

ESTUDIO Y ANÁLISIS PARA LA SELECCIÓN DE UNA TECNOLOGÍA A IMPLEMENTAR
EN LA ACTUALIZACIÓN DE LA RED PPDR DE LA POLICÍA METROPOLITANA DE
BOGOTÁ “MEBOG”

(Trabajo de Grado)

FADUL ANTONIO ROLÓN ABREO

Director:

Ing. Gustavo Alonso Chica, MSc

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES Y REGULACIÓN TIC
BOGOTÁ, 2018

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haber guiado mi camino,

Y haberme permitido llegar a

Este punto de mi vida,

A toda mi familia por su amor,

Comprensión y apoyo.

A mi Institución Policía Nacional de Colombia por

Haberme dado la oportunidad de crecer como

Persona y también profesionalmente.

A la Universidad Santo Tomás,

Por ayudarme a tener una visión

Más completa de las cosas.

Al Ingeniero Gustavo Chica por su tiempo

Y enseñanzas en el desarrollo de

Este trabajo de grado.

En memoria de mi Padre,

Que me cuida desde el Cielo.

CONTENIDO

ACRÓNIMOS	5
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
1. MARCO GENERAL DEL PROYECTO	14
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo General.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
1.3.3 Alcance.....	16
2. ESTADO ACTUAL DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE REDES “PPDR”	17
2.1 LA RED PPDR DE LA POLICÍA METROPOLITANA DE BOGOTÁ.....	17
2.2 GENERALIDADES DE LAS REDES PPDR.....	18
2.3 REQUISITOS TÉCNICOS PARA REDES PPDR	20
2.4 TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN REDES PPDR	30
2.3.1. Tecnología IDRA	31
2.3.2. Tecnología EDACS	32
2.3.3. Tecnología DIMRS	32
2.3.4. Tecnología TETRAPOL.....	33
2.3.5. Tecnología AMSF	33
2.3.6. Tecnología P25.....	34
2.3.7. Tecnología DMR.....	35
2.3.8. Tecnología TETRA:.....	36
2.3.9. Tecnología IDEN	37
2.3.10. Tecnología LTE.....	38
2.5 CUADRO COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS ANALIZADAS.....	38
3. ASPECTO REGULATORIO Y DEL USO DEL ESPECTRO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE REDES “PPDR” EN COLOMBIA.	45
3.1 RADIOCOMUNICACIONES PARA LA PPDR.....	45
3.2 DISPONIBILIDAD DE ESPECTRO Y REQUISITOS FUTUROS PARA PPDR DE BANDA ANCHA.....	48
3.3 DIAGNÓSTICO PARA COLOMBIA:.....	50
3.3.1 Limitaciones en el aspecto Regulatorio	55

4. DETERMINACIÓN DE LA TECNOLOGÍA A IMPLEMENTAR EN LA ACTUALIZACIÓN DE LA RED PPDR DE LA POLICÍA METROPOLITANA DE BOGOTÁ “MEBOG”	57
4.1 LA TOMA DE DECISIONES.....	57
4.2 LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO	59
4.3 DETERMINACIÓN DE LA TECNOLOGÍA A IMPLEMENTAR EN LA ACTUALIZACIÓN DE LA RED PPDR DE LA POLICÍA METROPOLITANA DE BOGOTÁ “MEBOG”	64
5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LA SELECCIÓN REALIZADA.	81
5.1 MODELO JERÁRQUICO	81
5.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	85
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
6.1 CONCLUSIONES	95
6.2 RECOMENDACIONES.....	97
7. BIBLIOGRAFÍA	98

ACRÓNIMOS

ACELP: Algebraic Code Excited Linear Prediction

ADP: Privacidad digital avanzada

AMSF: Sistema de Acceso Múltiple con Salto de Frecuencia

AMTD: Acceso múltiple por División de Tiempo

AME / AMBE: Advanced Multiband Excitation

ANE: Agencia Nacional del Espectro

ANP: Analytic Network Process

APCO: Association of Public-Safety Communications Officials-International.

APL: Automatic People Location

APT: Asia-Pacific Telecommunity

ARQ: Automatic Repeat Request

AVL: Automatic Vehicle Location

BSs: Base Stations

C4FM: Modulación de Frecuencia de Envolvente Constante de 4 Niveles.

CENAF: Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia

CIEPS: Centros de Información Estratégica Policial Seccional

CITEL: Comisión Interamericana de Telecomunicaciones

CMR: Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones

CQPSK: Modulación por desplazamiento de fase cuaternaria coherente.

CRC: Código de Redundancia Cíclica

DIRMS: Digital Integrated Mobile Radio System

DM: Disaster Management

DMR: Digital Mobile Radio

DQPSK: Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Coherente Diferencial.

EDACS: Enhanced Digital Access Communications System

ETSI: European Telecommunications Standards Institute

FCC: Federal Communications Commission

FEC: Forward Error Correction

FDD: Frequency Division Duplexing

FDMA: Frequency Division Multiple Access

GIS: Sistemas de Información Geográficos

GPS: Global Positioning System

HARQ: Hybrid Automatic Repeat Request

HPSM: Hosted Public Safety Model

IDEN: Integrated Digital Enhanced Network

IDRA: Integrated Dispatch Radio System

IMBE: Improved Multiband Excitation

IMT: Telecomunicaciones Móviles Internacionales

ISDN: Red Digital de Servicios Integrados

LTE: Long Term Evolution

LMR: Land Mobile Radio

LS: Line Stations

MAUT: Utilidad de Atributos Múltiples

MBB: Mobile Broad Band

MCDM: Multi Criteria Decision Making

MDMG: Modulación por desplazamiento mínimo con filtro gaussiano.

MDFG: Modulación por Desplazamiento de Frecuencia con Filtrado Gaussiano.

MDP: Modulación por Desplazamiento de Fase

MEBOG: Policía Metropolitana de Bogotá

MIMO: Multiple-Input Multiple-Output

MINTIC: Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

MESA: Mobility for Emergency and Safety Applications

MME: Mobility Management Entity

MS: Mobile Stations

MVNO: Mobile Virtual Network Operator

OTAR: Over the Air Re-keying

PAJ: Proceso analítico Jerárquico

PAMR: Public Access Mobile Radio

PDNs: Redes de Datos Empaquetados

P-GW: Packet Gateway

P25: Project 25.

PONAL: Policía Nacional

PPDR: Public Protection and Disaster Relief

PMR: Private Mobile Radio

PTT: Push to Talk

PS: Public Safety

PS-LTE: Public safety-LTE

PSTN: Red Telefónica Publica Conmutada

PTNs: Redes Telefónicas Privadas

RAN: Radio Access Network

RPCELP: Regular Pulse Code Excited Linear Prediction

RTPC: Red de Telefonía Pública conmutada.

SQPSK: Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura Escalonada.

TCP/IP: Protocolo de control de transmisión/Protocolo Internet.

TDD: Time División Dúplexing

TDMA: Time División Múltiple Access

TETRA: Terrestrial Trunked Radio

TIA: Asociación de Industrias de Telecomunicaciones de los Estados Unidos

TDR: Telecomunicaciones para Operaciones de Socorro

TRA: Autoridad Reguladora de las Telecomunicaciones de los Emiratos Árabes Unidos

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones

VSELP: Vector Sum Excited Linear Prediction

VPN: Virtual Private Network

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Jerarquía del modelo AHP	61
Figura 5.1. Árbol jerárquico.....	81
Figura 5.2. Pesos de los Niveles y Subniveles en el Expert Choice	83
Figura 5.3. Resultado Modo distributivo	84
Figura 5.4. Resultado Modo ideal. Fuente: Simulador	84
Figura 5.5. Análisis de sensibilidad Modo Distributivo.....	85
Figura 5.6. Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Tecnológico.....	86
Figura 5.7. Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Económico	86
Figura 5.8. Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Ambiental	87
Figura 5.9. Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Político	87
Figura 5.10. Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Regulatorio.....	88
Figura 5.11. LTE OPERADOR vs P25	90
Figura 5.12. LTE OPERADOR vs DMR	91
Figura 5.13. LTE OPERADOR vs TETRA	91
Figura 5.14. LTE OPERADOR vs IDEN	91
Figura 5.15. LTE OPERADOR vs LTE PRIVADO	92
Figura 5.16. LTE PRIVADO vs P25	92
Figura 5.17. LTE PRIVADO vs DMR	93
Figura 5.18. LTE PRIVADO vs TETRA	93
Figura 5.19. LTE PRIVADO vs IDEN	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Necesidades de las aplicaciones de datos	24
Tabla 2.2 Clasificación de la aplicación PPDR	25
Tabla 2.3. Cuadro Comparativo de las Tecnologías Analizadas	39
Tabla 3.1. Porcentaje de uso de cada banda de frecuencia asignada a PPDR.....	47
Tabla 3.2. Atribución de frecuencias para radiocomunicaciones de PPDR.....	54
Tabla 4.1. Tabla de valoración directa de Saaty	62
Tabla 4.2. RIA en función del número de elementos valorados por nivel (n).....	62
Tabla 4.2 Matriz de dominancia	71
Tabla 4.3 Matriz de dominancia con índices de dominancia	71
Tabla 4.4 Ponderación Final de los Criterios Según Niveles	72
Tabla 4.5 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Tecnológico	73
Tabla 4.6 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Económico	74
Tabla 4.7 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Ambiental	74
Tabla 4.8 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Regulatorio	74
Tabla 4.9 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Político	75
Tabla 4.10. Ratio de Inconsistencia de la Matriz de los Niveles Evaluados	75
Tabla 4.11 Matriz de Decisión	77
Tabla 4.12 Cálculo de la Prioridad Global (Método Distributivo)	78
Tabla 4-13 Calculo de la Prioridad Global (Método Ideal)	79
Tabla 5.1. Análisis de Sensibilidad Modo Distributivo < a 10%	88
Tabla 5.2. Análisis de Sensibilidad para el Modo Distributivo > a 10%.....	89
Tabla 5.3. Análisis de Sensibilidad Modo Ideal > a 10%.....	89

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como propósito realizar un análisis que permita seleccionar la tecnología a implementar por parte de la Policía Metropolitana de Bogotá (MEBOG), en el despliegue de la red de Protección Pública y Atención de Desastres (PPDR). El análisis desarrollado en este documento aborda de manera general las diferentes tecnologías que han venido siendo utilizadas para las comunicaciones de emergencia, resaltando sus principales características y enfocándose en aquellas que gracias a la revisión bibliográfica y a la opinión de expertos, han sido identificadas como las más relevantes para que una institución como la Policía Metropolitana de Bogotá, pueda tomar una decisión acertada.

La metodología desarrollada, contempla el uso de herramientas matemáticas de toma de decisiones multi-criterio, específicamente aquellas que hacen referencia a la aplicación del proceso analítico jerárquico (PAJ), a través de las cuales es posible caracterizar de una forma muy puntual y funcional cada una de las tecnologías PPDR evaluadas, de forma tal, que es posible mediante comparaciones directas, encontrar aquella que satisface de una mejor forma las necesidades puntuales que en términos de comunicaciones de emergencia tiene la Policía Metropolitana de Bogotá. Un análisis de sensibilidad realizado al final, permite confirmar la robustez de los resultados, lo cual toma especial importancia al momento de argumentar el porque de la selección realizada.

PALABRAS CLAVES

Multicriterio, PAJ, PPDR

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país con una gran biodiversidad, geografía y climatología variada, divisiones geo-políticas, bastante desigualdad socio-económica y zonas olvidadas por parte del Estado. Dependiendo de la zona geo-política del país de la que se esté hablando, y de los factores anteriormente mencionados que le correspondan, se puede también hablar de los posibles riesgos de que ocurran emergencias y/o catastrofes naturales como: inundaciones, huracanes, sequías, temporadas prolongadas de intenso frío o calor, movimientos sísmicos (sismos o terremotos), actividad volcánica, deslizamientos de tierra, intensas granizadas, entre otras. Así mismo, hay situaciones que el hombre propicia y que pueden derivar en situaciones de emergencia y peligro tales como: enfrentamientos bélicos de grupos armados al margen de la ley, ataques terroristas, desastres químicos, biológicos y nucleares, accidentes vehiculares masivos (automovil, tren, avión, etc.), secuestros, entre otros [1].

Algunas de estas situaciones pueden llegar a causar la caída y/o interrupción de las redes de comunicaciones tradicionales. La congestión por altísimos niveles de tráfico y el parcial o permanente daño de las redes de comunicaciones son sucesos comunes cuando suceden catástrofes, y en consecuencia el tiempo de respuesta de las unidades de emergencias del país se ve afectada, y a su vez sus operaciones de rescate [2].

Consciente de esta problemática, las instituciones de seguridad como lo son los Bomberos, la Policía Nacional, servicios médicos de emergencias, personal de gobierno y Fuerzas Militares han venido incorporando tecnologías que permitan comunicaciones de emergencia en todo el territorio Nacional, y que han ayudado a solucionar gran parte de las problemáticas propias de la inseguridad y de las situaciones que conllevan a emergencias de toda índole en el país.

Un caso particular en la búsqueda de soluciones a este tipo de problemáticas, se evidencia en la ciudad de Bogotá, en donde la La Policía Metropolitana dispone de aplicaciones informáticas que permiten a los encargados de la vigilancia tener acceso a herramientas tecnológicas, que involucran el intercambio de información mediante el uso de diversas redes y bases de datos. Sin embargo, en el desarrollo de estas funciones, se presentan inconvenientes que afectan la efectividad del servicio y la capacidad de reacción, entre los que se destacan: la congestión en la transmisión de datos, información

muy básica e incompleta, falta de integración con otras tecnologías de datos y video, ancho de banda limitado, entre otros problemas.

Sumado a los problemas anteriores, la tecnología actualmente empleada no permite un aumento de la capacidad de procesamiento de llamadas y por ende el número de usuarios concurrentes no está acorde a las exigencias de una ciudad como Bogotá. Es de resaltar que actualmente los usuarios de equipos de comunicación en el sector de seguridad pública tienen acceso a radios de banda angosta, dispositivos que no cuentan con la capacidad para prestar servicios de (video streaming en alta definición y tiempo real, oficina móvil, compartir archivos pesados fotos de alta resolución, acceso remoto a bases de datos, etc; por lo cual, están limitados a tener comunicaciones de voz y datos de muy baja velocidad.

Adicional a esto, en la actualidad hay limitantes a nivel de asignación de espectro radioeléctrico para el desarrollo de una red PPDR que permita la implementación de nuevas tecnologías que ayuden a integrar en el corto plazo las siguientes herramientas:

- Sistemas de video vigilancia fija y móvil en tiempo real.
- Sistemas de información donde reposan bases de datos de antecedentes.
- Localización automática de vehículos y personas.
- Sistemas de información geográficos GIS.
- Identificación dactilar y facial.
- Implementación de soluciones push to talk (PTT) de voz bidireccional e integración con las existentes.

Estas herramientas resultan de vital importancia al momento de atender las emergencias, reduciendo los tiempos de llegada al incidente y el tiempo de despacho, logrando fortalecer un Sistema Integral de Seguridad y Emergencia Único basado en redes de amplia cobertura, capacidad, y convergencia, optimizando recursos tanto financieros como logísticos.

Teniendo en cuenta que la realidad de la red PPDR de Bogotá no es la más adecuada para prestar un servicio a más de 8 millones de personas y que los requerimientos tecnológicos son una necesidad prioritaria en el corto plazo, se hace necesario analizar el contexto actual de las tecnologías utilizadas en comunicaciones de emergencia y socorro,

para poder determinar cual de ellas sería la mejor opción a implementar por parte de la Policía Metropolitana de Bogotá en el futuro próximo y de esa forma poder superar los inconvenientes que se han venido evidenciando hasta el momento.

Este documento se desarrolla de la siguiente manera, en el capítulo uno se contextualiza el trabajo mediante la descripción del título, planteamiento del problema, objetivos y el alcance proyectado. El capítulo dos, muestra el marco referencial de redes PPDR a nivel general, donde se realiza un estudio comparativo entre las tecnologías más representativas que se utilizan actualmente. El capítulo tres, especifica los esfuerzos que en materia normativa se han hecho para regular el uso de las redes **PPDR**. El capítulo cuatro, desarrolla la metodología de toma de decisiones **PAJ** para seleccionar la mejor tecnología a implementar la actualización de la red **PPDR** de la Policía metropolitana de Bogotá "**MEBOG**". En el capítulo cinco, se realiza un análisis de sensibilidad a lo encontrado en el capítulo cuatro. Finalmente, en el capítulo seis se muestran las conclusiones del trabajo y algunas recomendaciones generales.

1. MARCO GENERAL DEL PROYECTO

Este proyecto realiza la selección de la mejor tecnología a implementar en la actualización de la red de Protección Pública y Operaciones de Socorro “PPDR” de la Policía Metropolitana de Bogotá “MEBOG”, mediante la realización de un análisis de toma de decisiones multi-criterio utilizando el proceso analítico jerárquico (PAJ). En el transcurso del documento se evidenciará el desarrollo de los objetivos planteados y que corresponden al trabajo desarrollado para optar al título de Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones y Regulación TIC de la Universidad Santo Tomás.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este primer capítulo se propone contextualizar el trabajo, mediante la descripción del título, planteamiento del problema, objetivos y el alcance proyectado.

1.1 TÍTULO DEL PROYECTO

Estudio y Análisis para la selección de una tecnología a implementar en la actualización de la red PPDR de la Policía Metropolitana de Bogotá “MEBOG”

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Es necesario cambiar las redes de baja velocidad utilizadas por los organismos de seguridad pública por sistemas de alta velocidad que permitan obtener un mayor control y eficacia, así como la obtención de información importante y decisiva en la toma de decisiones en caso de una emergencia, catástrofes, atentados terroristas o alteración del orden público. Las redes de comunicación de misión crítica para la seguridad pública tienen requisitos operativos muy específicos, cuyo objetivo es maximizar la disponibilidad y fiabilidad del sistema en casos de desastres o eventos no planificados a gran escala [3], [4].

Entre los requisitos que deben tener estas nuevas redes PPDR, está el poder establecer redes punto a punto, es decir; en caso que la infraestructura falle se puedan establecer comunicaciones entre los usuarios cercanos, Así mismo, otra capacidad importante que

deben tener estas redes, es la de soportar alto tráfico en horas pico sin bloquearse, es decir en eventos como cierre bancario, servicios especiales con gran cantidad de ciudadanos como partidos de fútbol, conciertos; igualmente, un área de preocupación es la acumulación de llamadas en cola dentro de un grupo de conversación muy ocupado, lo que da lugar a un mayor tiempo de espera para acceder al canal, este factor debe ser superado por las redes PPDR [5], [3].

En las llamadas de servicios de emergencia, las imágenes y/o secuencias de video de incidentes, resultan vitales para prestar un buen servicio por parte de las autoridades y organismos de control y así poder lograr un resultado exitoso. Sin embargo, los usuarios actuales de equipos de comunicación en el sector de seguridad pública tienen acceso a tecnologías de radio de banda angosta, dispositivos que no cuentan con la capacidad para prestar servicios de (video streaming en alta definición y tiempo real, oficina móvil, manejo de archivos de alta resolución, acceso remoto a bases de datos, entre otros; por lo cual, están limitados a tener comunicaciones de voz y datos de muy baja velocidad. Lo anterior, establece una barrera considerable para el personal de campo que debe atender llamados de emergencia (Policía, Bomberos, FFMM, salud y defensa civil), ya que no cuentan con las herramientas suficientes que permita el acceso a información necesaria para la toma de decisiones en situaciones que demandan especial atención [6].

Sumado al problema de limitación del ancho de banda, la tecnología actualmente empleada no permite un aumento de la capacidad de procesamiento de llamadas y por ende el número de usuarios concurrentes, no está acorde a las exigencias de una ciudad como Bogotá, en donde hay tan solo 234 uniformados por cada 100.000 habitantes y un radio por cada 3 unidades. Lo anterior, representa un déficit en términos de los procesos que involucran seguridad, los cuales se enmarcan en tres grandes fases que son entre las cuales se encuentran: la preventiva, la represiva y la denominada fase de comando y control, en la que juegan un papel fundamental las comunicaciones [3].

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, **la red de telecomunicaciones actual de la Policía Metropolitana de Bogotá no está en la capacidad** de soportar los nuevos retos que se plantean, en materia de crimen organizado, riesgo de emergencias y desastres, con el fin de contribuir al bienestar de las personas, al desarrollo sostenible y la convivencia y seguridad ciudadana, en una ciudad con más de 8 millones de habitantes. Es por esta razón, que se hace necesario revisar entre las tecnologías utilizadas para las comunicaciones PPDR, cual sería la más conveniente para una ciudad como Bogotá.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Seleccionar la mejor tecnología a implementar en la actualización de la red de Protección Pública y Operaciones de Socorro “PPDR” de la Policía Metropolitana de Bogotá “MEBOG”, mediante la realización de un análisis de toma de decisiones multi-criterio utilizando el proceso analítico jerárquico (PAJ).

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar el estado actual de las tecnologías utilizadas en la implementación de redes “PPDR” a través de un estudio comparativo entre las tecnologías identificadas.
2. Establecer las limitaciones desde el punto de vista regulatorio y del uso del espectro para la implementación de redes “PPDR” en Colombia.
3. Determinar la mejor tecnología a implementar en la actualización de la red PPDR de la Policía Metropolitana de Bogotá “MEBOG”, mediante el proceso analítico jerárquico (PAJ).
4. Validar la estabilidad de la selección realizada mediante la realización de un análisis de sensibilidad a través del software expert choice.

1.3.3 Alcance

La implementación de una red PPDR de banda ancha en la Policía Nacional de Colombia marcará un hito en la transformación hacia ciudades inteligentes y seguras, esta red privada facilitará la integración de las plataformas de comunicación de la fuerza pública, otorgándoles mayores herramientas para la seguridad ciudadana. Las tecnologías de la información, las nuevas plataformas digitales y la evolución de los modelos de gestión en las ciudades, han impulsado a los gobiernos y a las instituciones a adoptar en sus políticas públicas innovaciones que mejoren la calidad de vida y la seguridad ciudadana.

La presente tesis, establecerá el marco teórico para utilización de redes PPDR en seguridad pública, con los siguientes alcances: Determinar el estado actual de las redes orientadas a PPDR para seguridad pública en el mundo, con el fin de establecer la mejor tecnología a implementar en la red PPDR de la policía metropolitana de Bogotá. Lo anterior será realizado con base a opiniones de expertos y mediante la utilización de modelos matemáticos de toma de decisiones, lo que sumado a un análisis de sensibilidad, permitirá profundizar más sobre la robustez del resultado obtenido.

2. ESTADO ACTUAL DE LAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE REDES “PPDR”

A través de este capítulo, se pretende identificar el estado actual de las tecnologías utilizadas en la implementación de redes para seguridad pública y prevención de desastres, más conocidas como PPDR por sus siglas en Inglés. A continuación, se hace una breve descripción sobre la Red PPDR que utiliza la Policía Metropolitana de Bogotá, para después conocer con más profundidad sobre las otras tecnologías que se han venido utilizando hasta el momento.

2.1 LA RED PPDR DE LA POLICÍA METROPOLITANA DE BOGOTÁ

Para atender las emergencias de seguridad y orden publico la Policia Metropolitana de Bogota MEBOG cuenta con un sistema troncalizado Motorola P25 version 7.17 en la banda de 800 MHz de siete sitios de repeticion con 129 portadoras y 6000 suscriptores aproximadamente, en este sistema se incluye a transito e Instituto Nacional Penitenciario y Carcelario INPEC, mientras que Bomberos, salud y Dirección de prevención y atención de emergencias DEPAE estan migrando sus sistemas analogicos para operar bajo esta plataforma. Este sistema cuenta con la posibilidad de implementar AVL y APL pero todavia no se ha adquirido.

El sistema no puede ser aumentado en portadoras por la no existencia de espectro disponible, con lo cual su expansion se dificulta y se limita al aumento del número de sitios pero con menos cobertura cada uno y la reutilizacion frecuencias, aumentando considerablemente los costos de ampliación de la infraestructura. El mantenimiento de la red es efectuado por Motorola Solutions bajo la supervisión del grupo de telemática de la MEBOG y es totalmente financiado por la Alcaldía Mayor de Bogotá a traves de su secretaria de seguridad.

Las Fuerzas Militares cuentan en Bogota, igualmente con sistema troncalizado P25 version 7.17 en la banda de 800 MHz que funciona independientemente pero que en un momento dado puede integrarse en caso de emergencia. Como informacion adicional y teniendo en cuenta que las redes PPDR estan proyectadas para una cobertura nacional, tanto la red P25 de la Policía Nacional, como de las Fuerzas Militares están desplegadas en todo el territorio colombiano con mas de 100 sitios de repeticion y 50 mil suscriptores.

La consulta de antecedentes se realiza a través de dispositivos móviles denominados PDA (Personal Digital Assistant o Ayudante personal digital) que funciona bajo un operador celular, actualmente no se cuenta con reconocimiento facial ni dactilar.

2.2 GENERALIDADES DE LAS REDES PPDR

En la CMR-2000 se adopta el término PPDR para referirse a los sistemas de radiocomunicación de seguridad pública y emergencia. Las redes PPDR están diseñadas para soportar las comunicaciones de Seguridad Pública. Este tipo de redes son en gran mayoría redes móviles privadas (PMR) con normas de la European Telecommunications Standards Institute (ETSI) o su equivalente Norteamericano Association of Public-Safety Communications Officials-International (APCO). Estas redes, pueden ser analógicas y/o digitales y tienen características propias que las diferencian de las redes móviles públicas, que las hacen por ello más adecuadas para los servicios y comunicaciones de emergencia [1].

Las redes de comunicación denominadas Public Protection and Disaster Relief (PPDR) surgen de la iniciativa de colaboración entre agencias públicas de seguridad para diseñar, desarrollar y desplegar tecnologías de información y comunicaciones para apoyar a la vigilancia, la justicia penal, la seguridad pública y nacional. Este trabajo conjunto permite el despliegue oportuno de redes optimizando capacidad y velocidad de respuesta [2].

Las redes y tecnologías PPDR, implementadas de manera correcta, permiten reducir o contener las amenazas a la seguridad pública, además de reducir costos provocados por posibles pérdidas de vida y daños en distintas infraestructuras. A medida que avanza el tiempo se hace cada vez más necesario la implementación de redes PPDR ya que la frecuencia e intensidad de los desastres, tanto naturales como causados por el hombre, aumentan cada vez más [2].

La PPDR involucra una amplia gama de servicios referentes a la seguridad, la ley, el orden, la protección sobre la vida, la propiedad tanto pública como privada, y el socorro en caso de emergencias y desastres. Según la UIT (Unión Internacional de las Telecomunicaciones), las PPDR se basan en dos componentes que se definen a continuación [1]:

- **Radio comunicaciones para Protección Pública (Public Protection):**
Estas son utilizadas por las agencias y centros de seguridad responsables de garantizar la protección de la vida y la propiedad, de atender las situaciones de emergencia, y mantener la ley y el orden.
- **Radio comunicaciones para Socorro de Desastres (Disaster Relief):**
Estas son utilizadas por los entes encargados de resolver emergencias de orden mayor que afecten el funcionamiento de la sociedad y/o representen una amenaza real y generalizada hacia el medio ambiente, la propiedad, la salud y la vida; desembocando en procesos a largo plazo buscando socorrer a las víctimas del suceso.

Los entes responsables de proveer los servicios de PPDR, además de ser los primeros en responder una llamada de auxilio, son las primeras fuerzas que se ocupan de hacer llegar dicho llamado a las autoridades competentes de manera óptima y que se de una respuesta oportuna. Al haber una infraestructura sólida de comunicaciones PPDR, el alcance de las autoridades, rescatistas y demás personal de auxilio puede ser más amplio e inclusive, cubrir zonas aledañas en las que también se requieran sus servicios.

El Gobierno es responsable de brindarles a los trabajadores de los centros de emergencia y agencias públicas de seguridad, las mejores herramientas para que puedan hacer su trabajo de la mejor manera y considerando el peligro al que están expuestos al realizarlo. Dentro de dichas herramientas están las comunicaciones PPDR, las cuales deben ser provistas por la ley de manera obligatoria y asegurar que cumplen un estandar de calidad que garantice su óptimo funcionamiento [1].

A medida que avanza el tiempo, las tecnologías evolucionan y con ellas las necesidades de mejorar significativamente los servicios que consumimos diariamente. Dentro de dichos servicios se encuentran las comunicaciones PPDR, que requieren de un constante aumento en la capacidad de datos tanto fijos como móviles para mejorar la velocidad de transmisión y así optimizar la respuesta de las fuerzas de rescate [1].

Por su naturaleza, las operaciones de PPDR pueden obtener ciertos beneficios o ventajas significativas, esto debido a que dichas operaciones tienen la capacidad para acceder a una gran cantidad de información como: bases de datos informativas, acceso a mensajes instantáneos, acceso a multimedia (imágenes y videos) de alta calidad, servicios de localización y mapeo, manejo de inteligencia artificial, entre otros. En un futuro ciertas

tecnologías tendrán un impacto relevante en las operaciones que se lleven a cabo en las PPDR debido a sus aplicaciones y usos en estos campos de acciones contra desastres y ayuda civil, estas tecnologías serán grandes despliegues de robótica como: Comunicación de máquina a máquina (M2M), Internet de las cosas (IoT), entre otras [1].

En aplicaciones PPDR, caso particular de la transmisión de imágenes y videos de alta calidad en tiempo real, se pueden necesitar unas tasas de bits mucho más elevadas que las que actualmente se requieren. A pesar de que sistemas de banda estrecha y banda ancha sigan usándose y operando de manera simultánea y en conjunto para cumplir con los requisitos de PPDR en un corto plazo, se evidencia la necesidad de la implementación de redes banda ancha en su totalidad para soportar las capacidades de multimedia que requieren una mayor capacidad y velocidad de datos. Una asignación adecuada de espectro nivel nacional es necesaria para poder cumplir con dichas necesidades de manera óptima y productiva. [7]

Las tecnologías móviles que son capaces de recibir datos e información que hace uso de un ancho de banda considerable, pueden ser de gran utilidad para las personas y/o máquinas que responden emergencias. Las agencias de PPDR necesitan redes de banda ancha móvil que les permitan compartir videos en tiempo real, mapas y planos detallados, fotografías de alta resolución y otros tipos de archivos que se hacen necesarios para las operaciones realizadas en este entorno [8].

Al día de hoy, todos los entes y organizaciones de misión crítica manejan sus propias redes centradas en voz en distintas o variadas bandas de frecuencia y tecnologías, por esto dichas redes no son interoperables entre si. Este problema de interoperabilidad puede ser superado y enfrentado en PPDR de banda ancha, solo si la red PPDR de banda ancha opera en un estándar común a nivel nacional [9].

2.3 REQUISITOS TÉCNICOS PARA REDES PPDR

A. Características ideales de las redes de comunicación PPDR:

Las redes de comunicación PPDR son diferentes de las redes comerciales que se prestan para el público en general. Esto se debe principalmente al tráfico de información que fluye a través de ellas, debido a la intencionalidad y consecuente criticidad de su uso. Las

características ideales que deben tener las redes de comunicación PPDR son [10], [11], [12]:

1. **Disponibilidad:** Esta es indispensable ya que la efectividad de las PPDR se ve afectada por el tiempo de inactividad aun en momentos críticos donde deberían operar eficientemente. Las redes de PPDR deberían estar disponibles en un 99.99% de veces que sean necesarias para así poder prestar un servicio oportuno en casos de emergencia extrema.
2. **Capacidad:** La red PPDR debe tener suficiente capacidad y redundancia para manejar el tráfico durante las condiciones operativas máximas sin sobrecargarse ni impidiendo que las operaciones se realicen con la mayor fluidez posible.
3. **Cobertura:** La cobertura de las redes de comunicación PPDR debe ser muy amplia. Debe proporcionar cobertura en toda el área geográfica donde se esté llevando a cabo una misión, que puede ser de las dimensiones de una red de área metropolitana o incluso aún más amplia. Además, la cobertura en interiores también debe estar disponible, especialmente en sótanos y túneles o en infraestructuras grandes y abarrotadas donde puede que sea difícil la comunicación.
4. **Fácil y rápidamente implementables:** Las redes antiguas ya existentes se rompen durante los desastres y emergencias, por lo tanto, las redes de comunicación PPDR deben ser fáciles y rápidamente implementables para poder sustituirlas con la mayor facilidad posible por nuevas en caso de daños a estas.
5. **Interoperabilidad:** La interoperabilidad es un requisito crucial de las redes de comunicación PPDR para la operación y cooperación efectiva y eficiente entre las agencias de PPDR. La interoperabilidad implica que las agencias PPDR pueden compartir información continuamente entre sí en todo momento. De tal manera que si los sistemas y redes PPDR no son interoperables puede no se realice una debida transferencia de datos he implica a su vez que no haya fluidez ni eficiencia en las bases de información que manejan entre agencias y entes de este sector.
6. **Movilidad:** Las redes de comunicación PPDR son desplegadas en un entorno altamente dinámico, lo que se traduce en una amplia variedad de requisitos de movilidad. Por lo tanto, las redes de comunicaciones PPDR son generalmente inalámbricas y de esta manera proporcionan una mejor movilidad.

7. **Actuación:** La respuesta a las redes de comunicaciones PPDR deben ser en tiempo real y tener baja latencia.
8. **Calidad de servicio:** Las redes PPDR deben cumplir con unos altos estándares QoS para que las misiones no se vean afectadas por la mala calidad, ya que lo que está en juego es de alta importancia y la mayoría de las comunicaciones son de misión crítica en naturaleza.
9. **Confiabilidad:** Las redes de comunicación PPDR deben ser confiables como debería ser requerido para operar en ambientes hostiles.
10. **Seguridad:** Las comunicaciones a través de las redes de comunicaciones PPDR solo deben ser escuchadas por el destinatario, esto para la seguridad y propósitos de confidencialidad.
11. **Escalabilidad y reconfiguración:** La escala y naturaleza de cada desastre es diferente, por lo tanto, las redes de comunicaciones PPDR implementadas, deberían ser fácilmente configurables para adaptarse a estos requisitos.

B. Entorno operativo:

Las actividades de las PPDR están presentes en todo el mundo y son de naturaleza continua. Se extiende desde la actividad rutinaria de seguridad y vigilancia cotidiana hasta el alivio de desastres específicos para cada evento. Según el tipo de actividad, existen tres operaciones distintas en los entornos definidos que imponen diferentes requisitos sobre el uso de los servicios PPDR [13].

- **Día a día:** Las operaciones de rutina que realizan las agencias de PPDR dentro de su zona. Estas operaciones generalmente se encuentran dentro de las fronteras nacionales.
- **Grandes emergencias o eventos públicos:** Las operaciones deben ser organizadas por las agencias PPDR además de las operaciones de rutina en caso de que existan grandes eventos de emergencia o eventos públicos, la talla y naturaleza de cada evento podría requerir recursos adicionales de jurisdicciones adyacentes, agencias transfronterizas u organizaciones Internacionales.
- **Desastres:** Existe una necesidad repentina de operaciones para las PPDR en caso de desastres, estos desastres pueden ser naturales o debido a las actividad humana. Las efectivas operaciones PPDR transfronterizas o la ayuda mutua internacional podría ser beneficioso en este entorno operativo.

C. Servicios de comunicaciones PPDR:

La naturaleza y el alcance de las comunicaciones PPDR varían con el evento en cuestión. Puede abarcar desde comunicaciones de voz básicas hasta comunicaciones de video y datos complejas. A continuación, se proporciona un breve resumen sobre diversas formas de servicios de comunicación en una red PPDR:

Servicio de voz: El servicio de voz es el principal para la comunicación PPDR. Los elementos clave del servicio de voz en situaciones de misión crítica son [14]:

- **Modo directo:** Proporciona a las agencias de PPDR la capacidad de comunicarse de unidad a unidad cuando están fuera del alcance de una red inalámbrica o cuando trabajan en un área confinada donde se requieren comunicaciones directas de unidad a unidad, sin utilizar la infraestructura de la red, en caso de falla total de la misma o de indisponibilidad de la red.
- **Push-to-Talk (PTT):** Brinda la capacidad de dirigirse a un individuo o grupo en particular con solo presionar un botón. Esta es una herramienta de ahorro de tiempo en la que los primeros respondedores confían en situaciones urgentes.
- **Llamada grupal:** Proporciona comunicaciones de uno a muchos miembros de un grupo y es de vital importancia para las PPDR. La capacidad de definir y redefinir grupos de conversación rápidamente es esencial para un trabajo en equipo eficaz.
- **Identificación del hablante:** Proporciona la capacidad a un usuario para identificar quién está hablando en un momento dado y podría equipararse al identificador de llamadas disponible en la mayoría de los sistemas celulares comerciales de hoy.
- **Alerta de emergencia:** Es esencialmente un botón de alarma con prioridad principal que indica que un miembro del grupo necesita comunicarse de inmediato.
- **Calidad de audio:** Este es un elemento vital para la voz de misión crítica. El oyente debe ser capaz de entender sin repetición, identificar al hablante, detectar el estrés en la voz de un hablante y escuchar los sonidos de fondo sin interferir con las principales comunicaciones de voz.

Servicios de datos: Mientras los servicios de voz seguirán siendo un componente importante en las operaciones de las PPDR, se espera que los servicios de datos y video desempeñen cada vez más un papel importante. Las agencias de PPDR hoy en día están usando aplicaciones de datos de banda estrecha como mensajes de estado predefinidos, transmisiones de datos de formularios y mensajes, acceso a bases de datos y aplicaciones de datos de banda ancha como mensajes cortos, correo electrónico y video comprimido. Existe una necesidad de tecnología de banda ancha para transmitir video o imágenes de alta resolución, para usar sistemas de información geográfica (GIS) y para acceder a Internet a altas velocidades. Los servicios de datos se utilizan para proporcionar una gran cantidad de aplicaciones que pueden tener requisitos muy diferentes en términos de capacidad, puntualidad y solidez del servicio de datos. La Tabla 2.1 muestra las diversas necesidades de las aplicaciones de datos.

Tabla 2.1. Necesidades de las aplicaciones de datos [14].

Servicio	Rendimiento	Puntualidad
Correo electrónico	Medio	Bajo
Imágenes	Alto	Bajo
Mapeo digital /+Servicios de información geográfica	Alto	Variable
Servicios de localización	Bajo	Alto
Video (tiempo real)	Alto	Alto
Video (escaneo lento)	Medio	Bajo
Acceso a la base de datos (remota)	Variable	Variable
Replicación de base de datos	Alto	Bajo
Supervisión de personal	bajo	alto

D. Tecnologías que se usan para los servicios de las PPDR basados en tasas de datos:

Puede haber tres tipos de tecnologías que se utilizan para las PPDR en función de las velocidades de datos [15]:

- Narrowband (NB) Banda estrecha: Velocidad o velocidad de bits de hasta 64 kbps, que es un canal de voz en un sistema de radio
- Widebanda (WB) Banda ancha: Velocidades de datos de varios cientos de kbps (por ejemplo, en el rango de 384-500 kbit /s)
- Broadband (BB) Banda ancha: Velocidades de datos en el rango de 1-100 Mbit / s

Si bien los sistemas de banda estrecha ofrecen un amplio conjunto de servicios centrados en la voz, las capacidades de transmisión de datos de los sistemas de banda estrecha son bastante limitadas. Los sistemas de banda ancha se utilizan para proporcionar servicios de datos. La Tabla 2.2 muestra la clasificación de la aplicación PPDR basada en las tecnologías anteriores:

Tabla 2.2 Clasificación de la aplicación PPDR [15].

Aplicación	Características	Ejemplo de PPDR
1. Narrowband (NB) BANDA ESTRECHA		
Voz	Persona a persona	Llamada selectiva y direccionamiento
	Uno a muchos	Despacho y comunicación grupal
	operación de conversación / modo directo	Grupos de portátil a portátil (móvil-móvil) en las proximidades sin infraestructura
	push-to-talk	push-to-talk
	Acceso de instalación a la ruta	Push-to-talk y acceso prioritario

	e voz	selectivo
	Seguridad	Voz
Telefax	Persona a persona	Estado, mensaje corto
	Uno a muchos (Radio difusión)	Alerta de despacho inicial (p. ej.: dirección, estado del incidente)
Mensaje	Persona a persona	Estado, mensaje corto, e-mail corto
	Uno a muchos (Radio difusión)	Alerta de despacho inicial (p. ej: dirección, estado del incidente)
Seguridad	Prioridad/acceso instantáneo	Hombre bajo el botón de una alarma
Telemetría	Estado de ubicación	Información de latitud y longitud de GPS
	Datos sensoriales	Telemetría/estado del vehículo
		EKG (electrocardiógrafo) en el campo
Base de Datos	consulta de registros basados en formularios	Acceder a los registros de licencia del vehículo
Registro Inicial	Informe de incidentes basados en formularios	Presentación de informe de campo
2. Widebanda (WB) BANDA ANCHA		
Mensajes	correos electrónicos posiblemente con archivos adjuntos	Mensajes de correo electrónico de rutina

Talk Around / Modo directo	comunicación directa de unidad a unidad sin infraestructura adicional	Teléfono directo al teléfono, comunicación localizada en escena
Base de Datos Registro Medio	formularios y consulta de registro	Acceder a registros médicos
		Listas de personas identificadas / personas desaparecidas
		SIG (sistemas de información geográfica)
Transferencia de archivos de texto	Transferencia de datos	Informe de llenado de la escena del crimen
		Información del sistema de gestión de registros sobre delincuentes
		Descargas de información legislativa
Transferencia de imagen	descarga / carga de imágenes fijas comprimidas	Biometría (huellas dactilares)
		Foto de identificación
		Construcción de mapas de distribución
Telemetría	estado de ubicación y datos sensoriales	Estados de vehículos
Seguridad	Acceso prioritario	Cuidado critico
Video	descargar/cargar video comprimido	Video clips
		Supervisión del paciente (puede requerir un enlace dedicado)
		Video de incidente en curso
Interactivo	determinación de ubicación	Sistema de 2 vías

		Datos de ubicación interactivos
3. Broadband (BB) BANDA ANCHA		
Acceso a base de datos	Acceso a intranet/internet	Acceder a planos arquitectónicos de edificios, ubicación de materiales peligrosos
	Buscando en la web	Directorio de navegación de la organización PPDR para el número de teléfono
Control de robótica	Control remoto de dispositivos robóticos	Robots de recuperación de bombas, robots de imágenes / video
Video	transmisión de video, transmisión de video en vivo	Comunicación de video de cámaras con clip inalámbricas utilizadas en la construcción de rescate de incendios
		Imágenes o video para ayudar a la asistencia médica remota
		Vigilancia de la escena del incidente mediante dispositivos robóticos fijos o controlados remotamente
		Evaluación de escenas de incendios / inundaciones desde plataformas aerotransportadas
Imágenes	Imágenes de alta resolución	Descargar imágenes satelitales de exploración de la tierra

E. Modelos de red PPDR:

Además de las redes PPDR dedicadas, con el avance de la tecnología, existen diferentes modelos adoptados en varios países para utilizar de manera óptima el recurso del espectro. Las redes PPDR pueden clasificarse en dos tipos generales:

- a. Modelos basados en el espectro
- b. Modelos basados en la estrategia de despliegue de red

El ecosistema 3GPP LTE o LTE-Advanced ha madurado y, en consecuencia, las redes comerciales se están desplegando rápidamente en todo el mundo. Basado en estándares abiertos como 3GPP LTE o LTE-Advanced, los sistemas PPDR de banda ancha se pueden realizar a través de varias formas como: El despliegue de redes dedicadas de PPDR usando espectro exclusivo, el acceso de prioridad sobre redes comerciales, o mediante un enfoque híbrido usando espectro dedicado en una red comercial dividida o una combinación de redes dedicadas y comerciales. Al comparar las diferentes alternativas, se puede ver que cada enfoque ofrece ventajas y desventajas. Finalmente, la elección de la implementación es un asunto nacional. [16]

Modelos basados en el espectro: La banda ancha móvil de seguridad pública puede entregarse a través de una red dedicada, red comercial o una combinación de red dedicada y comercial (red híbrida) [17].

- **Dedicado:** En este enfoque, el espectro dedicado se asigna a la red PPDR. El espectro dedicado puede ofrecer disponibilidad, control y seguridad. Por razones económicas, el espectro dedicado es compartido por varias agencias de PPDR (policía, bomberos, servicios médicos de emergencia, etc.) y otras organizaciones de usuarios de comunicación crítica.
- **Comercial:** En este enfoque, no se asigna espectro a la red PPDR. El espectro se comparte con las redes comerciales en todo el país.
- **Híbrido:** En este modelo, el espectro se puede compartir con el operador de red comercial en algunas áreas y el espectro dedicado para las restantes áreas. El espectro se puede compartir con los operadores de redes comerciales para proporcionar una mejor cobertura mediante el aprovechamiento de las redes ya existentes en áreas menos pobladas (áreas rurales) a un menor costo. Sin embargo, para las áreas densamente pobladas (áreas urbanas), el espectro dedicado se puede asignar a PPDR.

Modelos basados en la estrategia de despliegue de red: Según los modelos basados en estrategias de implementación de redes, al momento de implementar una red PPDR se puede hablar de tres tipos de infraestructuras de red [18]:

- I. **Infraestructura de red dedicada:** Estas redes proveen servicios móviles de banda ancha, y son planificadas, diseñadas, construidas y operadas por agencias PPDR/PS-LTE.
- II. **Infraestructuras de red comerciales:** Estas redes están basadas en la infraestructura de red común que comparten los servicios PPDR y seguridad pública, con los suscriptores de redes comerciales. En esta infraestructura se ve una clara diferencia con respecto a los servicios de banda ancha móvil PPDR ya que cuentan con restricción de acceso de usuario, posee una calidad de servicio (QoS) destacable, también cuenta con un modelo de reserva de recursos según la demanda, aplicaciones dedicadas, entre otras.
- III. **Infraestructura de red híbrida:** Esta infraestructura de red se basa, en parte en una infraestructura dedicada y por otra parte, en una estructura comercial. Su despliegue geográfico está dividido entre las redes PPDR y las redes comerciales, además puede basarse en varios tipos de arquitecturas de Redes de Operadores Móviles Virtuales (MVNO), las cuales son:
 - **Servicios Over-the-top:** Los servicios de PPDR/PS en LTE pueden ser implementados como aplicaciones sobre banda ancha móvil (MBB). Aquí, la lógica de negocio se encuentra conectada a las redes mediante Internet o VPN.
 - **Modelo MVNO:** Este modelo se caracteriza por hacer una distinción entre el proveedor del servicio de seguridad pública y el proveedor del servicio de red.
 - **Modelo de intercambio RAN (Red de Acceso por Radio):** En este modelo la red de acceso por radio común es compartida por los servicios tanto comercial como de seguridad pública, más sin embargo los servidores principales y de aplicaciones que alojan los servicios PPDR no son compartidos.

2.4 TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN REDES PPDR

Dentro de las tecnologías utilizadas para la comunicación PPDR móvil se encuentran las que se explican a continuación, sin embargo solo se describirán resaltando algunas de

sus características principales, ya que las características detalladas se podrán consultar en el cuadro comparativo que se presenta en la tabla 2.3.

2.3.1. Tecnología IDRA

La tecnología IDRA o Sistema radioeléctrico de despacho integrado, por sus siglas en Inglés, se utiliza principalmente en comunicaciones móviles enfocadas en negocios, aunque también se utiliza en aplicaciones de seguridad pública. Se puede establecer conexión entre usuarios de la Red Telefónica Pública Conmutada (RTPC) y abonados móviles de IDRA satisfaciendo necesidades de comunicación, según sea el caso, de voz, voz y datos, o datos nada más [19].

IDRA cuenta con una variedad de servicios divididos según la categoría en la que se encuentren. En primer lugar, están los tele-servicios en los que se encuentra la llamada punto a punto, llamada punto a multipunto (tanto bidireccional como unidireccional), llamada de interconexión dúplex y llamada de despacho dúplex. Estos tele-servicios se caracterizan por proveer una conversación cifrada y clara.

En segundo lugar, se encuentran los servicios portadores que soportan pueden soportar distintos tipos de datos en llamadas individuales, llamadas en grupos y llamadas de difusión. Por último, se encuentran los servicios suplementarios de telefonía. En estos servicios se puede encontrar la llamada a abonado ocupado/no contesta, prohibición de llamadas entrantes/salientes, presentación de identidad de llamada entrante, restricción de identidad de llamada entrante, guía de operación vocal, llamada de consulta de lista, llamada en espera, aviso de tasación, servicio de mensajes cortos, monitor de tráfico de llamadas, monitor de llamadas con entrada retardada, llamada con prioridad, comunicación conferencia, selección de zona, llamada a subgrupo, acceso a multizona y acceso a la Red de Telefonía Pública conmutada (RTPC) [19].

La seguridad en el sistema IDRA se garantiza mediante la autenticación continua de la información y la identificación de los participantes de la conexión, ya sea individual y/o temporal. Así mismo, los protocolos de comunicación se basan en comunicación PTT (PushToTalk) y se estructuran en 3 capas. En la primera capa se especifica la estructura física del canal, en la segunda capa se especifica el control de la comunicación entre la estación móvil y la infraestructura, y en la tercera capa se hace gestión de la conexión, de la movilidad y del recurso radioeléctrico.

2.3.2. Tecnología EDACS

La tecnología EDACS o Sistema de comunicaciones de acceso digital avanzado, por sus siglas en Inglés, fue creada para satisfacer las necesidades de sectores como la seguridad pública, empresas estatales, industria y usuarios comerciales mediante un servicio radioeléctrico bidireccional con concentración de enlaces con funcionamiento en frecuencias de ondas métricas (25 KHz o 12 KHz) o decimétricas (800 MHz o 900 MHz) [19].

Los servicios que se pueden ofrecer con esta tecnología dependen de los modos de comunicación que se utilicen. Las señales de voz digitales soportan todos los tipos de llamadas, tanto individuales como en grupo. Los datos digitales únicamente soportan el servicio de llamadas individuales. Además de estos modos de comunicación, existe la posibilidad de encriptar la información digital aumentando considerablemente el nivel de seguridad sin pérdida de calidad.

EDACS se ha desarrollado como una tecnología de vida ampliada, que es compatible con tecnologías anteriores, presentes y futuras, y está en constante evolución para dar cabida a nuevos servicios a través de sistemas con gran eficacia espectral. Así mismo, El acceso ágil e integrado mediante una plataforma radioeléctrica permite un intercambio de información rápido y seguro entre ordenadores normales, siendo este el objetivo de esta tecnología.

2.3.3. Tecnología DIMRS

La tecnología DIMRS o sistema radio-móvil digital integrado, por sus siglas en Inglés, integra de manera completa diversos servicios de comunicaciones radioeléctricas telefónicas, de radio búsqueda, y de despacho sobre una única arquitectura. El sistema DIMRS ayuda tanto a los usuarios que necesitan un sistema que integre servicios mejorados como también a los usuarios que no pueden hacer uso de sistemas autónomos de radio búsqueda, telefonía móvil, despacho por radio y comunicación de datos por vía modem [19].

Los canales de voz utilizan codificación VSELP (Vector sum excited linear prediction). La corrección de errores se lleva a cabo mediante la variación de la velocidad, por la cual las

modulaciones MAQ-16 codificadas y decodificadas se llevan a cabo selectivamente a los bits de la información de conforme a su importancia porcentual. Por otra parte los canales de datos utilizan un protocolo para aplicaciones en modo circuito de datos como las pertinentes a los computadores, el procedimiento para imágenes y la transferencia de archivos. El protocolo de envío y transmisión de datos proporciona un tren de paquetes dúplex con una velocidad de 7,2 kbit por segundo

2.3.4. Tecnología TETRAPOL

TETRAPOL es una tecnología de radio profesional espectralmente eficiente, que ofrece servicios de datos y voz sobre banda estrecha, su banda de utilización está por debajo de 1GHz, con una separación de las portadoras de 12,5 kHz, aunque se prevé una evolución a 6,25 kHz. Esta tecnología posee tres modos de funcionamiento, el modo red en el que el móvil está bajo la cobertura y el control de la infraestructura, el modo directo en el que los móviles se comunican directamente entre sí y el modo repetidor en el que los móviles se comunican a través de un repetidor independiente.

Las comunicaciones de radio utilizan tramas de 160 bits, durante 20 ms, con canales físicos que ofrecen una cadencia de 8 kbit/s. Los canales lógicos están organizados a partir de una súper trama de 200 tramas consecutivas durante 4 s. Al transmitir la información se codifica según un esquema que depende del tipo de trama a la que se le adiciona redundancia para proteger la información, Hay cuatro tipos de tramas: palabras, datos, acceso e interrupción.

Esta tecnología utiliza cifrado de extremo a extremo, se utilizan codecs para las comunicaciones móviles, lo que se traduce en la utilización de una codificación simple, un tiempo de respuesta más rápido y sin eco. Adicional a esto, TETRAPOL ha obtenido muy buenos resultados bajo condiciones operativas específicas, como los ambientes ruidosos.

2.3.5. Tecnología AMSF

La tecnología AMSF o Sistema de acceso múltiple con salto de frecuencia, por sus siglas en Inglés, fue desarrollada en Israel, donde se realizan pruebas continuas para evaluar su evolución. El objetivo de su creación es la mejora en la eficiencia espectral para prestar servicios de comunicaciones privadas por radio (PMR). Dichos servicios son el campo de operación de los sistemas AMSF, como también lo son algunas aplicaciones comerciales [19].

La tecnología AMSF está basada en una técnica radioeléctrica digital la cual permite que los sistemas radioeléctricos móviles tengan una eficacia espectral lo más óptima posible. Esta técnica de comunicación y sus bases están construidas con una mezcla entre AMDT y el acceso múltiple con salto de frecuencia.

Las reglas del salto se desarrollan para obtener gran eficacia espectral en el sistema móvil y para el buen funcionamiento en canales móviles interferidos. La consistencia de la capa física de la tecnología AMSF se usa para mejorar el espacio en su capacidad, introduciendo un esquema de reutilización celular con un pequeño factor de reutilización de frecuencia.). La interfaz aérea (AMSF) especifica los canales de tráfico y los canales de control (bidireccionales), de estos el único que tiene saltos es el referido a los canales de tráfico.

Esta tecnología, presta servicios relacionados con la telefonía, los servicios portadores de datos y aplicaciones como localización automática de vehículos (AVL), en tasas de transmisión que van desde los 1,2 kbit/s a los 28,8 kbit/s.

2.3.6. Tecnología P25

La tecnología P25, también llamada ASTRO 25 o PROYECTO 25, es un estándar de comunicaciones para misión crítica con utilidad en sistemas de radio móvil troncalizado [20]. Una de sus principales características es que puede prestar dos tipos de servicios, obligatorios y normalizados. Cuando un servicio es obligatorio se debe prestar dándole especial prioridad, lo que no ocurre cuando corresponde a una opción normalizada.

P25 define dos tipos de sistemas, los no troncales (convencionales) que son los que no tienen una gestión centralizada del funcionamiento y en donde todo el funcionamiento es controlado por los usuarios del sistema y posee dos modos de funcionamiento (directo y repetición); por otro lado están los sistemas troncales que son los que proporcionan la gestión de todos los aspectos del funcionamiento del sistema radioeléctrico, incluidos el

acceso al canal y el encaminamiento de la llamada, el funcionamiento de este sistema es controlado automáticamente.

Este sistema de radio comunicaciones troncalizado de área extendida emplea técnicas de transmisión y a su vez de control y señalización digital en el uso de canales de voz. Su versión más actual es la 7.17. Cuenta con un método de acceso FDMA2, Modulación C4FM, Estándar P25, Velocidad de canal 9.6 kHz y Ancho de Banda 12.5 kHz [20].

P25 opera en las bandas de frecuencias [21]: VHF: 132 – 174 MHz, UHF: 400 – 520 MHz y 806- 871 MHz. Las bandas de operación pueden variar de acuerdo a las características de los fabricantes. Su eficiencia espectral es para la Fase 1: FDMA con ancho de banda de 12,5 KHz / 2 Canales en 25 KHz / No trunking. Y para la Fase 2: TDMA en cada canal de 12,5 KHz / 4 Canales en 25 KHz [22].

2.3.7. Tecnología DMR

La tecnología DMR o Radio Digital Móvil, por sus siglas en Inglés, es un estándar para comunicaciones de voz digital. Fue publicado por ETSI con dos niveles (Tier 1 2005 & Tier 2 2015) con propósitos de interoperabilidad entre proveedores [19]. Dentro de sus principales características se encuentran: Múltiples grupos de conversación, Gráficos de tiempos duales, Mensajería de texto, Roaming, Repetidores remotos IP programables, APRS (Automatic Packet Reporting System). Su método de acceso es TDMA, posee un sistema trunking, 4 canales por portadora, un ancho de banda de 25 KHz (dos canales de 12,5 KHz), utiliza frecuencias entre 30 MHz – 1GHz, posee métodos de comunicación: Full – Dúplex / Semi Dúplex, una tasa de transmisión de datos: 28,8 Kbps y una velocidad de transmisión datos de 9,6 Kbps [23].

DMR posee una infraestructura de red basada en tres capas (layers), capa física, capa de datos y capa de control, Utiliza FDMA para el nivel 1, TDMA para el nivel 2 (conexiones IP) y TDMA para el nivel 3 en modo Trunking. Normalmente opera en las bandas de frecuencias en VHF: 136–174 MHz, VHF: 136 – 174 MHz, UHF: 350 – 520 MHz [24], [25].

Normalmente en un canal de 1 x 25 KHz con un solo repetidor FM se hace posible una conversación. En cambio con el mismo espectro y con dos repetidores DMR, se logran 4 conversaciones con una modulación 4FSK.

DMR tier 1 hace referencia al modo sin licencia y usa comunicación en modo directo sin necesidad de utilizar infraestructura. DMR tier 2 opera en bandas de frecuencia con

licencia y se utilizan repetidores para ampliar el area de cobertura. DMR tier 3 ofrece lo mismo del tier 2 pero es compatible y migrable a trunking digital.

2.3.8. Tecnología TETRA:

TETRA o sistema terrestre troncalizado por radio, por sus siglas en Inglés, es una tecnología móvil radioeléctrica de una muy excelente calidad que ha sido diseñada para usuarios profesionales, como lo son los entes que se encargan de los servicios de emergencias y el transporte público. TETRA sigue unas delimitaciones radioeléctricas de servicios móviles que garantizan una capacidad absoluta, que contempla las comunicaciones con agrupación de enlaces, comunicaciones sin agrupación de enlaces y comunicaciones lineales de móvil a móvil. Ofreciendo una gran variedad de facilidades que pueden ir desde ciertos servicios tales como voz, datos en el modo circuito, mensajes cortos y los que están en el modo paquete. Esta tecnología aguanta una gama exclusivamente alta y amplia de servicios suplementarios, de los cuales muchos de estos son exclusivos de TETRA [19].

Esta tecnología es creada para trabajar en las bandas de frecuencia por debajo de 1 GHz y tiene una estructura de canal de 25 kHz, lo que le posibilita amoldarse eficientemente en las bandas de frecuencia de los sistemas de telefonía privada PMR que existen actualmente. Las características abarcan servicios de telecomunicaciones de voz y datos en paquetes optimizados. Sus servicios de comunicación abarcan las llamadas punto a punto, punto a multipunto y punto a multipunto unidireccional.

La tecnología TETRA opera en la región de Europa en las bandas de frecuencias de 380-390/390-400 MHz, estas bandas se destinan a los servicios de emergencia y seguridad. Así mismo, las bandas de frecuencia de 410-420/420-430 y 450-460/460-470 MHz, están asignadas a los servicios de terceros y de redes móviles troncales y los rangos de 870-888/915-933 MHz están asignados a sistemas móviles para voz y datos [26].

La velocidades de transmisión van desde los 2,4 a los 28,8 Kb/s, TETRA tiene una eficiencia espectral mayor para los sistemas de comunicaciones móviles (4 a 1 en comparación a sistemas analógicos), gracias a que implementa TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo) de 4 ranuras [27].

La arquitectura de la tecnología TETRA comprende estaciones base (BSs), estaciones móviles (MS), estaciones de línea (LS) y unidades de administración de red centralizadas.

Adicional a esto, permite la conexión de con otras redes tales como Redes de Datos Empaquetados (PDNs), Red Telefónica Publica Conmutada (PSTN), Redes Telefónicas Privadas (PTNs) y Red Digital de Servicios Integrados (ISDN) [28].

Dentro de los tipos de terminales se encuentran principalmente equipos terminales móviles con un uso mayoritario en vehículos y portátiles con capacidad de conexión a un computador personal a través de la interfaz del terminal a la red TETRA [29].

TETRA usa una modulación de fase diferencial $\pi/4$ – DQPSK con 8 símbolos posibles cada uno con una distancia de $\pi/4$. Las ventajas de $\pi/4$ – DQPSK son la alta eficiencia espectral, dado que la información se transmite en las transiciones de fase sin crear amplitudes nulas, con lo que se facilita el diseño de amplificadores lineales de Radio Frecuencia [30].

Las tramas de tráfico para voz son de 30 ms y cada una tiene 137 bits lo que conlleva a una velocidad total de 4,567 kbit por segundo. Así mismo, para transmitir datos se alcanzan tasas del orden de los 19,2 kbit/s. Aunque también se pueden soportar servicios digitales con una velocidad de 28 kbit /s.

2.3.9. Tecnología IDEN

IDEN es una tecnología inalámbrica propietaria de Motorola que combina capacidades de telefonía celular, radio digital y modem de datos/fax en una sola red [31]. Su principal característica radica en la comunicación directa que permite pulsar un botón para poder establecer una llamada o conferencia con los usuarios del sistema, algunos terminales incluyen características GPS (Global Positioning System), muchas de las cuales dependen de la capacidad de la red; Motorola es quien provee tanto la infraestructura como los terminales móviles de esta tecnología

Su banda de operación está entre los 800 MHz – 900MHz - 1500 MHz utilizando redes TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo). Posee una modulación de señal digital M16-QAM para entregar 64 Kbps sobre un canal de 25 KHz [32].

Algunas de las zonas donde se usa iDEN son: América del Norte, Central y del Sur con países como: Estados Unidos, México, Brasil, Perú, Puerto Rico, Colombia, Ecuador, El Salvador, Canadá y Argentina, Arabia Saudita, Corea del Sur, Filipinas, China, Israel, Japón, Jordania, India y Singapur y Guam

2.3.10. Tecnología LTE

La tecnología LTE (Long Term Evolution) es un estándar de comunicación móvil que tiene una capacidad de transmisión de banda ancha conocido en el sector comercial como tecnología 4G. Ofrece una comunicación digital IP de tipo packet data. Para entornos de radio profesional dicho estándar ayuda a las necesidades de transmisión de altos volúmenes de datos. Estos datos, no son posibles de transmitir utilizando las tecnologías actuales de banda estrecha como TETRA o P25 [33], [34], [35].

Uno de los elementos clave de LTE es el uso de OFDM, multiplexación por división de frecuencia ortogonal y SC-FDMA (acceso múltiple por división de frecuencia única) [36], dentro de sus principales características están: Alta eficiencia espectral, baja latencia, separación del plano de usuario y el plano de control, ancho de banda adaptativo, compatibilidad con tecnologías de 3GPP, red de frecuencia única OFDM y grandes velocidades de datos [37].

LTE típicamente opera en un espectro de frecuencia de 700MHz a 2.6GHz. Un espectro más bajo como el de 700MHz llevará una señal en un área más grande, alcanzando así a un mayor número de personas con menos cambios de infraestructura [38]. Adicional a esto, posee terminales fijos como estaciones bases, móviles y portátiles, su modulación se hace a través de QPSK (=4QAM) con 2 bits por símbolo, 16QAM con 4 bits por símbolo y 64QAM con 6 bits por símbolo [39], [36], [40].

2.5 CUADRO COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS ANALIZADAS

Acontinuación se encuentra en la Tabla 2.3 el cuadro comparativo que resalta las características de las tecnologías abordadas anteriormente, e inclusive describen algunas ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Tabla 2.3. Cuadro Comparativo de las Tecnologías Analizadas

Fuentes: [20], [19], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [39], [40], [41], [42], [43].

	IDRA	EDACS	DIMRS	TETRAPOL	AMSF	Proyecto 25	DMR	TETRA	IDEN	LTE	
Descripción	El sistema IDRA (Integrated Dispatch Radio System), ha sido desarrollado para ser utilizado principalmente en las aplicaciones de comunicaciones móviles orientadas a los negocios.	EDACS (Enhanced Digital Access Communications System), es un sistema de radio troncal desarrollado por General Electric y Ericsson. EDACS fue inventado por General Electric a mediados de los 80.	DIRMS (Digital Integrated Mobile Radio System), Es un sistema que integra totalmente múltiples servicios como los de comunicaciones radioeléctricas telefónicas, de radiobúsqueda y de despacho en una sola infraestructura	Tetrapol es un estandar de radio movil digital profesional para la comunicación de voz y datos digitales utilizado a través de toda Europa por las organizaciones de seguridad pública y militares.	Es una técnica radioeléctrica digital avanzada con la que se logran sistemas radioeléctricos móviles de eficacia espectral óptima. La técnica de comunicaciones subyacente es una mezcla de AMDT y AMDC.	Project 25 (P25) es un estandar de radio troncal desarrollado por The Association of Public Safety Communications Officials International (APCO-25) para la seguridad pública.	DMR (Digital Mobile Radio) es un sistema para añadir nuevos servicios de datos y voz ya que intensifica la capacidad de los canales con licencia existentes;	TETRA (Terrestrial Trunked Radio) es una especificación de radio móvil profesional y de transceptor de dos vías (walkie-talkie). Es un estándar libre promovido por la ETSI	IDEN (Integrated Digital Enhanced Network) es un estandar inalámbrico digital basado en TDMA desarrollado por Motorola. Es un tipo de radio troncalizada con beneficios de telefonía celular.	LTE (Long Term Evolution). Es un estándar de comunicaciones móviles desarrollado por la 3GPP. LTE es una nueva generación en tecnologías móviles respecto a UMTS (tercera generación o 3G) y a su vez GSM (segunda generación o 2G).	
Canales de tráfico	20K0D7W/20K WDW	16K0F1E/8K50F 1E	20K0D7W/20K WDW	4K80P1W	25K0D7W/25K WDW	8K10F1E, 5K76G1E	7K60FXE	25K0D7W/25K WDW	Sin determinar	DTCH/MTCH	
Canales de control	20K0D7W/20K WDW	20K0D7W/20K WDW	20K0D7W/20K WDW	4K80P1W	25K0D7W/25K WDW	8K10F1E, 5K76G1E(	7K60FXD	25K0D7W/25K WDW	Sin determinar	BCCH/PCCH/CCCH/M CCH/DCCH	
Bandas de frecuencias (MHz)	Utilizadas actualmente:	136-174	806-821/851-866	70-520 746-870 870-888/915-933	806-821/851-866	Sin determinar; no obstante probablemente e será 130-200 360-512 800-941	30MHz - 1 GHz	380-390/390-400	806-821 / 851-866	450-470	
	1 453-1 477/1 501-1 525	380-512						410-420/420-430		692-862	
	Uso futuro:	806-821/851-866						450-460/460-470		2300-2400	
	905-915/850-860	896-901/935-940						870-888/915-933		3400-500	
Separación de dúplex	48 MHz (banda de 1,5 GHz)	Varias (ondas métricas, 45 MHz (banda de banda de 160 MHz)	45 MHz (banda de 800 MHz)	La necesaria (bandas de 80/160 MHz) 5 ó 10 MHz (banda de 400 MHz) 45 MHz (banda de 900 MHz)	45 MHz (banda de 800 MHz)	Varias o ninguna (banda de 150 MHz) 3 y 5 MHz (banda de 400 MHz) 39 y 45 MHz (banda de 800 MHz)	Sin determinar	5-10 MHz (banda de 400 MHz)	45 MHz - 48 MHz	1,4 MHz (banda de 450 MHz)	
	55 MHz (banda de 800 MHz)	Varias ondas deci-métricas, banda de 400 MHz)						10-45 MHz (banda de 800/900 MHz)		20 MHz (banda de 2300 MHz)	
		45 MHz (bandas de 800 y 900 MHz)									
Separación entre portadoras RF (kHz)	25	25/12,5	25	12,5-10 Evolución a 6,25	25	12,5 para 8K10F1E (C4FM) 6,25 para	25	25	25	15	

						5K76G1E (CQPSK)				
Potencia radiada aparente (p.r.a) máxima en la estación de base (W): Valor de cresta	No especificado	200	No especificado	25	10 W máxima en la antena con una ganancia de antena inferior al nivel que exige la reglamentación; promedio: 10 W	500	No especificado	25	No especificado	100
Potencia radiada aparente (p.r.a) máxima en la estación de base (W): Valor medio	Típicamente 30-400	200	250	No especificado		500	No especificado	25	No especificado	50
Potencia de transmisión nominal de la estación móvil (W) Valor de cresta, valor medio: Móvil	-/2	10/10-110/110	10,4/0,5	10/10	4/1,33	Gamas de 10/10 a 110/110	No especificado	10/2,5	No especificado	80/80-90/90
Potencia de transmisión nominal de la estación móvil (W) Valor de cresta, valor medio: Portátil	Sin especificar	1/1-6/6	3,5/0,17	2/2	0,6/0,2	Gamas de 1/1 y 5/5	No especificado	1/0,25	No especificado	100-110
Radio de la célula (km):	Sin determinar	Dependiente del diseño	5-40 (dependiente del diseño)	8-28	Dependiente del diseño	7,6-35	Sin determinar	3,8-17,5	Sin determinar	5-30
– Portátil/Suburbano	Sin determinar		5	8	7-13	7,6	Sin determinar	3,8	0-4	5-30
–Portátil/Rural	20-40		40	28	>50	35	Sin determinar	17,5	Sin determinar	5-30
Técnica de cobertura de zona	Reutilización de canal celular	Reutilización de canal celular	Reutilización de canal celular	Reutilización de canal celular Difusión simultánea Diversidad de receptores (Transmisión con compartición de tiempo)	Reutilización de canal celular y sectorización	Reutilización de canal celular Difusión simultánea Votación de receptores	Reutilización de canal celular	Reutilización de canal celular	EBTS, Enhanced Base Transceiver Systems	Reutilización de canal celular
		Difusión simultanea			Diversidad de receptores, sincronismo temporal			Casi síncrono (Difusión simultánea)		
	Diversidad de receptores (Base)	Ponderación de receptores	Diversidad de receptores		Diversidad de receptores, sincronismo temporal			Transmisión con compartición de tiempo		
		Diversidad de receptores								
Método de acceso	AMDT	AMDF	AMDT	AMDF	AMSF (AMDT/AMSF)	AMDF	FDMA y TDMA	AMDT	TDMA	OFDMA, SC-FDMA, MIMO

Canales de tráfico/portadoras RF: Inicial	6	1	6	1	3	1	2	4	No especificado	5
Canales de tráfico/portadoras RF: Capacidad de diseño	3, 6, 12	1	3, 4, 6, 8, 12, etc.	1	No especificado	1	4	8	3, 6	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
Velocidad de transmisión (kbits/s)	64	9,6	64	8	36,9	9,6	9,6	36	64	100.000
Modulación	MAQ de 16 estados (M = 4)	MDFG	MAQ de 16 estados (M = 4)	MDMG	$\pi/4$ SQPSK	Familia MDP-4-c, incluye C4FM y CQPSK	4FSK	$\pi/4$ DQPSK	M16-QAM	16QAM, 64QAM, QPSK
Velocidad binaria (kbits/s)	La velocidad binaria con corrección de errores es menos que 7,467	6,5	4,2	6	4,4	4,4	4,2	4,567	4.2	9,5
Protección contra errores	No especificado	2,7	3,177	2	5,596	2,8	FEC, CRC	2,633	No especificado	FEC, MIMO
Algoritmo de codificación	No especificado	AME	VSELP (6:1)	RPCELP	IMBE/AMBE	IMBE	No especificado	ACELP	VSELP	ARQ, HARQ
Códec vocal de velocidad alternativa:	No aplicable	No aplicable	No especificado	Códec de velocidad mitad, pendiente de determinar	No especificado	No aplicable	No especificado	Velocidad, pendiente de determinar	No especificado	No aplicable
Algoritmo de codificación	No especificado	No especificado	VSELP (3:1)	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado	VSELP(3:1)	No especificado
Datos en modo circuito (kbits/s) Protegidos	Hasta 4,8/intervalo	No especificado	7,2	4,8	4,8	6,1	No especificado	Hasta 19,2	No especificado	No especificado
**No protegidos	7,467/intervalo	No especificado	Ninguno	7,2	9,6	9,6	No especificado	Hasta 28,8	No especificado	No especificado
Datos en modo paquete	Orientado a la conexión (opcional), sin conexión	IP	Orientado a la conexión sin conexión. Soporta IP y otros protocolos de red	SI	Orientados a la conexión, orientados sin conexión, TCP/IP normal	Protocolo Internet (IP)	IP	Orientado a la conexión, sin conexión	Datos en modo paquete	IP
Canal de control común	1	1	Canal de información de intervalo: 1 Canal de control primario: 3 Canal de control temporal: 1	5	1 intervalo AMDT – control del enlace descendente, 3 intervalos de acceso a enlace descendente	2	1	2	1	1

Canal de control asociado	2	1	Canal de control asociado: 1	2	Lento asociado a 450 bit/s; rápido asociado – apropiación de ciclo	3	2	3	1	1
Canal de control de difusión	1 (Opcional: 5)	1	No especificado	1	Asegurado	2	1	2	1	1
Codificación de canal	Codificación de retícula multivelocidad con entrelazado más detección de errores y priorización de bit/códigos convolucionales con entrelazado más detección de errores	Control BCH/Repetición Adaptación vocal digital con repetición Repetición de datos	Codificación de retícula multivelocidad con entrelazado más detección de errores y priorización de bit	Códigos convolucionales con entrelazado y detección de errores	Códigos convolucionales de velocidad variable con entrelazado largo, protección de prioridad selectiva para bits vocales codificados, repetición parcial y algoritmo de Viterbi de mejora del estado del canal; detección de errores (código de redundancia cíclica (CRC))	Código BCH para ID de red Códigos de retícula para datos Códigos Golay y Hamming para voz Códigos Reed-Solomon para señales incorporadas	FEC, Forward Error Correction) y de control de redundancia cíclica (CRC, Cyclic Redundancy Check)	Códigos convolucionales con entrelazado y detección de errores	Codificación de Corrección de Error de delantero (FEC)	Los turbo códigos son códigos para el control de errores, este tipo de codificación es utilizada para conseguir fiabilidad en la transmisión de información entre el 39 transmisor y receptor, además permite la transmisión de información sobre canales limitados en banda, permitiendo a los sistemas trabajar cercanos al límite de la capacidad del canal.
Cifrado:	Sin especificar	Tipos 1, 3, 4	Considerado	Si	No especificado, concebido según un concepto de «preparación para»	No especificado	Utiliza cifrado por aire existente	La interfaz de aire es exportable más autenticación. Más encriptación de extremo a extremo definible por el usuario hasta el más alto nivel de seguridad	Considerado	Sin especificar
–Niveles de seguridad	Sin especificar	Si	Sin especificar	Si		Tipos 1, 2, 3 y 4	Si	Si	Sin especificar	Si
–Multialgoritmo	Sin especificar	Si	Sin especificar	Si		Si	Si	Si	Sin especificar	Si
–Multiclave	Sin especificar	No	Sin especificar	Si		Si	Si	Si	Sin especificar	Si
–Control de cifrado	Sin especificar	Si	Sin especificar	Si		Si	Si	Si	Si	Si
–Reinicio de claves en el aire	Sin especificar	Sin especificar	Sin especificar	Si		Si	Si	Sin especificar	Sin especificar	Si
Traspaso	Opcional	Si	Si	Si	Si	Si	Opcional	Si	Si	Opcional

Capacidad de itinerancia entre sistemas	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Capacidad de diseño para múltiples operadores (sistemas) en la misma zona	Si	Si	Si	Si	Considerado	Si	Si	Si	Si	Si
Modo directo	Sin determinar	Portátil-portátil, Portátil-móvil, Móvil-móvil, Móvil-base	Considerado	Móvil a móvil Cabeza de línea de vigilancia doble	Sin determinar	Móvil a móvil Exploración de canal Repetidor Cabeza de línea nodo troncal	Si	Móvil a móvil Vigilancia dual, Repetidor, Cabeza de línea nodo troncal	Sin determinar	Si
Modo repetidor	Sin especificar	Si	Sin especificar	Si	Sin especificar	Si	Si	Si	Sin especificar	Opcional
Ubicación	Mundial	Estados Unidos	América del Norte	Europa y países de influencia francesa.	Sin especificar	Estados Unidos, Australia, Latino América y África	Mundial	Europa	Mundial	Mundial
Ciclo de Vida útil	Medio	Finalizando	Iniciando	Medio	En desarrollo	Etapa 1 Finalizando Etapa 2 len Desarrollo	Medio	Medio	Finalizando	Iniciando
Propietario	Estándar desarrollado por la ARIB (Association of Radio Industries and Businesses) de Japón	Estándar desarrollado por parte de la TIA. General Electric - Ericsson	Método Desarrollado en Norte América	Matra Communications	FCC	APCO - TIA	Motorola y productores	ETSI	Motorola	Nokia, Samsung, Qualcomm, Ericsson y LG Electronics
Normalizado?	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Ventajas	Posee gran Cobertura. Cuenta con Variedad de servicios. Puede soportar distintos tipos de datos. Posse procesos de continua autenticación. Posee la característica de itinirancia y	Posee gran Cobertura. Permite la compatibilidad hacia atrás y la interoperabilidad con el gran parque existente de equipos y sistemas EDACS, a nivel mundial.	Integra totalmente múltiples servicios como los de comunicaciones radioeléctricas telefónicas, de radiobúsqueda y de despacho en una sola infraestructura. Proporciona un control de seguridad mediante un mecanismo de	Trata de satisfacer principalmente al sector de seguridad pública y puede también utilizarse en otras grandes redes privadas y en redes simples de unidades privadas o profesionales móviles de radiocomunicaciones. Integración de	Se logran sistemas radioeléctricos móviles de eficacia espectral óptima. Integración de sistemas de localización de vehículos (AVL) dentro de los terminales. El sistema AMSF se ha desarrollado	Amplia cobertura. Interoperabilidad. Múltiples proveedores. Capacidad de encriptación. Calidad de audio mejorada. Ya está desplegada	Usando un repetidor permite dos conversaciones en simultánea. Audio mejorado a nivel digital. Uso más eficiente del espectro. Mayor duración de la batería. Costo más bajo y precios más bajos de	Alta eficiencia espectral. Dispone de una amplia gama de facilidades, dada su infraestructura independiente. Infraestructura y bandas de frecuencia diferentes a las redes radio comerciales. El modo	Amplias capacidades y diseño adaptativo. Escalabilidad flexible, multinacional, de red. Uso eficiente del canal RF en varios anchos de banda del espectro. Redes de datos digitales con conmutación de circuitos (dial-up) y paquetes	Utiliza la arquitectura de red IP por lo que es compatible con voz y datos. Puede lograr una mayor velocidad de datos al ser compatible con MIMO (Multiple Input Multiple Output) Los terminales móviles pueden tener menor potencia en la transmisión. La carga de tráfico en los canales se libera si la descarga de los archivos es rápido

	actualización de posición Utiliza comunicación PTT. Posee mecanismos de corrección y detección de errores		autenticación que puede ser invocado antes del comienzo de cualquier servicio tasable. Posee itinerancia entre sistemas, lo que permite hacer llamadas sin importar la posición	sistemas de localización de vehículos (AVL) dentro de los terminales Infraestructura y bandas de frecuencia diferentes a las redes radio comerciales	principalmente para los usuarios PAMR. Ofrece servicios de las siete capas de la norma ISA Las señales en espectro ensanchado son difíciles de interceptar, posee códigos eficaces de protección contra errores . y son altamente resistentes al ruido y a la interferencia.	en Bogotá	radio. Capacidad de conexión con más 1800 repetidores en todo el mundo.	directo proporciona comunicaciones directas de móvil a móvil fuera de la cobertura de la red. Se ha diseñado para asegurar altos niveles de seguridad, posee gran variedad de servicios y garantiza un rápido restablecimiento de la llamada	de datos (IP). Capacidad de envío para llamadas privadas, locales y de grupos de área amplia. Servicios de abonado celular GSM claros. Mensajería Alfanumérica (Servicio de Mensajería Corta). Tecnología de comunicación digital fiable. Dispositivos portátiles compactos y totalmente equipados (Estaciones Móviles)	para cada conexión. Los recursos del canal se usan de manera eficaz. Latencia muy baja. La transmisión de datos es fluida y sin interrupciones de la transferencia de datos en curso.
Desventajas	Ha sido desarrollado para ser utilizado principalmente en las aplicaciones de comunicaciones móviles orientadas a los negocios. Su cifrado no está especificado Su uso es para banda estrecha	No está normalizada. Su ciclo de vida está terminando. Presenta problemas de interoperabilidad con otras tecnologías. Es una tecnología Privada. Su uso es para banda estrecha Solo soporta servicio de llamadas individuales con el uso de datos	Es relativamente nueva. Su uso es para banda estrecha. Todavía está en desarrollo	Es una tecnología de Radio Privada. Es más utilizado en lugares donde no hay mucha densidad de usuarios (EUROPA). Falta de interoperabilidad con diversos fabricantes. Dentro de sus desventajas es su baja capacidad para transmisión de datos. Su uso es para banda estrecha	Su principal desventaja es su reducido ancho de banda Es una tecnología en Desarrollo	Pocos usuarios en áreas muy extensas. P25 Fase 1 esta al final de su ciclo útil Velocidad de datos muy limitada. Su uso es para banda estrecha Requiere actualización a la fase II	Es una tecnología de Radio Privada con uso de banda estrecha. Normalmente se usa en zonas de cobertura media (algunos pueblos y municipios de Colombia). Costo elevado de terminales de Radio. Hay interfaces pendientes de definir que permitan coexistencia.	Es más utilizado en lugares donde no hay mucha densidad de usuarios (EUROPA). Falta de interoperabilidad con diversos fabricantes. Dentro de sus desventajas es su baja capacidad para transmisión de datos.. Su uso es para banda estrecha	Es una tecnología privada. Su ciclo de vida útil esta llegando a su fin. No hay muchos usuarios que utilicen esta tecnología en comparación con las demás. Su uso es para banda estrecha	Coste para el usuario por hacer uso del servicio LTE. LTE al ser una red nueva y con nuevos desarrollos requiere de despliegue de equipos y antenas para hacer la red operativa. El servicio LTE requiere tiempo para estabilizarse y tener la señal LTE disponible en todas partes. El personal debe estar calificado por la complejidad de LTE, por lo que requieren pagos más altos.

3. ASPECTO REGULATORIO Y DEL USO DEL ESPECTRO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE REDES “PPDR” EN COLOMBIA.

A través de este capítulo, se pretende revisar el estado a nivel regulatorio para el despliegue de las tecnologías utilizadas en la implementación de redes PPDR en Colombia.

3.1 RADIOCOMUNICACIONES PARA LA PPDR

Fenómenos naturales como terremotos, maremotos, inundaciones e incendios, accidentes o situaciones de delincuencia común y organizada, son catástrofes que lamentablemente suceden muy a menudo en la vida cotidiana y por todo el mundo. Por lo que, para poder atender, controlar y neutralizar de manera oportuna estas emergencias, instituciones de seguridad como lo son los bomberos, la policía nacional, servicios médicos de emergencias, personal de gobierno y fuerzas militares necesitan de un sistema de telecomunicaciones robusto y eficaz.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el contexto Internacional se han desarrollado esfuerzos encaminados a resaltar la importancia que tiene la asignación de recursos de telecomunicaciones, las franjas espectrales que deberían ser usadas y aquellos requerimientos mínimos relacionados con la parte técnica y operacional en el despliegue de redes PPDR. Algunos de estos esfuerzos se relacionan a continuación:

- En 1991 se aprobó en Tampere, Finlandia, la “Declaración de Tampere”, esta declaración; esta declaración manifiesta la necesidad de generar instrumentos jurídicos a nivel Internacional, para suministrar recursos de Telecomunicaciones que ayude a aliviar los efectos de las catástrofes y permita socorrer a los afectados con rapidez [44].
- En 1998, gracias al Convenio de Tampere, se aprobó por unanimidad el suministro de recursos de Telecomunicaciones en las operaciones dirigidas a la prestación de ayuda y mitigación de catástrofes. Este convenio entró en vigencia en enero de 2005 [45].

- Con el fin de ayudar a mitigar los efectos negativos al momento de enfrentar una catástrofe, la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones generó la Resolución 644 (CMR-2000) [46].
- En el 2003, el Informe UIT-R M.2033 propone los objetivos y requisitos de las radiocomunicaciones PPDR, recomendando a las organizaciones e instituciones de seguridad pública, a planificar adecuadamente el uso del espectro, y a desarrollar e implementar tecnologías que favorezcan la protección pública y la atención de desastres [47]. Así mismo, este organismo recomendó la asignación de una porción de espectro electromagnético exclusivo para estas instituciones para poder cumplir así con el objetivo de los organismos de seguridad pública creados por los gobiernos para la protección pública y las operaciones de socorro [48].
- Antes de los años 90's las radiocomunicaciones de PPDR se desplegaban en las bandas de VHF (Very High Frequency) que corresponde a la banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencia de 30MHz a 300MHz, y en las bandas de UHF (Ultra High Frequency) la cual ocupa el rango de frecuencia de 300MHz a 3GHz. A finales de esta década fue necesaria una armonización del espectro, que en los últimos años se estableció, gracias a la aprobación de la Resolución 646 emitida por la UIT expedida y aprobada en la CMR (Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones) en el año 2003. En dicha Resolución se enumeran las bandas y gamas de frecuencias específicas que deben considerar los entes Gubernamentales para las redes PPDR, las cuales se enuncian a continuación [49].
- **Región 1 (África, Europa y Oriente Medio):** 380–470 MHz.
- **Región 2 (América):** 746–806 MHz, 806–869 MHz, 4940–4990 MHz.
- **Región 3 (Asia y Oceanía):** 406.1–430 MHz, 440–470 MHz, 806–824, 851–869 MHz, 4940–4990 MHz, 5850–5925 MHz.

Cabe resaltar que en algunos países de la región 3, las bandas de 380–400 MHz y 746–806 MHz también se destinaron para la implementación de tecnologías PPDR.

En la tabla 3.1 se muestra el porcentaje de utilización de cada banda de frecuencia asignada para PPDR en la región dos:

Tabla 3.1. Porcentaje de uso de cada banda de frecuencia asignada a PPDR [49].

Banda de frecuencia (MHz)	Porcentaje de utilización	Ancho de banda dispuesto
380–400	4,61%	20
4940–4990	2,72%	50
821–824	2,04%	3
866–869	2,04%	3

Vale la pena anotar, que en la actualidad se está realizando un estudio a nivel regional (región 2 – Sudamérica) sobre la implementación de redes de banda ancha para PPDR y la definición de la banda de frecuencia que se va a destinar para dicho servicio, con la intención de complementar las redes de banda angosta con las que se cuenta. Existe la necesidad de llegar a la implementación de estas redes de banda ancha ya que las aplicaciones para las nuevas redes PPDR lo demandan. Dichas aplicaciones se enunciaron en la Tabla 2.2 del capítulo anterior.

Como se mencionó antes, en la resolución 646 de la UIT, se hace una recomendación a todos los países para que utilicen las bandas armonizadas establecidas para cada región teniendo en cuenta los requisitos Nacionales y Regionales, También solicita a los organismos encargados de las PPDR a que utilicen los lineamientos establecidos por la UIT, para así poder lograr una buena administración y planificación del uso del espectro, y una correcta implementación de la tecnologías y sistemas que ayudan a estos organismos a cumplir con sus objetivos. En ese mismo sentido, la Resolución 648 (CMR-2012), se refiere a “estudios para apoyar las aplicaciones de banda ancha para protección pública y operaciones de socorro en caso de catástrofe” [50].

Con base a esta normativa, se espera crear también una base de fabricación más amplia que permita la implementación de economías a escala resultando de esto equipos más económicos y con una mayor disponibilidad, de esta manera todos los organismos

encargados de la PPDR tendrán un mejor acceso a sistemas mejorados sobre una base de tipos uniformizados de equipos.

En las radiocomunicaciones PPDR es posible y necesario utilizar distintas tecnologías dependiendo del tipo de comunicación que se necesita establecer con mayor prioridad; en el caso en el que una institución establezca que para ellos es más importante las comunicaciones de voz o por mensajes de texto y envío de imágenes, es suficiente con el uso de tecnologías de segunda generación (2G) para lograr esto, sin embargo, otro tipo de aplicaciones que necesitan anchos de banda mayores, hacen necesaria la búsqueda de tecnologías que permitan dar este nivel de servicio [51].

3.2 DISPONIBILIDAD DE ESPECTRO Y REQUISITOS FUTUROS PARA PPDR DE BANDA ANCHA

La asignación de espectro es el componente más importante para adoptar LTE como la futura tecnología de elección para PPDR de banda ancha en el mundo. Una asignación de espectro adecuada puede ayudar a proporcionar una mayor capacidad para la red sobrecargada y la capacidad de reconfiguración dinámica para administrar mejor la carga y la conectividad [52].

Identificación Internacional y asignación de bandas PPDR de banda ancha:

Como se indica en la resolución 646 (CMR-03), las aplicaciones de protección pública y de socorro en su momento eran en su mayoría aplicaciones de voz de banda estrecha y de baja velocidad de datos, generalmente en anchos de banda de 25 kHz o menos; muchas aplicaciones futuras serán de banda ancha (velocidades indicativas de datos en el orden de 384-500 kbit/s) y / o banda ancha (velocidades indicativas de datos del orden de 1-100 Mbit/s) con anchos de banda de canal que dependen del uso de tecnologías espectralmente eficientes. En tiempos de desastres, si la mayoría de las redes terrestres son destruidas o dañadas, las redes de aficionados, satélites y otras redes inalámbricas pueden estar disponibles para proporcionar servicios de comunicación para ayudar en la protección pública y los esfuerzos de socorro en casos de desastre [53].

Según la UIT, los beneficios de la armonización del espectro, aunque restringidos a un nivel regional más que a nivel mundial, incluyen un mayor potencial de interoperabilidad

en las actividades de PPDR. Otros esfuerzos de la UIT y de entidades normalizadoras para redes PPDR son los siguientes:

- En las Recomendaciones UIT-R M.1826 se recomendaron las Regiones 2 y 3 para considerar la banda 4940-4990 MHz, o partes de ella, al llevar a cabo su planificación nacional para aplicaciones de PPDR de banda ancha a los efectos de lograr bandas / rangos de frecuencias armonizados para PPDR [54].
- Con el objetivo de actualizar la Resolución 646 para los sistemas PPDR de banda ancha, La CMR-12 aprobó la agenda 1.3 para la CMR-15: Revisar la Resolución 646 (Rev. CMR-12) para protección pública de banda ancha y socorro en casos de desastre, de conformidad con la Resolución 648 “Estudios para respaldar la protección pública de banda ancha y el socorro en casos de desastre” (CMR-12),
- La Resolución 646 (REV. CMR-15) alienta a las administraciones a considerar partes de la gama de frecuencias 694-894 MHz, al llevar a cabo su planificación nacional para sus aplicaciones PPDR, en particular banda ancha, con el fin de lograr la armonización. Además, alienta a las administraciones a que también consideren partes de los siguientes rangos de frecuencias regionalmente armonizados, para sus aplicaciones PPDR [55]:
 - ✓ En la Región 1: 380-470 MHz
 - ✓ En la Región 2: 746–806 MHz, 806–869 MHz, 4940–4990 MHz
 - ✓ En la Región 3: 406.1-430 MHz, 440-470 MHz y 4 940-4 990 MHz.
- En abril de 2017, la UIT emitió un informe sobre "Armonización de rangos de frecuencia para uso de aplicaciones PPDR en la región de América" En donde expresa que en esta región existe una tendencia a la armonización sobre la banda de 700 MHz para banda ancha de PPDR [49].
- La Recomendación CCP.II REC. 41 (XXII-13) es un documento que materializa los esfuerzos para armonizar la asignación de franjas espectrales de banda ancha enfocadas a redes PPDR sobre los 700 MHz. El hecho de vincularse a la armonización sobre esta banda impulsa la interoperabilidad entre tecnologías,

genera una mayor economía de escala y al mismo tiempo brinda facilidades para la ayuda Internacional de la Región en casos de desastres [49].

- La UIT en su informe (UIT-R M.2377-0) sobre "Objetivos de radiocomunicación y requisitos para la protección pública y el socorro en casos de desastre" proporciona amplios objetivos y requisitos de aplicaciones PPDR, que abarcan desde la banda estrecha hasta la banda ancha y la banda ancha. El Informe (UIT-R M.2291) proporciona las capacidades de las tecnologías IMT para cumplir los requisitos de las aplicaciones que admiten operaciones PPDR de banda ancha [56], [57].

Adicional a estos esfuerzos, varios estudios han corroborado las necesidades en términos de espectro para aplicaciones de PPDR de banda ancha móvil en diferentes países del mundo. Ejemplo de esto, la autoridad reguladora de las telecomunicaciones de los Emiratos Árabes Unidos (TRA) también condujo un estudio de espectro PPDR [58], el cual concluyó que al usar tecnología LTE junto con la disponibilidad potencial de equipos de usuario de mayor potencia, el uso de PPDR podría en teoría ser soportado en tan solo 2x5 MHz de espectro, una tolerancia de 2x10 MHz permitiría un crecimiento futuro razonable. Sin embargo, esto tiene que estar en la misma banda y se debe hacer una mezcla de frecuencias más bajas (por ejemplo 700 MHz u 800 MHz) para obtener una cobertura amplia junto con frecuencias más altas (por ejemplo, 2300 o 2600 MHz).

Por otra parte y de acuerdo con el Informe ECC 199 [59] titulado "Requisitos del usuario y necesidades de espectro para los futuros sistemas PPDR de banda ancha en Europa", primero, se requieren al menos 10 MHz para el enlace ascendente de la red terrestre. Con 10 MHz disponibles, muchos, pero no todos los escenarios pueden ser cubiertos, y segundo, también se requerirán al menos 10 MHz para el enlace descendente de la red terrestre. Con 10 MHz disponibles, la mayoría de los escenarios que utilizan llamadas individuales pueden ser acomodados. Todos los escenarios se pueden acomodar en un enlace descendente de 10 MHz donde las llamadas grupales se utilizan de manera óptima.

3.3 DIAGNÓSTICO PARA COLOMBIA:

Para Colombia, el marco jurídico-regulatorio relacionado con temas de operaciones de socorro y seguridad pública no es muy amplio, sin embargo, partir del año 2003 con la

aprobación del convenio de Tampere, este marco comenzó a contemplar las tecnologías de la información y las comunicaciones, como herramientas importantes para prestar servicios de seguridad pública y atención de emergencias [60].

En ese mismo sentido, la resolución 2060 del 2009 tomó como elemento orientador el documento denominado “Plan de emergencia y contingencias del sector de las telecomunicaciones” para las aplicaciones en el país. Este documento sirve como guía de las acciones del entorno referente a las telecomunicaciones en situaciones de desastres, emergencias y amenazas, el cual brinda una ayuda al sistema nacional para la prevención y atención de desastres, con el fin de apoyar a las víctimas antes, durante y después de un evento que las afecte, y para impulsar el aporte de las telecomunicaciones con el objetivo de que puedan mitigar los efectos que trae consigo un desastre de origen natural o una situación de emergencia o seguridad pública [61].

En la búsqueda de soluciones para el desarrollo de redes PPDR en Colombia, se plantea la posibilidad de utilizar el segmento bajo de la banda de 700 MHz, también conocida como el ‘dividendo digital’. Esta banda cobra especial importancia debido a sus características de propagación que facilitan la cobertura a un costo menor. Igualmente, esta banda es de fácil penetración en edificaciones y entornos cerrados debido a que presenta una mejor propagación, lo que se traduce en una mayor cobertura y la correspondiente reducción del número de sitios a desplegar.

La banda de 700MHz presentaba en el pasado una alta ocupación con baja probabilidad de uso en el corto plazo. Gracias a los procesos de migración, la liberación total de la banda de 700MHz (Dividendo digital) se logró en agosto de 2015 [62]. El Ministerio de las tecnologías de la información y las comunicaciones MINTIC se encuentra adelantado el proceso de asignación de espectro en las bandas de 700 y 1900 MHz, dentro del cual estarán las nuevas redes para seguridad pública y atención de emergencias [63].

Por lo tanto, en Colombia se pretende apagar la televisión analógica a finales del 2019, y usar este espectro para impulsar la conectividad de banda ancha a través de redes móviles, como las PPDR. Como parte de dicho proceso, el MINTIC y la ANE iniciaron el trámite para adjudicar el dividendo digital. Como primer paso, el Gobierno presentó para comentarios el borrador del proyecto de asignación para espectro en las bandas de 700 MHz y 1.900 MHz.

Sin embargo, este proceso ha tenido varios obstáculos debido a las inquietudes planteadas por los diferentes operadores celulares; entre las cuales se establece la necesidad, antes de adjudicar el espectro, de hacer efectivas medidas que solución en la problemática del operador dominante en favor de la libre competencia y el beneficio para los usuarios.

Es claro que la banda del Dividendo Digital ha despertado alto interés en los proveedores de redes y servicios móviles comerciales, por cuanto sus buenas propiedades de propagación permitirían llevar servicios de internet de banda ancha a zonas rurales de Colombia a costos más razonables, lo cual a su vez apoya las metas de penetración del Gobierno Nacional. Adicional a esto, el hecho de que el espectro en bandas bajas sea relativamente escaso en comparación con el espectro en bandas altas (con menores cualidades de propagación), hace que sea previsible que el Dividendo Digital llegue a ser una banda de alto valor económico que generaría recursos importantes para la Nación.

En una posible resolución de adjudicación, se dejaría estipulado que en línea con el desarrollo de las redes PPDR de banda ancha a nivel mundial, reconocido por la Unión Internacional de Telecomunicaciones - UIT mediante Resolución UIT 646 de 2015 y revisado en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2015, el MINTIC, establece conveniente reservar una porción de espectro de 20 MHz en la banda de 700 MHz para posible asignación futura asociada a este fin. Lo anterior hasta tanto se definan la banda de frecuencias y el ancho de banda requeridos para este tipo de servicios en Colombia, y en concordancia con lo dispuesto en el Decreto 1078 de 2015.

En la búsqueda de bandas de frecuencia y de anchos de banda requeridos, en países como EEUU se designaron cuatro bandas de frecuencia para 3GPP (bandas 12, 13, 14, 17), mientras que se asignaron dos para Asia-Pacific Telecommunity (APT), la banda 28 para el modo Frequency Division Duplexing (FDD) y la banda 44 para la versión Time Division Duplexing (TDD). Las diferencias radican en que las bandas operativas tienen diferentes ubicaciones en el espectro dentro de los 700 MHz. La mayor diferencia se encuentra donde se ubican las bandas de guarda. La canalización Estadounidense, a su vez, presenta algunas inconsistencias, como la inexistencia de interoperabilidad in-band, es decir, los terminales que funcionan en la banda 13 son incompatibles con aquellos que funcionan en otras bandas.

Sin embargo, Colombia adoptó la canalización FDD propuesta por APT. En esta banda existe la posibilidad de destinar un bloque pareado de 2 x 5MHz (10MHz en total) para PPDR. La parte correspondiente a PPDR sería el bloque pareado inferior de la banda, es decir, correspondería al bloque de 703-708 MHz junto con el bloque de 758-763 MHz.

Por otra parte y como otra posibilidad, está la banda de 380-400MHz, la cual, ha sido una de las bandas preferidas a nivel Internacional para el despliegue de servicios PPDR, por cuanto al ser la banda más baja, se caracteriza porque tiene mejores cualidades de propagación en comparación con las otras bandas; lo que resulta ser una característica muy importante para el despliegue de redes para emergencias con la mayor cobertura posible, con el uso de menos infraestructura. A lo anterior se suma el hecho de que en esta banda existen 20MHz de espectro disponible en caso de que se decida su uso para PPDR.

Sin embargo, si bien esta banda posee buenas condiciones de propagación, tecnologías de última generación de PPDR son hasta el momento incipientes. Actualmente, las redes de PPDR que han sido desplegadas sobre esta banda, ofrecen servicios de telecomunicaciones de banda angosta, no obstante, algunos países de la Región 2 (América), han manifestado su deseo de utilizar esta banda para prestar servicios PPDR de banda ancha. Es por esta razón, que dentro de la Comisión Internacional de Telecomunicaciones (CITEL), se vienen haciendo propuestas que buscan vincular esta porción de espectro dentro de las bandas recomendadas y a futuro utilizadas en toda la región; modificando de esta forma la Resolución 646. Esta situación, no ha sido indiferente por parte de países pertenecientes a las regiones 1 y 3, ya que este rango de frecuencias también ha sido usado para prestar servicios de PPDR. Un punto a considerar es que esta banda presenta por el momento, un menor valor económico en comparación con las otras bandas propuestas. Sin embargo, esta situación puede cambiar a futuro dependiendo del desarrollo Internacional.

Finalmente, y para terminar el diagnóstico para Colombia, se hace necesario dar una mirada a los esfuerzos donde se han atribuido total o parcialmente algunos canales para las comunicaciones PPDR, estas atribuciones se muestran en la tabla 3.2, la cual se presenta a continuación [64].

Tabla 3.2. Atribución de frecuencias para radiocomunicaciones de Protección pública y operaciones de socorro [64].

Atribución UIT-R M.2033	Atribución según CNABF de Colombia	
Banda (MHz)	Banda (MHz)	Uso
	0,495-0,505	Socorro y llamada, en los sistemas auxiliares de ayuda del servicio móvil marítimo
	9,15-10,81	Red Nacional de emergencia de la DGR
3-30	27,035 27,055 27,065 27,075	CNABF - Plan de distribución de canales - Información y Coordinación de atención de emergencias, desastres y seguridad ciudadana. Estos canales forman parte de la banda ciudadana entre 26,965 MHz y 27,405 MHz
68-88		
	121,5 123,1	Socorro y urgencia
138-144	138,9125 140,0125 142,950 143,9125 143,800	Sistema Nacional de Radiocomunicaciones de Emergencia Ciudadana y Red Nacional de Emergencia.
148-174	148,812 154,1125 160,2625 164,0125	Sistema Nacional de Radiocomunicaciones de Emergencia Ciudadana y Red Nacional de Emergencia.
380-400		
400-430		
400-470	441,5500 441,8000 446,2500 453,0375 455,7125 457,0375 460,775 475,775 467,925	Sistema Nacional de Radiocomunicaciones de Emergencia Ciudadana y Red Nacional de Emergencia.
746-806		
806-809		
	813,2375 813,4875 858,2375 858,4875	Sistema Nacional de Radiocomunicaciones de Emergencia Ciudadana.
4940-4990	4940-4990	Acceso de Banda Ancha Inalámbrica en Radiocomunicaciones para protección Pública, Operaciones de Socorro y salvaguarda de la Vida Humana.

Teniendo en cuenta los datos observados en la tabla 3.2, se observa como en el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia (CNABF) no están contempladas ciertas atribuciones de bandas de frecuencias, para un uso propio de los organismos que están encargados de las operaciones de socorro y emergencias en Colombia, la ANE en el documento “Propuesta de modelo de política de espectro radioeléctrico para Colombia” se ha referido en la necesidad de espectro para las operaciones que requieran de atención inmediata de socorro. Por esto la ANE esta en acción con los estudios correspondientes para determinar las bandas de frecuencia de interés y la viabilidad de reservar Espectro Radio Eléctrico para uso exclusivo de dichas operaciones [64].

3.3.1 Limitaciones en el aspecto Regulatorio

Las siguientes condiciones, han sido identificadas como potenciales limitaciones desde el punto de vista regulatorio y del uso del espectro para la implementación de redes “PPDR” en Colombia, después de haber revisado la situación tanto a nivel Nacional como Mundial:

- Aun no existe una homogeneidad a nivel Internacional con respecto al uso uniforme y armonizado de espectro radioeléctrico en operaciones de riesgo y socorro para asegurarse de garantizar la vida humana. Entorno a esto Colombia no es la excepción. La Unión Internacional de Telecomunicaciones, en el informe UIT-R M.2033, determinó ciertas bandas de frecuencias para radiocomunicaciones de operación pública y misiones de socorro (PPDR). Sin embargo, hasta el momento Colombia no se ha planteado asignar bandas de frecuencia dedicadas para estos propósitos.
- Colombia en la actualidad no cuenta con espectro dedicado para servicios de banda ancha PPDR, ya que es frecuente que el espectro se subaste, generando una discontinuidad en los servicios e inexistencia de espectro dedicado para soportar algún servicio en específico [11]. Las bandas de frecuencias que soportan los servicios PPDR en Colombia actualmente están distribuidas contemplando recomendaciones Internacionales como la 646 de la ITU [49].

- En el actual CNABF no están contempladas ciertas atribuciones de bandas de frecuencias para un uso propio de los organismos que están encargados de las operaciones de socorro y emergencias, a pesar de que si están contempladas en las recomendaciones dadas por parte de los entes Internacionales. Por esta razón, la Agencia Nacional del Espectro (ANE) en el documento “Propuesta de modelo de política de espectro radioeléctrico para Colombia” se ha referido en la necesidad de asignar espectro para las operaciones que requieran de atención inmediata de socorro [64].
- Hay pocas bandas potenciales de 3GPP que también podrían considerarse para adopción. Una de ellas es la Banda existente a 450 MHz y se abre la posibilidad de usar parte de la banda de 700 MHz, más específicamente hablando de los 746 a 806MHz según recomendaciones de la UIT, sin embargo, es necesario identificar claramente las bandas, así como la cantidad de espectro para la comunicación PPDR de banda ancha teniendo en cuenta el desarrollo del ecosistema global para la comunicación PPDR en esas bandas.
- El hecho de que el espectro en bandas bajas sea relativamente escaso en comparación con el espectro en bandas altas (con menores cualidades de propagación), hace que sea previsible que el Dividendo Digital llegue a ser una banda de alto valor económico que generaría recursos importantes para la Nación.
- No será posible realizar una correcta asignación de bandas de frecuencia en Colombia para comunicaciones PPDR, hasta tanto se definan la banda de frecuencias y el ancho de banda requeridos para este tipo de servicios y su consecuente proyección en Colombia, y en concordancia con lo dispuesto en el Decreto 1078 de 2015.

4. DETERMINACIÓN DE LA TECNOLOGÍA A IMPLEMENTAR EN LA ACTUALIZACIÓN DE LA RED PPDR DE LA POLICÍA METROPOLITANA DE BOGOTÁ “MEBOG”.

En este capítulo se busca recopilar la visión que tienen algunos expertos en tecnologías PPDR con el fin de evaluar cual debería ser la que se implemente en la actualización de la red PPDR de la policía Metropolitana de Bogotá. Para realizar esto, se tendrá como referencia lo revisado en capítulos anteriores y se sumará a ello la visión dada por los expertos para definir los niveles necesarios para elegir una tecnología sobre otra, así como los criterios y subcriterios que se necesitan para poder valorar adecuadamente las alternativas seleccionadas.

4.1 LA TOMA DE DECISIONES.

El ser humano en los diferentes escenarios y condiciones debe tomar decisiones en la vida cotidiana. Por ciertos momentos las personas tienen diferentes alternativas para una determinada situación y deben elegir una alternativa basándose en la opción que mejor satisface las necesidades puntuales de la decisión [65]. Para las distintas experiencias que el ser humano tiene a lo largo de su vida, es normal que la base de la toma de decisiones sea la experiencia acompañada de la subjetividad inherente en todos los individuos, sin embargo, el hecho de tomar una decisión basada en estos criterios no necesariamente hace que la decisión tomada sea la más acertada [66].

Lo que define una buena decisión, es el procedimiento o el medio a través del cual se logra definir que hacer o que ruta seguir, habiendo contemplado los diferentes criterios y actores que intervienen en la decisión. Es por esto, que la percepción de una buena decisión no necesariamente depende de los buenos resultados que puede conllevar esta, sino como se dirigió su aplicación. Por consiguiente, el proceso que se adopte para tomar una decisión, tiene importancia al momento de escoger o señalar una alternativa frente a las demás, de este modo hay una vía para sustentar cual de las opciones fue la más indicada entre las diferentes alternativas. Normalmente una buena decisión cumple con las siguientes características [67]:

- Selección y proyección de la decisión con la que se busca conseguir el objetivo específico.
- Recolección de datos importantes.
- Consideración de las orientaciones y prioridades de aquella persona que tome la decisión.

En la mayoría de los ámbitos, la toma de decisiones toma especial relevancia al ser considerada una actividad sensible e importante sin la cual sería imposible avanzar en el desarrollo de un proyecto. Dependiendo del tipo de proyecto, es habitual que sea necesario tomar decisiones difíciles, debido a que estas decisiones tienen efectos inmediatos sobre agentes implicados que pueden resultar afectados por la decisión a tomar y porque puede haber diferentes puntos de vista para abordar situaciones que no son sencillas de modelar y conciliar. Según [68], las razones para prestar especial cuidado al procedimiento para tomar una decisión son las siguientes:

- Tamaño y Complejidad de los proyectos que se manejan actualmente.
- El posicionamiento que busca tener la industria en los nuevos tipos de mercados.
- Las limitantes a la hora de tomar decisiones complejas que se debe al desconocimiento de los factores que hacen parte de los proyectos, lo que conlleva muchas veces a la modificación de los objetivos, metas y principios que anteriormente estaban previstos.
- La legislación exige un alto grado de compromiso a los líderes del proyecto porque cada vez se busca garantizar una mejor calidad en servicios, productos y prestaciones a nivel de ingeniería con un seguimiento a las presentaciones de los documentos que especifiquen su modelo y modo de implementación.

Al momento de enfrentarse a la toma de una decisión, es necesario evaluar íntegramente el contexto de la problemática a solucionar, una decisión bien tomada, se apoya en el estudio y en la búsqueda del escenario que represente el menor riesgo posible, lo que se logra utilizando mecanismos que siguen métodos matemáticos rigurosos, que sirven de apoyo a la resolución del problema [68].

4.2 LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO

La toma de decisiones multicriterio o MCDM por su abreviación (en inglés, Multi Criteria Decision Making), permite analizar una toma de decisiones desde diferentes puntos de vista, introduciendo una abundante serie de métodos, técnicas y conceptos [69]. El MCDM busca mediante procesos matemáticos aplicados, esquemas administrativos e investigaciones operativas, seleccionar la mejor solución (alternativa) para una decisión determinada [70]. Avances significativos en la teoría de toma de decisiones se han visto reflejados desde mediados del siglo XX, tratando de facilitar y ayudar en la toma de decisiones a personajes líderes o grandes empresarios a nivel mundial, mediante la gestión de una base de datos con el fin de recopilar información para dar soporte a la forma como se toma la decisión. En [71] y [72] se encuentran métodos como scoring, la Teoría de utilidad multiatributo (MAUT), el proceso analítico Jerárquico (PAJ) y el proceso analítico de red (ANP), entre otros.

El Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), es uno de los métodos más empleado para determinar la selección de tecnologías en la actualidad. En [73], [74], [75], [76], [77] emplean el método PAJ para elegir la tecnología deseable en contextos específicos, gracias a que este método realiza un análisis por medio de un método matemático por medio del establecimiento de niveles y la ayuda de expertos al momento de hacer valoraciones mediante la utilización de escalas. Por consiguiente, este método se adapta a las condiciones de el estudio propuesto en este documento, teniendo en cuenta que se desea encontrar cual es la mejor tecnología a implementar en la implementación de la red PPDR de la policía Metropolitana de Bogotá.

Descripción del método a utilizar

El Proceso Analítico Jerárquico (PAJ o AHP por sus siglas en Inglés), ha sido desarrollado con el fin de tratar decisiones complejas gracias a que se basa en una técnica matemática estructurada estudiada y mejorada por Thomas L. Saaty. Este método ha sido ampliamente usado como apoyo a decisiones en ámbitos de negocios, salud, gobierno, educación e industria, entre otros [78].

El uso del PAJ, inicia con la identificación de un problema y el diseño de un modelo jerárquico de forma piramidal descendente, en cuya parte superior se encuentra el objetivo principal del problema y a partir de allí se empiezan a identificar niveles de importancia, finalmente, en la parte inferior del esquema jerárquico se encuentran las

alternativas a considerar y a valorar. Para el despliegue del problema de forma jerárquica es necesario tener mucho conocimiento, experiencia e información relacionada sobre el problema que se plantea [65].

Después de construir el esquema jerárquico, se deben valorar por niveles todos los componentes que hacen parte del modelo jerárquico, mediante comparaciones pareadas, basadas en ratios de preferencia (si se comparan alternativas) o ratios de importancia para encontrar pesos relativos (si se comparan principios y criterios).

El método PAJ tiene ventajas con respecto a las demás técnicas, específicamente cuando los elementos son difíciles de cuantificar y comparar o cuando la comunicación entre el equipo decisor tiene diferencias notorias en terminologías, o perspectivas. Algunas de las situaciones donde se puede aplicar este método son [79]:

- Selección: Elección de una alternativa que hace parte de un conjunto de posibilidades, usualmente con características que influyen en la determinación de los criterios de decisión.
- Clasificación: Para situar un conjunto de alternativas desde la más a la menos deseable.
- Priorización: Para definir las prioridades de un conjunto de alternativas, en lugar de elegir una sólo o simplemente agruparlas según su tipo.
- Asignación de recursos: Para distribuir recursos entre un conjunto de alternativas.
- Benchmarking: Para relacionar los procesos en una organización particular con las de otra.
- Gestión de la calidad: Para guiar y direccionar los aspectos multidimensionales de la calidad y la mejora de esta.

Aun cuando puede ser usado por individuos para tomar decisiones de baja complejidad, el PAJ es más útil cuando las personas trabajan con equipos en problemas complejos, que involucran percepciones y juicios humanos, cuyas resoluciones tienen repercusiones a largo plazo [80]. Los procedimientos para usar el PAJ pueden ser resumidos de forma general de la siguiente manera [81]:

Organizar el problema en forma jerárquica.

Para utilizar el método PAJ se empieza por establecer los distintos niveles de complejidad del problema logrando que los participantes obtengan un mayor entendimiento de la situación iniciando su recorrido desde lo general hasta lo puntual. De esta forma a medida que la información se va organizando, se va diseñando una imagen del problema, que va haciéndose más clara y mejor, a medida que llega más información [81].

La jerarquía que propone el PAJ, se conforma por un objetivo general o meta, un conjunto de alternativas y un conjunto de criterios que relacionan las diferentes alternativas al objetivo planteado. De los criterios se pueden desprender criterios menores (sub-criterios) que a su vez pueden llegar a ser divididos en otros sub-subcriterios si es necesario. Un ejemplo de este modelo jerárquico en la figura 4.1, donde se aprecia la meta u objetivo en la parte superior, los criterios van en posiciones intermedias y las alternativas en el nivel inferior.

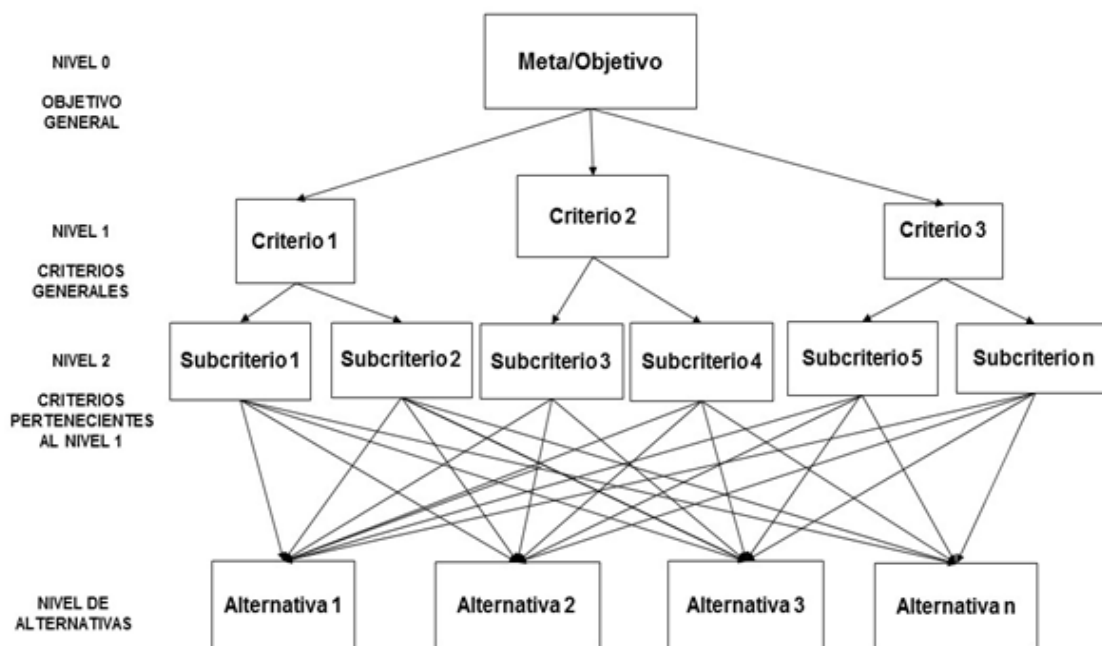


Figura 4.1: Jerarquía del modelo AHP. Adaptado de [65].

Asignar ratios de prioridad

Después de terminada la construcción de la jerarquía, para el establecimiento de prioridades se usa el proceso matemático del PAJ en cada uno de los niveles identificados. Este proceso matemático genera un vector de prioridades que corresponde

a la importancia relativa de cada criterio o nivel en particular. Esta importancia relativa se realiza haciendo comparaciones por pares, teniendo en cuenta la tabla 4.1 que se muestra a continuación [65].

Tabla 4.1. Tabla de valoración directa de Saaty [82].

Escala Numérica^a	Escala Verbal	Explicación
1	Relevancia Equivalente	Ambos componentes aportan de igual forma a la propiedad o criterio
3	Relevancia moderada de un componente con respecto al otro	El juicio y la comprobación previa benefician a un componente frente al otro
5	Repetidamente un componente es más relevante que en otro	El juicio y la comprobación previa benefician mayormente a un componente frente al otro
7	Mayor relevancia de un componente	Un componente controla fuertemente y su control está medido en práctica
9	Relevancia muy superior de un componente con respecto al otro	Un componente controla al otro con el mayor orden de magnitud posible

*Los valores 2,4, 6 y 8 suelen utilizarse en situaciones intermedias, y las cifras decimales en estudios de gran precisión.

Examinar la consistencia de la relación de los juicios

Una vez cada experto a realizado la valoración pareada para todos los elementos de un nivel, el método matemático del PAJ valora el nivel de consistencia de sus juicios, buscando que las valoraciones realizadas sean lo menos contradictorias posibles, es decir, que conserven proporcionalidad entre ellas. Para el cálculo de la consistencia de los juicios, se ha dispuesto de la tabla 4.2, en la cual se aprecian los valores de los ratios de inconsistencia aleatoria (RIA), los cuales se relacionan dependiendo del número de elementos (n) que hacen parte de un mismo nivel evaluado.

Tabla 4.2.: RIA en función del número de elementos valorados por nivel (n) [81].

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
RIA	0	0	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484	1,513	1,535	1,555	1,57	1,583	1,595

Una vez hallado el RIA, se debe calcular el índice de consistencia o CI por sus siglas en inglés, el cual se define en la Ecuación 4.1 [81]:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Ecuación (4.1)}$$

Teniendo en cuenta que el número de elementos valorados por cada nivel o criterio determina el tamaño de la matriz cuadrada a analizar (nxn), para hallar el valor máximo de λ es necesario hacer la suma ponderada del resultado de la multiplicación del valor de cada criterio (valores de la columna que corresponda al criterio) por el valor del vector prioridad resultante para ese criterio en particular. Una vez se hace este proceso con cada uno de los criterios, se realiza la suma ponderada por filas, este resultado se divide entre el valor del vector prioridad correspondiente a esa fila y se aplica la media para obtener el λ_{max} .

Después de hallar CI y RIA se puede calcular CR (calcular el índice de consistencia aleatoria), teniendo en cuenta la ecuación 4.2.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Ecuación (4.2)}$$

Para valores de 0,10 (10%) o menos para CR, se acepta la consistencia de la matriz y a su vez se admite como válido vector de prioridad resultante. El umbral para n=3 se fija en 0,05 (5%) y para n=4 en 0,08 (8%). Para n=5, si CR es mayor que 0,10 se deben analizar nuevamente los juicios emitidos.

Determinación de la decisión final

Después de llevar a cabo cada uno de los procesos que se explicaron anteriormente, queda como paso final la ponderación para cada alternativa considerada, para esto, se hace necesario que cada uno de los criterios encontrados sea evaluado en cada una de las alternativas establecidas. A estas valoraciones se les aplica un método de normalización que conserve proporcionalidad (método de la suma o distributivo, y el método del mayor o también llamado ideal), y a cada una de esas normalizaciones se les multiplica por el valor del vector prioridad de cada uno de los subcriterios y criterios correspondientes dentro de la jerarquía.

4.3 DETERMINACIÓN DE LA TECNOLOGÍA A IMPLEMENTAR EN LA ACTUALIZACIÓN DE LA RED PPDR DE LA POLICÍA METROPOLITANA DE BOGOTÁ “MEBOG”.

La determinación de la tecnología a implementar se realiza con base en el método del proceso analítico Jerárquico, el cual, permite trabajar con gran cantidad de información, facilita la agregación de opiniones y valoraciones de diferentes expertos, la comprensión del método es sencilla para las personas que lo desconocen y permite medir el nivel de consistencia de los juicios de los expertos. Por último, es posible realizar un análisis de sensibilidad, el cual es realizado a través de un software, lo que facilita la forma de presentar comparaciones entre las diferentes alternativas al variar los pesos de niveles y criterios.

Al momento de utilizar el PAJ se tienen en cuenta la opinión de expertos, mediante la cual se hace la selección de los criterios de decisión, que son necesarios para poder completar el análisis propuesto en este capítulo. Los pasos que se siguen para su desarrollo de forma mucho más puntual son [81]:

1. Identificación del objeto de estudio.
2. Elección de las alternativas.
3. Elección de expertos.
4. Elección de los criterios de decisión.
5. Análisis de dominancia
6. Ponderación de los criterios.
7. Valoración de las alternativas según cada criterio.
8. Cálculo de la prioridad global en el conjunto de alternativas.
9. Análisis de resultados.

A continuación se muestra el desarrollo de cada uno de estos 9 pasos.

1. Identificación del objeto de estudio

La definición del objeto de estudio corresponde a determinar la tecnología a implementar en la actualización de la red PPDR de la Policía Metropolitana de Bogotá “Mebog”.

2. Elección de alternativas:

Las redes PPDR, mejor conocidas como redes de emergencia y socorro, han tenido el soporte de tecnologías que han permitido prestar servicios de comunicaciones en diferentes condiciones, a continuación se enumeran las alternativas que para el concepto de los expertos se deben considerar en este estudio, es de anotar que estas tecnologías se explicaron en el capítulo 2 de este documento, sin embargo no se incluyeron todas las tecnologías analizadas por diferentes motivos, entre los cuales se encuentra el nivel de masificación, el ciclo de vida de la tecnología, el desconocimiento sobre una tecnología en particular, entre otros. Las Tecnologías consideradas en el análisis son las siguientes:

- **P25:** Es un estándar usado para la creación de artículos interoperables de comunicación inalámbrica digital. Conocido también como Proyecto 25 o APCO P25 [41].
- **DMR:** Fue creado y formado como un protocolo de radio digital de banda estrecha con el objetivo de obtener una mejora de la eficiencia espectral sobre la radio analógica tradicional PMR y para tener mejor factibilidad en las comunicaciones bidireccionales por medio de radio digital [42].
- **TETRA:** Es una tecnología de radio digital troncalizado creada y administrada por la European Telecommunications Standards Institute ETSI, instituto internacional que produce y mantiene protocolos de comunicación que usamos todos los días (entre ellos, el protocolo GSM para celulares. La tecnología TETRA, fue pensada para usuarios PMR (Professional Mobile Radio – Radio Profesional Móvil), especialmente para usos en agencias gubernamentales, seguridad pública (policías, bomberos y ambulancias), servicios de emergencia [43].
- **IDEN:** Es una tecnología inalámbrica propietaria de Motorola que combina capacidades de telefonía celular, radio digital y modem de datos/fax en una sola red [31].
- **LTE exclusivo para seguridad pública:** La tecnología LTE de Seguridad Pública es una solución que ofrece una infraestructura de red de banda ancha móvil, así como aplicaciones y dispositivos para el personal encargado de intervenciones inmediatas. En la actualidad en varios países se están utilizando e implementado redes LTE para seguridad pública.

- **Red LTE de Operador:** La utilización de redes privadas 4G LTE por una agencia de seguridad es posible y los diferentes operadores están trabajando al respecto creando una base de aplicaciones especialmente diseñadas para seguridad pública y VPNs así como algoritmos de cifrado dedicados, en ese caso, la red pública sólo serviría como vínculo entre las bases de datos y los usuarios finales.

3. Elección de los expertos

La elección de los expertos fue realizada teniendo en cuenta las diferentes áreas (niveles) de estudio que fueron definidas, de un listado preliminar de posibles expertos, se escogieron aquellos que tenían una visión general sobre las tecnologías PPDR y que por sus áreas de experticia, podían aportarle positivamente a las valoraciones requeridas por el método del PAJ. Los siguientes perfiles corresponden a los expertos que colaboraron en este estudio:

Experto 1: Persona con grado de Brigadier General, Jefe de Oficina Telemática Policía Nacional de Colombia, Ingeniero de sistemas con especialización en Redes y Comunicaciones, y Especialización en Gerencia de proyectos en ingeniería de Telecomunicaciones.

Experto 2. Gerente de Ventas de Soluciones para Seguridad Pública de la firma Motorola Solutions, Ingeniero de telecomunicaciones especialista en redes móviles y magíster en Telecomunicaciones.

Experto 3. Teniente Coronel, Ingeniero de sistemas, Jefe de Telemática de la Dirección de Seguridad Ciudadana de la Policía Nacional, con amplia experiencia en la administración y diseño de redes para atender las necesidades de comunicaciones de la Policía así como redes de apoyo ciudadano.

4. Elección de los criterios de decisión

La elección de los criterios de decisión se realizó inicialmente mediante una búsqueda bibliográfica, con la cual fuera posible poner a consideración de los expertos la identificación de aquellos criterios imprescindibles para el desarrollo del análisis propuesto. Normalmente en procesos de este estilo se tienen en cuenta metodologías como la BOCR, la cual, orienta la forma de agrupar criterios por niveles, teniendo en

cuenta los beneficios, oportunidades, costos y riesgos que estén presentes en el análisis [83], [84].

Una vez realizada la búsqueda bibliográfica, se procedió a hacer la consulta a los expertos para identificar aquellos criterios que se consideraban pertinentes para el estudio, identificando 22 criterios enmarcados en 5 niveles de estudio. La forma de valorar los criterios se realizó utilizando una escala Likert de 1-9 siendo el 9 el valor que significaba la mayor valoración para cada criterio y 1 la menor, teniendo especial cuidado en que todos los criterios fuesen evaluados a maximizar, es decir que para todos el 9 fuese el valor máximo y que aportara positivamente al análisis. Un caso en el que el 9 podría ser utilizado de forma negativa, sería un costo, ya que un 9 en la valoración de un costo se vería reflejado como lo más costoso, sin embargo la forma de valorar el costo es definiendo el criterio como “menor costo”, de esta forma la valoración de 9 se traduciría en que es el más barato. Para encontrar los pesos se utilizó la comparación por pares propia del PAJ, utilizando la tabla 4.1, lo que permitió definir los pesos de cada criterio como un valor entre (0-1).

Los criterios seleccionados se enmarcaron en 5 niveles y fueron definidos gracias a la opinión de los expertos de la siguiente forma:

Nivel Tecnológico: En este nivel se agrupan los aspectos que hacen parte de los requerimientos técnicos que debe tener una tecnología PPDR, este nivel se compone de los siguientes criterios que se definen a continuación, con base en lo visto en el Item **2.2 A**, el cual hace parte del capítulo 2 de este documento:

1. **Disponibilidad:** Esta es indispensable ya que la efectividad de las PPDR se ve afectada por el tiempo de inactividad aun en momentos críticos donde deberían operar eficientemente. Las redes de PPDR deberían estar disponibles en un 99.99% de veces que sean necesarias para así poder prestar un servicio oportuno en casos de emergencia extrema.
2. **Capacidad:** La red PPDR debe tener suficiente capacidad y redundancia para manejar el tráfico durante las condiciones operativas máximas sin sobrecargarse ni impidiendo que las operaciones se realicen con la mayor fluidez posible.
3. **Cobertura:** La cobertura de las redes de comunicación PPDR debe ser muy amplia. Debe proporcionar cobertura en toda el área geográfica donde se esté

llevando a cabo una misión, que puede ser de las dimensiones de una red de área metropolitana o incluso aún más amplia. Además, la cobertura en interiores también debe estar disponible, especialmente en sótanos y túneles o en infraestructuras grandes y abarrotadas donde puede que sea difícil la comunicación.

4. **Fácil y rápidamente implementables:** Las redes antiguas ya existentes se rompen durante los desastres y emergencias, por lo tanto, las redes de comunicación PPDR deben ser fáciles y rápidamente implementables para poder sustituirlas con la mayor facilidad posible por nuevas en caso de daños a estas.
5. **Interoperabilidad:** La interoperabilidad es un requisito crucial de las redes de comunicación PPDR para la operación y cooperación efectiva y eficiente entre las agencias de PPDR. La interoperabilidad implica que las agencias PPDR pueden compartir información continuamente entre sí en todo momento. De tal manera que si los sistemas y redes PPDR no son interoperables puede no se realice una debida transferencia de datos he implica a su vez que no haya fluidez ni eficiencia en las bases de información que manejan entre agencias y entes de este sector.
6. **Movilidad:** Las redes de comunicación PPDR son desplegadas en un entorno altamente dinámico, lo que se traduce en una amplia variedad de requisitos de movilidad. Por lo tanto, las redes de comunicaciones PPDR son generalmente inalámbricas y de esta manera proporcionan una mejor movilidad.
7. **Actuación:** La respuesta a las redes de comunicaciones PPDR deben ser en tiempo real y tener baja latencia.
8. **Calidad de servicio:** Las redes PPDR deben cumplir con unos altos estándares QoS para que las misiones no se vean afectadas por la mala calidad, ya que lo que está en juego es de alta importancia y la mayoría de las comunicaciones son de misión crítica en naturaleza.
9. **Confiabilidad:** Las redes de comunicación PPDR deben ser confiables como debería ser requerido para operar en ambientes hostiles.
10. **Seguridad:** Las comunicaciones a través de las redes de comunicaciones PPDR solo deben ser escuchadas por el destinatario, esto para la seguridad y propósitos de confidencialidad.
11. **Escalabilidad y reconfiguración:** La escala y naturaleza de cada desastre es diferente, por lo tanto, las redes de comunicaciones PPDR implementadas, deberían ser fácilmente configurables para adaptarse a estos requisitos.

Nivel Económico: Corresponde a aquellos aspectos del ámbito económico y financiero que deben ser tenidos en cuenta al momento de pensar en la implementación de una tecnología PPDR en una ciudad como Bogotá. Estos aspectos están referidos a los costos en que habría que incurrir desde diferentes puntos de vista y se detallan a continuación.

1. **Menor Costo de Infraestructura:** Corresponde a los costos que hay que asumir, por concepto de la instalación o ampliación de infraestructura necesaria para el despliegue de una tecnología en particular.
2. **Menor Costo Terminales:** Corresponde a los costos que hay que asumir, por concepto de dispositivos terminales, necesarios para el correcto funcionamiento de una tecnología en particular.
3. **Menor Costo De Mantenimiento:** Corresponde a los costos que hay que asumir, por concepto del mantenimiento de la red desplegada y que es necesario para el correcto funcionamiento de una tecnología en particular.
4. **Menor Costo Del Servicio:** Corresponde a los costos que hay que asumir, por concepto de garantizar el servicio de comunicaciones PPDR dependiendo del tipo de red desplegada.

Nivel Ambiental: En este aspecto se intenta valorar el impacto a nivel de medio ambiente que se produciría por cuenta de implementar una red PPDR, en la medida que el impacto sea menor, mejor será la valoración para esa tecnología en particular. Los aspectos considerados en este nivel son los siguientes:

1. **Menor Contaminación Visual:** El despliegue de nueva infraestructura puede llevar a la construcción de nuevas obras en sitio para poder ubicar antenas y posicionar dispositivos, lo que se puede traducir en molestias en términos de visibilidad para muchos usuarios.
2. **Menor Impacto Ambiental:** El impacto al medio ambiente se intenta valorar teniendo en cuenta el potencial aporte al medio ambiente (menor incidencia) que puede conllevar la implementación de una tecnología PPDR en particular.

- 3. Uso Del Espectro.** El mejor aprovechamiento del espectro se ha contemplado como un criterio a valorar, teniendo en cuenta que entre mejor se utilice el espectro, habrá una mayor posibilidad de optimizar recursos y frecuencias.

Nivel Político: Este nivel cubre los aspectos relacionados con las fuerzas de algunos sectores y sus posibles intereses relacionados con la posible implementación de una tecnología. Los criterios tenidos en cuenta son:

- 1. Impacto Social de Sectores:** Este criterio intenta valorar el grado de aceptación que puede tener una tecnología a implementar y también los posibles conflictos de intereses que pueden llegar a haber entre los diferentes actores.
- 2. Autonomía Nacional:** Este Criterio busca valorar el grado de autonomía que tendría el Estado Colombiano, dependiendo de la tecnología que se implemente.

Nivel Regulatorio: Este nivel abarca aquellos aspectos que se deben tener en cuenta en el ámbito regulatorio y que son necesarios contemplar al momento de llegar a implementar una tecnología en particular, estos aspectos son:

- 1. Menor Impedimento Regulatorio:** Hace referencia a valorar la forma en que las condiciones a nivel regulatorio y de asignación de espectro pueden llegar a facilitar el despliegue de una tecnología en particular.
- 2. Menor Ampliación de Infraestructura:** Este criterio busca valorar la facilidad de poder implementar una tecnología, en términos de tiempos y despliegue de infraestructura que se pueden ver afectados por las licencias y permisos a que haya lugar.

5. Análisis de Dominancia

El análisis de dominancia se realiza mediante la utilización de una matriz cuadrada donde se evalúa cada una de las alternativas criterio a criterio, identificando el número de veces que una alternativa domina a otra en el total de los criterios evaluados. Al tener la matriz completa, se procede a hacer un análisis de dominancia donde se puede identificar el grado en que una alternativa domina a otra (medido en porcentaje), e inclusive, ese análisis mostraría eventualmente si existe una alternativa que domine a todas las demás

en todos los criterios “óptimo de pareto”, los resultados de este análisis se evidencian en la tabla 4.2

Tabla 4.2 Matriz de dominancia

	P25	DMR	TETRA	IDEN	LTE PRIVADO	LTE OPERADOR
P25	0%	45,45%	45,45%	50%	40,91%	40,91%
DMR	36,36%	0%	40,91%	45,45%	31,82%	40,91%
TETRA	36,36%	27,27%	0%	50%	27,27%	31,82%
IDEN	40,91%	40,91%	31,82%	0%	18,18%	27,27%
LTE PRIVADO	45,45%	59,09%	68,18%	77,27%	0%	36,36%
LTE OPERADOR	50%	59,09%	63,63%	68,18%	45,45%	0%

El resultado resaltado (45,45%) indica que la tecnología P25 tiene una dominancia en el 45,45% de los criterios evaluados con respecto a la tecnología DMR, en este caso ninguna alternativa tuvo el 100% de dominancia (No hubo óptimo de pareto), por lo que para tener una mejor comprensión de los datos, se hace necesario encontrar el Índice de dominancia (D_i/d_i), donde D_i es la sumatoria de las filas evaluadas y d_i es la suma de las columnas evaluadas. Estos resultados se pueden apreciar en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Matriz de dominancia con índices de dominancia

	P25	DMR	TETRA	IDEN	LTE PRIVADO	LTE OPERADOR	D_i	D_i/d_i
P25	0	10	10	11	9	9	49	1,06
DMR	8	0	9	10	7	9	43	0,84
TETRA	8	6	0	11	6	7	38	0,69
IDEN	9	9	7	0	4	6	35	0,54
LTE PRIVADO	10	13	15	17	0	8	63	1,75
LTE OPERADOR	11	13	14	15	10	0	63	1,61
D_i	46	51	55	64	36	39		

Se puede apreciar con claridad, que la alternativa con mayor índice de dominancia es LTE PRIVADO, seguida por LTE OPERADOR, P25, DMR Y TETRA con índices de

1.75, 1.61, 1.06, 0.84 y 0.69 respectivamente, por ultimo está la tecnología IDEN con un índice del 0.54, lo que se puede interpretar como que al tener el menor índice de dominancia, es la tecnología más dominada por las demás.

6. Ponderación de los criterios

La ponderación de los criterios se realizó aplicando la media geométrica a las valoraciones dadas por los expertos, esta técnica permite tener una valoración objetiva en términos de discrepancias ya que minimiza el impacto de valoraciones muy distantes a las realizadas por los demás expertos, caso que puede suceder como consecuencia de que un experto valore algún criterio que no sea de su completo dominio. Los resultados de este proceso se pueden ver en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Ponderación Final de los Criterios Según Niveles

	Tecnológico	Financiero	Ambiental	Regulatorio	Político	Vector Prioridad
Tecnológico	1,00	1,13	4,00	3,17	3,63	0,37
Financiero	0,89	1,00	3,48	2,76	3,16	0,32
Ambiental	0,25	0,29	1,00	0,79	0,91	0,09
Regulatorio	0,31	0,36	1,26	1,00	1,14	0,12
Político	0,28	0,32	1,10	0,87	1,00	0,10
Σ (Columnas)	2,73	3,09	10,84	8,60	9,85	1,00

Se puede observar que adicional a los niveles establecidos inicialmente, hay una casilla nombrada como Vector Prioridad, la cual muestra un número en un rango entre 0 y 1 Para este caso en particular, al criterio tecnológico se le asignó un Vector Prioridad de 0.37 correspondiendo al 37%, los demás niveles están expresados de la misma forma dando una total del 100%. Este valor hallado, es consecuencia de haber aplicado la primera parte del PAJ y debe entenderse como el peso que tendrá cada nivel en la ponderación final, al momento de evaluar los criterios correspondientes a ese nivel en particular entre cada una de las alternativas. A continuación, en las tablas 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 se muestra el mismo proceso con cada uno de los criterios de cada nivel.

Tabla 4.5 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Tecnológico

	Escalabilidad	Confiabilidad	Fácil Implantación	Actuación	Capacidad	Interoperabilidad	Movilidad	Cobertura	Calidad de servicio	Seguridad	Disponibilidad	Vector Prioridad
Escalabilidad	1,00	1,00	7,00	7,00	1,26	5,00	1,59	0,60	0,66	1,26	0,87	0,15
Confiabilidad	1,00	1,00	2,00	2,00	1,26	1,59	1,59	0,60	0,66	1,26	0,87	0,09
Fácil Implantación	0,50	0,50	1,00	1,00	0,63	0,79	0,79	0,30	0,33	0,63	0,44	0,05
Actuación	0,50	0,50	1,00	1,00	0,63	0,79	0,79	0,38	0,42	0,63	0,44	0,05
Capacidad	0,79	0,79	1,59	1,59	1,00	2,00	2,00	0,48	1,00	1,00	0,69	0,09
Interoperabilidad	0,63	0,63	1,26	1,26	0,79	1,00	1,00	0,38	0,42	0,79	0,55	0,06
Movilidad	0,63	0,63	1,26	1,26	0,79	1,00	1,00	0,38	0,42	0,79	0,55	0,06
Cobertura	1,66	1,66	3,32	1,00	1,00	2,64	2,64	1,00	1,33	1,91	1,39	0,14
Calidad de servicio	1,52	1,52	3,03	2,41	1,91	2,41	2,41	0,93	1,00	1,73	1,26	0,14
Seguridad	0,79	0,79	1,59	1,59	1,00	2,41	1,26	0,52	0,58	1,00	0,69	0,08
Disponibilidad	1,15	1,15	2,30	2,30	1,45	0,93	1,82	0,72	0,79	1,45	1,00	0,10
Σ (Columnas)	10,17	10,17	25,35	22,40	11,72	20,55	16,89	6,29	7,60	12,45	8,74	1,00

Tabla 4.6 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Económico

	Costos de Infraestructura	Costo Terminales	Costos De Mantenimiento	Costos Del Servicio	Vector Prioridad
Menor Costo de Infraestructura	1,00	0,52	0,60	0,60	0,16
Menor Costo Terminales	1,91	1,00	1,10	1,14	0,30
Menor Costo De Mantenimiento	1,66	0,91	1,00	1,00	0,27
Menor Costo Del Servicio	1,66	0,97	1,00	1,00	0,27
Σ (Columnas)	6,23	3,31	3,70	3,74	1,00

Tabla 4.7 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Ambiental

	Contaminación Visual	Impacto Ambiental	Uso Del Espectro	Σ (Filas)	Vector Prioridad
Menor Contaminación Visual	0,20	0,20	0,20	0,59	0,20
Menor Impacto Ambiental	0,20	0,20	0,20	0,59	0,20
Uso Del Espectro	0,60	0,60	0,60	1,81	0,60
Σ (Columnas)	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00

Tabla 4.8 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Regulatorio

	Regulación	Despliegue De Infraestructura	Vector Prioridad
Menor Impedimento Regulatorio	1,00	1,65	0,62
Menor Ampliación de Infraestructura	0,61	1,00	0,38
Σ (Columnas)	1,61	2,65	1,00

Tabla 4.9 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Político

	Impacto Social De Sectores	Autonomía Nal	Vector Prioridad
Impacto Social De Sectores	1,00	1,14	0,53
Autonomía Nacional	0,87	1,00	0,47
Σ (Columnas)	1,87	2,14	1,00

En este punto es importante mencionar, que el método PAJ contempla un análisis para cada una de las matrices que valora cada experto, en donde la inconsistencia encontrada de las matrices debe ser inferior al 10%. En el desarrollo de algunas valoraciones por parte de los expertos hubo que repetir el proceso de valoración, ya que se superaba el umbral estipulado de la inconsistencia, en otros casos, se utilizó el método de asignación directa con incrementos decimales, lo que permitió reducir el nivel de inconsistencia a alrededor del 0%, lo que permitió continuar con el proceso del PAJ. Un ejemplo de la Inconsistencia encontrada para la matriz que valora los niveles, se aprecia en la tabla 4.10.

Tabla 4.10. Ratio de Inconsistencia de la Matriz de los Niveles Evaluados

λ_{max}	5,00
IC	0,00
IAM	1,12
RC	0,0%

7. Valoración de las alternativas según cada criterio

Para hacer la valoración de las alternativas para cada criterio, los expertos asignaron cada una de sus opiniones, tratando de estimar los ratios de preferencia por cada uno de los criterios y subcriterios en particular. Para obtener la matriz de decisión, se aplicó la

media geométrica a las valoraciones de los expertos. En la Tabla 4.11 se aprecia este resultado.

8. Cálculo de la prioridad global en el conjunto de alternativas

Teniendo en cuenta que todos los criterios y subcriterios fueron evaluados a maximizar, no hubo necesidad de revisar criterios a minimizar, por lo que se procedió a aplicar dos métodos de normalización a los datos de la matriz de decisión, los cuales corresponden a la normalización por la suma (Método Distributivo) y a la normalización por el mayor (Método Ideal).

Una vez han sido obtenidos los valores de haber aplicado cada método, se realiza una multiplicación directa de cada valor normalizado por el valor del vector prioridad encontrado para cada criterio y subcriterio. Y para poder determinar cual es la tecnología a escoger se deben sumar los valores obtenidos por cada alternativa. Los resultados de haber aplicado el método distributivo se muestran en la tabla 4-12 y así mismo en la tabla 4-13 se hace lo correspondiente para el método Ideal.

Para facilidad al momento de interpretar la Tabla 4.12, el valor 0.0046 (resaltado en amarillo) obtenido por tecnología P25 en criterio de escalabilidad, corresponde al valor obtenido después de haber realizado la media geométrica con las valoraciones de los expertos y su correspondiente normalización, realizada con el método distributivo, lo que arroja un valor de (0.085), este valor es multiplicado por el vector prioridad para el criterio de escalabilidad (0.146), y a su vez multiplicado por el vector prioridad del nivel tecnológico (0.367), lo que da como resultado (0.0046).

Así mismo, para entender los valores de la Tabla 4.13, se aplicó la misma metodología anterior, la única diferencia radicó en el método utilizado para realizar la normalización, ya que en esta oportunidad se utilizó el método de normalización por el ideal (normalización por el mayor).

Tabla 4.11 Matriz de decisión

NIVELES / CRITERIOS		TECNOLOGÍAS PPDR					
		P25	DMR	TETRA	IDEN	LTE PRIVADO	LTE OPERADOR
Tecnológico	Escalabilidad	2,9	3,9	4,9	5,3	9,0	8,0
	Confiabilidad	6,0	5,3	5,3	5,8	5,9	8,3
	Fácil Implantación	7,7	7,9	7,4	5,0	4,5	9,0
	Actuación	7,2	8,0	8,0	8,0	9,0	6,3
	Capacidad	4,3	6,0	6,3	7,7	9,0	9,0
	Interoperabilidad	9,0	7,0	6,3	6,0	5,5	5,5
	Movilidad	7,2	6,3	7,6	7,0	8,0	8,7
	Cobertura	4,3	7,0	7,0	6,0	6,1	6,5
	Calidad de servicio	9,0	6,0	6,3	7,7	9,0	8,1
	Seguridad	6,3	7,7	7,7	7,7	9,0	7,0
	Disponibilidad	7,7	7,7	7,0	6,0	9,0	7,0
Económico	Menor contaminación visual	9,0	6,0	5,3	4,6	7,0	8,7
	Menor impacto ambiental	9,0	6,0	5,6	5,0	7,0	9,0
	Uso del espectro	6,0	6,6	7,1	7,7	9,0	9,0
Ambiental	Menor costo de infraestructura	7,0	8,0	8,7	9,0	3,6	9,0
	Menor costo terminales	5,0	7,0	6,0	7,7	9,0	9,0
	Menor costo de mantenimiento	7,7	6,5	6,5	4,3	5,5	9,0
	Menor costo de servicio	9,0	9,0	8,7	7,7	9,0	5,2
Político	Impacto social	9,0	9,0	9,0	9,0	8,7	6,5
	Autonomía nacional	8,7	8,7	9,0	9,0	9,0	6,5
Regulatorio	Menor impedimento regulatorio	9,0	7,9	5,3	4,9	6,1	7,7
	Menor ampliación infraestructura	4,9	7,0	6,5	5,3	7,0	9,0

Tabla 4.12 Cálculo de la Prioridad Global (Método Distributivo)

NIVELES / CRITERIOS		TECNOLOGÍAS PPDR					
		P25	DMR	TETRA	IDEN	LTE PRIVADO	LTE OPERADOR
Tecnológico	Escalabilidad	0,0046	0,0062	0,0078	0,0084	0,0143	0,0127
	Confiabilidad	0,0056	0,0050	0,0050	0,0055	0,0056	0,0078
	Fácil Implantación	0,0032	0,0033	0,0031	0,0021	0,0019	0,0037
	Actuación	0,0028	0,0031	0,0031	0,0031	0,0035	0,0024
	Capacidad	0,0033	0,0045	0,0048	0,0058	0,0068	0,0068
	Interoperabilidad	0,0050	0,0038	0,0035	0,0033	0,0030	0,0030
	Movilidad	0,0035	0,0031	0,0037	0,0034	0,0039	0,0042
	Cobertura	0,0110	0,0085	0,0085	0,0073	0,0075	0,0080
	Calidad de servicio	0,0073	0,0070	0,0073	0,0089	0,0105	0,0094
	Seguridad	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049	0,0057	0,0044
	Disponibilidad	0,0076	0,0064	0,0058	0,0050	0,0076	0,0058
Económico	Menor contaminación visual	0,0041	0,0027	0,0024	0,0021	0,0032	0,0039
	Menor impacto ambiental	0,0040	0,0026	0,0025	0,0022	0,0031	0,0040
	Uso del espectro	0,0074	0,0081	0,0087	0,0094	0,0111	0,0111
Ambiental	Menor costo de infraestructura	0,0080	0,0091	0,0099	0,0103	0,0041	0,0103
	Menor costo terminales	0,0112	0,0156	0,0134	0,0171	0,0201	0,0201
	Menor costo de mantenimiento	0,0169	0,0143	0,0143	0,0095	0,0121	0,0198
	Menor costo de servicio	0,0160	0,0160	0,0154	0,0136	0,0160	0,0092
Político	Impacto social	0,0095	0,0095	0,0095	0,0095	0,0092	0,0069
	Autonomía nacional	0,0081	0,0081	0,0084	0,0084	0,0084	0,0060
Regulatorio	Menor impedimento regulatorio	0,0159	0,0139	0,0094	0,0087	0,0109	0,0136
	Menor ampliación infraestructura	0,0055	0,0077	0,0072	0,0059	0,0077	0,0010
RESULTADO GLOBAL		0,165	0,163	0,158	0,154	0,176	0,183

Tabla 4-13 Calculo de la Prioridad Global (Método Ideal)

NIVELES / CRITERIOS		TECNOLOGÍAS PPDR					
		P25	DMR	TETRA	IDEN	LTE PRIVADO	LTE OPERADOR
TECNOLÓGICO	Escalabilidad	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05
	Confiabilidad	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
	Fácil implantación	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
	Actuación	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
	Capacidad	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
	Interoperabilidad	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
	Movilidad	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	Cobertura	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04
	Calidad de servicio	0,04	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05
	Seguridad	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
	Disponibilidad	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
ECONÓMICO	Menor contaminación visual	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
	Menor impacto ambiental	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
	Uso del espectro	0,04	0,04	0,04	0,05	0,60	0,06
AMBIENTAL	Menor costo de infraestructura	0,04	0,05	0,05	0,05	0,20	0,05
	Menor costo terminales	0,05	0,08	0,07	0,08	0,10	0,10
	Menor costo de mantenimiento	0,07	0,06	0,06	0,04	0,50	0,09
	Menor costo de servicio	0,09	0,09	0,08	0,07	0,09	0,05
POLÍTICO	Impacto social	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04
	Autonomía nacional	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03
REGULATORIO	Menor impedimento regulatorio	0,07	0,06	0,04	0,04	0,05	0,06
	Menor ampliación infraestructura	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
RESULTADO GLOBAL		0,166	0,164	0,159	0,156	0,175	0,180

9. Análisis de resultados

Teniendo en cuenta que todas las valoraciones dadas por los expertos se hicieron a maximizar, es decir que el mayor número posible representa una mejor valoración en cada uno de los criterios, se utilizaron dos métodos distintos para normalizar los cuales conservan proporcionalidad, estos resultados se pueden evidenciar en las tablas 4.12 y 4.13. Los resultados obtenidos por el método distributivo arrojan que la tecnología LTE OPERADOR obtuvo el mayor porcentaje con un 18.3%, seguido de LTE PRIVADO la cual obtuvo un 17.6% y P25 con un 16,5%, las tecnologías DMR, TETRA e IDEN obtuvieron un 16,3%,15,8% y 15,4% respectivamente. De la misma manera, se encontró que los resultados fueron muy similares a los que se precisaron con el método del ideal, ya que la tecnología LTE OPERADOR se posicionó en primer lugar con un 18% y para el segundo lugar se encontró a la tecnología LTE PRIVADO con 17.5% seguida por P25 con un 16,6%, les siguieron las tecnologías DMR, TETRA e IDEN, las cuales obtuvieron un 16,4%,15,9% y 15,6% respectivamente.

Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia que en ambos casos las tecnologías mantuvieron sus posiciones, la tecnología LTE OPERADOR se posiciona como la tecnología que obtiene el mayor porcentaje, seguida por la tecnología LTE PRIVADO, P25, DMR, TETRA y finalmente la tecnología IDEN. Lo anterior da a entender que al momento de escoger una tecnología para implementar la red PPDR de la policía metropolitana de Bogotá, esta debería ser LTE ya sea a través de un operador o a nivel propietario.

Como último paso del PAJ, se hace necesario realizar un análisis de sensibilidad, con el fin de conocer la robustez de los resultados precisados anteriormente, para esto, los valores obtenidos en los vectores de prioridad serán variados con la finalidad de ver los posibles comportamientos en el resultado global, y así mismo, poder resaltar las áreas fuertes y/o débiles, de las tecnologías que se posicionan en primer y segundo lugar. Estas variaciones se muestran en el siguiente capítulo.

5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LA SELECCIÓN REALIZADA.

Como se mencionó anteriormente, Para completar el proceso del PAJ, en este capítulo se realizará un análisis de sensibilidad para confirmar que los resultados sean suficientemente robustos y concluyentes. Para realizar este análisis, se utiliza una herramienta informática de cálculo denominada Expert Choice.

Este software, permite observar la importancia de los criterios, con lo cual ayuda a determinar diferentes escenarios que pueden llegar a cambiar una decisión, gracias a que permite cambiar los valores obtenidos en los vectores de prioridad (pesos) de los criterios y subcriterios analizados durante todo el proceso matemático del PAJ.

A continuación, se muestran los resultados de realizar variaciones en los pesos de los criterios (no mayores al 10%), y se observará como estos cambios afectan el resultado obtenido inicialmente, lo que se verá reflejado en que la tecnología LTE OPERADOR seguirá siendo la tecnología ganadora a pesar de los cambios, o, que alguna de las otras tecnologías podrían posicionarse como las tecnologías a escoger, en caso de que los cambios resulten en que el modelo jerárquico evaluado tenga cierta fragilidad.

5.1 MODELO JERÁRQUICO

El modelo jerárquico analizado se muestra en la Figura 5.1, se observa como en la parte de arriba del modelo se posiciona el objetivo del problema a resolver (Goal), a partir del cual se establecen criterios y subcriterios, sobre los cuales se valora cada una de las alternativas.

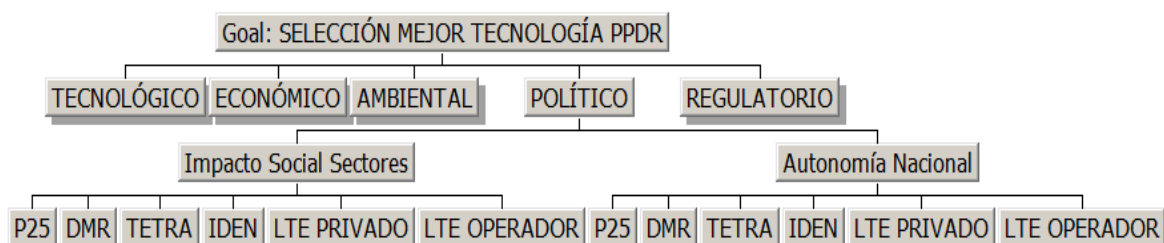


Figura 5.1. Árbol jerárquico. Fuente: Simulador

Para una mejor comprensión de la Figura 5.1, se puede apreciar que los criterios identificados, para evaluar cual es la mejor tecnología PPDR a implementar, son los mismos 5 que han venido trabajando hasta el momento, Tecnológico, Económico, Ambiental, Político y Regulatorio. Así mismo, y por no saturar la imagen, solo se muestran los sub-criterios del nivel político, los cuales son: Impacto social de sectores y la Autonomía Nacional. Finalmente, se aprecia que en la base del modelo jerárquico están las alternativas estudiadas, lo que significa que todos los criterios y sub-criterios identificados son evaluados para cada tecnología en particular.

Una vez establecido el modelo jerárquico, se ingresan los datos que se obtuvieron con la media geométrica, la cual fue aplicada a las valoraciones de los expertos. En la Figura 5.2 se muestran los valores calculados por el software (pesos) para cada criterio, donde la letra L (Local), debe entenderse como el peso del subcriterio en relación con los otros que están en el mismo clúster. Así mismo, la letra G (Global), corresponde al peso que tiene un criterio o sub-criterio en particular dentro de todo el modelo, es decir, su peso específico frente al objetivo planteado.

Es de anotar, que el software en su implementación, utiliza el PAJ para corroborar los datos que se obtienen de forma matemática con las operaciones y las matrices, y cuando se han insertado todas las valoraciones necesarias, muestra un color verde que también se aprecia en la Figura 5.2 antes del nombre de cada criterio, señalando que si el modelo jerárquico está listo para ponderar las valoraciones, la parte del objeto de estudio (Goal) también se pone en verde.

En los criterios y subcriterios, se puede observar que el nivel de color verde dentro del cuadro, es proporcional al ratio de importancia dentro de cada nivel del modelo jerárquico, es decir corresponde a su importancia local. Esto se evidencia por ejemplo, en el criterio Político, donde el cuadro verde muestra su participación cercana al 10% (cerca del 90 % del cuadro está en blanco), mientras que cada uno de sus sub-criterios muestra un cuadro con una participación cercana al 50% cada uno, es decir cada uno de los cuadros está aproximadamente lleno de verde a la mitad.

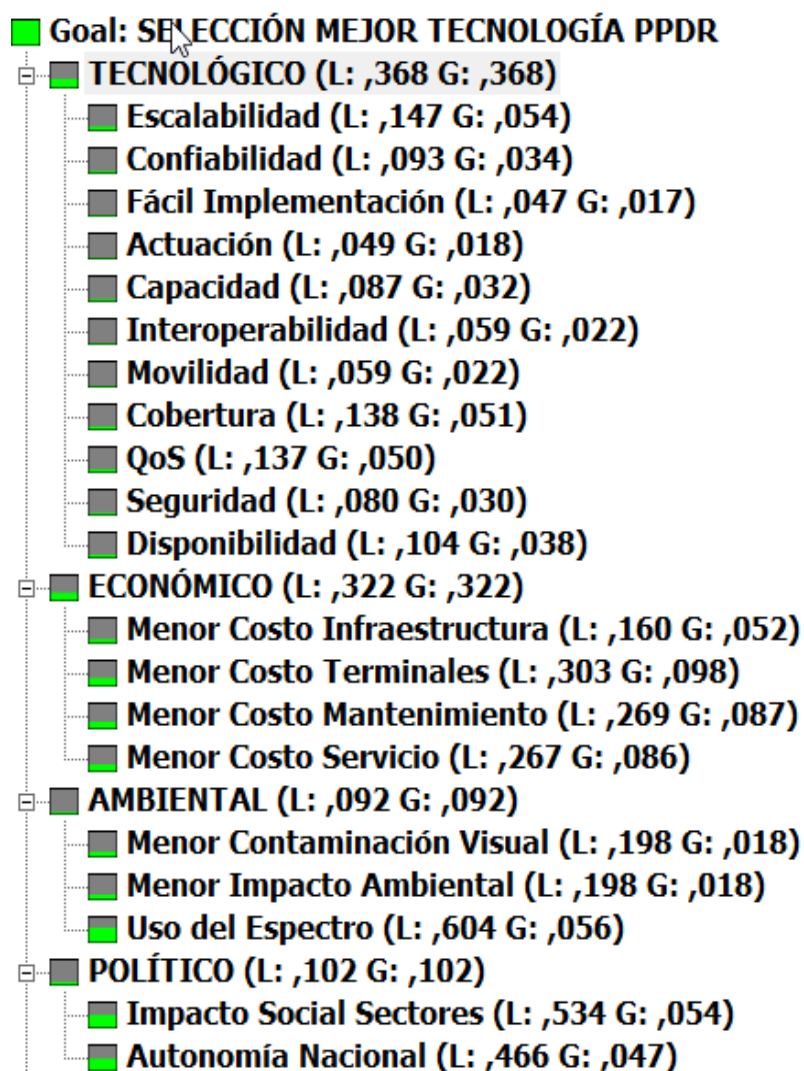


Figura 5.2. Pesos de los Niveles y Subniveles en el Expert Choice. Fuente: Simulador

Una vez se ha confirmado que todos los criterios están en verde, se puede proceder a calcular el resultado del modelo, en las Figuras 5.3 y 5.4 se muestran el resultado obtenido al aplicar el modo distributivo y el modo ideal con la ayuda del programa Expert Choice.

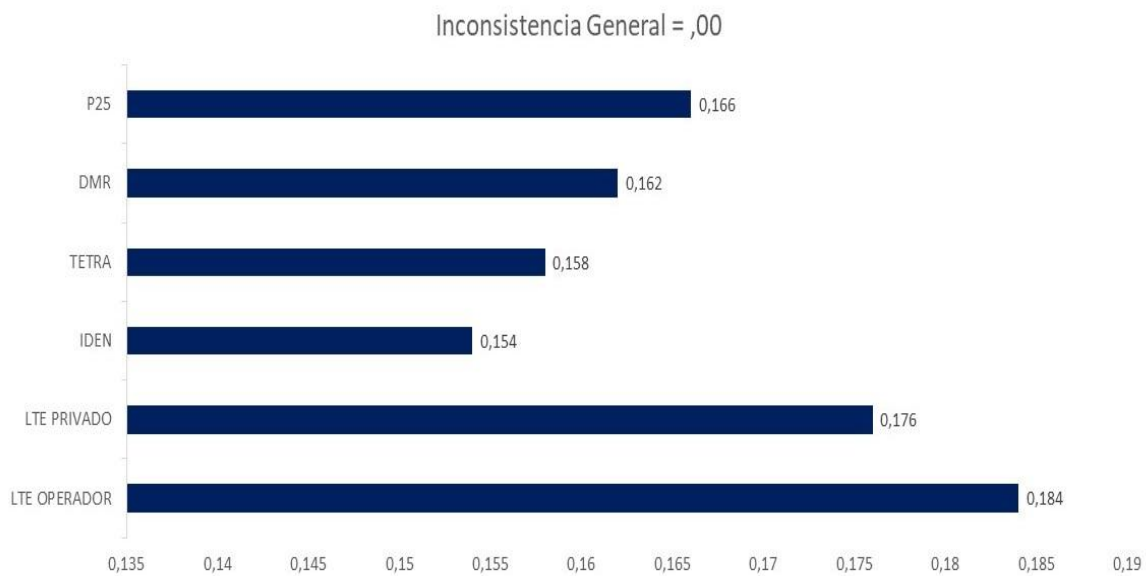


Figura 5.3. Resultado Modo distributivo. Fuente: Simulador

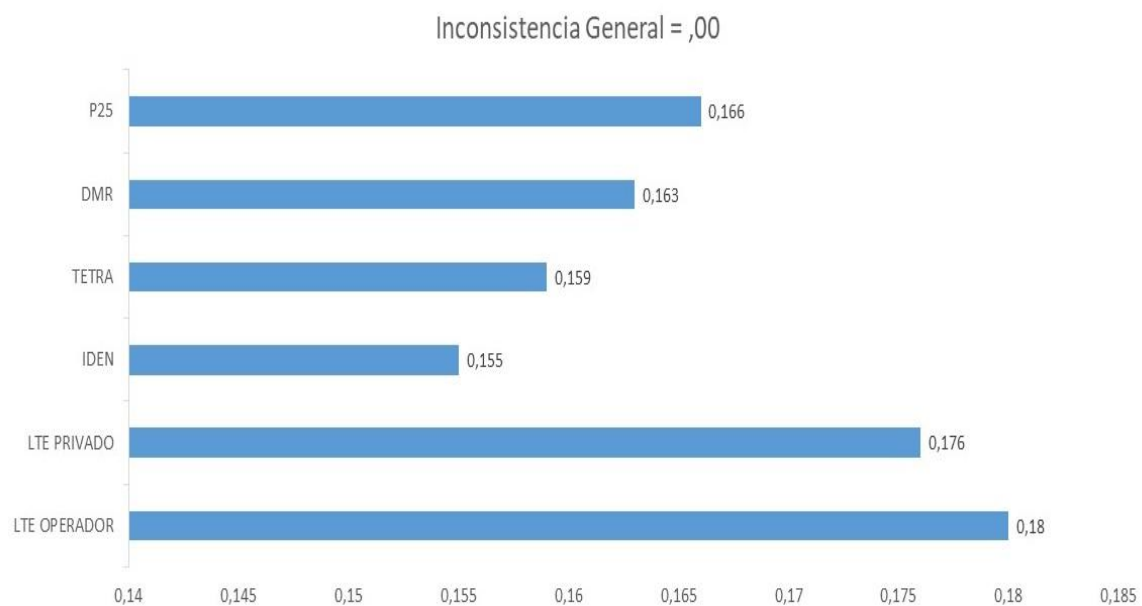


Figura 5.4. Resultado Modo ideal. Fuente: Simulador

En ambos casos se aprecia que los resultados obtenidos de forma matemática coinciden con los arrojados por el software, lo que indica que el PAJ fue aplicado de buena manera. En este punto es que tiene sentido hacer las variaciones en los pesos de los criterios.

5.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En la figura 5.5 se puede observar como Expert Choice en uno de sus herramientas analíticas, muestra los resultados de una forma diferente a la convencional y permite comparar los desempeños de las distintas tecnologías para cada uno de los criterios evaluados..

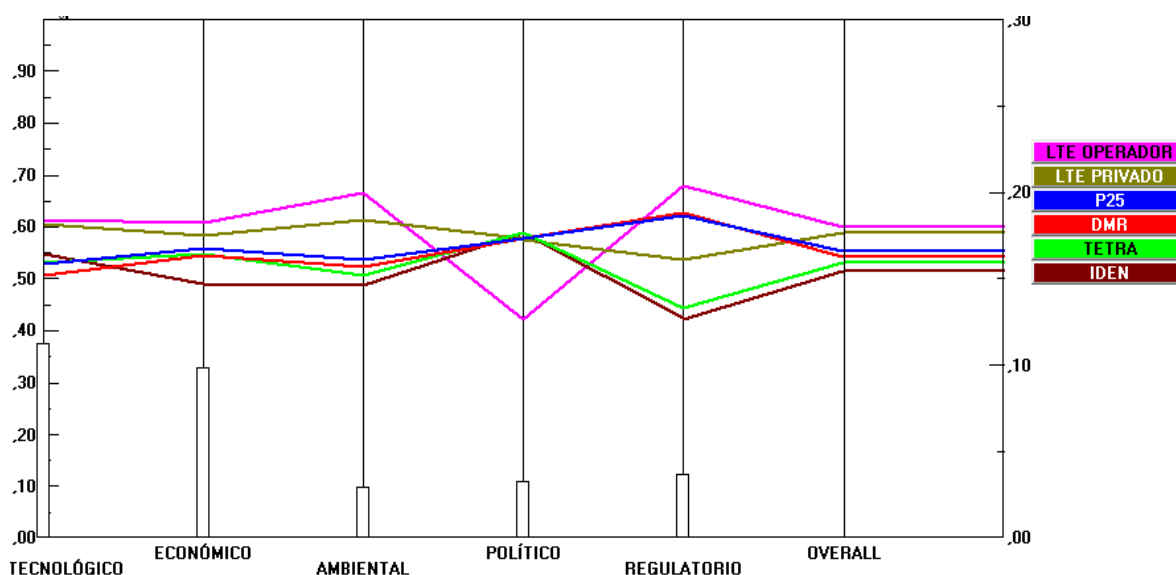


Figura 5.5. Análisis de sensibilidad Modo Distributivo. Fuente: Simulador

Gracias a la utilización de colores en el entorno gráfico, se puede apreciar como la tecnología LTE OPERADOR (en violeta) tiene el primer lugar, y de segundo lugar encontramos al LTE PRIVADO, seguida por P25. Se puede ver con facilidad que uno de los aspectos frágiles de esta tecnología corresponde al nivel político, sin embargo, posee fortalezas a nivel tecnológico, ambiental y regulatorio y económico. A continuación se muestran las variaciones menores a un 10%, realizadas sobre los pesos de estos criterios.

1. Sensibilidad a la variación menor al 10%

Se puede observar en las figuras 5.6, el resultado de variar el criterio tecnológico en cerca del 10 %, de igual manera en la figura 5.7 para el criterio económico, en la figura 5.8 para el criterio ambiental, en la figura 5.9 para el criterio político y en la figura 5.10 para el criterio Regulatorio. Los resultados de estas variaciones y su repercusión en la elección de la tecnología a escoger se consolidan en la tabla 5.1.

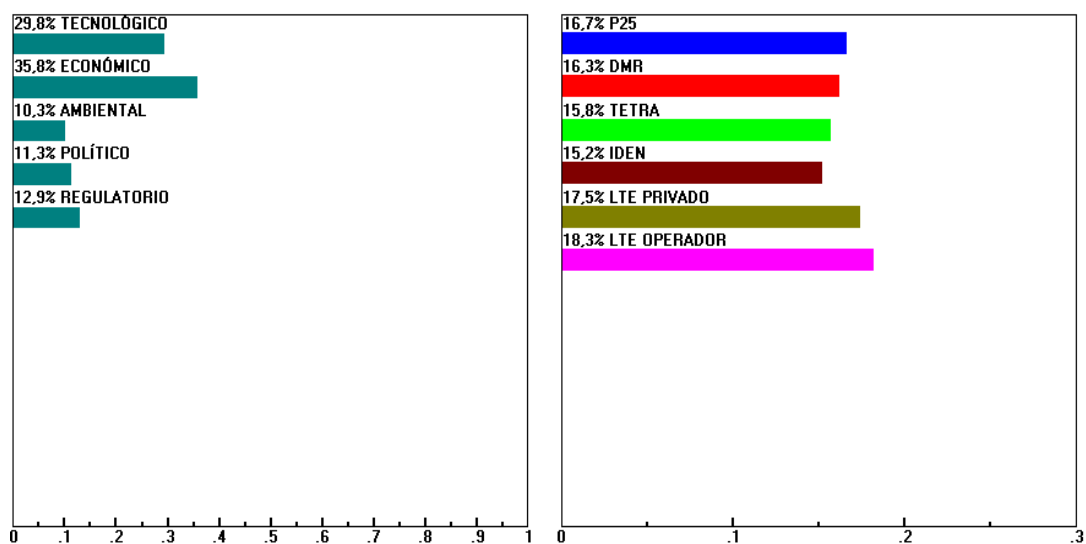


Figura 5.6. Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Tecnológico. Fuente: Simulador

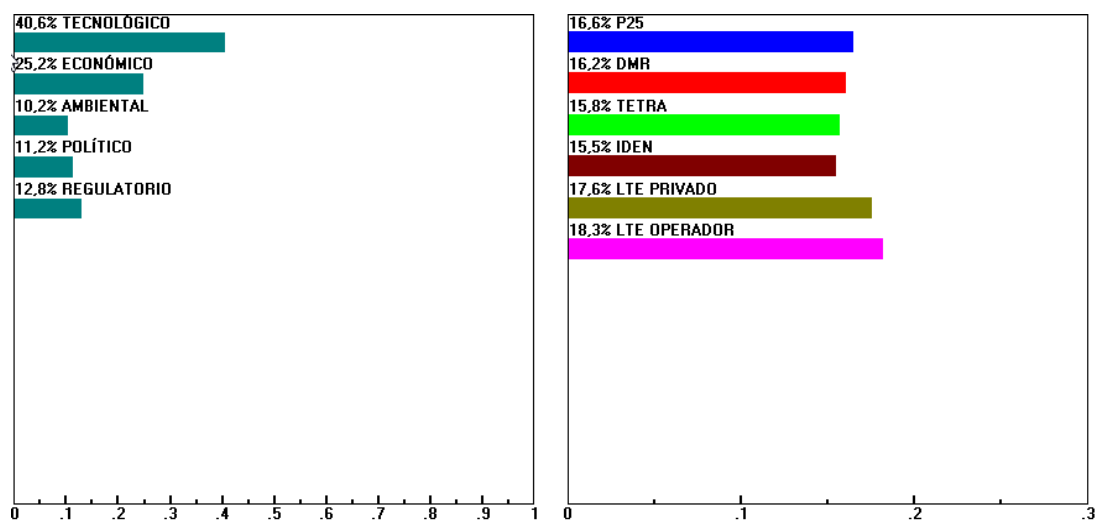


Figura 5.7. Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Económico. Fuente: Simulador

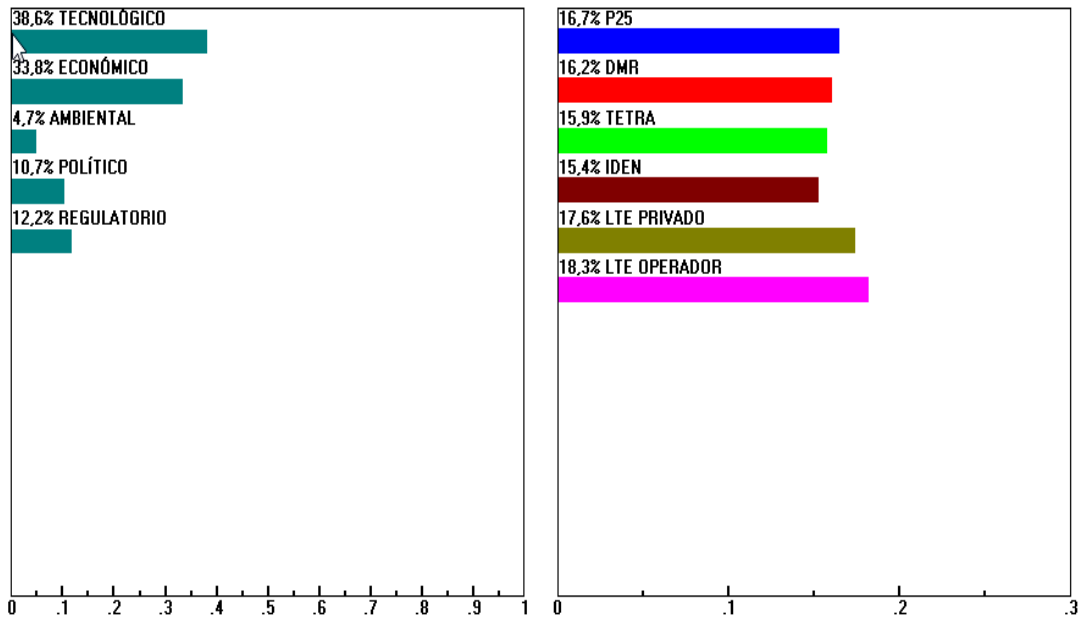


Figura 5.8. Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Ambiental. Fuente: Simulador

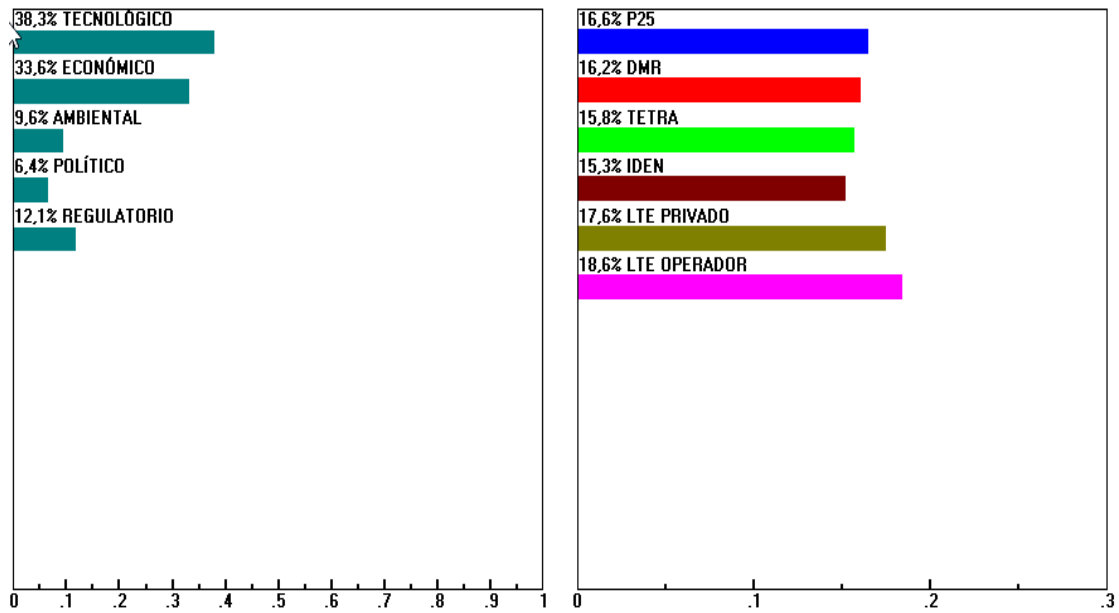


Figura 5.9. Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Político. Fuente: Simulador

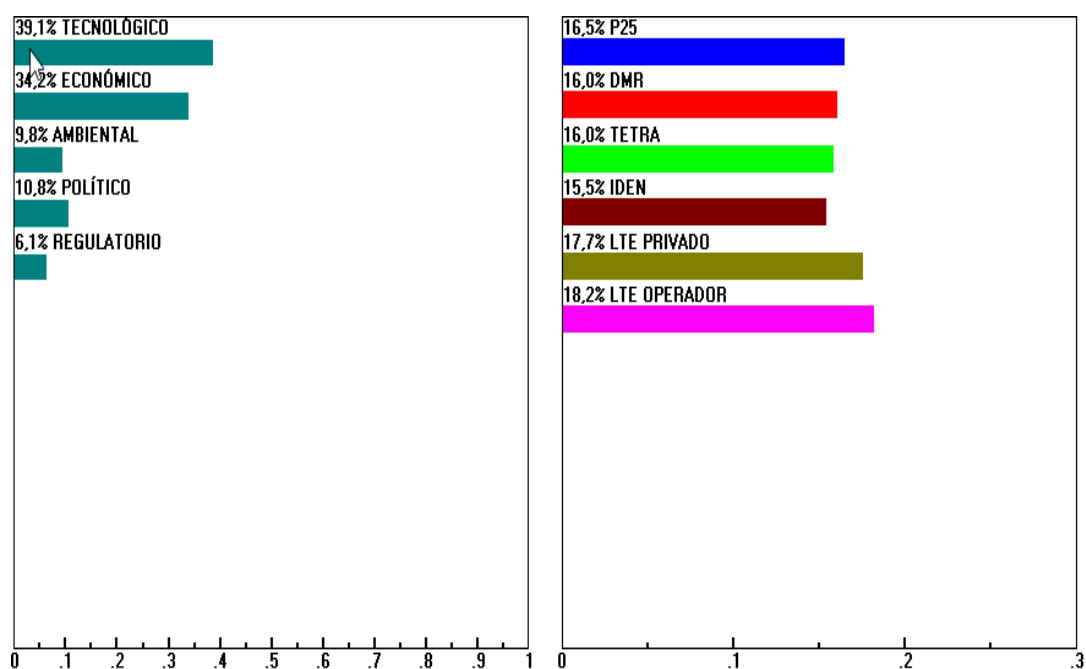


Figura 5.10. Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Regulatorio. Fuente: Simulador

Tabla 5.1. Análisis de Sensibilidad Modo Distributivo < a 10%

CRITERIOS					ALTERNATIVAS					
Tecnológico	Económico	Ambiental	Político	Regulatorio	P25	DMR	TETRA	IDEN	LTE PRIVADO	LTE OPERADOR
20,9	40,3	11,5	12,7	14,5	16,9	16,5	15,8	15,1	17,4	18,3
23,8	38,8	11,1	12,2	14	16,8	16,4	15,8	15,1	17,5	18,3
43	20,7	10,8	11,9	13,6	16,6	16,2	15,8	15,5	17,6	18,3
39,5	27,1	9,9	10,9	12,5	16,6	16,2	15,8	15,4	17,6	18,3
38,3	33,6	5,4	10,6	12,1	16,6	16,2	15,9	15,4	17,6	18,3
36,8	32,2	9,2	10,2	11,6	16,6	16,2	15,8	15,4	17,6	18,4
37,9	33,2	9,5	7,3	12	16,6	16,2	15,8	15,3	17,6	18,5
38,3	33,6	9,6	6,4	12,1	16,6	16,2	15,8	15,3	17,6	18,6
37,4	32,7	9,4	10,3	10,2	16,6	16,2	15,9	15,4	17,6	18,3
38,5	33,7	9,7	10,6	7,6	16,6	16,1	16	15,5	17,7	18,2

Al variar 10% del valor de cada criterio se logró comprobar que los valores son constantes y que su variación es mínima, y por consiguiente la tecnología LTE OPERADOR en todos los casos siguió encabezando los resultados.

Teniendo en cuenta lo realizado anteriormente, se propusieron otras variaciones adicionales, con el fin de ampliar el rango y de esta manera poder sacar conclusiones mucho más robustas.

2. Sensibilidad a la variación mayor al 10%

A continuación en la Tablas 5.2 se muestran los resultados consolidados de variar los pesos de los criterios hasta por un 50% para el modo distributivo y en la tabla 5.3 aquellos que corresponden a la misma variación pero para el modo ideal.

Tabla 5.2. Análisis de Sensibilidad para el Modo Distributivo > a 10%

CRITERIOS					ALTERNATIVAS					
Tecnológico	Económico	Ambiental	Político	Regulatorio	P25	DMR	TETRA	IDEN	LTE PRIVADO	LTE OPERADOR
42,2	29,5	8,4	9,3	10,6	16,6	16,1	15,8	15,5	17,6	18,4
47,4	26,8	7,7	8,4	9,7	16,5	16	15,9	15,6	17,7	18,4
32,9	39,3	8,3	9,1	10,4	16,7	16,2	15,9	15,3	17,6	18,4
32,1	40,8	8,1	8,9	10,2	16,7	16,2	15,9	15,3	17,6	18,4
34,3	30,1	15,2	9,5	10,9	16,6	16,2	15,8	15,3	17,6	18,5
33	28,9	18,5	9,1	10,4	16,6	16,1	15,8	15,3	17,7	18,5
33	29	8,3	19,3	10,5	16,7	16,3	16	15,6	17,6	17,8
32,7	28,7	8,2	20	10,4	16,7	16,3	16	15,6	17,6	17,7
33	28,9	8,3	9,1	20,7	16,8	16,5	15,6	15,1	17,4	18,6
31,5	27,6	7,9	8,7	24,3	16,9	16,6	15,5	15	17,4	18,7

Tabla 5.3. Análisis de Sensibilidad Modo Ideal > a 10%

CRITERIOS					ALTERNATIVAS					
Tecnológico	Económico	Ambiental	Político	Regulatorio	P25	DMR	TETRA	IDEN	LTE PRIVADO	LTE OPERADOR
43,4	28,8	8,3	9,1	10,4	16,6	16,2	15,9	15,6	17,7	18,1
48,2	26,4	7,6	8,3	9,5	16,5	16,1	15,9	15,7	17,7	18,1
32,3	40,5	8,1	8,9	10,2	16,7	16,3	16	15,4	17,6	18,1
30,3	44,1	7,6	8,4	9,6	16,7	16,3	16	15,3	17,6	18,1
33,4	29,3	17,6	9,2	10,6	16,6	16,2	15,9	15,4	17,7	18,2
32,1	28,1	20,7	8,9	10,2	16,6	16,2	15,9	15,4	17,7	18,3
33,1	29	8,3	19	10,5	16,7	16,4	16,1	15,7	17,6	17,5
33,4	29,3	8,4	18,3	10,6	16,7	16,4	16,1	15,7	17,6	17,6
32	28	8	8,8	23,1	16,9	16,6	15,6	15,1	17,4	18,3
30,9	27,1	7,8	8,5	25,7	17	16,7	15,5	15	17,4	18,4

A pesar de las variaciones tan considerables, se sigue estableciendo LTE OPERADOR como la mejor tecnología en la mayoría de los casos, solo cuando el criterio político tiene un peso cercano al 30% la tecnología LTE PRIVADO toma la delantera, lo que da a entender que en todo el análisis realizado LTE OPERADOR es la tecnología a seleccionar, y en detrimento de esta última la tecnología LTE PRIVADO debe tomar su lugar. Así mismo la tecnología P25 se estableció siempre como la tercera mejor opción, tal vez pensando en que su ciclo de vida todavía podría tener una segunda fase en el futuro.

3. Comparación entre Tecnologías

Con la ayuda de Expert Choice se realizó una comparación entre las tecnologías existentes teniendo como punto de referencia LTE OPERADOR y LTE PRIVADO. En las figuras 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 y 5.19 se presenta la comparación de las tecnologías.

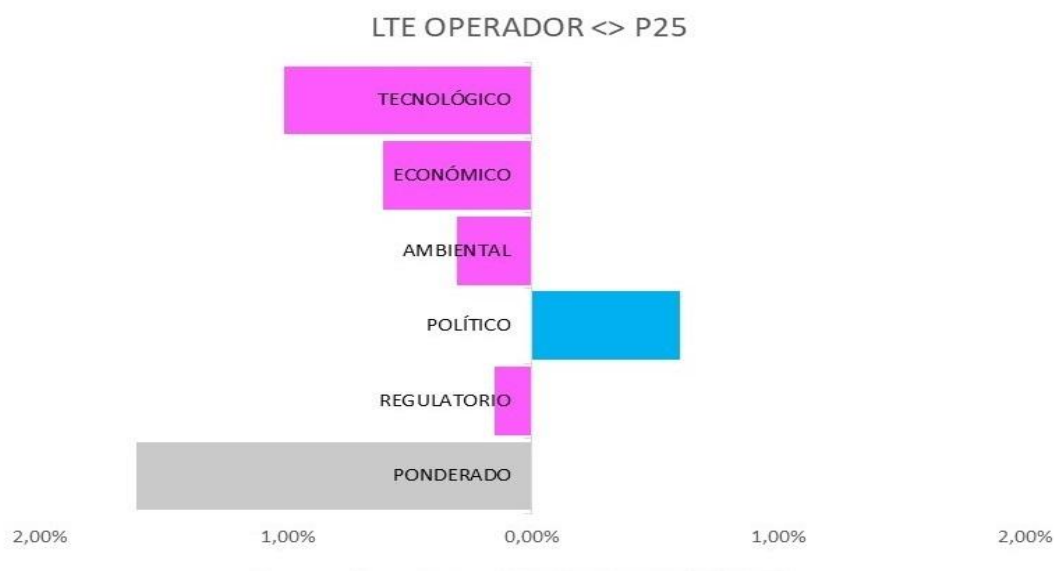


Figura 5.11. LTE OPERADOR vs P25. Fuente: Autor

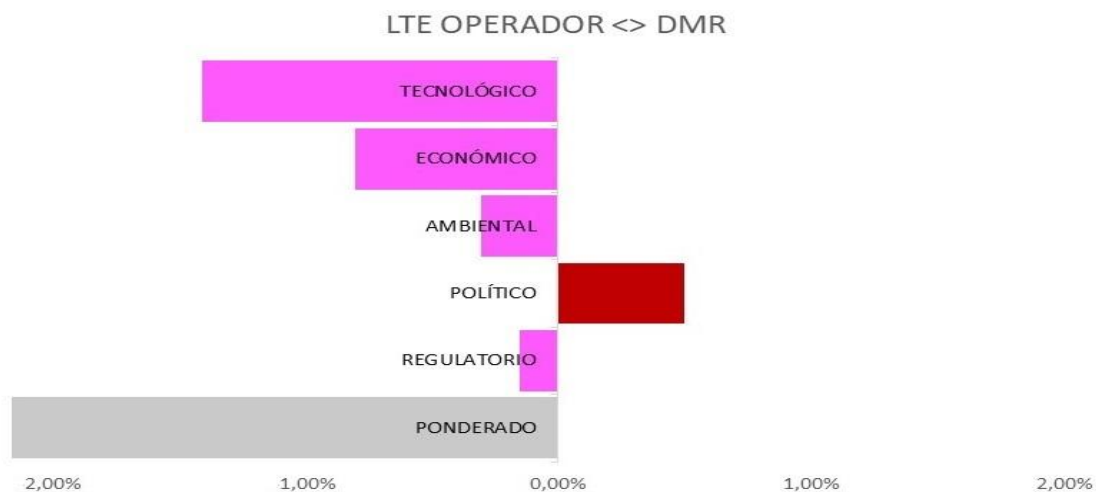


Figura 5.12. LTE OPERADOR vs DMR. Fuente: Autor



Figura 5.13. LTE OPERADOR vs TETRA. Fuente: Autor

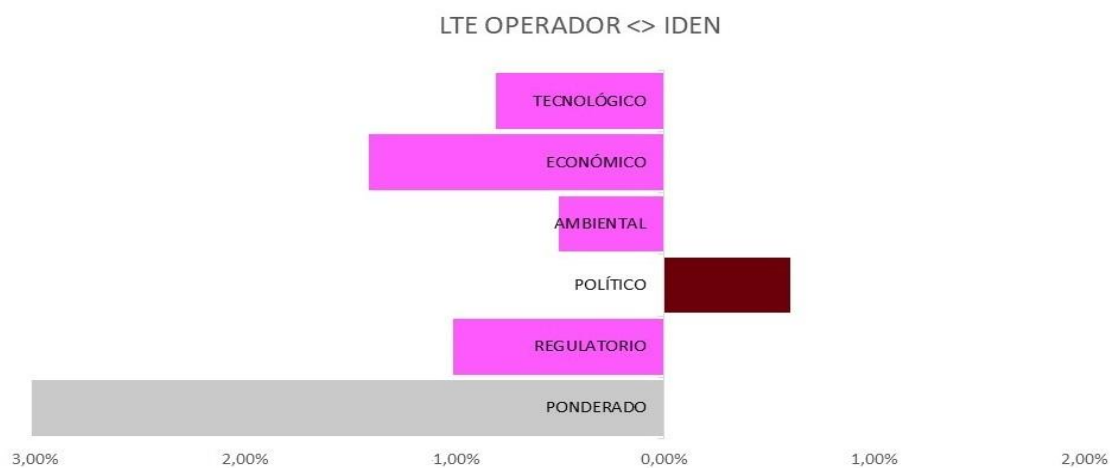


Figura 5.14. LTE OPERADOR vs IDEN. Fuente: Autor

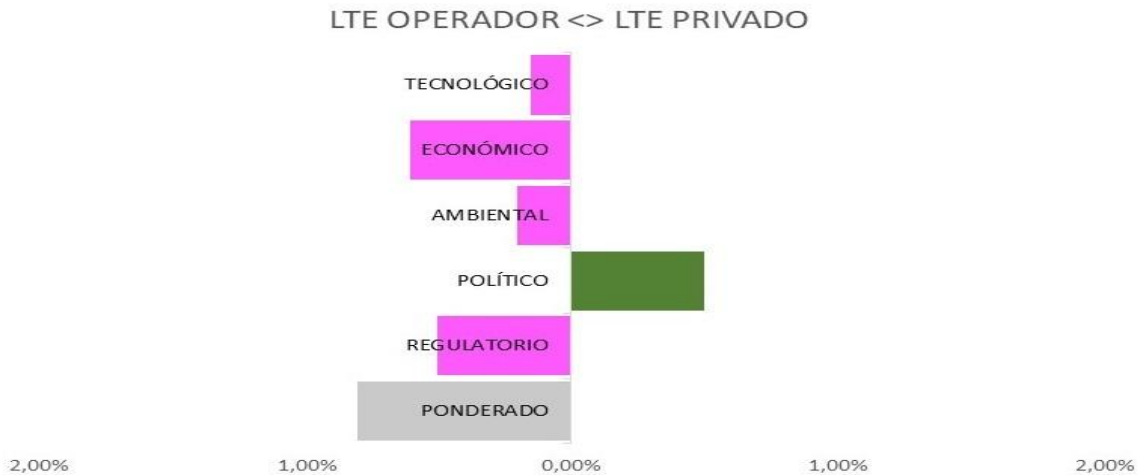


Figura 5.15. LTE OPERADOR vs LTE PRIVADO. Fuente: Autor

Al comparar las figuras 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15 se puede afirmar que LTE OPERADOR tiene grandes ventajas en los niveles tecnológico, ambiental, económico y regulatorio, sin embargo, tiene debilidad en el nivel político. Es de anotar que el nivel regulatorio se muestra como una fortaleza para esta tecnología, teniendo en cuenta que los criterios que se evalúan para este nivel corresponden a los menores impedimentos que hay desde el punto regulatorio para su despliegue y a la menor necesidad de ampliar la infraestructura. Este último representa una ventaja muy amplia sobre las demás tecnologías ya que si el despliegue de la red se hace a través de un operador, la infraestructura ya estaría implementada y los operadores ya tienen porciones de espectro garantizadas para prestar el servicio.

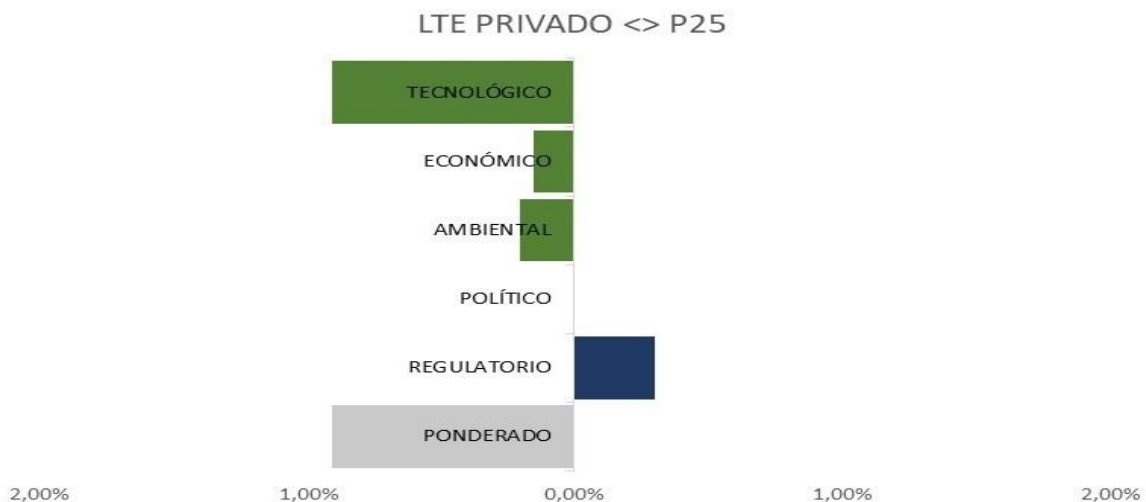


Figura 5.16. LTE PRIVADO vs P25. Fuente: Autor

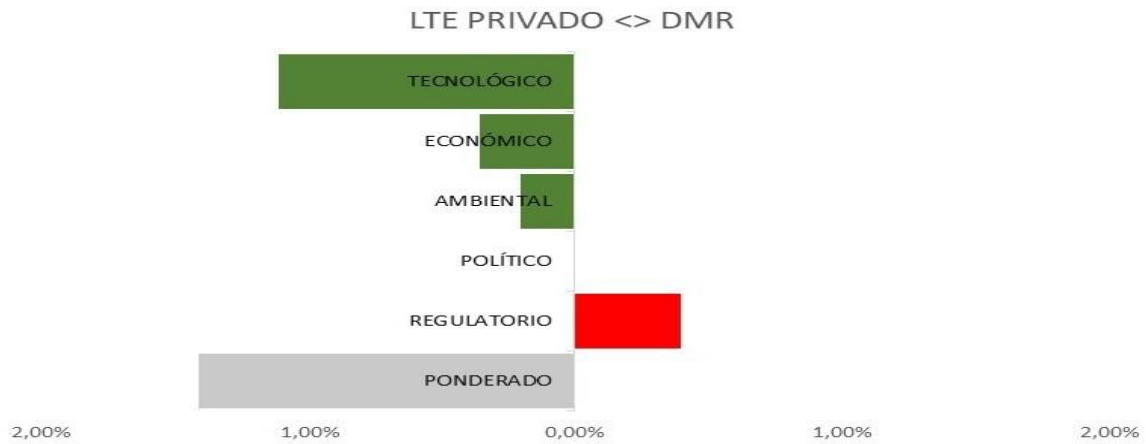


Figura 5.17. LTE PRIVADO vs DMR. Fuente: Autor
*

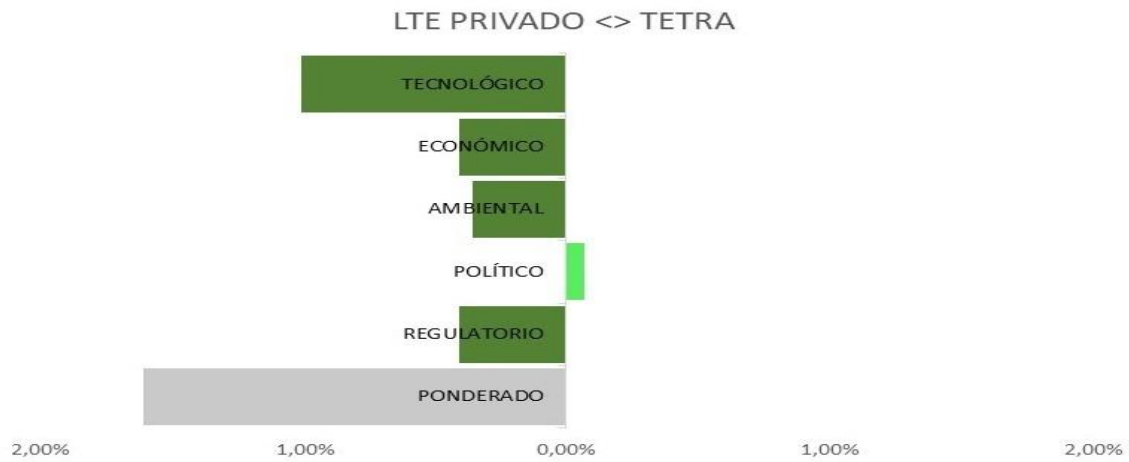


Figura 5.18. LTE PRIVADO vs TETRA. Fuente: Autor

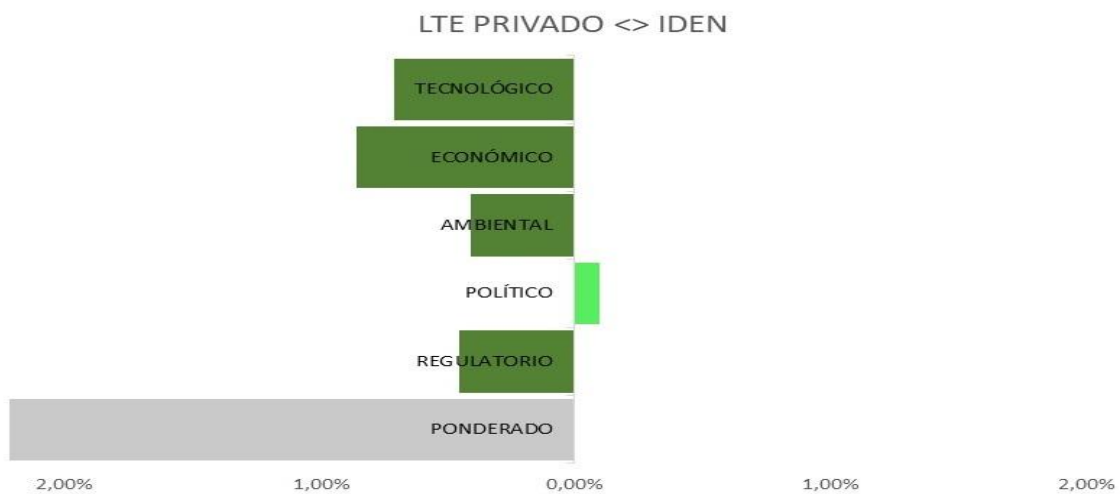


Figura 5.19. LTE PRIVADO vs IDEN. Fuente: Autor

Para el Caso de la tecnología LTE PRIVADO, se aprecia que tiene un comportamiento similar al que posee la tecnología LTE OPERADOR (ver Figura 5.11), sin embargo, una de sus debilidades está en el nivel Regulatorio, ya que se haría necesaria la adjudicación de espectro para poder hacer un despliegue adecuado de esta alternativa, a diferencia por ejemplo de LTE operador, ya que los prestadores del servicio móvil ya lo tienen garantizado a pesar de que la banda de 400 MHz todavía no ha sido liberada para que se trabaje sobre ella con LTE.

Por otra parte, LTE PRIVADO tiene la desventaja frente a LTE OPERADOR en términos económicos, ya que su implementación implicaría un amplio costo, al tener que comprar toda la red desde cero. Sin embargo, con relación al nivel político, tendría más aceptación ya que la autonomía nacional aumentaría considerablemente y por lo tanto su aceptación a nivel de ciertos sectores sociales. En todos los demás niveles (tecnológico y ambiental), para el caso de estas dos tecnologías, son bastante similares.

Con relación a las comparaciones con las demás tecnologías, tanto LTE PRIVADO como LTE OPERADOR, tienen ventajas significativas en términos tecnológicos y ambientales dado su mejor aprovechamiento del espectro y su mayor potencial a futuro; medido este último no solamente en términos de su ciclo de vida, sino en la proyección que tendrían en el corto y mediano plazo para superar aquellos impedimentos que se han identificado a nivel político y/o regulatorio, lo que permitiría su consolidación y su aceptación como excelentes alternativas para implementar las redes PPDR no solo en Bogotá, sino en cualquier parte del territorio Nacional.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- La relevancia de haber considerado aspectos ambientales, políticos, regulatorios, además de los aspectos económicos y tecnológicos, que normalmente se consideran en todo estudio de selección de una tecnología, se hace evidente en este análisis. La oportunidad de variar los pesos de los criterios seleccionados y analizar el ¿qué sucedería si?, representa una fortaleza al momento de tomar decisiones y una oportunidad de tener argumentos sólidos al momento de justificar elecciones.
- A pesar de que en los resultados obtenidos por las diferentes tecnologías no había diferencias muy marcadas a nivel numérico, es de resaltar que la tecnología que siempre se posicionó como ganadora, fue la tecnología LTE OPERADOR y en segundo lugar LTE PRIVADO, seguido por la tecnología P25. Lo anterior se argumenta desde las virtudes que tienen estas tecnologías ya que a nivel de transmisión de datos desde un comienzo se sabía que tienen el potencial de prestar servicios de comunicaciones PPDR con características mejoradas, especialmente hablando de LTE. Sin embargo, al haber contemplado criterios adicionales como el político, regulatorio, ambiental y económico, fue posible mostrar de una forma más realista, las posibilidades y contextos que deben ocurrir para que se pueda implementar como solución al caso de estudio realizado.
- LTE tiene varias mejoras a nivel tecnológico en comparación con las tecnologías P25, DRM, TETRA e IDEN. Estas mejoras incluyen: mejor cobertura y capacidad, y servicios más confiables, arquitectura simplificada basada en IP (protocolo de Internet), baja latencia y baja pérdida de paquetes, mayor interoperabilidad gracias a los protocolos e interfaces comercialmente estandarizados, mejores características y capacidades de seguridad, calidad de servicio y priorización, adicionalmente se puede implementar de forma flexible con una amplia gama de tamaños de canal / anchos de banda de operador.

- La utilización de servicios de banda ancha son clave en el desarrollo de las comunicaciones PPDR, ya que su implementación permitiría a las autoridades policiales, militares y entidades de socorro, como salud y bomberos, tener más opciones y características que faciliten la realización de su trabajo de manera óptima. Estas facilidades podrían ser visualización de mapas en tiempo real, video streaming, y mejor calidad de las llamadas sin que exista o se minimice la preocupación de factores como la distancia, el ruido o la geografía.
- Según recomendaciones de la UIT, es necesario considerar la Banda existente de 450 MHz, para implementar servicios 3GPP, así mismo, también podría considerarse la posibilidad de usar parte de la banda de 700 MHz. Esto estaría en consecuencia con una correcta planificación de la Gestión Nacional de Desastres y con la posibilidad de asignar bandas LTE que estén armonizadas a nivel mundial.
- En todos los países, el Gobierno tiene la obligación legal de proveer las comunicaciones de misión crítica nacional, y más aún las comunicaciones utilizadas para PPDR. Una pregunta se abre paso al considerar la tecnología LTE PRIVADA ya que su posible implementación podría estar condicionada a la existencia de un espectro dedicado exclusivamente para soportar los servicios de comunicaciones de misión crítica ya que, posiblemente, la demanda de este servicio sea cada vez más alta.
- Al elegir la implementación de una red PPDR sobre tecnología LTE PRIVADA (dedicada exclusiva para comunicaciones de misión crítica) hay que tener en cuenta el valor económico que tendrá la adquisición del espectro necesario y la infraestructura tecnológica que implicaría su despliegue, además hay que buscar el equilibrio entre el beneficio socioeconómico que se generará gracias al impacto de dichas comunicaciones y la pérdida de oportunidades comerciales para utilizar el espectro para soportar algún otro servicio.

- Los modelos MNO/MVNO (Red de operador móvil/Red de operador móvil virtual) no son ampliamente utilizados hoy en día, sin embargo podrían traer beneficios si se conciben como alternativas para prestar servicios de seguridad pública y de emergencia. El propósito de estos modelos es utilizar la infraestructura desplegada por operadores comerciales, para la creación de servicios dedicados para usuarios críticos, mediante el uso de una capa de aplicaciones dedicadas a seguridad pública.

6.2 RECOMENDACIONES

- El contexto económico por el que esté atravesando el país al momento de tomar estas decisiones y el valor del espectro electromagnético influye enormemente en la posibilidad de adquirir una red dedicada en el corto y mediano plazo. Lo recomendable a la hora de considerar la implementación de la red PPDR de la Policía Metropolitana de Bogotá, es proyectarla hacia el futuro, sabiendo que en este momento habría que hacer una inversión bastante grande (LTE PRIVADO) o buscando alternativas para garantizar una seguridad de los datos y estrategias que permitan cambiar la opinión de algunos sectores que no estarían muy de acuerdo en implementar una red (LTE OPERADOR) con una capa de aplicaciones para seguridad pública. En cualquier caso, la asignación de frecuencias es clave en este proceso para garantizar el buen funcionamiento de la red y poder buscar formas de aprovechar todas las capacidades que tiene a nivel técnico la tecnología LTE en cualquiera de las alternativas propuestas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] REDACCION NACIONAL, «Vanguardia,» 25 Abril 2009. [En línea]. Available: <http://www.vanguardia.com/historico/26659-los-10-desastres-naturales-que-marcaron-al-pais>. [Último acceso: 8 Abril 2018].
- [2] A. M. Erazo Coronado y J. Arroyave Cabrera, «PUCP,» Septiembre 2013. [En línea]. Available: <http://congreso.pucp.edu.pe/alaic2014/wp-content/uploads/2013/09/Ana-Mar%C3%ADA-Erazo-y-Jes%C3%BAs-Arroyave.pdf>. [Último acceso: 8 Abril 2018].
- [3] Oscar Schmitz, «TICs aplicadas a la Seguridad Pública,» 2014.
- [4] J. Spiess, «Using Big Data to Improve Customer Experience and Business Performance,» *Bell Labs Technical Journal*, 2014.
- [5] S.-I. Sou, «Enabling Proximity Call Continuity via Common Neighbor Tunneling for Public Safety in LTE,» <http://ieeexplore.ieee.org/document/7564104/>, 2016.
- [6] C. Chen, «Modeling of a public safety communication system for emergency response,» *IEEE International Conference on Communications*, 2009.
- [7] E. Solis Tulande, «ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA Y FUNCIONAL DE UNA RED PPDR,» Bogotá D.C, 2017.
- [8] educalingo, «educalingo,» [En línea]. Available: <https://educalingo.com/es/dic-es/respondedor>. [Último acceso: 9 Abril 2018].
- [9] G. Ghensi, «analysismason,» 29 Octubre 2012. [En línea]. Available: <http://www.analysismason.com/About-Us/News/Insight/LTE-advances-public-safety-Oct2012/>. [Último acceso: 9 Abril 2018].
- [10] R. Premkumar, «Washington University, Computer Science & Engineering,» 30 Abril 2014. [En línea]. Available: <http://www.cs.wustl.edu/~jain/cse574-14/ftp/disaster.pdf>. [Último acceso: 9 Abril 2018].
- [11] Mintic, «Mintic,» Mayo 2015. [En línea]. Available: https://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-9301_recurso_1.pdf. [Último acceso: 16 Abril 2018].
- [12] Cellnex, «Cellnex,» Febrero 2018. [En línea]. Available: http://www.112cv.com/documentos/tecnoemergencias/Cellnex_telecom_Soluciones_de_Co_municaciones_Criticas.pdf. [Último acceso: 16 Abril 2018].
- [13] R. Ferrus y O. Sallent, «The Road Ahead Through LTE technology,» de *Book-Mobile*

Broadband Communications for Public Safety.

- [14] NPSTC, «National Public Safety Telecommunications Council,» [En línea]. Available: <http://www.npstc.org/download.jsp?tableId=37&column=217&id=2055&file=Mission%20Critical%20Voice%20Functional%20Description%20083011.pdf>. [Último acceso: 9 Abril 2018].
- [15] UIT, «Interessensgruppen,» 2003. [En línea]. Available: http://wiki.oevsv.at/images/2/2f/ITU_R-REP-M.2033-2003-PDF-E.pdf. [Último acceso: 9 Abril 2018].
- [16] Z. Frias Barroso, «Upm,» 2016. [En línea]. Available: http://oa.upm.es/40157/1/ZORAIDA_FRIAS_BARROSO_1.pdf. [Último acceso: 16 Abril 2018].
- [17] UIT-R, «Extranet,» 2015. [En línea]. Available: <https://extranet.itu.int/brdocsearch/R-HDB/R-HDB-21/R-HDB-21-2015/R-HDB-21-2015-PDF-S.pdf>. [Último acceso: 16 Abril 2018].
- [18] Nokia Networks, «LTE Networks for Public Safety Services,» 2014, Espoo.
- [19] INFORME UIT-R M., «SISTEMAS MÓVILES TERRESTRES DIGITALES CON UTILIZACIÓN EFICAZ DEL ESPECTRO PARA TRÁFICO DE DESPACHO,» (Cuestión UIT-R 37/8), 2014.
- [20] Policía Metropolitana, «ASTRO 25/P25 POLICÍA METROPOLITANA DE BOGOTÁ».
- [21] Maira Isabel Medina / dominion, «DOCPLAYER,» Noviembre 2017. [En línea]. Available: <http://docplayer.es/61821134-Tetra-vs-p25-y-dmr-1.html>. [Último acceso: 11 Junio 2018].
- [22] CODAN RADIO COMMUNICATIONS, «CODAN RADIO COMMUNICATIONS,» [En línea]. Available: <https://www.codanradio.com/about-codan-radio/why-p25/>. [Último acceso: 11 Junio 2018].
- [23] Digital Mobile Radio Association , «Informe técnico sobre los beneficios de DMR,» 2009.
- [24] SIERRA NEVADA Amateur Radio Society, «Digital Mobile Radio - DMR 101».
- [25] ETSI , «RTR/ERM-TGDMR-307 Technical Report - Electromagnetic compability and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) General System Design,» [En línea]. Available: https://www.dmrassociation.org/downloads/standards/tr_102398v010301p.pdf. [Último acceso: 12 Junio 2018].
- [26] S. Bakaricc, M. Borzic, D. Bratkovic, and V. Grga, «TETRA (Terrestrial Trunked Radio) - technical features and application of professional communication technologies in mobile digital radio networks for special purpose services,» 47th Int. Symp. ELMAR, 2005, no. June, pp. 307-310, 2005 .
- [27] N. Catalano, «OPERACIONAL TRONCALIZADO DIGITAL TETRA,» vol. 1, 2007.

- [28] J. Girón, «ANÁLISIS DEL ESTÁNDAR DE RADIO TRONCALIZADO DIGITAL TETRA (Terrestrial Trunked Radio) Y DE SU POSIBLE APLICACIÓN EN EL ECUADOR,» vol. 1 , p. 25 , 2011.
- [29] P. V. Gomez, «ANÁLISIS DE SISTEMAS DIGITALES RADIO APROPIADOS A LAS NECESIDADES DE TELECOMUNICACIÓN EN ZONAS RURALES AISLADAS DE LA AMAZONÍA PERUANA,» 2003.
- [30] A. Defilippi, «LANIFICACIÓN DE UN SISTEMA TRONCALIZADO DIGITAL EN ESTÁNDAR TETRA PARA APLICACIONES DE SEGURIDAD CIUDADANA Y COMUNICACIONES EN CASO DE EMERGENCIA,» no. 505, pp. 10-12, 2012.
- [31] Tech Target - Margaret Rouse, «Tech Target - Search Networking,» [En línea]. Available: <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/iDEN>. [Último acceso: 13 Junio 2018].
- [32] Motorola, Inc, «iDEN - Technical Overview,» E. Algonquin Rd., Schaumburg.
- [33] Teltronic, «Teltronic,» [En línea]. Available: <http://www.teltronic.es/productos/lte/>. [Último acceso: 11 Marzo 2018].
- [34] TechTarget - Margaret Rouse, «Search Mobile Computing - Long Term Evolution (LTE),» [En línea]. Available: <https://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/Long-Term-Evolution-LTE>. [Último acceso: 2018 Junio 14].
- [35] «Xataka,» [En línea]. Available: https://i.blogs.es/efd0e8/lte-evolucion/1366_2000.jpg. [Último acceso: 2018 Junio 14].
- [36] Adrio Communications Ltd - Ian Poole, «Radio-Electronics.com,» [En línea]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/lte-ofdm-ofdma-scdma.php>. [Último acceso: 14 Junio 2018].
- [37] LTE & PPDR, «Análisis de la Tecnología LTE y su espectro aplicado a la Seguridad Pública».
- [38] «Android Authority,» [En línea]. Available: <https://www.androidauthority.com/4g-lte-guide-146347/>. [Último acceso: 14 Junio 2018].
- [39] Ericsson, 6 Abril 2011. [En línea]. Available: <http://www.comlab.uniroma3.it/ens/LTE1.pdf>. [Último acceso: 14 Junio 2018].
- [40] RF Wireless World, «RFW,» [En línea]. Available: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-LTE.html>. [Último acceso: 14 Junio 2018].
- [41] Icom, «Icom,» [En línea]. Available: <http://www.icomamerica.com/es/products/landmobile/p25/p25/default.aspx>. [Último acceso: 11 Marzo 2018].
- [42] R. Digital, «Radio Digital,» URE, [En línea]. Available: <https://radiodigital.ure.es/red-dmr/que->

es-dmr/. [Último acceso: 11 Marzo 2018].

- [43] P. Sorolla, «Viu,» 15 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.universidadviu.es/que-es-el-sistema-tetra/>. [Último acceso: 11 Marzo 2018].
- [44] ONU, «SELA.ORG,» [En línea]. [Último acceso: 18 05 2018].
- [45] U. I. d. Telecomunicaciones, «Union Internacional de Telecomunicaciones,» 2009. [En línea]. Available: https://www.itu.int/en/ITU-D/EmergencyTelecommunications/Documents/El_Salvador_2009/presentations/Presentac. [Último acceso: 18 05 2018].
- [46] U. I. d. Telecomunicaciones, « «Union Internacional de Telecomunicaciones,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/md/R07-WRC07-071022-TD-0081/es>. [Último acceso: 18 05 2018].
- [47] U. I. d. Telecomunicaciones, «Union Internacional de Telecomunicaciones,» 2003. [En línea]. Available: <http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2033->. [Último acceso: 18 05 2018].
- [48] A. R. Jamieson, «Unión internacional de Telecomunicaciones,» 13 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/itunews/manager/display.asp?lang=es&year=2006&issue=03&ipage=publicProtection&ext=html>. [Último acceso: 10 Marzo 2018].
- [49] L. Lara, «Unión Internacional de Telecomunicaciones,» 31 Julio 2015. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-R/seminars/rrs/2015-Americas/Forum/MOTOROLA%20IMT.pdf>. [Último acceso: 10 Marzo 2018].
- [50] U. I. d. Telecomunicaciones, «Union Intenacional de Telecomunicaciones,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.cept.org/files/9421/ITU-R%20Resolution%20648.pdf>. [Último acceso: 18 05 2018].
- [51] J. L. L. Torres, «Blogspot,» 3 Julio 2017. [En línea]. Available: <http://ventanadeanalisiseconomico.blogspot.com.co/2017/07/radiocomunicaciones-para-proteccion.html><http://ventanadeanalisiseconomico.blogspot.com.co/2017/07/radiocomunicaciones-para-proteccion.html>. [Último acceso: 10 Marzo 2018].
- [52] Geneva, «RESOLUTION 646 [COM5/4] (WRC 03),» 12 noviembre 2003. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0A/0E/R0A0E00006A0001MSWE.doc.
- [53] Geneva, «RESOLUTION 646 (REV.WRC 12),» 2012. [En línea]. Available: [www.cept.org/files/9421/Resolution%20646%20\(R%20Rev.%20WRC-12\).docx](http://www.cept.org/files/9421/Resolution%20646%20(R%20Rev.%20WRC-12).docx).
- [54] *Harmonized frequency channel plan for broadband public protection*, 2007.

- [55] *RESOLUTION 646 (REV.WRC-15) ppdr*, 2015.
- [56] ITU-R, «ITU,» Julio 2015. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2377-2015-PDF-E.pdf. [Último acceso: 26 Abril 2018].
- [57] ITU-R, «ITU,» Diciembre 2013. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2291-2013-PDF-E.pdf. [Último acceso: 26 Abril 2018].
- [58] LS Telcom, «LS Telcom Smart Spectrum Solutions,» [En línea]. Available: https://www.lstelcom.com/fileadmin/content/marketing/brochures/LS_Brochure_CriticalCommunications_en.pdf. [Último acceso: 26 Abril 2018].
- [59] Electronic Communications Committee, «ECO Documentation Database,» 6 Marzo 2015. [En línea]. Available: <https://www.erodocdb.dk/download/5e636c6a-ea7f/ECCDEC0403.PDF>. [Último acceso: 26 Abril 2018].
- [60] E. S. Tulande, «Análisis de viabilidad técnica y funcional de una red de protección pública y gestión de desastres bajo la tecnología (eLTE) para la policía nacional en la ciudad de Villavicencio,» 2017.
- [61] Mintic, «Plan de emergencia y contingencias del sector de telecomunicaciones,» Bogotá , 2009.
- [62] A. N. d. E. ANE, «El espectro al servicio de los colombianos,» 2015.
- [63] MinTIC, «www.mintic.gov.co,» 2017. [En línea].
- [64] ANE, «Mintic,» 31 Diciembre 2012. [En línea]. Available: https://www.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/Planeacion/poli-lineamientos-manuales/Manuales/ManualGestionEspectro/Titulo_IV.pdf?s=54375CF22C977F7839C3BA35E35C371FBB21DF05. [Último acceso: 3 Mayo 2018].
- [65] DEL SOCORRO GARCÍA C., M, «Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y Soft Computing,» En: Universidad Politécnica de Cartagena, 2009.
- [66] DIETER, G, «Engineering Design. A Materials and Processing Approach,» En: Tokyo: McGraw-Hill, 1983.
- [67] O. León, «Tomar decisiones difíciles,» En: Segunda Edición ed Universidad, 2001.
- [68] Boer, S.J.D, «Decision Methods and Techniques in Methodical Engineering Design,» En: Ph.D. Thesis De Lier: Academisch Boeken Centrum, 1989..
- [69] Beltan, Félix Antonio Cortés Aldana Mónica Garcia Melón Pablo A, «Selección de una Tecnología de Banda Ancha para la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, usando

- una Técnica de Decisión Multicriterio.,» En: Ingeniería e Investigación, Vol. 27, número 001, Universidad Nacional de Colombia, pp. 132-137, Abril de 2007.
- [70] Kaliszewski, I. , «Out of the mist: towards decision-maker-friendly multiple criteriadecision making support.,» En: European Journal of Operational Research, pp. 293-307, 2004.
- [71] Pomerol, J.C. ; S., Barba Romero, «Multicriterion decision in management: Principles and practice.,» En: Comisión de Regulación de Comunicaciones, 2010.
- [72] Romero, C, «Teoría de la decisión Multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones.,» En: Alianza Editorial S.A. Madrid, 1993.
- [73] L. Chemane, O.P. ; Cossa, T., «MCDM Model for Selecting Internet Access Technologies - A Case Study in Mozambique,» En: Eurocon, Serbia & Montenegro, Belgrade, November 22-24, 2005.
- [74] Sasidhar, M. ; Min, K. J., «Desicion support models for the selection of Internet access technologies in rural communities,» En: Telemat. Inform., vol. 22, no. 3, pp. 201-219, 2005.
- [75] Nepal, T. , «Evaluation of rural telecommunications infraestructure in South África.,» En: Probl. Nonlin. Anal. Eng. Syst., vol. 3, no. 24, pp. 138-149, 2005.
- [76] T. N. Andrewa, P. R. ; Nepal. T, «Enhancing the selection of communication Technology for rural telecommunications: An analytic hierarchy process model.,» En: International Journal of Computers, Systems and Signals, Vol. 6, No. 2, 2005.
- [77] Gasiea, Yousef A, «An analytical decision approach to rural Telecommunications infraestructure selection. University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering Management of Projects, Tesis de Graos, 2010. - 344 p.».
- [78] J.M., Moreno-Jiménez: El Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones En Toma de decisiones con criterios múltiples., En: Caballero R. y Fernández, G.M. Ed. ASEPUMA, Madrid, 2002.
- [79] E. H. Forman y S. I. G, «The analytical hierarchy process-an exposition.,» En: Operations Research 49 (4): pp. 469-487, 2001-07.
- [80] Bhushan, Navneet; Kanwal R., «Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process.,» En: London: Springer-Verlag. ISBN 1-8523375-6-7., 2004-01.
- [81] Saaty, Thomas L., «Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World.,» En: Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications. ISBN 0-9620317-8-X, 1999-05.
- [82] E., Rodriguez, «Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización

de una pyme.,» En: Real centro Universitario San Lorenzo del Escorial ISSN: 1133-3677, 2007.

- [83] G. A. C. Pedraza, «Estudio y Análisis de la viabilidad de la implementación de la tecnología PLT (Power Line Telecommunications) en Colombia en el ámbito de la transmisión de datos sobre redes de baja tensión,» 2012.
- [84] Saaty, Thomas L., «Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factor - The Analytic Hierarchy/ Network Process.,» En: RACSAM (Review of The Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics) pp. 251-318., 2008-06.