño de Estrategias de Captura de Datos		X	X							
	Recopilación de Conjuntos de Datos			X	X						
	Preprocesamiento y Anotación de Datos			X	X						
	Creación de un Repositorio de Datos			X	X						
III	Selección de Arquitecturas de Red			X	X	X					
	Desarrollo de Modelos de Aprendizaje Profundo				X	X	X				
	Preparación de Conjuntos de Datos de Entrenamiento				X	X	X				
	Proceso de Entrenamiento y Validación					X	X				
	Implementación de Modelos para Análisis en Tiempo Real					X	X				
IV	Evaluación de Infraestructuras						X	X			

	Existentes												
	Mapeo de Integración de Sistemas						X	X					
	Diseño de Interfaces de Comunicación						X	X					
	Implementación de Protocolos Estandarizados						X	X					
	Creación de Sistemas de Almacenamiento de Datos						X	X					
	Gestión Efectiva de los Datos						X	X					
V	Análisis de Requisitos de Usuario							X	X				
	Desarrollo del Diseño de Interfaz							X	X	X			
	Programación de la Interfaz de Usuario								X	X			
	Implementación Final y Lanzamiento									X			
VI	Realización de Pruebas de Campo									X	X		
	Calibración y Ajustes									X	X		
	Elaboración de Documentación Técnica									X	X		
	Programas de Capacitación									X	X		
	Evaluación Integral del Sistema									X	X		

### Presupuesto discriminado

PRESUPUESTO DISCRIMINADO (RUBROS)	FINANCIADO ANE	FINANCIADO ANE (%)	CONTRAPARTIDA UNAL		TOTAL
			Especie	Efectivo	
Alquiler de Equipos	\$0	0,0%	\$0	\$0	\$0
Materiales e insumos	\$38.000.000	15,2%	\$0	\$0	\$38.000.000
Software	\$0	0,0%	\$0	\$0	\$0
Suscripciones a bases de datos especializadas	\$0	0,0%	\$0	\$0	\$0
Servicios Técnicos	\$0	0,0%	\$0	\$0	\$0
Salidas de campo	\$7.000.000	2,8%	\$0	\$0	\$7.000.000
Recursos humanos para actividades de CT+I	\$170.000.000	68,0%	\$221.828.400	\$0	\$391.828.400
Publicaciones y patentamiento	\$0	0,0%	\$0	\$0	\$0
Eventos académicos	\$0	0,0%	\$0	\$0	\$0
<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$215.000.000</b>	<b>86,0%</b>	<b>\$221.828.400</b>	<b>\$0</b>	<b>\$436.828.400</b>
Gastos de administración (Max. 15%)	\$35.000.000	14,0%	\$0	\$0	\$35.000.000
<b>TOTAL</b>	<b>\$250.000.000</b>	<b>100,0%</b>	<b>\$221.828.400</b>	<b>\$0</b>	<b>\$471.828.400</b>

**Total Proyecto: \$471'828.400 (100%)**  
**Financiado ANE: \$250'000.000 (53%)**  
**Contrapartida UNAL: \$221'828.400 (47%)**

Adicionalmente, se adjunta Anexo 1.Presupuesto\_Discriminado.

### Mecanismos de Verificación y Validación de resultados

Producto	Verificación	Validación
Publicación de Artículo Científico	Se realizará a través de la revisión por pares en una revista indexada, asegurando que el artículo cumpla con los estándares académicos y científicos requeridos.	La aceptación y publicación del artículo en la revista servirá como validación de la calidad y relevancia de la investigación realizada.
Documento de Arquitectura de Red de Monitoreo	Se revisará el documento por expertos en el área para confirmar que incluye toda la información técnica necesaria, como la arquitectura, configuración y requisitos del sistema.	Se comparará la información del documento con los estándares actuales de la industria y las mejores prácticas para asegurar su precisión y aplicabilidad.
Red de Monitoreo Multipropósito	Se llevarán a cabo pruebas funcionales en cada sensor y en la red en su conjunto para asegurar que operan correctamente.	Se realizará un análisis de ocupación de los servicios de RDS FM, Cubrimiento (VHF-UHF), TDT, 5G y los valores de campo electromagnético para validar la eficacia del sistema en condiciones reales.
Documentación de Pruebas Operativas	Se elaborará un informe detallado de todas las pruebas realizadas, incluyendo metodología, resultados y análisis.	Expertos independientes revisarán el informe para confirmar que las pruebas fueron exhaustivas y que los resultados son fiables.
Participación en Eventos Científicos	Se documentará la participación en simposios, conferencias, ferias o congresos, incluyendo detalles como agendas, presentaciones y feedback recibido.	La aceptación de presentaciones en estos eventos y la retroalimentación positiva de la comunidad científica validará la relevancia y el impacto del proyecto. Así mismo se presentará el certificado de la participación en el evento.
Manuales de Usuario, Programador y Administrador	Revisión de los manuales por parte de un equipo de expertos para asegurar que son completos, precisos y fáciles de entender.	Se llevarán a cabo sesiones de prueba con usuarios finales y administradores para confirmar que los manuales son efectivos y facilitan la operación y mantenimiento del sistema.



## Bibliografía

- [1] Hossain, M. A., Md Noor, R., Yau, K. L. A., Azzuhri, S. R., Z'aba, M. R., Ahmedy, I., & Jabbarpour, M. R. (2021). Machine Learning-Based Cooperative Spectrum Sensing in Dynamic Segmentation Enabled Cognitive Radio Vehicular Network. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 1169, 14(4), 1169.
- [2] Ranjbar, M., Nguyen, H. L., Tran, N. H., Karacolak, T., Sastry, S., & Nguyen, L. D. (2021). Energy efficiency of full-duplex cognitive radio in low-power regimes under imperfect spectrum sensing. *Mobile Networks and Applications*.
- [3] Wang, J., Li, Q., Duan, H., Fang, J., Ren, Z., & Li, H. (2021). Multiantenna- Assisted Wideband Spectrum Sensing Based on Sub-Nyquist Sampling. *IEEE Wireless Communications Letters*.
- [4] Golvaei, M., & Fakharzadeh, M. (2021). A Fast Soft Decision Algorithm for Cooperative Spectrum Sensing. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68(1), 241–245.
- [5] Hossain, M. A., Md Noor, R., Yau, K. L. A., Azzuhri, S. R., Z'aba, M. R., Ahmedy, I., & Jabbarpour, M. R. (2021). Machine Learning-Based Cooperative Spectrum Sensing in Dynamic Segmentation Enabled Cognitive Radio Vehicular Network. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 1169, 14(4), 1169.
- [6] Ren, S., Chen, W., Li, D., & Fang, C. (2021). An Adaptive Compressive Wideband Spectrum Sensing Algorithm Based on Least Squares Support Vector Machine. *IEEE Access*.
- [7] ATAMAN, Fikriye. THE SPECTRUM SENSING TECHNIQUES AND METHODS. *INTERNATIONAL RESEARCH IN ENGINEERING SCIENCES*, p. 156.
- [8] Latifoğlu, F. (2020). A novel singular spectrum analysis-based multi- objective approach for optimal FIR filter design using artificial bee colony algorithm. *Neural Computing and Applications*, 32(17), 13323–13341.
- [9] Astaiza, E., Bermudez, H. F., & Campo, W. Y. (2017). Efficient Wideband Spectrum sensing Based on Compressive Sensing and Multiband Signal Covariance. *IEEE Latin America Transactions*, 15(3), 393– 399.
- [10] Molina-Tenorio, Y., Prieto-Guerrero, A., & Aguilar-Gonzalez, R. (2021). Real-time implementation of multiband spectrum sensing using sdr technology. *Sensors*, 21(10).
- [11] Zhang M, Wang L, Feng Y. Distributed cooperative spectrum sensing based on reinforcement learning in cognitive radio networks. *AEU-Int J Electron C*. 2018;94:359-366
- [12] KHAMAYSEH, Sundous; HALAWANI, Alaa. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey on machine learning-based methods. 2020.
- [13] Cadena Muñoz, E., Eslava Blanco, H. J., & Franco Calderón, J. A. (2015). Gestión del espectro radioeléctrico en Colombia. *Tecnura*, 19(45), 159-173.
- [14] Kassri, N., Ennouaary, A., Bah, S., & Baghdadi, H. (2021). A review on SDR, spectrum sensing, and CR-based IoT in cognitive radio networks. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(6).
- [15] Subray, S., Tschimben, S., & Gifford, K. (2021). Towards Enhancing Spectrum Sensing: Signal Classification Using Autoencoders. *IEEE Access*, 9, 82288–82299.

- [16] Talajiya, P. H., Gangurde, A. P., Ragavendran, U., & Murali, H. (2020). Cognitive Radio Networks and Spectrum Sensing: A Review. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (IJOE)*, 16(13), 4.
- [17] Liu, Y., Zhao, X., Zhou, H., Zhang, Y., & Qiu, T. (2019). Low-complexity spectrum sensing for MIMO communication systems based on cyclostationarity. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2019(1). Retrieved from
- [18] Dikmese, S., Lamichhane, K., & Renfors, M. (2021). Novel filter bank-based cooperative spectrum sensing under practical challenges for beyond 5G cognitive radios. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021(1). <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01889-w>
- [19] Liu, M., Liao, G., Zhao, N., Song, H., & Gong, F. (2020). Data-driven deep learning for signal classification in industrial cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(5), 3412-3421.
- [20] Chaudhary, N., & Mahajan, R. (2021). Energy Detector based Spectrum Sensing towards Efficient Detection of Primary Users. *J. Electrical Systems*, 17(2), 194-209.
- [21] Sure, P. (2021). On the performance of Grassmann-covariance-matrix-based spectrum sensing for cognitive radio. *Sādhana*, 46(4).
- [22] George, G. R., & Prema, S. C. (2019). Cyclostationary feature detection based blind approach for spectrum sensing and classification. *Radioengineering*, 27(1), 298-303. <https://doi.org/10.13164/RE.2019.0298>
- [23] Nouri, M., Behroozi, H., Mallat, N. K., & Aghdam, S. A. (2021). A wideband 5G cyclostationary spectrum sensing method by kernel least mean square algorithm for cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68(7), 2700-2704.
- [24] Zhao, Q., Tong, L., & Gao, B. (2021). Advanced chirp transform spectrometer with novel digital pulse compression method for spectrum detection. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(3), 1-21.
- [25] Hossain, M. A., Md Noor, R., Yau, K. L. A., Azzuhri, S. R., Z'aba, M. R., Ahmedy, I., & Jabbarpour, M. R. (2021). Machine Learning-Based Cooperative Spectrum Sensing in Dynamic Segmentation Enabled Cognitive Radio Vehicular Network. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 1169, 14(4), 1169.
- [26] Janu, D., Singh, K., & Kumar, S. (2021). Machine learning for cooperative spectrum sensing and sharing: A survey. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, e4352.
- [27] Rasethuntsa TR, Kumar S. An integrated performance evaluation of ED-based spectrum sensing over  $\alpha$ - $\kappa$ - $\mu$  and  $\alpha$ - $\kappa$ - $\mu$ -extreme fading channels. *Trans Emerg Telecommun Technol.* 2019;30(5):e3569.
- [28] Bishop CM. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Germany: Springer; 2006.
- [29] Oksanen J, Lundén J, Koivunen V. Reinforcement learning based sensing policy optimization for energy efficient cognitive radio networks. *Neurocomputing*. 2012;80:102-110.
- [30] Lundén J, Kulkarni SR, Koivunen V, Poor HV. Multiagent reinforcement learning based Spectrum sensing policies for cognitive radio networks. *IEEE J Selected Topics Signal Process.* 2013;7(5):858-868.

- [31] Peñaloza, M. L. S., & Vesga, C. B. (2021). Hacia una gestión innovadora del espectro radioeléctrico en Colombia: acceso dinámico y mejores prácticas. Las TIC y las Sociedad Digital. Doce años después la Ley. Tomo I Modernización para el Sector TIC y sus recursos esenciales.
- [32] Gummineni, M., & Polipalli, T. R. (2020). Implementation of reconfigurable transceiver using GNU Radio and HackRF One. *Wireless Personal Communications*, 112(2), 889-905.
- [33] Alarcon, O. C., Suaña, J. A. R., Montoya, J. J. M., & Aguilar, M. D. G. (2021). Estudio de uso de Radio Definida por Software RTL-SDR y HackRF One para Recepción de FM. *Revista Científica Investigación Andina*, 20(2).
- [34] Vazquez, J. A. E. (2023). Nvidia Jetson nano, un mini pc para desarrollo de robótica e inteligencia artificial. *Inicio*, 1(1), 1-4.
- [35] Escobar Molina, M. C. (2023). Comparativa de plataformas Raspberry PI 4 y Jetson Nano para aplicaciones de agricultura de precisión (Bachelor's thesis).
- [36] Del Barrio, A. A., Manzano, J. P., Maroto, V. M., Villarín, Á., Pagán, J., Zapater, M., ... & Hermida, R. (2023). HackRF+ GNU Radio: A software-defined radio to teach communication theory. *The International Journal of Electrical Engineering & Education*, 60(1), 23-40.