

Recomendaciones para la actualización del plan técnico nacional de radiodifusión sonora en amplitud modulada, en ondas hectométricas

LUIS GABRIEL LLANOS HENRIQUEZ

Director:

Ing. Gustavo Chica

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA DE TELECOMUNICACIONES
MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES Y REGULACION TIC
BOGOTÁ D.C., 2024

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a la Agencia Nacional del Espectro por la oportunidad que me brindaron de llevar a cabo este proyecto y darme la oportunidad de enriquecerlo mediante el desarrollo de la Maestría. En particular a la Ingeniera Diana Paola Morales Mora que al momento de realizar el presente proyecto se encontraba a cargo de la Subdirección de Gestión y Planeación Técnica del Espectro. A la coordinadora del Grupo de Ingeniería Carolina Daza Tache quien confió en mí en todo momento, y a todos mis compañeros del Grupo de Radiodifusión Sonora que me apoyaron para sacar adelante tan honorable trabajo, los cuales quiero nombrar uno a uno para regalarles una mención dentro de este proyecto. El ingeniero Juan Luis Vergara (líder del Grupo de Radiodifusión Sonora); Las ingenieras Dayana Arévalo, Susan Arguello y Diana Flórez (integrantes del Grupo de Radiodifusión Sonora); La abogada Silvia Carolina López (líder jurídica del Grupo de Ingeniería); Los ingenieros Javier Giraldo, Mauricio Hernández, Manuel Hernández, Nelson Hernández, Gustavo Vargas y Héctor Trejos (integrantes del Grupo de Radiodifusión Sonora). A todos ellos muchas gracias y ha sido un placer poder trabajar a su lado en la consecución de este proyecto que no busca más sino poner nuestro conocimiento al servicio del país.

TABLA CONTENIDO

ACRÓNIMOS	v
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
1 MARCO GENERAL DEL PROYECTO	4
1.1 OBJETIVOS	6
1.1.1 Objetivo General	6
1.1.2 Objetivos Específicos.....	6
1.2 ALCANCE	6
1.3 METODOLOGIA.....	7
1.4 MARCO TEÓRICO.....	7
1.4.1 Teoría de Ondas de Superficie	7
1.4.2 Recomendación UIT-R P.368	9
1.4.3 Método de la atenuación	19
2 Características de Propagación de Onda de Superficie	20
2.1 Análisis comparativo entre mediciones en campo y resultados obtenidos con las curvas de la Recomendación UIT-R P.368-9.....	21
2.2 Análisis de compatibilidad entre estaciones con las curvas de la Recomendación UIT-R P.368-9	29
3 DEFINICIONES.....	32
3.1 Incorporación de definiciones	32
3.1.1 Anchura de banda ocupada.....	32
3.1.2 Atribución de una banda de frecuencia	32
3.1.3 Canal proyectado.....	33
3.1.4 Clase de emisión	33

3.1.5	Cobertura de un municipio	33
3.1.6	Conceptos sobre divisiones territoriales.....	34
3.1.7	Emisión	35
3.1.8	Emplazamiento para la ubicación de estaciones de radiodifusión sonora	35
3.1.9	Enlace punto a zona (para redes transmóviles de radiodifusión sonora)	35
3.1.10	Enlace radioeléctrico	35
3.1.11	Estudio de emisión	36
3.1.12	Frecuencias para la prestación del servicio de radiodifusión sonora	36
3.1.13	Ganancia de una antena.....	36
3.1.14	Intensidad de campo	37
3.1.15	Intensidad de campo eléctrico admisible (Ead).....	37
3.1.16	Intensidad de campo en el espacio libre	37
3.1.17	Interferencia	38
3.1.18	Municipios colindantes	38
3.1.19	Ondas radioeléctricas	38
3.1.20	Propagación en el espacio libre	38
3.1.21	Radio.....	39
3.1.22	Radiación (Radioeléctrica)	39
3.1.23	Radiocomunicación.....	39
3.1.24	Servicio de radiocomunicación	39
3.1.25	Sistema de transmisión (centro emisor)	39
3.1.26	Transmóviles.....	40
3.1.27	Zona de cobertura.....	40
3.1.28	Zona tropical	40

3.2	Modificación de definiciones	40
3.2.1	Adjudicación de una frecuencia o de un canal radioeléctrico	40
3.2.2	Anchura de banda necesaria	41
3.2.3	Área de servicio primaria	41
3.2.4	Asignación de permisos de una frecuencia o de un canal radioeléctrico	41
3.2.5	Canal de frecuencias	42
3.2.6	Emisión fuera de banda	42
3.2.7	Intensidad de campo nominal utilizable (Enom).	42
3.2.8	Interferencia objetable.....	42
3.2.9	Relación de protección	43
3.2.10	Relación de protección en radiofrecuencia	43
3.2.11	Servicio de radiodifusión sonora	43
3.2.12	Ubicación de la estación	44
3.2.13	Anchura de banda necesaria	44
4	COMPARATIVA MEDIANTE EL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO	45
5	CONCLUSIONES	72
6	REFERENCIAS.....	75
7	GRÁFICAS	Error! Bookmark not defined.
8	TABLAS	83
9	ANEXOS	Error! Bookmark not defined.

ACRÓNIMOS

Abreviatura	Significado
AM	Amplitud Modulada
FM	Frecuencia Modulada
PTNRS	Plan Técnico de Radiodifusión Sonora
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
ANE	Agencia Nacional del Espectro
RDS	Radiodifusión Sonora
CR	Ratio de consistencia
kHz	Kilohercio
MHz	Megahercio
mS/m	Milisiemens por metro
dB	Decibelio
RJ81	Conferencia Administrativa Regional de Radiodifusión por Ondas Hectométricas (Región 2) celebrada en Rio de Janeiro en el año 1981
kW	Kilovatio
μV/m	Microvoltio por metro

CNABF	Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia
Enom	Intensidad de campo nominal utilizable
Ead	Intensidad de campo eléctrico admisible
CM	Cabecera Municipal
CP	Centro Poblado
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DIVIPOLA	división político-administrativa
PAJ	Proceso Analítico Jerárquico

RESUMEN

Este proyecto de grado ha sido desarrollado con el fin de establecer directrices encaminadas a la planeación del espectro radioeléctrico en la banda de amplitud modulada, de la mano de recomendaciones internacionales y acuerdos entre países que hacen parte de la región en la cual nos encontramos ubicados geográficamente, armonizando el uso de las frecuencias no solo en nuestro país, sino con los países que nos rodean. De esta manera se busca argumentar la modificación del Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en Amplitud Modulada – PTNRS en AM, siendo el PTNRS el documento con el cual se establece la normatividad y estándares para la planificación, vigilancia y control de los servicios de radiodifusión en Colombia.

ABSTRACT

This thesis project has been developed in order to establish guidelines for the planning of the radio spectrum in the AM band, in accordance with international recommendations and agreements between countries that are part of the region in which we are geographically located, harmonizing the use of frequencies not only in our country, but also with the countries that surround us. In this way, it seeks to argue for the modification of the National Technical Plan for AM Sound Broadcasting - PTNRS in AM, the PTNRS being the document that establishes the regulations and standards for the planning, surveillance and control of broadcasting services in Colombia.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con análisis previos realizados a los diferentes informes, documentos, resoluciones y recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, pertinentes para la planificación y operación de sistemas que funcionan en las bandas atribuidas al servicio de Radiodifusión Sonora en Amplitud Modulada, se evidencian los factores que requieren ser actualizados y la necesidad de realizar la modernización del actual PTNRS en AM.

Dentro de los documentos analizados encontramos el Acuerdo Regional Rio de Janeiro 1981 para AM el cual continúa vigente, del cual Colombia hizo parte de los países de la Región 2 y en donde encontramos que el método para la planeación del espectro en AM, es diferente al utilizado en el actual PTNRS en AM, toda vez que se utilizan relaciones de protección para la planificación de estaciones en cocanal y adyacentes a más o menos 10 kHz, mientras que en Colombia se evalúan contornos interferentes para emisoras en cocanal y áreas de servicio para emisoras adyacentes a más o menos 10 kHz.

Adicionalmente encontramos que en la actualidad el PTNRS en AM utiliza para el cálculo del área de cobertura de las emisoras la Recomendación UIT-R P.368-3, la cual ha venido actualizándose hasta llegar a la Recomendación UIT-R P.368-9, que contiene nuevas curvas de propagación por onda de superficie, en donde se establecen las diferentes curvas que se deben aplicar dentro del cálculo del área de cobertura de una emisora, dependiendo de las características del terreno.

Las diferencias entre las curvas utilizadas en el actual PTNRS en AM y las actualizadas por la Recomendación UIT 368-9, la discrepancia parcial o total entre las definiciones existentes en el nuevo Plan Técnico con las diferentes recomendaciones internacionales, y la no alineación internacional del método para establecer la compatibilidad entre estaciones de radiodifusión sonora en AM, son factores que influyen en la forma de planificación del espectro, y Colombia como miembro de la Unión Internacional de Telecomunicaciones y como parte de los países pertenecientes a la Región 2, tiene la necesidad de permanecer

actualizada en materia de recomendaciones internacionales con el fin de evitar una errónea planificación del espectro para la Radiodifusión Sonora en Amplitud Modulada.

Así mismo, el numeral 7 del artículo 4 de la Ley 1341 de 2009, modificado por el artículo 4 de la Ley 1978 de 2019, establece que el Estado debe intervenir en el sector las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones para “Garantizar el uso adecuado y eficiente del espectro radioeléctrico, que maximice el bienestar social generado por el recurso escaso, así como la reorganización de este, respetando el principio de protección a la inversión, asociada al uso del espectro. Los proveedores de redes y servicios de telecomunicaciones responderán jurídica y económicamente por los daños causados a las infraestructuras” [1].

Además, de acuerdo con el párrafo 3 del artículo 11 de la Ley 1341 de 2009, modificada por la Ley 1978 de 2019, establece que, para el acceso al uso del espectro radioeléctrico, y más específicamente, para maximizar el bienestar social en el acceso y uso del espectro radioeléctrico se debe realizar “de acuerdo con las mejores prácticas internacionales y las recomendaciones de la UIT. En cualquier caso, la determinación de la maximización del bienestar social en el acceso y uso del espectro radioeléctrico estará sujeta a valoración económica previa” [1]. Por lo cual, es necesario identificar las características de los planes técnicos de los países con los que compartimos fronteras, además de establecer la obsolescencia de las recomendaciones aplicadas al actual PTNRS en AM, con el fin de evitar una errada planeación del espectro, y como consecuencia, interferencias entre estaciones de radiodifusión sonora en AM.

1 MARCO GENERAL DEL PROYECTO

Actualmente la entidad encargada de la generación y actualización del plan técnico de radiodifusión sonora en amplitud modulada es la Agencia Nacional del Espectro, la cual establece las recomendaciones internacionales a aplicar para la planeación del espectro radioeléctrico en Colombia. El plan técnico de radiodifusión sonora establece las características técnicas que las estaciones de radiodifusión sonora en la banda de AM deben cumplir para mantener el espectro libre de interferencias tanto en el territorio Nacional como internacional. Debido a esta importante labor mantener una armonía entre estaciones nacionales e internacionales, se han evidenciado inconsistencias entre lo plasmado en el actual plan técnico de radiodifusión sonora en AM y las recomendaciones internacionales.

Por un lado, se ha evidenciado que las curvas de propagación por onda de superficie que se utilizan para la predicción del área de servicio en el actual PTNRS en AM se encuentra en la Recomendación UIT 368-3, las cuales fueron actualizadas por la Recomendación UIT 369-9 en el 2007. Es importante que se utilicen las nuevas curvas de propagación por onda de superficie para realizar una planificación de espectro más acertada y de esta manera evitar posibles interferencias entre las estaciones de radiodifusión sonora en AM.

De acuerdo con la curva de la Recomendación UIT 368-3 utilizada en el actual PTNRS en AM, la conductividad del terreno es de 3.14 mS/m y la constante de permitividad es de 4. Sin embargo, es necesario caracterizar los valores de conductividad y permitividad de acuerdo con las propiedades del suelo en Colombia. Adicionalmente, ninguna de las curvas de propagación establecidas en la actualización de la Recomendación UIT 368-9 del 2007, se encuentra alineada a los valores de conductividad y permitividad actuales.

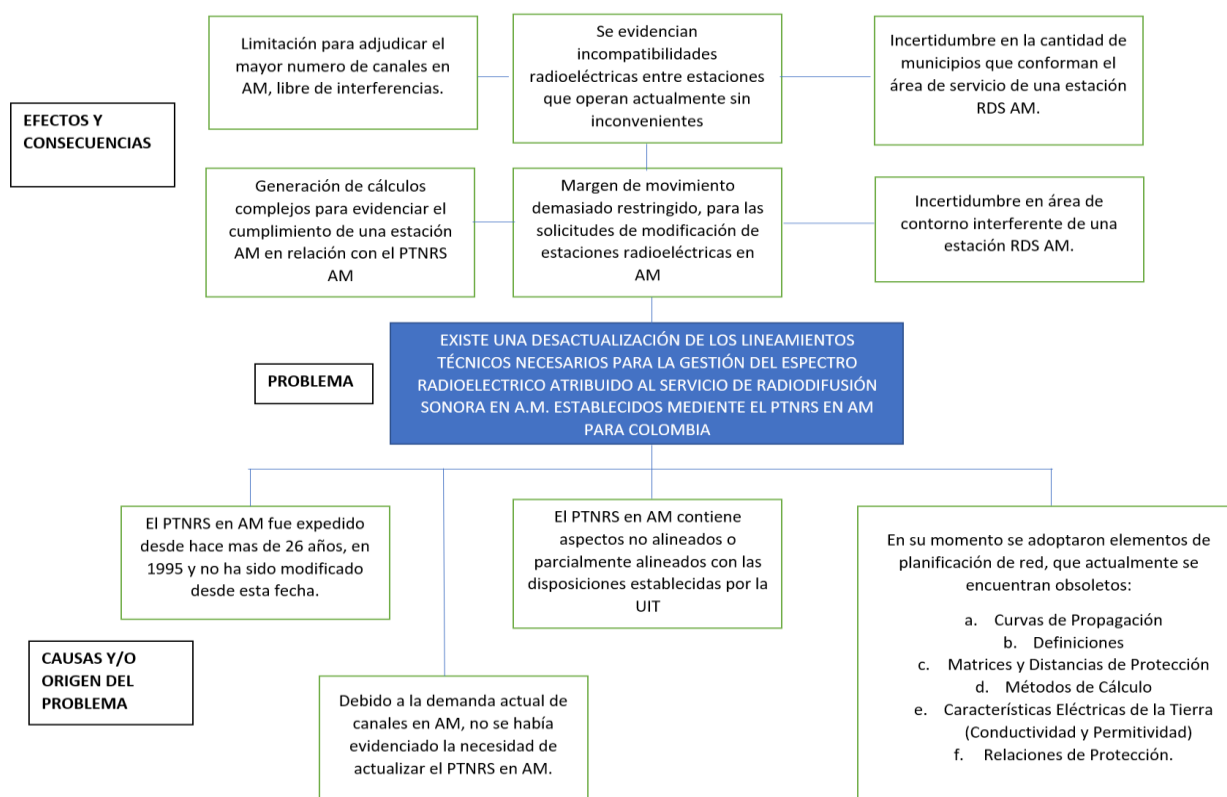
Adicionalmente las definiciones existentes en el actual PTNRS en AM han sido actualizadas en las diferentes recomendaciones que la utilizan. Con el fin de que el PTNRS en AM sea una herramienta clara para los concesionarios de radiodifusión sonora en AM, es necesario que las definiciones estén alineadas con cada una de las recomendaciones en las que son utilizadas.

En el actual PTNRS en AM se utiliza un método de cálculo de compatibilidad entre estaciones que no se encuentra alineado con lo establecido en las actas finales de la

conferencia administrativa regional de radiodifusión por ondas hectométricas de la región 2, celebrada en Río de Janeiro en 1981. El actual método de cálculo establece el cálculo de compatibilidad entre estaciones en cocanal mediante la referencia de sus contornos interferentes y la compatibilidad entre estaciones en canal adyacente a más o menos 100 kHz, mediante la referencia de sus áreas de servicio. Mientras que en las actas finales de la conferencia administrativa regional de radiodifusión por ondas hectométricas de la región 2 se establece la relación de protección de 26 dB para estaciones en cocanal, y 0 dB para estaciones que se encuentren con una separación de más o menos 100 kHz.

De acuerdo con lo planteado anteriormente, es necesario plantear la siguiente pregunta: ¿Cómo se logra alinear el Plan Técnico de Radiodifusión Sonora en Amplitud Modulada de Colombia con las recomendaciones internacionales establecidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones y los tratados regionales internacionales?

A continuación, la Gráfica 1.1 relaciona el árbol de problemas identificado:



Gráfica 1.1.1: Mapa de Problema.

Fuente: Elaboración Propia

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Establecer recomendaciones para la actualización del plan técnico nacional de radiodifusión sonora en amplitud modulada, específicamente para ondas hectométricas, teniendo en cuenta las recomendaciones internacionales vigentes y los planes técnicos de los países de la región 2.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Establecer si la curva de propagación de onda de superficie de la recomendación UIT 368-9 utilizada en el plan técnico nacional de radiodifusión sonora en Amplitud modulada, predice adecuadamente la cobertura de una emisora de radiodifusión sonora en AM.
- Verificar la alineación de las definiciones presentes dentro del actual plan técnico nacional de radiodifusión sonora en amplitud modulada, con las recomendaciones internacionales vigentes.
- Identificar el método de cálculo más pertinente, de acuerdo con la compatibilidad actual entre estaciones, para la planificación de canales de emisoras de radiodifusión sonora en AM en Colombia, teniendo en cuenta las recomendaciones internacionales y tratados regionales.

1.2 ALCANCE

Estudiar y analizar los fundamentos del Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en Amplitud Modulada haciendo énfasis en las recomendaciones internacionales para el servicio en ondas hectométricas.

Los entregables de este trabajo son:

Objetivo específico 1: Un documento capitulo en donde se plasmen los resultados de las simulaciones de intensidad de campo eléctrica de tres emisoras que prestan el servicio de radiodifusión sonora en AM del país y se contraste con las mediciones de campo a realizar.

Objetivo específico 2: Un documento capitulo en donde se consolide un cuadro comparativo que contenga las definiciones del actual PTNRS en AM y se contraste con las recomendaciones de la UIT vigentes.

Objetivo específico 3: Un documento capitulo en donde se realice una comparativa de los métodos de cálculos presentes en las recomendaciones internacionales con base en el método de toma de decisiones denominado “proceso analítico jerárquico” o también llamado (PAJ).

1.3 METODOLOGIA

A continuación, se presentan los puntos que se desarrollarán dentro de la tesis:

- Realizar simulaciones de intensidad de campo eléctrico utilizando la curva establecida en el PTNRS en AM la cual pertenece a la Recomendación UIT 368-10 del 2022, comparando los resultados obtenidos con las mediciones de campo eléctrico realizadas en verificaciones de campo. Como resultado de este análisis obtendremos si la curva establecida en el PTNRS en AM caracteriza las propiedades de propagación del suelo en el territorio colombiano.
- Buscar las definiciones contenidas en el PTNRS en AM e identificar las recomendaciones UIT y tratados internacionales, para establecer si estas definiciones fueron incorporadas correctamente en el PTNRS en AM.
- Revisar los diferentes métodos de planificación del espectro radioeléctrico en AM establecidos por la UIT y por las actas finales de la conferencia administrativa regional de radiodifusión por ondas hectométricas de la región 2. El resultado se analizará utilizando el método de toma de decisiones denominado “proceso analítico jerárquico” o también llamado (PAJ).

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 Teoría de Ondas de Superficie

El servicio de radiodifusión sonora en amplitud modulada funciona a través de ondas que se propagan por medio de la superficie de la tierra, estas ondas en particular tienen una característica de propagación que dependen de las características del terreno.

La propagación de señales radioeléctricas es un fenómeno complejo que depende de varios factores. En el caso de las ondas de superficie, estas se propagan a través de la ionosfera y experimentan una fuerte atenuación durante las horas diurnas en frecuencias medias. A diferencia de las señales con propagación ionosférica, las ondas de superficie utilizan el modo de propagación terrestre y son ampliamente utilizadas en diversas aplicaciones de comunicaciones y sistemas de navegación.

➤ **Modo de propagación de la onda de superficie:**

La onda de superficie es el modo de propagación predominante para las señales radioeléctricas en la banda de radiodifusión en ondas hectométricas y kilométricas. A través de este modo, las señales se propagan a lo largo del suelo y dependen de las corrientes presentes en el mismo. Aunque la existencia de la atmósfera afecta las características de propagación, no es esencial para este modo de propagación.

➤ **Aplicaciones de la onda de superficie:**

Las ondas de superficie se utilizan en una amplia gama de aplicaciones en las comunicaciones radioeléctricas. Entre ellas se incluyen:

➤ **Radiodifusión en ondas hectométricas y kilométricas:** La onda de superficie es el modo principal de propagación para la radiodifusión en estas bandas, permitiendo la transmisión de señales de radio a largas distancias.

➤ **Comunicaciones y sistemas de navegación en ondas miriámétricas/kilométricas:** Las señales de comunicación y navegación utilizan este modo de propagación para transmitir información en estas bandas de frecuencia.

➤ **Comunicaciones de corto alcance en ondas decamétricas:** Las ondas de superficie también se utilizan para comunicaciones de corto alcance en esta banda de frecuencia.

➤ **Algunos tipos de radar en ondas decamétricas:** En ciertos casos, los sistemas de radar utilizan la propagación por onda de superficie en esta banda de frecuencia, aunque también pueden emplear modos de propagación por onda ionosférica.

➤ **Características de la onda de superficie:**

Las ondas de superficie con polarización horizontal experimentan una fuerte atenuación y su utilidad práctica es limitada. Por lo tanto, en la mayoría de las aplicaciones, se utilizan ondas de superficie con polarización vertical.

Además, las ondas de superficie presentan una dispersión casi despreciable, lo que permite la transmisión de señales de banda ancha incluso cuando solo está activa la onda de superficie. Esto las hace especialmente adecuadas para aplicaciones que requieren transmisión de datos a alta velocidad.

➤ Desvanecimiento y variaciones en la propagación:

A diferencia de las señales con propagación ionosférica, las ondas de superficie experimentan un desvanecimiento significativo solo cuando hay variaciones temporales en el trayecto de propagación. En general, las ondas de superficie sobre tierra son estables, con algunas variaciones estacionales y pequeñas variaciones locales debido a la presencia de estructuras o características topográficas significativas. Por otro lado, en la propagación sobre el mar, pueden ocurrir desvanecimientos lentos debido a los efectos de las mareas y la agitación del mar.

➤ Predicción y medición de la propagación de la onda de superficie:

Existen métodos teóricos basados en consideraciones prácticas, como la Recomendación UIT-R P.368, que permiten predecir la cobertura de sistemas de radiodifusión en ondas hectométricas y kilométricas. Sin embargo, la predicción en zonas urbanas con edificios altos aún presenta limitaciones. Además, las mediciones y el análisis de la fase relativa de la onda de superficie son importantes para comprender el comportamiento y la calidad del servicio de estas señales, especialmente en sistemas con modulación digital.

La propagación de la onda de superficie en las comunicaciones radioeléctricas es un modo de propagación fundamental para diversas aplicaciones. Aunque experimenta una fuerte atenuación a frecuencias medias durante las horas diurnas, las ondas de superficie con polarización vertical permiten la transmisión de señales de banda ancha. A través de métodos teóricos y mediciones, es posible predecir y comprender la propagación de la onda de superficie, aunque aún existen desafíos en la predicción en zonas urbanas.

1.4.2 Recomendación UIT-R P.368

La recomendación UIT-R P.368-9 proporciona información sobre la intensidad de campo y su dependencia de las características del terreno debido a la propagación por onda de superficie a frecuencias inferiores a 30 MHz.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT, considerando que, por la complejidad del cálculo, sería útil disponer de un juego de curvas de propagación por onda de superficie que correspondan a un cierto número de valores-tipo de frecuencias y de características del suelo, recomienda que se utilicen las curvas del Anexo 1 “Curvas de propagación y condiciones de validez (trayectos homogéneos)” [2], aplicadas en las condiciones que se indican, para la determinación de la intensidad de campo de la onda de superficie para las frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz; que, por regla general, se utilicen estas curvas para dicha determinación de la intensidad de campo sólo en los casos en que pueda preverse con certeza una amplitud despreciable de las reflexiones ionosféricas; que no se utilicen estas curvas para aplicaciones en que la antena receptora está situada a una altura considerable por encima de la superficie de la Tierra, es decir, cuando $\epsilon_r \ll 60 \lambda \sigma$ las curvas son utilizables hasta una altura $h = 1,2 \sigma^{1/2} \lambda^{3/2}$. Las curvas de propagación correspondientes a alturas de antena de hasta 3 000 m y a frecuencias de hasta 10 GHz se pueden encontrar en la publicación de la UIT titulada «Manual de curvas de propagación de las ondas radioeléctricas sobre la superficie de la Tierra»; que estas curvas, establecidas para trayectos homogéneos con arreglo a las condiciones señaladas en el Anexo 1 “Curvas de propagación y condiciones de validez (trayectos homogéneos)” de la recomendación en cuestión, se utilicen también para la determinación de la intensidad de campo en trayectos mixtos, de acuerdo con lo indicado en el Anexo 2 “Aplicación a trayectos mixtos (trayectos inhomogéneos)” de la recomendación UIT-R P.368-9 [2].

Dentro del Anexo 1 “Curvas de propagación y condiciones de validez (trayectos homogéneos)” [2] de la recomendación UIT-R P.368-9 encontramos que para el cálculo de las curvas de propagación se utilizaron las siguientes hipótesis.

- la Tierra es una esfera homogénea lisa;
- en la troposfera, el índice de refracción disminuye exponencialmente en función de la altura, conforme se describe en la Recomendación UIT-R P.453 [3];
- tanto las antenas transmisoras como las receptoras se hallan situadas en tierra;
- el elemento radiante es un monopolo vertical corto. Se supone dicha antena vertical en la superficie de una Tierra plana, perfectamente conductora y excitada de forma que radie 1 kW, en cuyo caso la intensidad de campo a 1 km de distancia será de 300 mV/m; esto corresponde a una fuerza electromotriz de 300 V (véase la Recomendación UIT-R

P.525 [4])

- las curvas se han trazado para distancias medidas siguiendo la curvatura de la Tierra
- las curvas dan el valor de la componente vertical de la intensidad del campo de radiación, es decir, el que puede efectivamente medirse en la región de campo lejano de la antena.

Las curvas de intensidad de campo constituyen una herramienta fundamental para la estimación de la cobertura de sistemas de comunicación como radio, televisión, radar y otros sistemas inalámbricos. Comprender la atenuación de la señal en función de la distancia y la frecuencia permite un diseño óptimo de los sistemas, asegurando una cobertura adecuada y minimizando las áreas de sombra. Este análisis es esencial para la planificación precisa y efectiva de la infraestructura de comunicación. A continuación, se presentan algunos aspectos clave que ilustran la importancia de las curvas de intensidad de campo en el diseño y optimización de sistemas de comunicación [2], [3 y [4]:

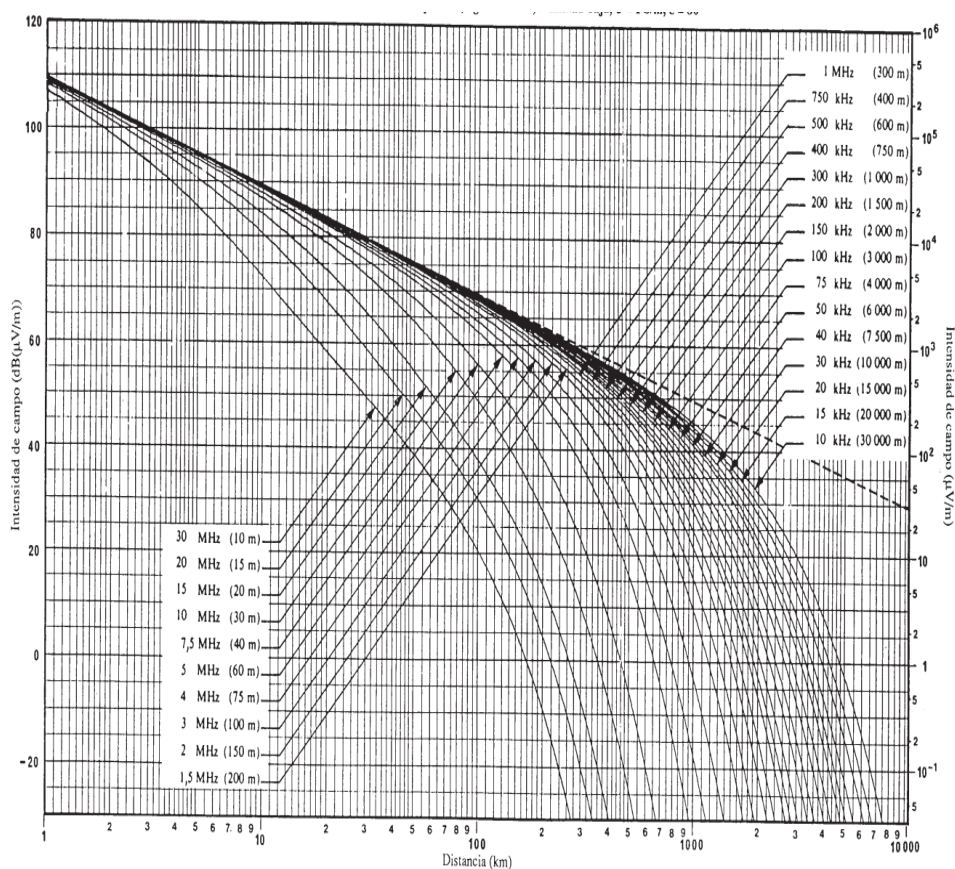
- **Optimización de frecuencias y potencia de transmisión:** La atenuación de la señal es una función compleja de la frecuencia de la onda electromagnética, que varía considerablemente dependiendo del medio de propagación. Las ondas de menor frecuencia, por ejemplo, tienden a propagarse a mayores distancias, especialmente en medios conductores como la tierra y el agua. El análisis de las curvas de intensidad de campo permite la selección óptima de las frecuencias y potencias de transmisión, con el objetivo de alcanzar distancias específicas y maximizar la eficiencia energética del sistema.
- **Consideraciones de interferencia y regulaciones:** El conocimiento detallado de la variación de la intensidad de campo es esencial para anticipar y mitigar potenciales interferencias entre sistemas de comunicación. Este análisis resulta crucial para el cumplimiento de las normativas del espectro radioeléctrico, asegurando que los sistemas operen de manera eficiente y sin interferencias mutuas. Además, facilita la asignación adecuada de frecuencias para evitar conflictos y maximizar el uso eficiente del espectro disponible.

- **Efectos ambientales en la propagación:** Las propiedades del medio de propagación influyen significativamente en el comportamiento de las ondas electromagnéticas. Las curvas de intensidad de campo permiten evaluar cómo diferentes entornos, como el agua salada, la tierra seca o el hielo, afectan la atenuación de la señal. Esta información es esencial para la adaptación de los sistemas de comunicación a condiciones ambientales específicas, garantizando un rendimiento adecuado en entornos marítimos, desérticos, polares, entre otros.
- **Modelado de pérdidas y optimización:** En campos como la geofísica, la exploración submarina o la comunicación en áreas remotas, las curvas de intensidad de campo son herramientas críticas para modelar las pérdidas de señal y diseñar sistemas capaces de mantener la comunicación en condiciones adversas. Estas curvas proporcionan un marco cuantitativo para evaluar el rendimiento del sistema y ajustar los parámetros de diseño, como la potencia de transmisión y la ubicación de las antenas, para optimizar la cobertura y la calidad de la señal.
- **Impacto en la calidad de la señal:** Las curvas de intensidad de campo también permiten prever los efectos de la distancia y la frecuencia en la calidad de la señal recibida. Esto resulta fundamental para el diseño de sistemas que mantengan una calidad de servicio adecuada, particularmente en aplicaciones críticas como la transmisión de datos. La capacidad de anticipar la degradación de la señal con la distancia garantiza que la intensidad del campo sea suficiente para preservar la integridad de la información, minimizando errores y pérdidas en la comunicación.

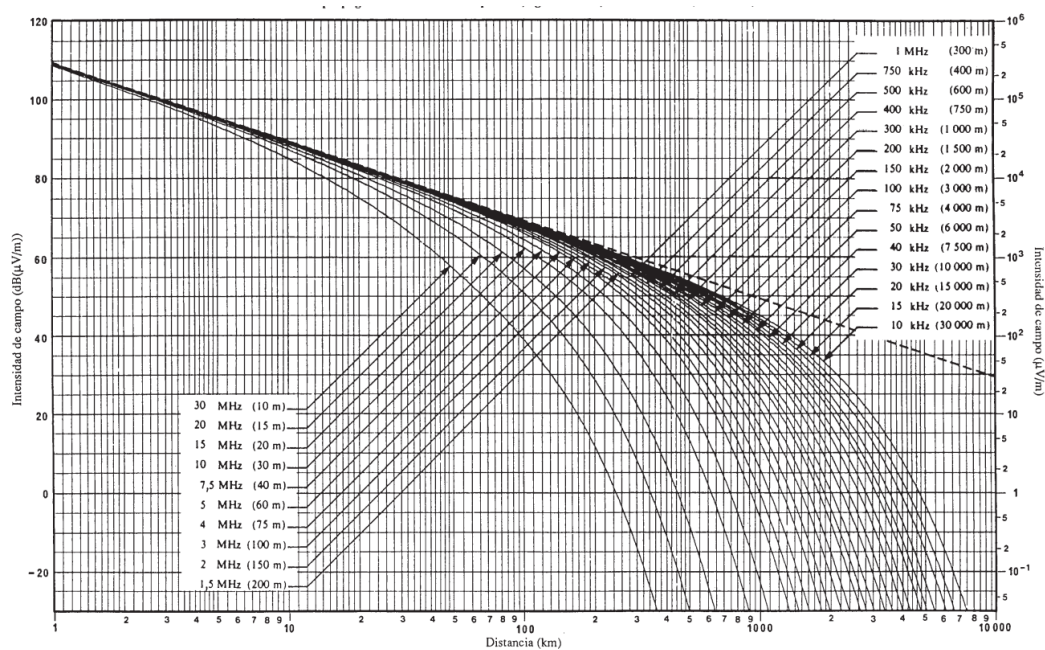
De esta forma, las curvas de intensidad de campo en función de la distancia y la frecuencia son herramientas esenciales para el análisis y diseño de sistemas de comunicación. Permiten optimizar la planificación, ajustar frecuencias y potencias de transmisión, prevenir interferencias, adaptar los sistemas a distintos entornos, modelar pérdidas en aplicaciones especializadas y mantener la calidad de la señal. Su correcta aplicación contribuye a mejorar la cobertura, la calidad y la eficiencia de los sistemas de comunicación, garantizando un desempeño robusto y confiable en diversas condiciones operativas.

Estas curvas son particularmente útiles para Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora En Amplitud Modulada, ya que proporcionan la base técnica necesaria para determinar la cobertura efectiva, evitar conflictos de interferencia y garantizar un uso eficiente del espectro. Además, el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en Amplitud Modulada (AM) en Colombia se basa en estas curvas para garantizar una prestación eficiente del servicio de radiodifusión sonora, minimizando interferencias y optimizando el uso del espectro radioeléctrico. Su correcta aplicación contribuye a mejorar la cobertura, la calidad y la eficiencia de los sistemas de comunicación, garantizando un desempeño robusto y confiable en diversas condiciones operativas.

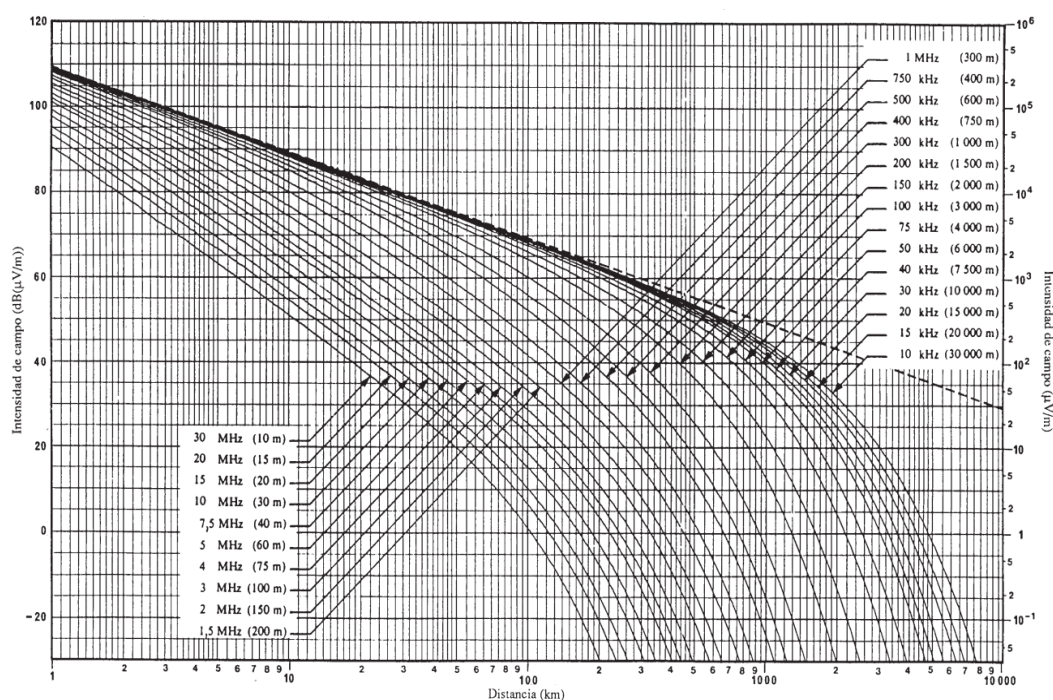
Las Gráficas 1.2 a 1.12 contienen las curvas de intensidad de campo en función de la distancia, con la frecuencia como parámetro.



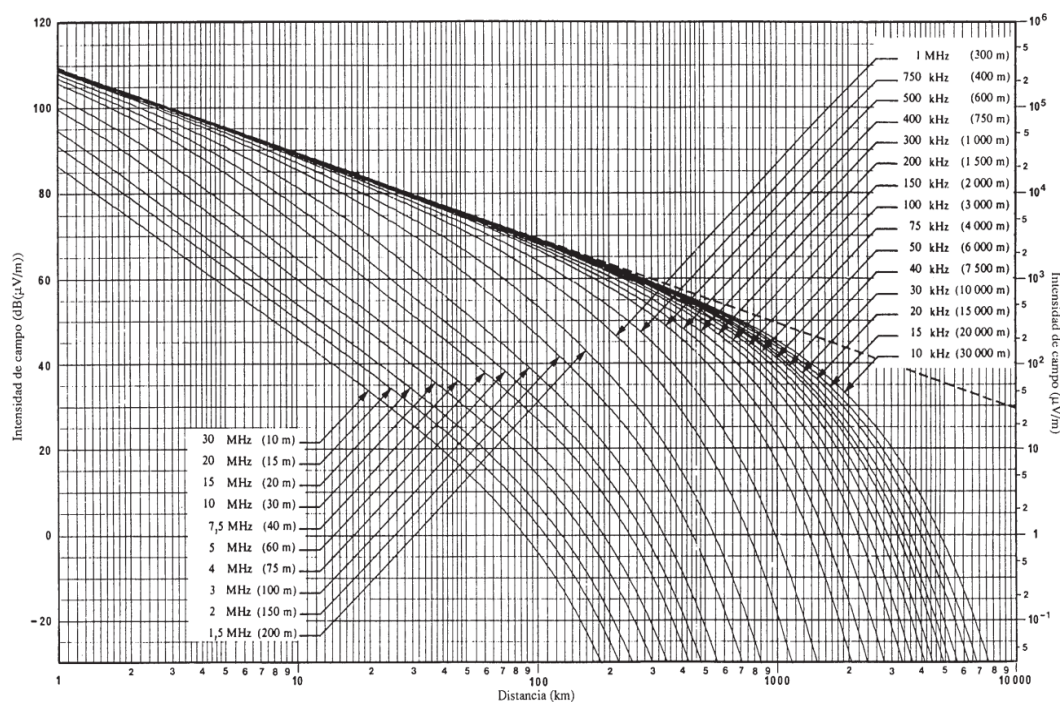
Gráfica 1.1.2: Curvas de propagación de la onda de superficie; agua del mar, salinidad baja, $\sigma = 1 \text{ S/m}$, $\epsilon = 80$. Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9 [2]



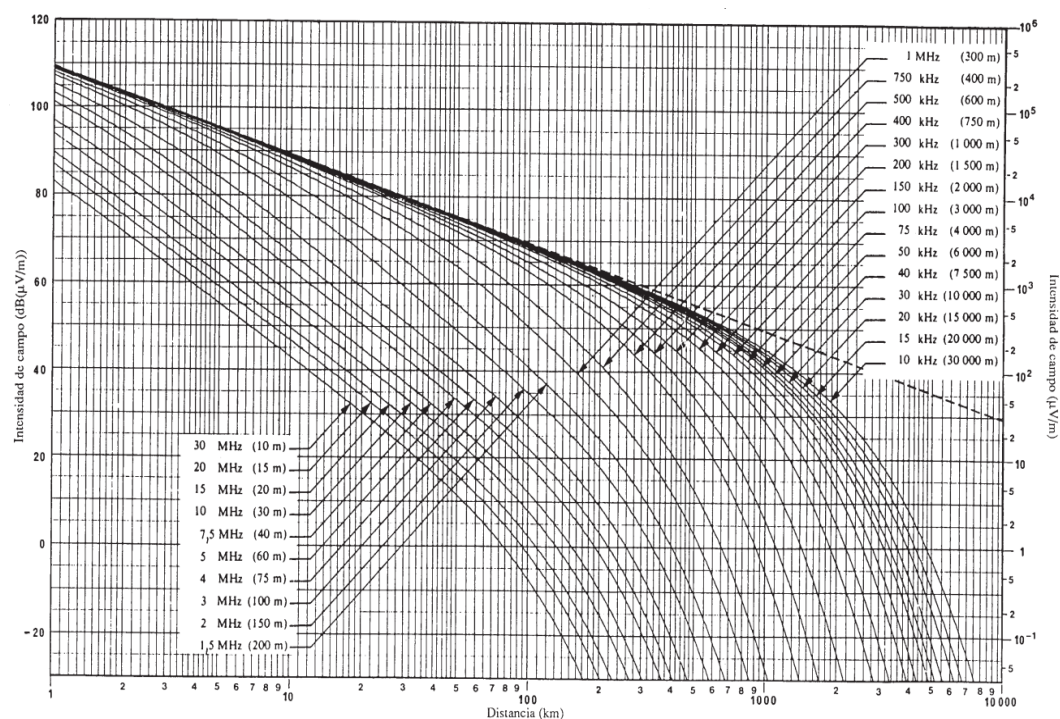
Gráfica 1.1.3: Curvas de propagación de la onda de superficie; agua del mar, salinidad media, $\sigma = 5 \text{ S/m}$, $\epsilon = 70$. Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9 [2]



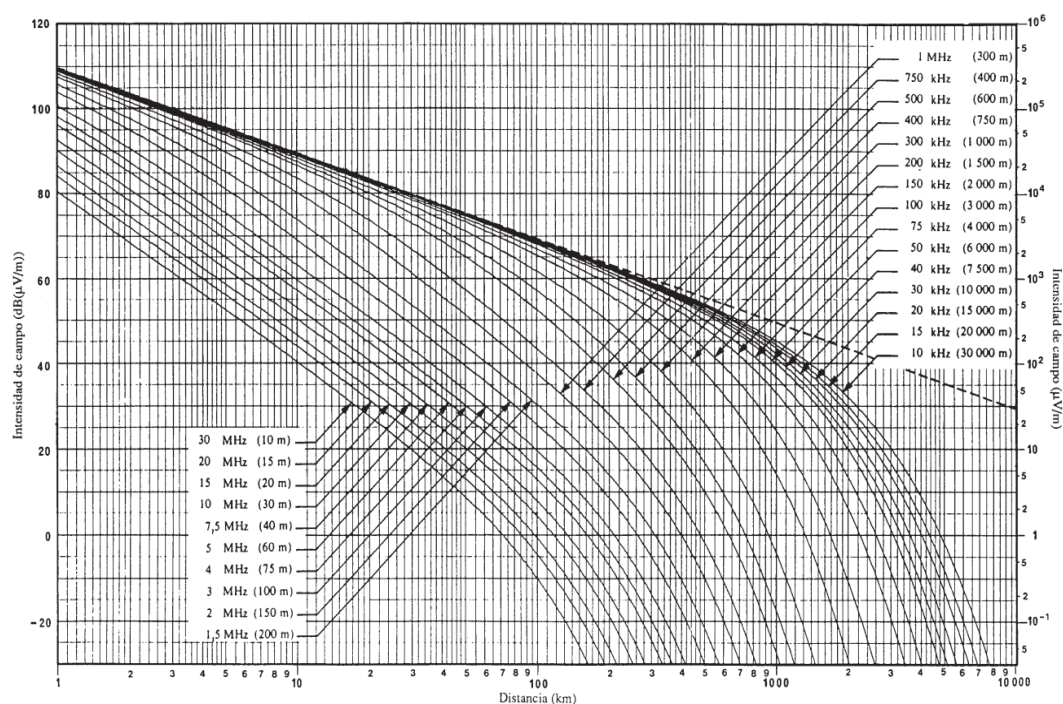
Gráfica 1.1.4: Curvas de propagación de la onda de superficie; agua dulce, $\sigma = 3 \times 10^{-3} \text{ S/m}$, $\epsilon = 80$. Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9 [2]



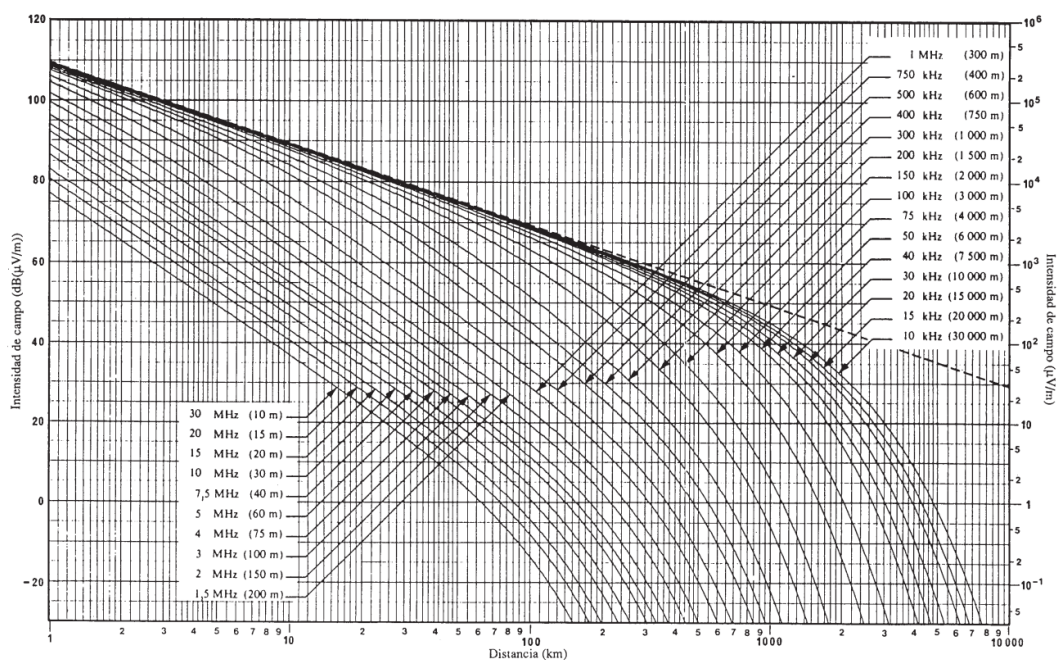
Gráfica 1.1.5: Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra, $\sigma = 3 \times 10^{-3} \text{ S/m}$, $\epsilon = 40$
Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9 [2]



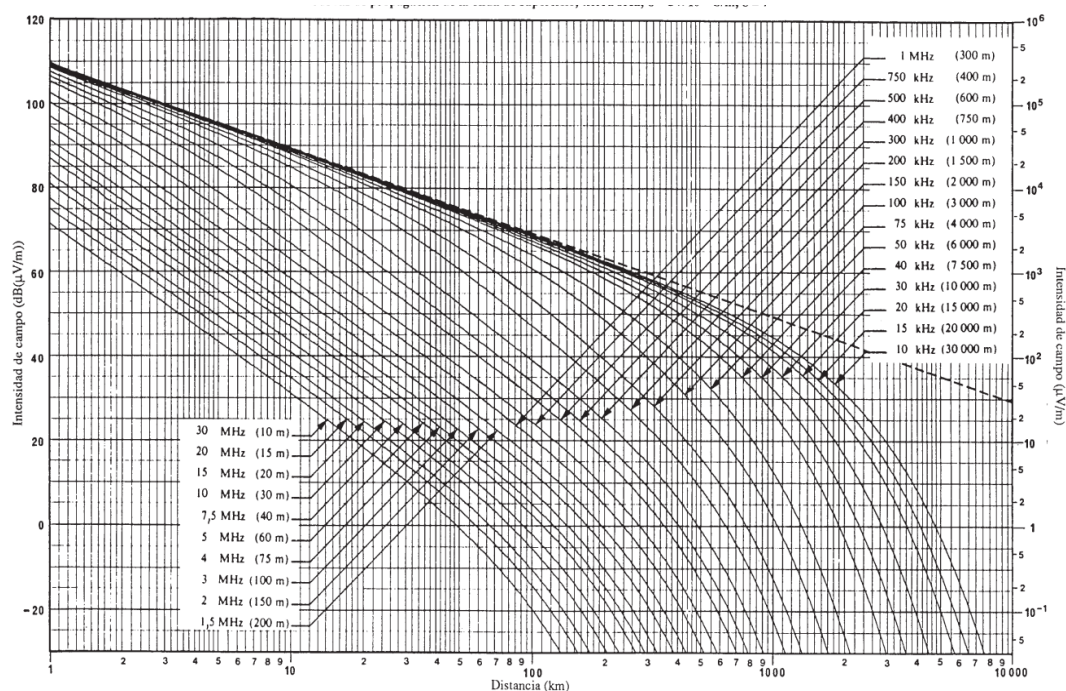
Gráfica 1.1.6: Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra húmeda, $\sigma = 10^{-2} \text{ S/m}$, $\epsilon = 30$
Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9 [2]



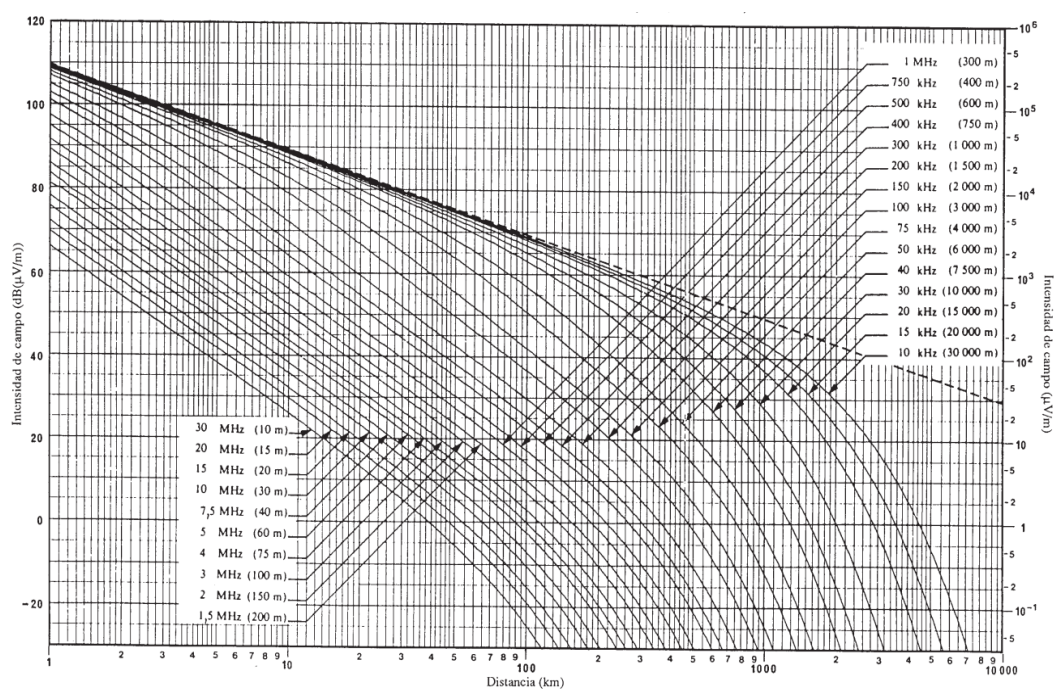
Gráfica 1.1.7: Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra, $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ S/m, $\epsilon = 22$
Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9 [2]



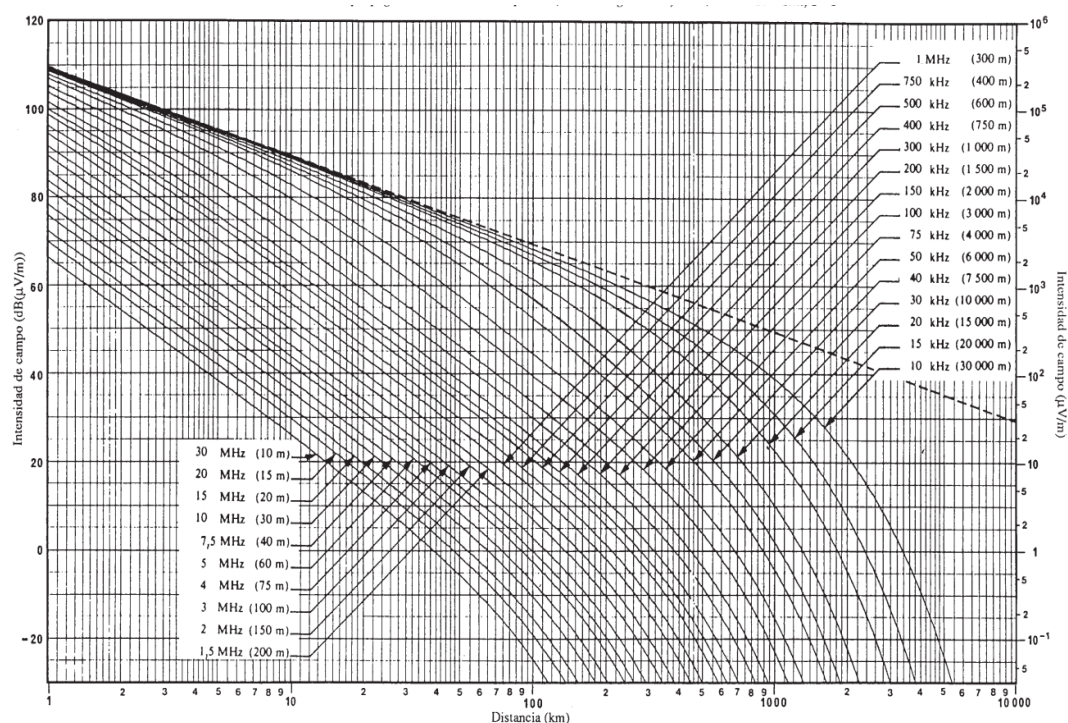
Gráfica 1.1.8: Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra moderadamente seca, $\sigma = 10^{-3}$ S/m, $\epsilon = 15$. Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9



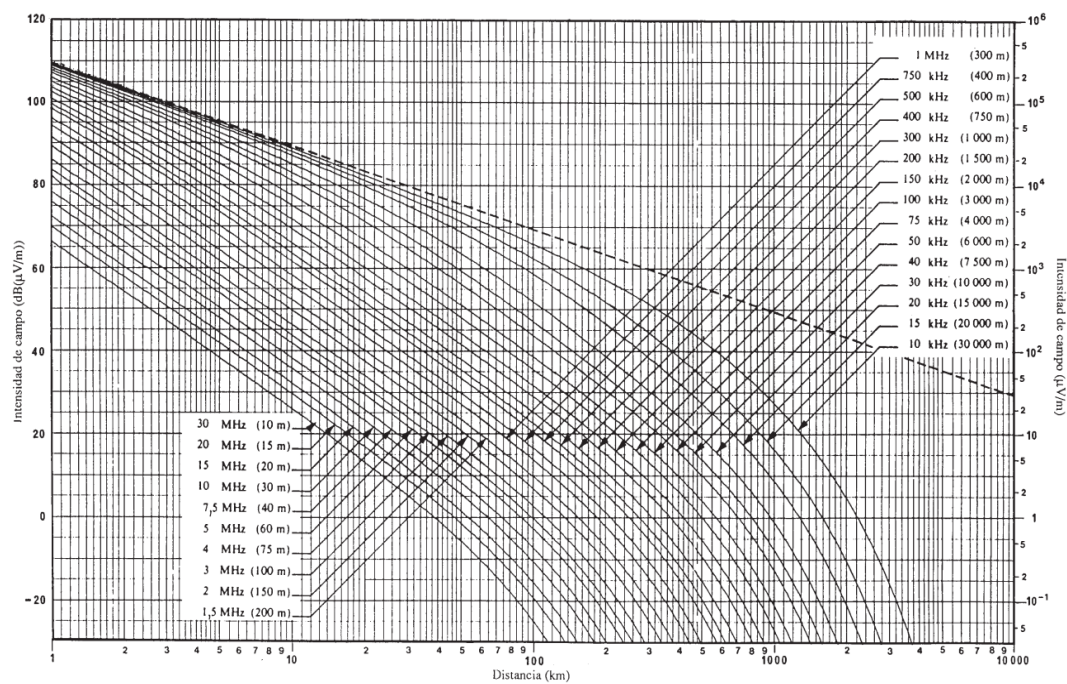
Gráfica 1.1.9: Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra seca, $\sigma = 3 \times 10^{-4}$ S/m, $\epsilon = 7$
Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9



Gráfica 1.1.10: Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra muy seca, $\sigma = 10^{-4}$ S/m, $\epsilon = 3$
Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9



Gráfica 1.1.11: Curvas de propagación de la onda de superficie; hielo de agua dulce, -1°C , $\sigma = 3 \times 10^{-5} \text{ S/m}$, $\epsilon = 3$. Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9



Gráfica 1.1.12: Curvas de propagación de la onda de superficie; hielo de agua dulce, -10°C , $\sigma = 10^{-6} \text{ S/m}$, $\epsilon = 3$. Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9

1.4.3 Método de la atenuación

La UIT en su INFORME 879-1 de 1986 “MÉTODOS PARA CALCULAR LAS CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS EFECTIVA DEL TERRENO DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA” [5] establece varios métodos para calcular la conductividad del terreno. Dentro de los cuales encontramos “El método de la atenuación” [5], el cual consiste en realizar mediciones de intensidad de campo a lo largo de una línea radial iniciando desde el transmisor, comparando los resultados de la medición con las curvas de la Recomendación UIT-R P.368 [2]. Al final se elige la curva que mejor caracteriza la conductividad del terreno, estableciendo valores de conductividad y permitividad.

A manera de resumen sobre el propósito del marco teórico, las curvas de intensidad de campo en función de la distancia y la frecuencia son herramientas esenciales para el análisis y diseño de sistemas de comunicación. Estas curvas permiten evaluar la atenuación de la señal, lo cual es fundamental para optimizar la planificación, ajustar frecuencias y potencias de transmisión, y prever los efectos de la distancia en la calidad de la señal. Además, facilitan la prevención de interferencias, la adaptación de los sistemas a distintos entornos, y el modelado de pérdidas en aplicaciones especializadas. Al comprender y gestionar la atenuación, se puede garantizar que la señal llegue con la intensidad suficiente, manteniendo así la calidad del servicio y la integridad de la información transmitida.

En el próximo capítulo, se explorarán a mayor profundidad las características de propagación de la onda de superficie, considerando cómo la atenuación y las condiciones del medio afectan la transmisión de señales a bajas frecuencias. Este análisis será fundamental para comprender cómo estas características específicas influyen en la planificación de sistemas de radiocomunicaciones y en la optimización de la cobertura en distintos entornos.

2 CARACTERÍSTICAS DE PROPAGACIÓN DE ONDA DE SUPERFICIE

Los métodos de propagación establecidos por la UIT para predecir la cobertura para la onda de superficie en su Recomendación UIT-R P.368-9 [2] y en el Acuerdo RJ81 [6] no contemplan, en su método de cálculo, las pérdidas en la propagación ocasionadas por la rugosidad del terreno, dado que por la naturaleza de la propagación de la onda de superficie este factor no es relevante. Para ello, la conductividad eléctrica del terreno y su permitividad son los parámetros esenciales para predecir el alcance de la zona de cobertura de las estaciones. Entre mayor sea la conductividad eléctrica del terreno mayor será la cobertura de las estaciones en A.M. por onda de superficie.

Las actas finales de la Conferencia Administrativa Regional de Radiodifusión por Ondas Hectométricas (Región 2) Rio de Janeiro, 1981 [6], establece que los cálculos para predecir coberturas de las estaciones de radiodifusión sonora en A.M. se pueden realizar considerando conductividades eléctricas del terreno homogéneas y no homogéneas.

Las conductividades homogéneas simplifican de manera importante los cálculos de cobertura y los análisis de compatibilidad electromagnética. En cambio, con conductividades no homogéneas, los cálculos son muy dispendiosos y generan alta complejidad para los concesionarios y la ANE.

Es importante resaltar que, por la naturaleza de las características del suelo en el país, no se tienen valores de conductividades¹ homogéneas, lo que implica que en la propagación real de la onda de superficie los diferentes valores de conductividad afectan positiva o negativamente la cobertura de las emisoras.

Con el objetivo de simplificar la planeación, administración y estudios técnicos para la asignación del espectro, la ANE considera adecuado suponer que el terreno colombiano es homogéneo con un único valor de conductividad y de permitividad. Además, dicho supuesto se adoptó desde el año 1995 en el PTNRS en A.M. actual.

¹ En Colombia no se cuenta con información oficial de los valores de conductividad eléctrica del terreno y su permitividad aplicables para las radiocomunicaciones.

Considerando lo indicado en el numeral 3.1 del presente documento, se hace necesario establecer en la modificación del PTNRS en A.M. nuevos valores de conductividad eléctrica y permitividad, los cuales brinden una aproximación con las coberturas reales de las emisoras. Dado que con las simulaciones de la predicción de cobertura realizadas con herramientas computarizadas de ingeniería del espectro o aplicando manualmente las curvas de propagación de la onda de superficie, no es posible igualar la cobertura real.

2.1 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MEDICIONES EN CAMPO Y RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS CURVAS DE LA RECOMENDACIÓN UIT-R P.368-9

Ahora bien, la ANE realizó un diagnóstico del escenario radioeléctrico actual en el país en la banda de A.M., llevando a cabo análisis de compatibilidad de los canales asignados y proyectados del actual PTNRS en A.M., tomando los valores de permitividad y conductividad de dicho plan, sin considerar pérdidas por la rugosidad del terreno, evidenciando que el 46% de los canales presenta problemas de incompatibilidad electromagnética en la planificación, sin que a la fecha se hayan recibido reportes de quejas presentados por los concesionarios o interferencias objetables en la banda de A.M. Adicionalmente, se validó que los métodos actuales para la predicción de la cobertura de la onda de superficie, requieren ser actualizados y alineados con las recomendaciones vigentes de la UIT, con el fin de obtener una predicción de la cobertura de las estaciones de radiodifusión sonora cercana a la real y mejorar los criterios de compatibilidad electromagnética en la planeación del espectro.

Así las cosas, con el objetivo de solucionar los problemas de incompatibilidad electromagnética identificados en la planificación del espectro y de tener una mayor disponibilidad de este recurso, alineada con las recomendaciones de la UIT, sin afectar la operación de los canales actualmente asignados, es necesario modificar los valores de conductividad y permitividad del presente PTNRS en A.M. Para la modificación de dichos valores se utilizaron las curvas de propagación de onda de superficie de la Recomendación UIT-R P.368-9, las cuales proporcionan información sobre la intensidad de campo y su dependencia de las características eléctricas de la tierra debido a la propagación por onda de superficie a frecuencias inferiores a 30 MHz.

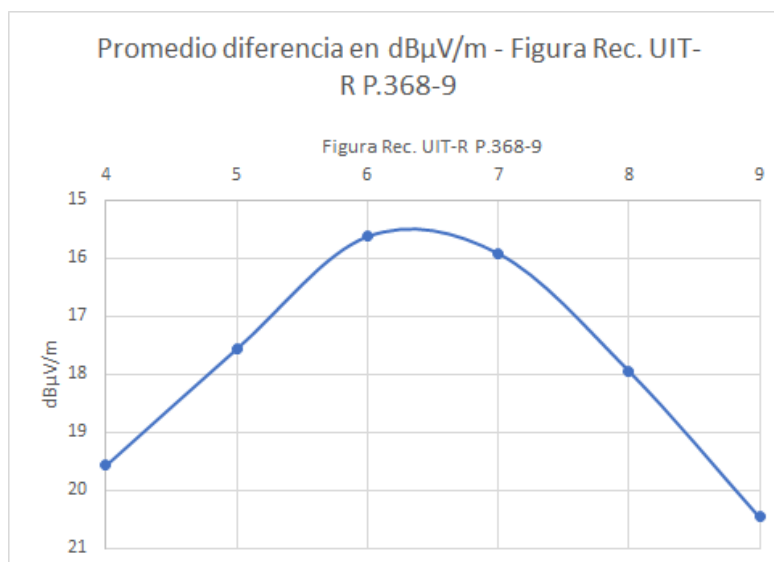
Para establecer la utilización de una curva de propagación de onda de superficie de la Recomendación UIT-R P.368-9 que esté acorde con las características del terreno en Colombia, la ANE utilizó el método de atenuación propuesto en el numeral 18.3.1 del Manual sobre Propagación por onda de superficie de la UIT, con el cual se realiza la medición de la conductividad efectiva del suelo. Este método de atenuación establece lo siguiente: “Una vez determinada la potencia radiada pueden efectuarse mediciones a distancias del transmisor cada vez mayores. Estas mediciones deben normalizarse al valor de 1 kW prax, y la tendencia de los resultados debe compararse con las curvas de la Recomendación UIT-R P.368 (o de GRWAVE) para encontrar la conductividad efectiva” [7]

Aplicación del método de atenuación propuesto por la UIT en el Manual sobre Propagación por onda de superficie:

La ANE realizó 16 visitas de control técnico a estaciones que prestan el servicio de radiodifusión sonora en A.M. para 11 rutas en diferentes zonas del país, y mediciones en 133 puntos en horario diurno (Ver Anexo 4. Rutas AM). En las visitas de control técnico a las emisoras se realizó la verificación de la ubicación y la potencia real radiada por cada estación, y luego se efectuaron mediciones de intensidad de campo eléctrico a distancias del transmisor cada vez mayores.

Posteriormente, se realizó un análisis de los valores obtenidos en las mediciones, y fueron comparados con los resultados teóricos obtenidos en el software GRWAVE de la UIT, el cual utiliza las curvas de la Recomendación UIT-R P.368. La comparación se estableció para cada punto de medición, en donde se analizó la tendencia de las diferencias en dB μ V/m entre las mediciones y los resultados obtenidos del software GRWAVE. La información detallada de los valores se encuentra en el Anexo 1. Medición de la Conductividad Efectiva del Suelo – Hoja “Mediciones VS GRWAVE”.

En la Gráfica 2.1 y la Tabla 2.1 se muestran los resultados de los análisis realizados.



Gráfica 2.1: Promedio de las diferencias de intensidades de campo eléctrico
Fuente: Elaboración ANE

Tabla 2.2.1 : Diferencia de las mediciones de intensidad de campo eléctrico.
Fuente: Elaboración ANE

Figura 4 (dB μ V/m)	Figura 5 (dB μ V/m)	Figura 6 (dB μ V/m)	Figura 7 (dB μ V/m)	Figura 8 (dB μ V/m)	Figura 9 (dB μ V/m)
19,56	17,56	15,63	15,92	17,94	20,45

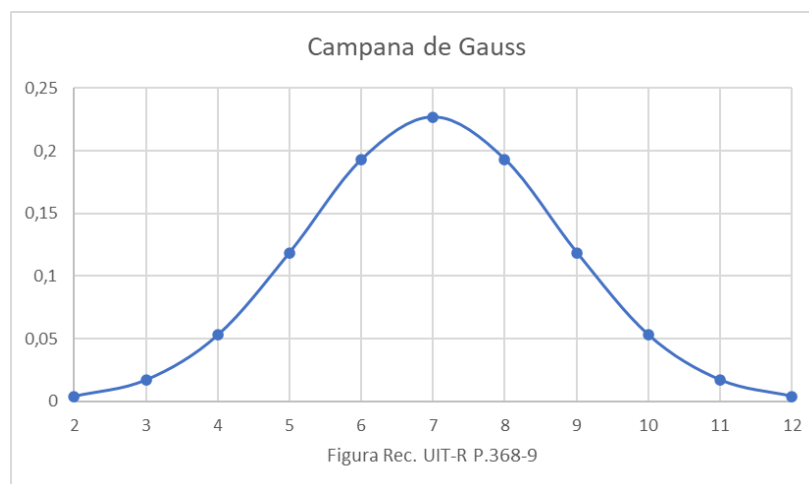
De acuerdo con la tabla anterior, se evidencia que las Gráficas 1.7 y 1.8 correspondientes a las figuras 6 y 7 de la Recomendación UIT-R P.368 contienen los valores más cercanos a las mediciones de intensidad de campo eléctrico realizadas por la ANE, toda vez que la diferencia entre las mediciones realizadas en el terreno y los resultados obtenidos del software GRWAVE de la UIT son menores a las de las otras figuras consideradas.

Adicionalmente, en la Tabla 2.2 se listan las rutas en las que se realizaron las mediciones de intensidades de campo eléctrico y se relaciona el número de la curva de la Recomendación UIT-R P.368 que mejor representa los valores de conductividad eléctrica del terreno para cada ruta.

Tabla 2.2.2 Rutas de mediciones de intensidad de campo eléctrico
Fuente: Elaboración ANE

Rutas	Figura Rec. UIT-R P.368-9
Bogotá D.C – Tunja (Boyacá)	5
Tunja (Boyacá)- Bogotá D.C.	4
Barranquilla 8Atlántico) -Riohacha (La Guajira)	6
Villavicencio (Meta)- Bogotá D.C.	9
Bogotá D.C. -Villavicencio (Meta)	9
Cali (Valle del Cauca) - La Paila (Valle del Cauca)	5
Concordia (Antioquia)- Santa Barbara (Antioquia)	7
Medellín (Antioquia)-Yarumal (Antioquia)	9
Bucaramanga (Santander) – Cúcuta (Norte de Santander)	7
Cúcuta (Norte de Santander) – Bucaramanga (Santander)	7
Ibagué-Neiva	9

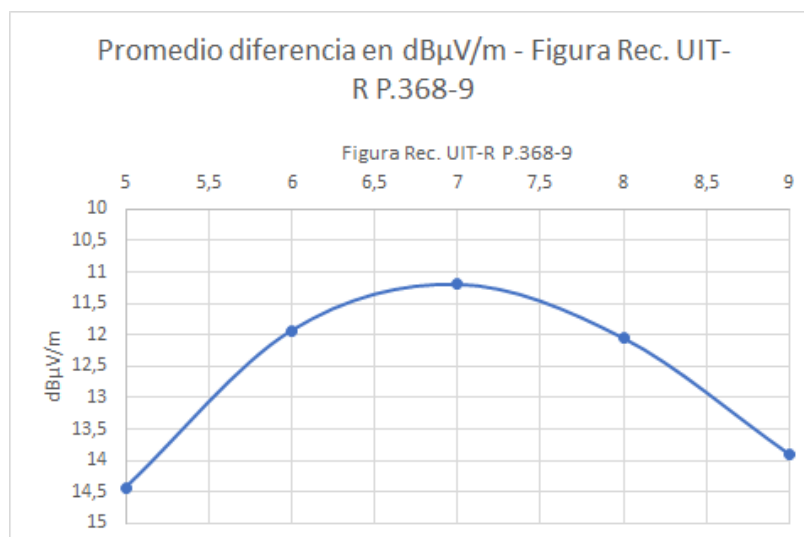
Así como se observó en los cálculos anteriores, la Gráfica 1.8 es la que refleja de manera más cercana los distintos territorios cubiertos con las mediciones, teniendo en cuenta que hay algunas zonas que se acercan más a las Gráficas 1.5 o 1.6 y otras a la Gráfica 1.10. Los resultados de la Tabla 2.2 se soportan en las mediciones de intensidad de campo eléctrico realizadas en los 133 puntos de medición. Estos resultados se representan con la Campana de Gauss en la siguiente ilustración. La información detallada de los valores se encuentra en el Anexo 1. Medición de la Conductividad Efectiva del Suelo – Hoja “Simulación VS Monitoras”.



Gráfica 2.2: Campana de Gauss.
Fuente: Elaboración ANE

Basados en los datos de la tabla 2.2 y de la Gráfica 2.2 se evidencia que las figuras que describen la conductividad del suelo varían en función de la ruta en la cual se realizaron las mediciones. Se observa que existe una tendencia hacia la curva que muestra la Gráfica 8 (figura número 7 de la Recomendación UIT-R P.368-9), con la cual se puede representar de manera homogénea la conductividad del suelo en todo el territorio nacional.

Adicional a la aplicación del método de atenuación propuesto por la UIT en el Manual sobre Propagación por onda de superficie, la ANE realizó mediciones de intensidad de campo eléctrico de todas las emisoras A.M. del país con las estaciones de monitoreo que tiene la entidad, obteniendo un total de 2472 mediciones. Posterior a las mediciones, se realizaron comparaciones entre los resultados obtenidos en las mediciones de intensidad de campo eléctrico realizadas por las estaciones de monitoreo de la ANE y las simulaciones realizadas en la herramienta HTZ Communications de las 349 estaciones de A.M (Ver detalle en Anexo 1. Medición de la Conductividad Efectiva del Suelo). asignadas para la prestación del servicio de radiodifusión sonora, haciendo uso de los valores de intensidades de campo para diferentes valores de permitividad y conductividad de las curvas de propagación de onda de superficie establecidos en la Recomendación UIT-R P.368-9.



Gráfica 2.3: Promedio de las diferencias de intensidad de campo eléctrico
Fuente: Elaboración ANE

Tabla 2.2.3 Promedio de la diferencia en dB μ V/m entre la medición de intensidad de campo eléctrico de la monitora con respecto a la simulación en HTZ realizada para todas las estaciones asignadas del país
Fuente: Elaboración ANE

Figura 5 (dB μ V/m)	Figura 6 (dB μ V/m)	Figura 7 (dB μ V/m)	Figura 8 (dB μ V/m)	Figura 9 (dB μ V/m)
14,44	11,93	11,20	12,05	13,90

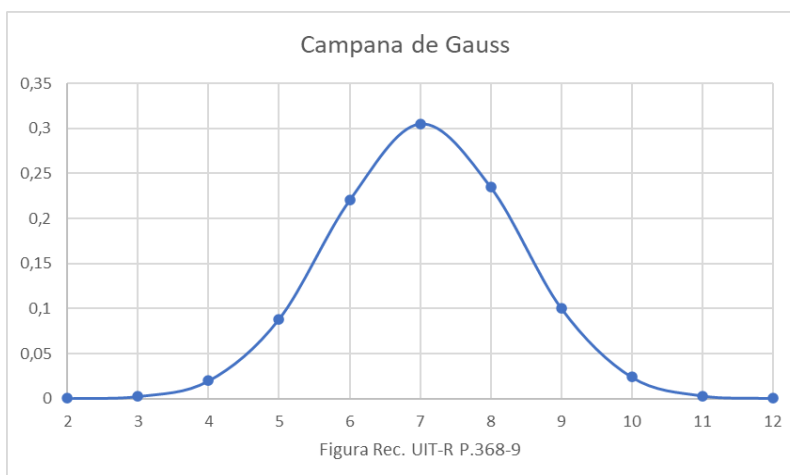
Comparando los valores de intensidad de campo eléctrico registrados en las mediciones de las estaciones de monitoreo con los valores de intensidad de campo resultantes de la simulación, se observa que la curva mostrada en la Gráfica 8 de este documento, correspondiente a la Figura 7 la Recomendación UIT-R P.368-9 representa menores diferencias, es decir, que los valores de conductividad de estas curvas se acercan más a la realidad percibida por las monitoras ubicadas en diferentes zonas del país.

En la Tabla 2.4 se listan las ciudades donde se ubican las estaciones de monitoreo de la ANE utilizadas para realizar las mediciones de intensidad de campo eléctrico y se relaciona el número de la curva de la Recomendación UIT-R P.368 que mejor representa los valores de conductividad eléctrica del terreno para cada ciudad.

Tabla 2.2.4 Figura de la Recomendación UIT-R P.368-9 que mejor representa la conductividad del terreno en cada ciudad
Fuente: Elaboración ANE

Ciudad de la Monitora	Figura Rec. UIT-R P.368-9
Barranquilla	8
Bucaramanga	9
Cali	6
Cartagena	8
Cúcuta	7
Funza	6
Ibagué	9
Ipiales	7
Manizales	5
Medellín	9
Montenegro	7
Montería	6
Neiva	7
Pasto	6
Pereira	8
Popayán	5
Oicatá	6
Villavicencio	8

Los resultados de la Tabla 2.4 soportan las 2472 mediciones de intensidad de campo eléctrico realizadas con las estaciones de monitoreo de la ANE. Estos resultados se representan con la Campana de Gauss en la Gráfica 2.4.



Gráfica 2.4: Campana de Gauss.
Fuente: Elaboración ANE

Al revisar el resultado de la Gráfica 2.4 y contrastarlo con la Gráfica 1.8 (Figura 7 de la Recomendación UIT-R P.368-9), se observa que es la que mejor representa la conductividad del terreno para cada una de las ciudades en donde se encuentran las monitoras.

En el marco de lo anterior, se concluye que la figura 7 de la Recomendación UIT-R P.368-9 es la curva que mejor representa la conductividad del suelo en Colombia. Es por esto por lo que, para el nuevo Plan Técnico de Radiodifusión Sonora en Amplitud Modulada, se establece que para efectos de planificación de estaciones se usará una conductividad efectiva del suelo de 1 mS/m, y un valor de permitividad de 15, valores que son utilizados en la figura 7 de la Recomendación UIT-R P.368-9.

Es importante señalar que la Recomendación UIT-R P.368-9 fue actualizada por la Recomendación UIT-R P.368-10 en el mes de agosto de 2022. Esta actualización pone a disposición del sector un Software que pretende reemplazar las figuras de las curvas de la Recomendación UIT-R P.368-9, por lo que la Figura 7 no aparece en esta última Recomendación. Sin embargo, la ANE seguirá haciendo referencia a la curva de propagación de onda de superficie de la Figura 7 perteneciente a la Recomendación UIT-R P.368-9 y la adjuntará como Anexo al Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en Amplitud Modulada.

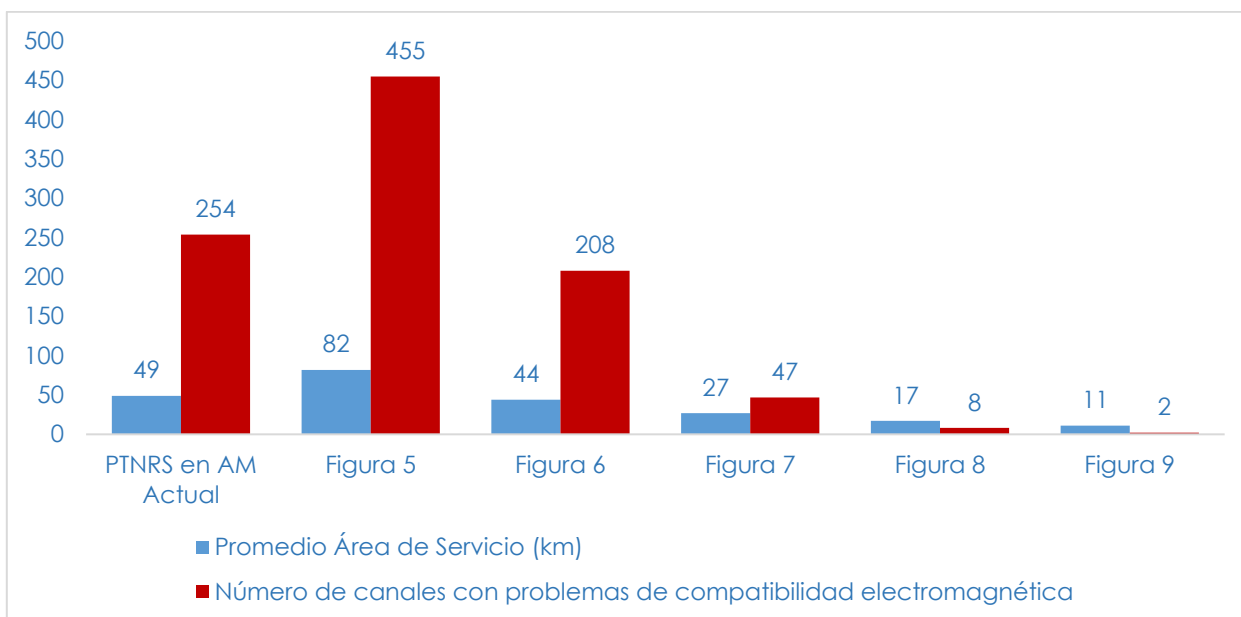
2.2 ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD ENTRE ESTACIONES CON LAS CURVAS DE LA RECOMENDACIÓN UIT-R P.368-9

En la gestión del espectro radioeléctrico los canales deben estar alineados a las condiciones de planificación establecidas para que el servicio de radiodifusión sonora se preste libre de interferencias objetables y haciendo un uso eficiente del espectro. Por ello, como complemento a lo descrito en el numeral 3.1, es necesario diagnosticar el estado actual de la planificación del espectro en la banda de A.M. haciendo uso de las buenas prácticas de planificación radioeléctrica establecidas por la UIT.

La ANE realizó análisis de ingeniería del espectro² del 100% de los canales asignados y proyectados en el PTNRS en A.M. con el objetivo de establecer, para cada estación, el alcance del área de servicio e identificar los canales que presentan problemas de compatibilidad electromagnética en la planificación, considerando los valores de conductividad y permitividad del actual PTNRS en A.M. y las curvas de propagación de la Recomendación UIT-R P. 368 – 9.

En la Gráfica 2.5 se muestra un resumen de los resultados de los análisis realizados, documentando el promedio del alcance en kilómetros del área de servicio de todas las estaciones del país y el número de canales que según la simulación presentan problemas de compatibilidad electromagnética en la planificación.

² No se consideraron las pérdidas en la propagación ocasionadas por la rugosidad del terreno



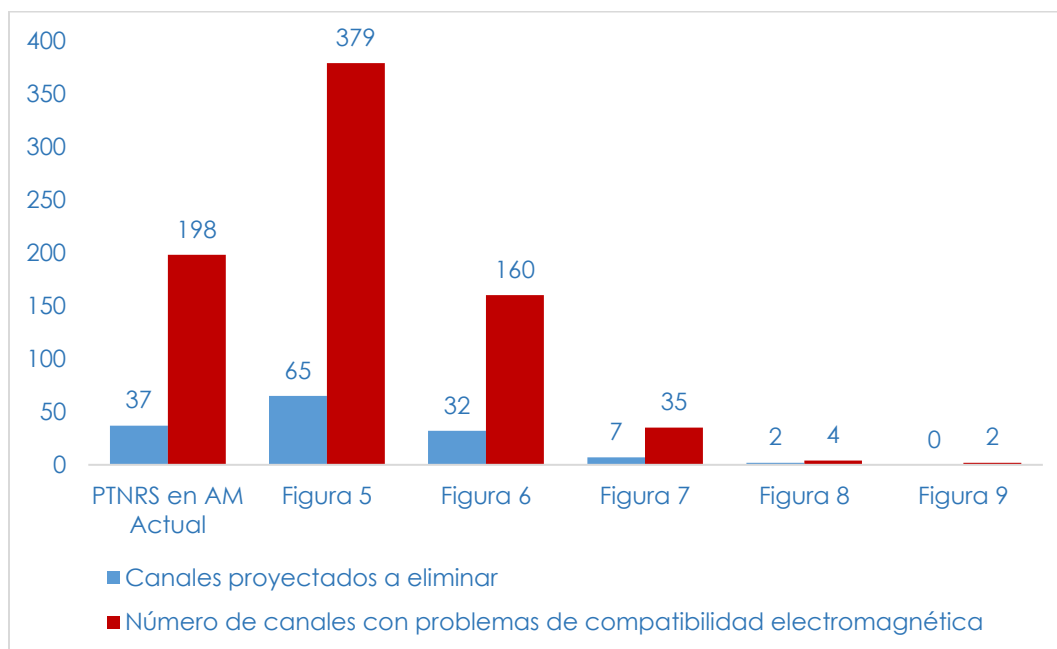
Gráfica 2.5: Alcance promedio en kilómetros del área de servicio de los canales del PTNRS en A.M. y canales con problemas de compatibilidad electromagnética según la simulación.

Fuente: Elaboración ANE

Se observa que, al predecir la cobertura de las emisoras considerando diferentes valores de conductividad y permitividad establecidos en las curvas de propagación por onda de superficie de la Recomendación UIT-R P. 368 – 9, se genera, para cada figura (5 a 9 de la recomendación), un escenario radioeléctrico distinto en el país, representado por estaciones que podrían presentar problemas de compatibilidad electromagnética. Con el fin de definir el escenario de distribución de canales más eficiente, es necesario determinar los criterios más adecuados para realizar una planificación del espectro en el PTNRS en A.M. ajustada al escenario real.

La curva de propagación por onda de superficie de la Figura 7 de la Recomendación UIT-R P. 368 – 9 es la que mejor representa el escenario radioeléctrico actual en la planificación del espectro en la banda de A.M., toda vez que reduce de manera importante los canales con problemas de compatibilidad electromagnética y mantiene una predicción adecuada de la cobertura de las estaciones de radiodifusión sonora en A.M. conforme al análisis referenciado en el numeral 3.1 del presente documento. Adicionalmente, se resalta que en el país las emisoras de A.M. en operación no presentan interferencias objetables.

Ahora bien, considerando que el número de canales con problemas de compatibilidad electromagnética que fueron identificados en la simulación e indicados en la Gráfica 17, incorpora canales en estado proyectado en el PTNRS en A.M., la ANE realizó nuevamente el análisis eliminando los canales proyectados que podrían tener problemas de compatibilidad electromagnética, y el resultado se muestra en la Gráfica 2.6.



Gráfica 2.6: Canales proyectados a eliminar para reducir el número de canales con problemas de compatibilidad electromagnética según la simulación.

Fuente: Elaboración ANE

3 DEFINICIONES

3.1 INCORPORACIÓN DE DEFINICIONES

De acuerdo con las actualizaciones en las recomendaciones UIT-R BS.561 “Definiciones de la radiación en radiodifusión (ondas kilométricas, hectométricas y decamétricas)” [8] y UIT-R BS.638 “Términos y definiciones utilizados en la planificación de frecuencias para radiodifusión sonora” [9] se modificaron y adaptaron las definiciones establecidas en el antiguo PTNRS en AM. En el presente capítulo se desarrollan las definiciones incorporadas y las modificadas.

Se incorporan al Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en A.M. las siguientes definiciones:

3.1.1 Anchura de banda ocupada

Es el rango de frecuencias en el cual, por debajo de su frecuencia límite inferior y por encima de su frecuencia límite superior, se emiten potencias medias iguales cada una al 0,5% de la potencia media total de la emisión autorizada.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. La Anchura de banda ocupada indica la ocupación real del espectro en una emisión de radiodifusión sonora.

3.1.2 Atribución de una banda de frecuencia

Inscripción en el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF) de una banda de frecuencias determinada, para que sea utilizada por uno o varios servicios de radiocomunicación terrenal o espacial o por el servicio de radioastronomía en condiciones especificadas. Este término se aplica también a la banda de frecuencias considerada.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.3 Canal proyectado

Canal planificado para la prestación del servicio de radiodifusión sonora, que está disponible para futuras asignaciones por parte del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.4 Clase de emisión

Conjunto de características de una emisión, a saber: tipo de modulación de la portadora principal, naturaleza de la señal moduladora, tipo de información que se va a transmitir o cualquiera otra característica. Cada clase de emisión se designa mediante un conjunto de símbolos normalizados.

Esta definición se incorpora con el fin de clarificar la emisión autorizada en ondas hectométricas. Adicionalmente, se busca una alineación con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.5 Cobertura de un municipio

Delimitación geográfica de la extensión territorial de un municipio cubierta por una estación de radiodifusión sonora con la intensidad de campo nominal utilizable (E_{nom}), la cual se protegerá contra interferencias objetables conforme a lo establecido en el numeral 5.5.2. del presente Plan Técnico.

Esta definición se incorpora con el fin de establecer de manera clara la cobertura en municipios generada por una estación de radiodifusión sonora en A.M.

3.1.6 Conceptos sobre divisiones territoriales

- Área urbana. Se caracteriza por estar conformada por conjuntos de edificaciones y estructuras contiguas agrupadas en manzanas, las cuales están delimitadas por calles, carreras o avenidas, principalmente. Cuenta, por lo general, con una dotación de servicios esenciales tales como acueducto, alcantarillado, energía eléctrica, hospitales y colegios, entre otros. En esta categoría están incluidas las ciudades capitales y las cabeceras municipales.
- Área rural o resto municipal. Se caracteriza por la disposición dispersa de viviendas y explotaciones agropecuarias existentes en ella. No cuenta con un trazado o nomenclatura de calles, carreteras, avenidas y demás. Tampoco dispone, por lo general, de servicios públicos y otro tipo de facilidades propias de las áreas urbanas.
- Cabecera municipal (CM). Es el área geográfica que está definida por un perímetro urbano, cuyos límites se establecen por acuerdos del Concejo Municipal. Corresponde al lugar en donde se ubica la sede administrativa de un municipio.
- Centro poblado (CP). Es un concepto creado por el DANE para fines estadísticos, útil para la identificación de núcleos de población. Se define como una concentración de mínimo veinte (20) viviendas contiguas, vecinas o adosadas entre sí, ubicada en el área rural de un municipio o de un corregimiento departamental. Dicha concentración presenta características urbanas tales como la delimitación de vías vehiculares y peatonales.
- Área no municipalizada (ANM). Solamente para efectos de lo dispuesto en esta Resolución, y de acuerdo con las definiciones establecidas por el DANE³, se entenderá como área no municipalizada la división del departamento que no forma parte de un determinado municipio ubicado en los departamentos de Amazonas, Guainía y Vaupés y que cuenta con un código de identificación DIVIPOLA.

Estos conceptos facilitan la interpretación de algunas condiciones del PTNRS en A.M. Adicionalmente, se incorporan con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M.

³ <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/cnpv-2018-glosario.pdf>

3.1.7 Emisión

Radiación producida o producción de radiación por una estación transmisora radioeléctrica.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.8 Emplazamiento para la ubicación de estaciones de radiodifusión sonora

Ubicación geográfica de un terreno destinado para la instalación y operación del sistema de transmisión de una o varias estaciones de radiodifusión sonora.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.9 Enlace punto a zona (para redes transmóviles de radiodifusión sonora)

Medio de comunicación que utiliza ondas radioeléctricas entre una estación situada en un punto fijo determinado y cualquier estación o estaciones situadas en puntos no especificados de una zona dada que constituye el área de cobertura de la estación situada en un punto fijo.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M., dado que se utilizan las mismas bandas de frecuencias para la operación de equipos transmóviles.

3.1.10 Enlace radioeléctrico

Medio de telecomunicación de características específicas entre dos puntos que utiliza ondas radioeléctricas.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.11 Estudio de emisión

Es el conjunto de instalaciones físicas y equipos necesarios para la elaboración, almacenamiento y edición de contenidos y programas que podrán ser emitidos en directo o grabados para su difusión posterior. También podrá integrar todas las áreas o divisiones adicionales de una emisora, tales como administración, comercial, etc.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M.

3.1.12 Frecuencias para la prestación del servicio de radiodifusión sonora

- Frecuencia de operación. Frecuencia central asignada para la prestación del servicio público de radiodifusión sonora.
- Frecuencia de enlace entre el estudio de emisión y el sistema de transmisión. Frecuencia del canal de la red punto a punto entre el estudio de emisión y el sistema de transmisión de una estación de radiodifusión sonora.
- Frecuencia para la operación de equipos transmóviles. Frecuencia para la red punto a zona: Frecuencia central del canal de la red punto a zona para la operación de equipos transmóviles.
- Frecuencia para la operación de equipos transmóviles. Frecuencia para la red punto a punto: frecuencia central del canal de la red punto a punto que soporta la red para la operación de equipos transmóviles.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. dado que se utilizan las mismas bandas de frecuencias para el enlace entre el estudio de emisión y el sistema de transmisión, al igual que la operación de equipos transmóviles.

3.1.13 Ganancia de una antena

Relación, generalmente expresada en decibelios, que debe existir entre la potencia necesaria a la entrada de una antena de referencia sin pérdidas y la potencia suministrada

a la entrada de la antena en cuestión, para que ambas antenas produzcan, en una dirección dada, la misma intensidad de campo o la misma densidad de flujo de potencia, a la misma distancia. Salvo que se indique lo contrario, la ganancia se refiere a la dirección de máxima radiación de la antena.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.14 Intensidad de campo

Fuerza por unidad de carga que experimenta una partícula cargada dentro de un campo eléctrico. Se expresa en voltios por metro (V/m) o en dBV/m si está en forma logarítmica.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.15 Intensidad de campo eléctrico admisible (Ead)

Es el valor de la intensidad de campo resultante de la diferencia entre la intensidad de campo nominal utilizable (E_{nom}) y la relación de protección aplicable.

Esta definición se incorpora porque es un nuevo concepto utilizado para el cálculo de compatibilidad electromagnética entre estaciones.

3.1.16 Intensidad de campo en el espacio libre

Expresa la intensidad de campo que existe en un punto cualquiera, cuando no existen ondas reflejadas.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable para la red de enlace entre el estudio de emisión y el sistema de transmisión y la operación de equipos transmóviles.

3.1.17 Interferencia

Efecto de una energía no deseada debida a una o varias emisiones, radiaciones, inducciones o sus combinaciones sobre la recepción en un sistema de radiocomunicación, que se manifiesta como degradación de la calidad, falseamiento o pérdida de la información que se podría obtener en ausencia de esta energía no deseada.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.18 Municipios colindantes

Dos municipios son colindantes cuando sus límites geográficos son fronterizos, de acuerdo con la división político-administrativa - DIVIPOLA del DANE.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.19 Ondas radioeléctricas

Ondas electromagnéticas cuya frecuencia se fija convencionalmente por debajo de 3000 GHz, y que se propagan por el espacio sin guía artificial.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.20 Propagación en el espacio libre

Propagación de una onda electromagnética en un medio dieléctrico ideal homogéneo que se puede considerar infinito en todas las direcciones.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M. En lo referente a la red de enlace y operación de equipos transmóviles.

3.1.21 Radio

Término general que se aplica al empleo de las ondas radioeléctricas.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.22 Radiación (Radioeléctrica)

Flujo saliente de energía de una fuente cualquiera en forma de ondas radioeléctricas o esta misma energía.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.23 Radiocomunicación

Toda telecomunicación transmitida por ondas radioeléctricas.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.24 Servicio de radiocomunicación

Servicio que implica la transmisión, la emisión o la recepción de ondas radioeléctricas para fines específicos de telecomunicación.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.25 Sistema de transmisión (centro emisor)

Conjunto de equipos emisores con su correspondiente sistema radiante. Ejemplo: Transmisor, generador de estéreo, procesador de audio, filtros y diplexores, línea de transmisión, arreglo de antenas, torre soporte, sistema de tierra y otros.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.26 Transmóviles

Unidad móvil que permite la realización de programas en el exterior (fuera del estudio de emisión) o para la contribución a programas que se realizan en el estudio de emisión.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M.

3.1.27 Zona de cobertura

Zona asociada a una estación transmisora para un servicio dado y una frecuencia específica, en el interior de la cual, y en condiciones técnicas determinadas, puede establecerse una radiocomunicación con otra u otras estaciones receptoras.

Esta definición se incorpora con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M. Asimismo, contribuye a entender mejor el contenido del PTNRS en A.M.

3.1.28 Zona tropical

La «Zona Tropical» comprende en la Región 2 toda la zona que se extiende entre los trópicos de Cáncer y Capricornio.

Esta definición se incorpora de acuerdo con el concepto establecido en el Reglamento de Radiocomunicaciones.

3.2 MODIFICACIÓN DE DEFINICIONES

3.2.1 Adjudicación de una frecuencia o de un canal radioeléctrico

Inscripción de un canal determinado en un plan, adoptado por una conferencia competente, para ser utilizado por una o varias administraciones para un servicio de radiocomunicación

terrenal o espacial en uno o varios países o zonas geográficas determinados y según condiciones especificadas.

Esta definición se modifica con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M.

3.2.2 Anchura de banda necesaria

Para una clase de emisión dada, es la anchura de la banda de frecuencia suficiente para asegurar la transmisión de la información a la velocidad y la calidad requeridas en condiciones especificadas.

Esta definición se modifica con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M.

3.2.3 Área de servicio primaria

Área de servicio delimitada por el contorno dentro del cual el nivel calculado de la intensidad de campo nominal utilizable (E_{nom}) de la onda de superficie está protegido contra interferencia objetable.

Se complementa de acuerdo con el concepto de intensidad de campo nominal utilizable (E_{nom}), con el cual se delimita el área de servicio.

3.2.4 Asignación de permisos de una frecuencia o de un canal radioeléctrico

Autorización que da una administración para que una estación radioeléctrica utilice una frecuencia o un canal radioeléctrico determinado en condiciones especificadas.

Esta definición se modifica con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M.

3.2.5 Canal de frecuencias

Parte del espectro de frecuencias que se destina para la transmisión o recepción de señales y que puede determinarse por dos límites definidos, por su frecuencia central y la anchura de banda asociada o por cualquier otra indicación equivalente.

Esta definición se modifica con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M.

3.2.6 Emisión fuera de banda

Emisión en una o varias frecuencias situadas inmediatamente fuera de la anchura de banda necesaria, cuyo nivel puede reducirse sin influir en la transmisión de la información correspondiente.

Esta definición se modifica con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M.

3.2.7 Intensidad de campo nominal utilizable (Enom).

Valor mínimo convencional de la intensidad de campo necesaria para proporcionar una recepción satisfactoria, en condiciones especificadas, en presencia de ruido atmosférico, de ruido artificial y de interferencia debida a otros transmisores. El valor de la intensidad de campo nominal utilizable ha sido empleado como referencia en planificación.

Esta definición se modifica con el fin de que esté alineada con el Acuerdo de Rio de Janeiro de 1981.

3.2.8 Interferencia objetable

Es la interferencia ocasionada por una señal que excede la máxima intensidad de campo admisible dentro del contorno protegido, de conformidad con los valores determinados según las disposiciones de este Plan, y corresponde al valor de la intensidad de campo nominal utilizable dividido por la relación de protección.

Esta definición se modifica con el fin de que esté alineada con el Acuerdo de Río de Janeiro de 1981.

3.2.9 Relación de protección

Valor mínimo, generalmente expresado en decibelios, de la relación entre la señal deseada y la señal no deseada a la entrada del receptor, determinado en condiciones especificadas, que permite obtener una calidad de recepción especificada de la señal deseada a la salida del receptor.

Esta definición se modifica con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M.

3.2.10 Relación de protección en radiofrecuencia

Valor de la relación de señal deseada a señal interferente en radiofrecuencia que en condiciones bien determinadas permite obtener la relación de protección en audiofrecuencia a la salida de un receptor. Estas condiciones determinadas comprenden diversos parámetros, tales como la separación de frecuencias entre la portadora deseada y la portadora interferente, las características de la emisión (tipo, porcentaje de modulación), niveles de entrada y salida del receptor y las características de este (selectividad, sensibilidad a la intermodulación).

Para efectos de planificación se protegerán el contorno de la intensidad de campo nominal utilizable (E_{nom}) de conformidad a las disposiciones de este Plan.

Esta definición se modifica para incorporar el concepto de intensidad de campo nominal utilizable aplicado a la relación de protección en radiofrecuencia.

3.2.11 Servicio de radiodifusión sonora

La radiodifusión sonora es un servicio público de telecomunicaciones a cargo y bajo la titularidad del Estado, orientada a satisfacer necesidades de telecomunicaciones de los habitantes del territorio nacional y cuyas emisiones se destinan a ser recibidas por el público en general.

Esta definición se modifica con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M.

3.2.12 Ubicación de la estación

Lugar de instalación del sistema de transmisión de una estación de radiodifusión sonora en A.M., el cual requiere para su operación la autorización previa del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

Esta definición se modifica con el fin de que esté alineada con el PTNRS actual en F.M., teniendo en cuenta que el concepto es aplicable tanto para la radiodifusión sonora en A.M. como para F.M.

3.2.13 Anchura de banda necesaria

Con el fin de alinear el plan técnico nacional de radiodifusión sonora con el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias, es necesario restringir el valor de ancho de banda necesario de los canales 1 y 117 de 20 a 10 kHz, lo anterior se debe a que en la actualidad Bandas de Frecuencias la banda atribuida al servicio de radiodifusión sonora en amplitud modulada se encuentra entre 535 y 1705 kHz, por lo tanto, si los canales 1 y 117 se les asigna un ancho de banda necesario máximo de 20 kHz, se estarían saliendo de la banda de frecuencia atribuida.

4 COMPARATIVA MEDIANTE EL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

En este capítulo se busca recopilar la visión que tienen algunos expertos en planificación del espectro en Radiodifusión Sonora en AM, para la planificación de canales de emisoras de radiodifusión sonora en AM en Colombia. Esto, de acuerdo con la compatibilidad actual entre estaciones y teniendo en cuenta las recomendaciones internacionales y tratados regionales. Para este fin, se propone evaluar cuáles son las características más importantes entre los métodos de cálculo propuestos por el anterior Plan Técnico Nacional de Radio Difusión Sonora (PTNRDS) y el actual PTNRDS. 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 un método sobre otro, así como los criterios y subcriterios que se necesitan para poder valorar adecuadamente las alternativas seleccionadas.

4.1 LA TOMA DE DECISIONES.

En la vida cotidiana, los seres humanos enfrentan constantemente la necesidad de tomar decisiones en diversos contextos y condiciones. En muchas ocasiones, disponen de varias alternativas para una situación específica y deben seleccionar aquella que mejor satisfaga sus necesidades particulares [10]. La toma de decisiones a lo largo de la vida suele fundamentarse en la experiencia y en la subjetividad inherente de cada individuo. No obstante, decidir en función de estos factores no garantiza necesariamente que la elección realizada sea la más acertada [11].

Lo que define una buena decisión es el proceso o el método mediante el cual se determina qué acción realizar o qué camino seguir, considerando los diferentes criterios y actores involucrados. Por ello, la percepción de una buena decisión no depende exclusivamente de los resultados favorables que pueda generar, sino de cómo se fue dando su implementación. En consecuencia, el proceso adoptado para decidir es fundamental al momento de seleccionar una alternativa sobre las demás, ya que permite justificar cuál de las opciones es la más adecuada entre las disponibles. Generalmente, una buena decisión presenta las siguientes características [12]:

- Selección y proyección de la alternativa que busca alcanzar un objetivo específico.

- Recolección de datos relevantes.
- Consideración de las directrices y prioridades de la persona encargada de tomar la decisión.

En la mayoría de los entornos, la toma de decisiones es crucial, pues constituye una actividad sensible e indispensable para avanzar en el desarrollo de un proyecto. Dependiendo de la naturaleza del proyecto, es común que sea necesario tomar decisiones complejas, dado que estas pueden tener efectos inmediatos sobre los actores implicados, quienes pueden verse afectados por la decisión. Además, suelen existir múltiples puntos de vista para abordar situaciones difíciles de modelar y reconciliar. Según [13], las razones para prestar especial atención al proceso de toma de decisiones son las siguientes:

- La magnitud y complejidad de los proyectos actuales.
- El posicionamiento que la industria busca en nuevos mercados.
- Las limitaciones en la toma de decisiones complejas, debido al desconocimiento de factores que intervienen en los proyectos, lo que a menudo lleva a modificar objetivos, metas y principios previamente establecidos.
- La legislación que demanda un alto grado de compromiso de los líderes de proyecto, ya que se busca garantizar una mayor calidad en servicios, productos y prestaciones en ingeniería, con un seguimiento adecuado de la documentación que especifique su modelo y modo de implementación.

A la hora de enfrentarse a una decisión, es esencial evaluar en su totalidad el contexto de la problemática que se intenta resolver. Una decisión bien fundamentada se apoya en el análisis y en la identificación del escenario que represente el menor riesgo posible. Esto se logra mediante el uso de mecanismos basados en métodos matemáticos rigurosos, los cuales proporcionan un soporte objetivo en la resolución del problema [13].

4.2 LA TOMA DE DECISIONES MULTICRITERIO

La toma de decisiones multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés, Multi Criteria Decision Making) permite analizar una decisión desde diversos puntos de vista, introduciendo una variedad de métodos, técnicas y conceptos [14]. A través de procesos matemáticos

aplicados, esquemas administrativos y estudios de operaciones, el MCDM busca seleccionar la mejor alternativa para una decisión determinada [15]. Desde mediados del siglo XX, los avances en la teoría de decisiones han sido significativos, facilitando la toma de decisiones para líderes empresariales a nivel mundial mediante el uso de bases de datos que proporcionan información de soporte. Algunos de los métodos destacados incluyen el scoring, la Teoría de Utilidad Multiatributo (MAUT), el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), y el Proceso Analítico en Red (ANP), entre otros [16] y [17].

El Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) es uno de los métodos más utilizados actualmente para la selección de tecnologías. Estudios como [18], [19], [20], [21] y [22] han empleado el método PAJ para elegir tecnologías en contextos específicos, debido a su capacidad de análisis mediante métodos matemáticos, que incluyen la definición de niveles y la participación de expertos para valorar alternativas mediante escalas. Así, este método resulta adecuado para el estudio propuesto en este documento.

Descripción del método a utilizar

El Proceso Analítico Jerárquico (PAJ o AHP, por sus siglas en inglés) fue desarrollado para abordar decisiones complejas y se basa en una técnica matemática estructurada creada y perfeccionada por Thomas L. Saaty. Este método ha sido ampliamente utilizado para apoyar decisiones en áreas como negocios, salud, gobierno, educación e industria [23].

El uso del PAJ comienza con la identificación del problema y el diseño de un modelo jerárquico en forma piramidal descendente. En la parte superior se encuentra el objetivo principal y, a partir de ahí, se identifican los niveles de importancia. Al final del esquema se ubican las alternativas a considerar y valorar. Para estructurar el problema en forma jerárquica, es fundamental contar con conocimiento, experiencia e información relevante sobre el tema [10].

Una vez construido el esquema jerárquico, se valoran los componentes de cada nivel mediante comparaciones pareadas, que se basan en ratios de preferencia (si se comparan alternativas) o en ratios de importancia para determinar los pesos relativos (si se comparan criterios y subcriterios).

El PAJ presenta ventajas en comparación con otras técnicas, especialmente cuando los elementos son difíciles de cuantificar o comparar o cuando existen diferencias de terminología o perspectiva en el equipo decisor. Entre las situaciones donde se puede aplicar este método se encuentran [24]:

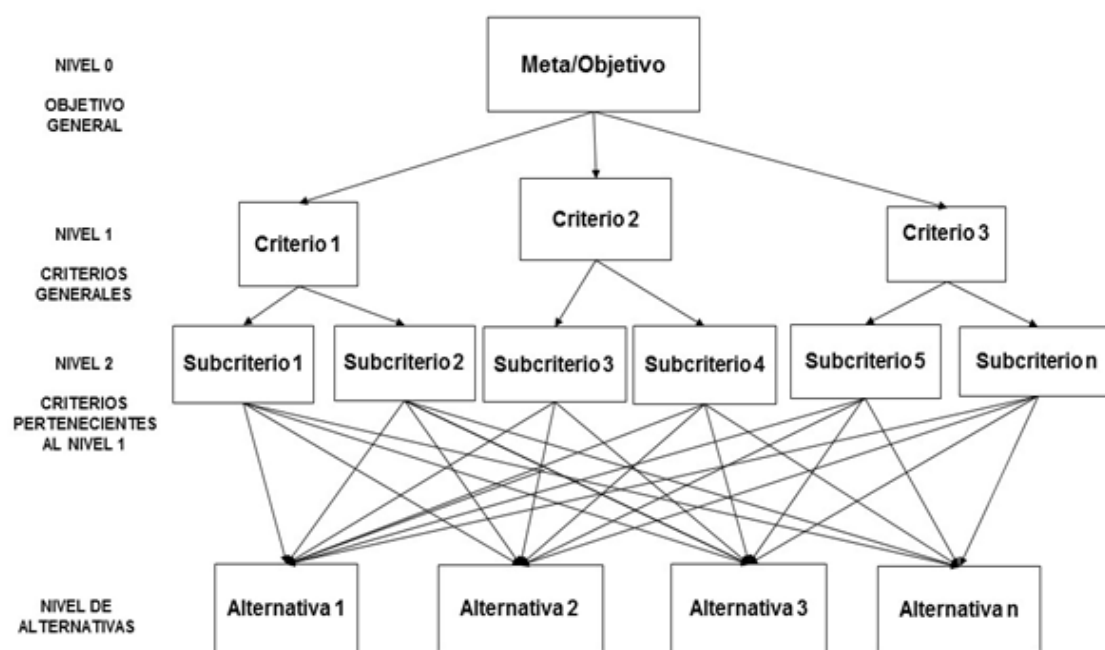
- Selección: Elegir una alternativa de un conjunto de opciones, evaluando características que influyen en los criterios de decisión.
- Clasificación: Ordenar un conjunto de alternativas de la más a la menos deseable.
- Priorización: Definir las prioridades de un conjunto de alternativas, sin limitarse a elegir solo una o agruparlas.
- Asignación de recursos: Distribuir recursos entre varias alternativas.
- Benchmarking: Comparar los procesos de una organización con los de otra.
- Gestión de calidad: Guiar y dirigir los aspectos multidimensionales de la calidad y su mejora.

Si bien puede ser usado por individuos en decisiones de baja complejidad, el PAJ es particularmente útil para equipos que abordan problemas complejos, involucrando percepciones y juicios humanos, y cuyas decisiones tienen repercusiones a largo plazo [25]. Los pasos generales para utilizar el PAJ son los siguientes [26].

1. **Organizar el problema de forma jerárquica.**

El proceso inicia estableciendo los niveles de complejidad del problema, facilitando que los participantes comprendan la situación desde un enfoque general hasta el nivel específico. A medida que se organiza la información, se obtiene una imagen más clara y completa del problema [26].

La jerarquía del PAJ se compone de un objetivo general o meta, un conjunto de alternativas y un conjunto de criterios que relacionan las alternativas con el objetivo planteado. Estos criterios pueden subdividirse en subcriterios y, si es necesario, en sub-subcriterios. Un ejemplo de este modelo jerárquico se presenta en la Figura 4.1, donde el objetivo se ubica en la parte superior, los criterios en posiciones intermedias y las alternativas en el nivel inferior.



Gráfica 4.1: Jerarquía del modelo AHP. Adaptado de [10].

Asignar ratios de prioridad

Una vez finalizada la construcción de la jerarquía, el siguiente paso en el PAJ consiste en establecer las prioridades a través de un proceso matemático aplicado a cada uno de los niveles identificados. Este procedimiento genera un vector de prioridades, que representa la importancia relativa de cada criterio o nivel específico en el contexto de la decisión. Esta importancia relativa se realiza haciendo comparaciones por pares, teniendo en cuenta la tabla 4.1 que se muestra a continuación [10].

Tabla 4.1 Tabla de valoración directa de Saaty [27].

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 que cada experto ha realizado la valoración pareada de todos los elementos en un nivel, el método matemático del PAJ evalúa el nivel de consistencia de sus juicios, buscando minimizar posibles contradicciones y asegurar que las valoraciones mantengan una relación proporcional. Para calcular la consistencia de los juicios, se utiliza la tabla 4.2, donde se presentan los valores de los ratios de inconsistencia aleatoria (RIA), los cuales varían en función del número de elementos (n) incluidos en el nivel evaluado.

Tabla 4.2 RIA en función del número de elementos valorados por nivel (n) [26].

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 [26]:

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

Considerando que el número de elementos evaluados en cada nivel o criterio determina el tamaño de la matriz cuadrada a analizar (n x n), para obtener el valor máximo de λ (λ_{max}) es necesario calcular la suma ponderada de los productos entre los valores de cada criterio (los valores de la columna correspondiente al criterio) y el valor del vector de prioridades

asignado a ese criterio en particular. Este proceso se aplica a cada criterio, realizando posteriormente una suma ponderada por filas. El resultado se divide entre el valor del vector de prioridad correspondiente a cada fila y, finalmente, se calcula la media de estos cocientes para obtener el λ_{max} .

Con el valor de λ_{max} , se procede a calcular el índice de consistencia (CI) y el ratio de inconsistencia aleatoria (RIA). A partir de estos valores, se puede calcular el coeficiente de consistencia (CR) utilizando 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

Tras realizar cada uno de los pasos descritos anteriormente, el último proceso consiste en ponderar cada alternativa considerada. Para ello, es necesario evaluar cada uno de los criterios identificados en función de cada alternativa establecida. A las valoraciones obtenidas se les aplica un método de normalización que mantenga la proporcionalidad, como el método de la suma (distributivo) o el método del máximo, también conocido como ideal. Luego, cada una de estas normalizaciones se multiplica por el valor del vector de prioridades de los subcriterios y criterios correspondientes dentro de la jerarquía.

4.3 COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA LA PLANIFICACIÓN DEL ESPECTRO EN RADIODIFUSIÓN SONORA EN AM

La comparación de los métodos se basa en el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), el cual permite gestionar una gran cantidad de información, facilita la integración de opiniones y valoraciones de diferentes expertos, y es sencillo de comprender, incluso para aquellos que

no están familiarizados con él. Además, el PAJ permite medir la consistencia de los juicios emitidos por los expertos, asegurando la fiabilidad de las valoraciones. Finalmente, es posible realizar un análisis de sensibilidad mediante el uso de software, lo que facilita la comparación entre distintas alternativas al modificar los pesos asignados a niveles y criterios.

Al utilizar el PAJ, se considera la opinión de expertos para seleccionar los criterios de decisión necesarios, lo cual permite completar el análisis propuesto en este capítulo. Los pasos específicos que se siguen para su desarrollo son [26]:

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.
10. Análisis de sensibilidad.

A continuación, se muestra el desarrollo de cada uno de estos 10 pasos.

1. Identificación del objeto de estudio

La definición del objeto de estudio corresponde a determinar el mejor método de planificación del espectro en Radiodifusión Sonora en AM.

2. Elección de alternativas:

En el antiguo PTNRS en A.M. se establece para sistemas de radiodifusión sonora en ondas hectométricas, el uso de las curvas de propagación de onda de superficie, establecidas en la Recomendación UIT-R P.368-3 [2], suponiendo que el terreno colombiano es homogéneo de constante dieléctrica (permitividad ϵ) igual a 4 y una conductividad media (σ) de 10 a la menos 13.5 unidades electromagnéticas (abmhos / cm), para realizar los cálculos del área de servicio y el contorno interferente de cada emisora, análisis que permite determinar la

distancia en kilómetros del área de servicio y la distancia en kilómetros del alcance de las señales que posiblemente interfieren a emisoras coccanales y en canales adyacentes hasta ± 10 kHz. Con base en estas distancias, el antiguo PTNRS [28] se establecen unas matrices de alcances y distancias de protección en kilómetros, las cuales indican la separación que debe existir entre dos sistemas de transmisión para que estos sean compatibles.

Sin embargo, este método de cálculo no contempla las relaciones de protección establecidas en los numerales 4.9.1 y 4.9.2 del acuerdo regional sobre el servicio de radiodifusión por ondas hectométricas en la región 2 de 1981 [6] (Acuerdo RJ81), en la cual se relaciona una relación de protección de 26 dB para estaciones coccanales y una relación de protección de 0 dB para el primer canal adyacente, además de utilizar los valores de conductividad y permitividad de una recomendación UIT en una versión obsoleta, lo cual genera una mayor incompatibilidad entre estaciones, disminuye la posibilidad de reutilización de frecuencias y por tanto no se evidencia un uso eficiente del espectro radioeléctrico.

Dado lo anterior, es posible evidenciar que el método de cálculo de distancias de protección y la utilización de una curva de propagación de onda de superficie particular, no se encuentra alineado con las recomendaciones UIT vigentes para la operación de sistemas de radiodifusión sonora en ondas hectométricas, aspecto que puede generar importantes riesgos en la compatibilidad entre estaciones de radiodifusión sonora, así como limitar la adjudicación del mayor número de canales en AM en el país.

Es por este motivo que de acuerdo con la diferencia de estándares propuestos para realizar los cálculos del área de servicio y el contorno interferente de cada emisora entre el PTNRS antiguo y el nuevo, se decidió hacer la comparativa del presente capítulo, con el fin de corroborar la pertinencia de la implementación del nuevo PTNRS.

Las electivas seleccionadas son:

- El método de planificación del espectro radioeléctrico en AM antiguo
- El método de planificación del espectro radioeléctrico en AM actual

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 3 expertos de la Agencia Nacional del Espectro, quienes tenían una visión general sobre el espectro radioeléctrico en AM y que, por sus áreas de experticia, podían aportarles positivamente a las valoraciones requeridas por el método del PAJ.

4. Elección de los criterios de decisión

La elección de criterios de decisión mediante una búsqueda bibliográfica es una práctica esencial en el desarrollo de un análisis estructurado y bien fundamentado. Esta estrategia permite identificar criterios relevantes basados en estudios previos y experiencias documentadas en el campo de interés, los cuales se presentan luego a los expertos para validar su pertinencia y aplicabilidad en el contexto específico.

Una metodología comúnmente empleada en este tipo de procesos es el BOCR (Beneficios, Oportunidades, Costos y Riesgos), que ofrece una estructura para agrupar y evaluar los criterios en función de su impacto en el análisis. El uso de BOCR facilita la comparación de alternativas bajo una perspectiva integral, ya que no solo se concentra en los beneficios, sino que también evalúa los riesgos y los costos que pueden afectar la decisión. Esta metodología es particularmente útil cuando el análisis implica múltiples factores y se requiere una visión equilibrada para evitar sesgos en el proceso de toma de decisiones [28], [29].

Luego de la búsqueda bibliográfica, se realizó una consulta a los expertos para seleccionar los criterios pertinentes para el estudio. Para valorar estos criterios, se utilizó una escala de Likert de 1 a 9, donde 9 representaba la mayor valoración posible y 1 la menor. Se prestó especial atención para asegurar que todos los criterios fueran evaluados en términos de maximización; es decir, que una valoración de 9 reflejara siempre un impacto positivo en el análisis.

En el caso de los costos, donde una valoración alta (9) podría interpretarse como algo negativo debido a su implicación de un alto costo, se ajustó el criterio para que la valoración máxima indicara el menor costo. Así, se definió el criterio como “menor costo,” de manera que un 9 indicara que un costo es bajo, reflejando así un efecto positivo.

Para determinar los pesos de cada criterio, se utilizó el método de comparación por pares del Proceso Analítico Jerárquico (PAJ). A través de la Tabla 4.1, se realizó una evaluación comparativa que permitió asignar pesos a cada criterio en un rango de 0 a 1. Este método asegura una priorización coherente de los criterios según su importancia relativa, integrando las valoraciones de los expertos en un modelo de análisis cuantitativo que facilita la toma de decisiones basada en evidencia y opinión experta.

Los criterios seleccionados se enmarcaron en 4 niveles y fueron definidos gracias a la opinión de los expertos de la siguiente forma:

- **Nivel Tiempo de Estudio Técnico:** Este nivel agrupa los criterios relacionados con el tiempo necesario para que el Grupo de Ingeniería de la Agencia Nacional del Espectro (ANE) evalúe y verifique el estudio técnico presentado. Su objetivo es optimizar el tiempo de respuesta en el proceso de evaluación.

Criterios:

- **Menor tiempo concesionario:** Evalúa la rapidez con la que el concesionario entrega el estudio técnico.
- **Menor tiempo ANE:** Mide el tiempo que el ANE requiere para realizar la verificación y el análisis del estudio técnico.

- **Nivel Riesgo de Error en Cálculo:** Este nivel se enfoca en minimizar el riesgo de errores en los cálculos relacionados con áreas de servicio y contornos de interferencia. Su objetivo es reducir posibles inexactitudes en las evaluaciones técnicas.

Criterios:

- **Reducción riesgo Concesionario:** Evalúa las medidas adoptadas por el concesionario para minimizar errores en sus cálculos.
- **Software de simulación:** Considera el uso de herramientas de simulación que ayuden a reducir el riesgo de errores en los cálculos técnicos.

- **Nivel Uso Eficiente de Espectro:** Este nivel busca evaluar la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico, un recurso limitado, para maximizar el número de emisoras sin comprometer la calidad del servicio ni generar interferencias.

Criterios:

- **Maximizar número de emisoras:** Valora si el método permite aumentar el número de emisoras dentro del espectro asignado.
- **Reducir posibles interferencias:** Mide la capacidad del método para minimizar interferencias entre las emisoras
- **Nivel Exactitud en Cobertura:** Enfocado en evaluar el nivel de precisión en la cobertura de las emisoras del servicio de Radiodifusión Sonora en AM. Este nivel asegura que la cobertura planeada se ajusta a la realidad técnica y regulatoria.

Criterios:

- **Área de servicio:** Evalúa la exactitud en la delimitación del área de servicio de la emisora.
- **Contorno interferente:** Analiza la precisión en la definición de los contornos de interferencia, garantizando que no afecten a otras emisoras.

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 4.3

Tabla 4.3 Matriz de dominancia

	Antiguo PTNRS	Nuevo PTNRS
Antiguo PTNRS	0%	0%
Nuevo PTNRS	100%	0%

El resultado resaltado (100%) indica que el nuevo método de cálculo contemplado en el nuevo Plan Técnico Nacional de Radio Difusión Sonora domina por completo al método antiguo. 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 4.4.

Tabla 4.4 Matriz de dominancia con índices de dominancia

	Antiguo PTNRS	Nuevo PTNRS	D_i	D_i/d_i
Antiguo PTNRS	0	0	0	0
Nuevo PTNRS	8	0	8	∞
d_i	8	0		

Se puede apreciar con claridad, que la alternativa con mayor índice de dominancia es nuevo método de cálculo contemplado en el nuevo Plan Técnico Nacional de Radio Difusión Sonora (Valor muy grande, tiende a infinito). Esto a su vez se entiende, para el caso del método planteado por el antiguo Plan Técnico Nacional de Radio Difusión como la alternativa dominada por el nuevo método.

Dados estos resultados, se puede proyectar que, desde el punto de vista de la dominancia, el nuevo método de cálculo es la alternativa más sólida entre las evaluadas.

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 4.5.

Tabla 4.5 Ponderación Final de los Criterios Según Niveles

Criterios	Tiempo Estudio Técnico	Riesgo Error En Cálculo	Uso Eficiente de Espectro	Exactitud en Cobertura	Vector Prioridad
Tiempo Estudio Técnico	1	1/5	1/7	1/3	0,06
Riesgo Error En Cálculo	5	1	1	3	0,38
Uso Eficiente de Espectro	7	1	1	3	0,41

Exactitud en Cobertura	3	1/3	1/3	1	0,15
Σ (Columnas)	16,00	2,53	2,48	7,33	

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 **uso eficiente de espectro** se le asignó un Vector Prioridad de 0.41 correspondiendo al 41%, 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 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 se muestra el mismo proceso con cada uno de los criterios de cada nivel.

Tabla 4.6 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Tecnológico

	Menor tiempo concesionario	Menor tiempo ANE	Vector Prioridad
Menor tiempo concesionario	1	1/5	0,17
Menor tiempo ANE	5	1	0,83
Σ (Columnas)	6,00	1,20	

Tabla 4.7 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Económico

	Reducción riesgo Concesionario	Software de simulación	Vector Prioridad
Reducción riesgo Concesionario	1	1/3	0,25
Software de simulación	3	1	0,75
Σ (Columnas)	4,00	1,33	

Tabla 4.8 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Ambiental

	Maximizar número de emisoras	Reducir posibles interferencias	Vector Prioridad
Maximizar número de emisoras	1	1/7	0,13
Reducir posibles interferencias	7	1	0,88
Σ (Columnas)	8,00	1,14	

Tabla 4.9 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Regulatorio

Alternativas	Área de servicio	Contorno interferente	Vector Prioridad
Área de servicio	1	1/3	0,25
Contorno interferente	3	1	0,75
Σ (Columnas)	4,00	1,33	

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 1,47%, 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

$\lambda_{\max}$	4,00
IC	0,013
IAM	0,882
RC	1,47%

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.

Tabla 4.11 Matriz de decisión

NIVELES / CRITERIOS		Métodos	
		Antiguo PTNRS	Nuevo PTNRS
Tiempo Estudio Técnico	Menor tiempo concesionario	1	7
	Menor tiempo ANE	1	3
Riesgo Error En Cálculo	Reducción riesgo Concesionario	1	9
	Software de simulación	1	5
Uso Eficiente de Espectro	Maximizar número de emisoras	1	3
	Reducir posibles interferencias	1	7
Exactitud en Cobertura	Área de servicio	1	5
	Contorno interferente	1	9

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 el mejor método de cálculo 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.

Tabla 4.12 Cálculo de la Prioridad Global (Método Distributivo)

Criterios	Peso	Subcriterios	Peso	Antiguo PTNRS	Nuevo PTNRS
Tiempo Estudio Técnico	0,061	Menor tiempo concesionario	0,167	0,001	0,009
		Menor tiempo ANE	0,833	0,013	0,038
Riesgo Error En Cálculo	0,380	Reducción riesgo Concesionario	0,250	0,010	0,086
		Software de simulación	0,750	0,048	0,238
Uso Eficiente de Espectro	0,411	Maximizar número de emisoras	0,125	0,013	0,039

		Reducir posibles interferencias	0,875	0,045	0,315
Exactitud en Cobertura	0,148	Área de servicio	0,250	0,006	0,031
		Contorno interferente	0,750	0,011	0,100

0,146	0,854
-------	-------

Para facilidad al momento de interpretar la Tabla 4.12, el valor 0.0048 (resaltado en amarillo) obtenido por el método de cálculo actual del Plan Técnico Nacional de Radio Difusión Sonora en criterio de software de simulación, 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 (0.750), este valor es multiplicado por el vector prioridad para el criterio software de simulación (0.875), y a su vez multiplicado por el vector prioridad del nivel de riesgo de error en el cálculo (0.380), lo que da como resultado (0.0048).

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 4.12 Cálculo de la Prioridad Global (Método Ideal)

Criterios	Ponderación	Subcriterios	Ponderación	Antiguo PTNRS	Nuevo PTNRS
Tiempo Estudio Técnico	0,061	Menor tiempo concesionario	0,167	0,001	0,010
		Menor tiempo ANE	0,833	0,017	0,051
Riesgo Error En Cálculo	0,380	Reducción riesgo Concesionario	0,250	0,011	0,095
		Software de simulación	0,750	0,057	0,285
Uso Eficiente de Espectro	0,411	Maximizar número de emisoras	0,125	0,017	0,051
		Reducir posibles interferencias	0,875	0,051	0,360
Exactitud en Cobertura	0,148	Área de servicio	0,250	0,007	0,037
		Contorno interferente	0,750	0,012	0,111

0,174	1,000	1,174
0,148	0,852	

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 método de cálculo contemplado en el nuevo Plan Técnico Nacional de Radio Difusión Sonora obtiene un resultado de 0,854, es decir un valor de 85,4% frente al 14,6% que obtuvo el cálculo del antiguo PTNRDS. De la misma manera, se encontró que los resultados fueron muy similares a los que se precisaron con el método del ideal, ya que nuevamente el cálculo del nuevo método del PTNRDS se posicionó en primer lugar con un 85,2% y para el caso del método antiguo un 14,8%.

Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia que en ambos casos los métodos evaluados mantuvieron sus posiciones. Lo anterior da a entender que al momento de comparar las características que tienen los métodos, la alternativa que más conviene, como resultado de haber aplicado el método PAJ, es el método de cálculo contemplado en el nuevo Plan Técnico Nacional de Radio Difusión Sonora.

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 los métodos evaluados. Estas variaciones se muestran a continuación.

10. Análisis de Sensibilidad a la Selección Realizada

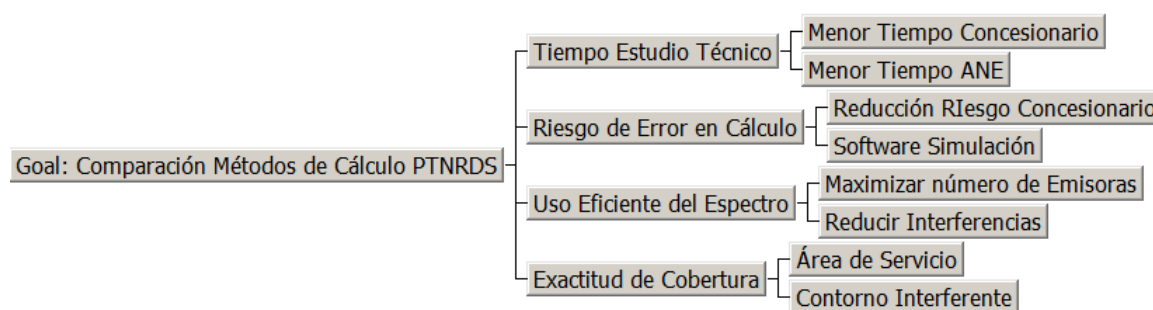
Para completar el proceso del PAJ, el desarrollo de este análisis busca confirmar que los resultados sean suficientemente robustos y concluyentes. Para realizar este análisis, se utiliza una herramienta informática de cálculo denominada Expert Choice.

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 y se observará como estos cambios afectan el resultado obtenido inicialmente, lo que se verá reflejado en que el método de cálculo actual del PTNRDS seguirá siendo el método más ventajoso a pesar de los cambios, o, que el método antiguo pueda llegar a serlo, en caso de que los cambios resulten en que el modelo jerárquico evaluado tenga cierta fragilidad.

4.1 MODELO JERÁRQUICO

El modelo jerárquico analizado se muestra en la Figura 4.2, 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.



Gráfica 4.2 Árbol jerárquico.

Fuente: Simulador

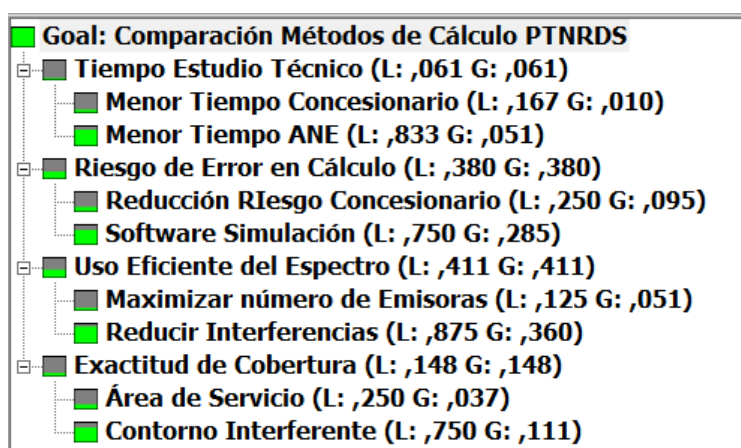
Para una mejor comprensión de la Figura 4.2, se puede apreciar que los criterios identificados, para comparar los métodos de cálculo de los PTNRDS, son los mismos 4 que han venido trabajando hasta el momento, Tiempo de estudio técnico, Riesgo de Error en Cálculo, Uso eficiente de espectro y Exactitud de Cobertura. Así mismo, se muestran los sub-criterios o criterios de segundo nivel para cada uno de los criterios padres según la base del modelo jerárquico del PAJ.

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 4.3

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 4.3, antes del nombre de cada criterio, señalando así que el modelo jerárquico está listo para ponderar las valoraciones.

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 Uso eficiente del espectro, donde el cuadro verde muestra su participación cercana al 40% (cerca del 60 % del cuadro está en blanco). Este mismo concepto se replica para todos los demás criterios de primer nivel, y también para sus correspondientes subcriterios.



Gráfica 4.3 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 calcular el resultado del modelo, en las Figuras 4.4 y 4.5 se muestran el resultado obtenido al aplicar el modo distributivo y el modo ideal con la ayuda del programa Expert Choice.



Gráfica 4.4 Resultado Modo distributivo

Fuente: Simulador



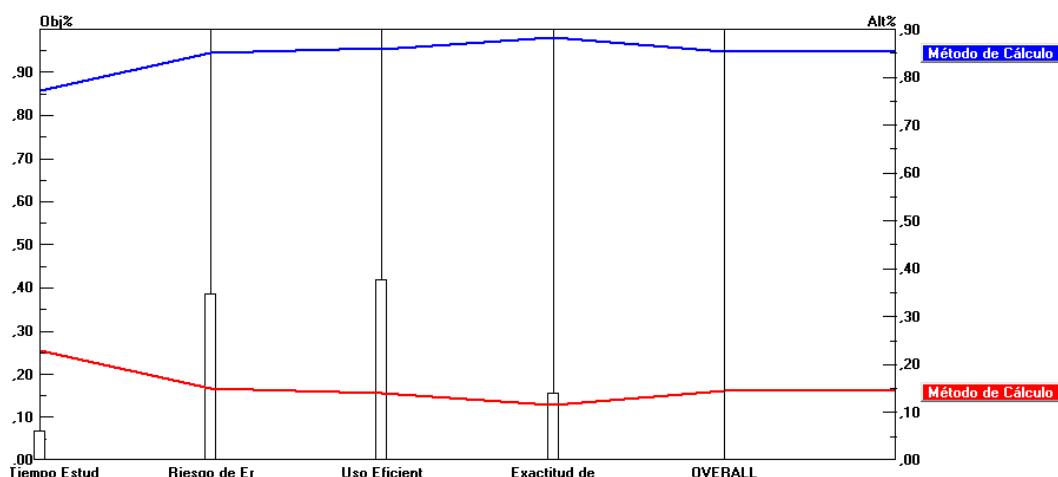
Gráfica 4.5 Resultado Modo ideal

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.

5.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En la figura 4.6 se puede observar cómo Expert Choice en una 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.



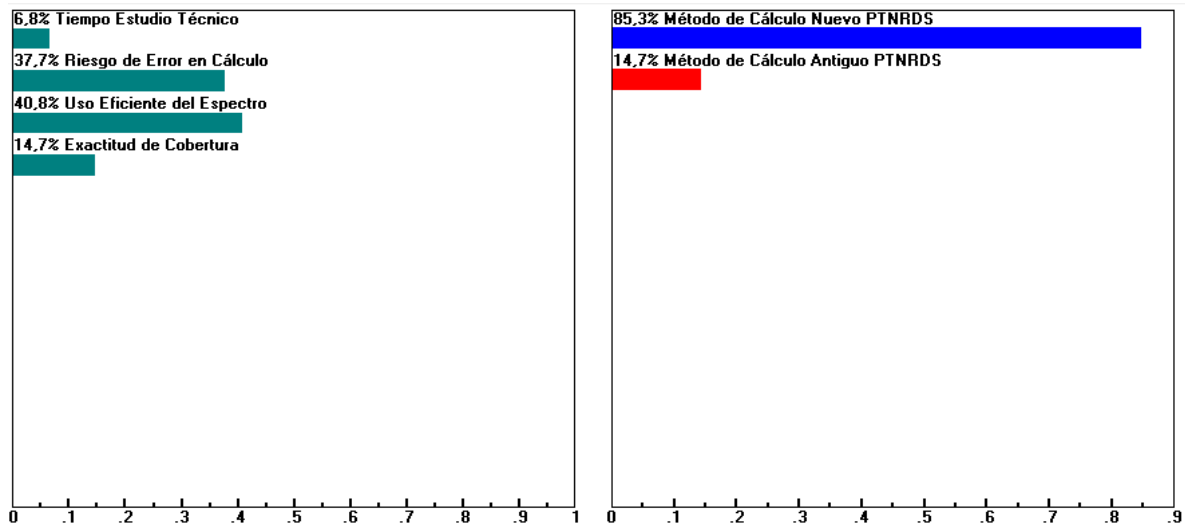
Gráfica 4.6 Análisis de sensibilidad Modo Distributivo

Fuente: Simulador

Gracias a la utilización de colores en el entorno gráfico, se puede apreciar como el método utilizado en el nuevo PTNRDS (en azul) tiene el primer lugar, y en segundo lugar se encuentra el método de cálculo antiguo del PTNRDS (en rojo). También se observan unas barras con diferentes alturas que ayudan a formar cada una de las líneas de colores referidas a cada uno de los métodos evaluados. Estas barras representan los pesos relativos que tienen los criterios de primer nivel. A continuación, se proponen cambios en los valores de esos pesos y se muestran las variaciones menores a un 10%, realizadas para revisar la robustez de los resultados.

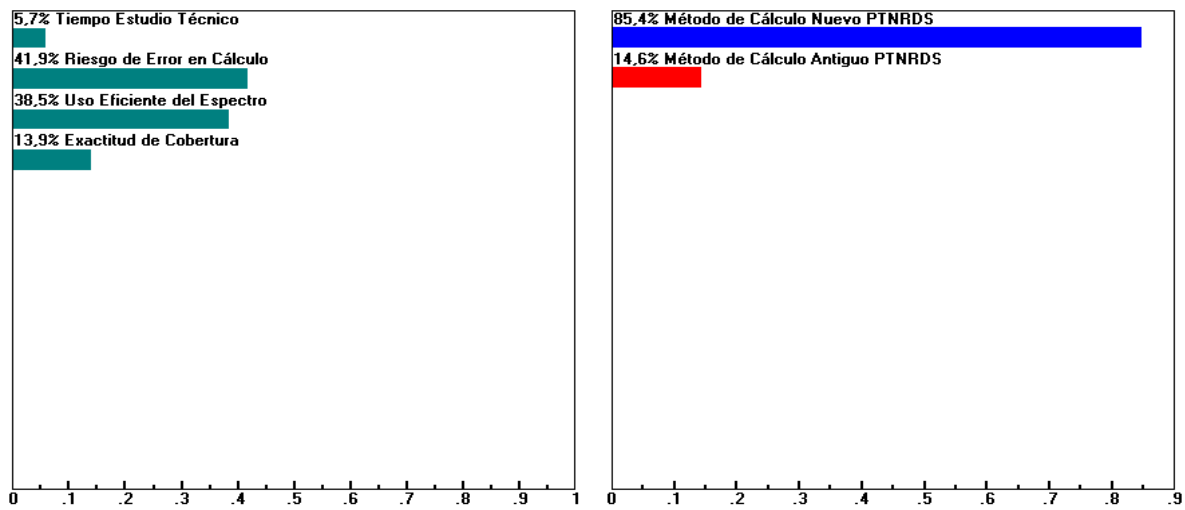
1. Sensibilidad a la variación menor al 10%

Se puede observar en las figuras 4.7, el resultado de variar el criterio tiempo de estudio técnico en cerca del 10 %, de igual manera en la figura 4.8 para el criterio riesgo de error de cálculo, en la figura 4.9 para el criterio uso eficiente del espectro, y finalmente, en la figura 4.10 para el criterio exactitud de cobertura. Los resultados de estas variaciones y su repercusión en la elección del método a escoger se consolidan en la tabla 4.14.



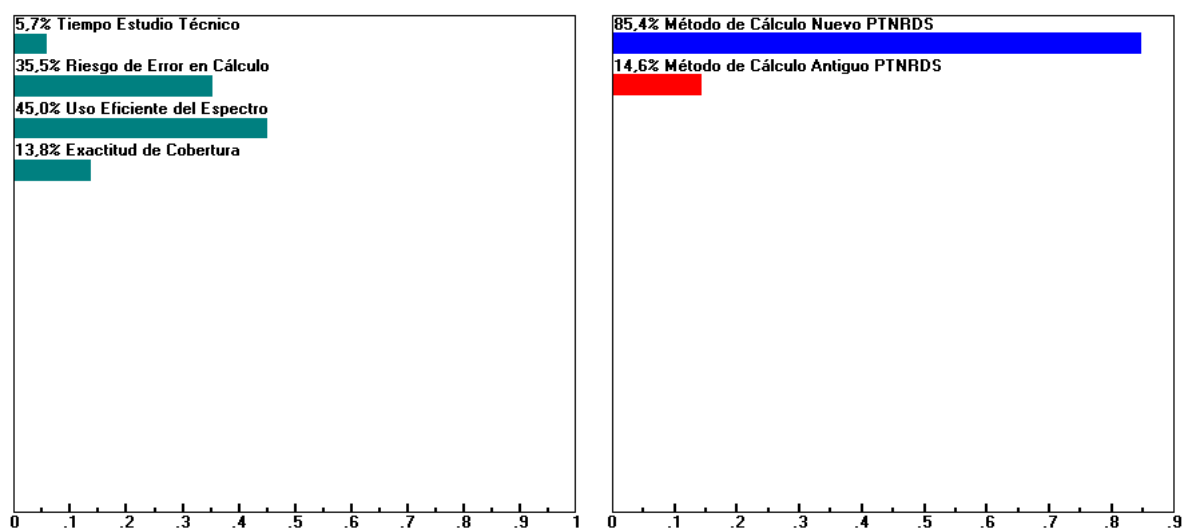
Gráfica 4.7 Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Tiempo de Estudio Técnico

Fuente: Simulador



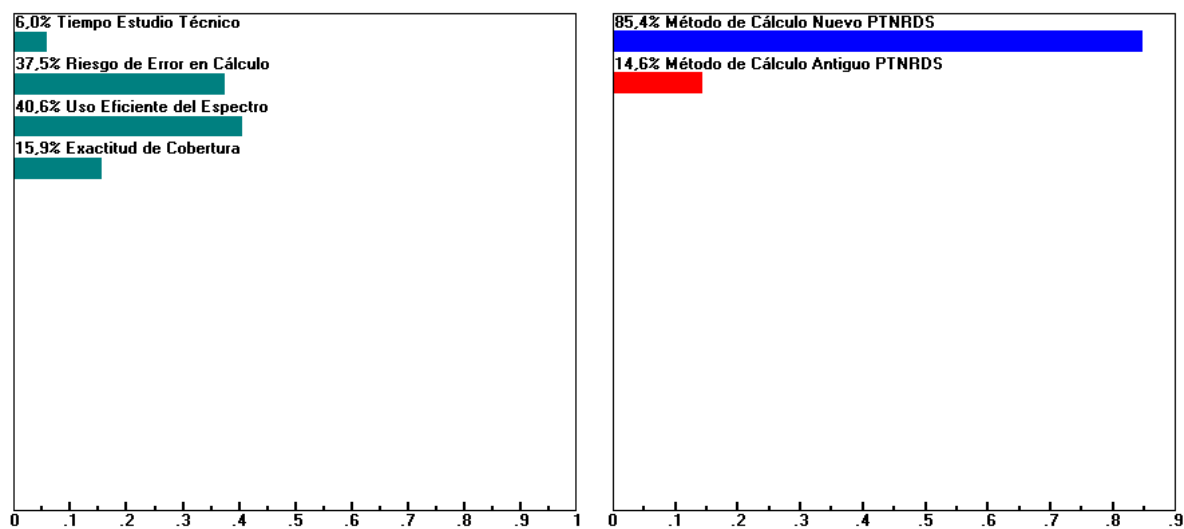
Gráfica 4.8 Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Riesgo de Error de Cálculo

Fuente: Simulador



Gráfica 4.9 Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Uso Eficiente del Espectro

Fuente: Simulador



Gráfica 4.10 Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Exactitud de Cobertura

Fuente: Simulador

Tabla 4.13 Análisis de Sensibilidad Modo Distributivo < a 10%

CRITERIOS				ALTERNATIVAS	
Tiempo Estudio Técnico	Riesgo Error en Cálculo	Uso Eficiente de Espectro	Exactitud en Cobertura	Método Antiguo PTNRDS	Método Nuevo PTNRDS
6,6	37,8	40,9	14,7	14,7	85,3
5,2	38,4	41,5	14,9	14,5	85,5
5,7	41,9	38,5	13,9	14,6	85,4
6,5	34,1	43,7	15,7	14,6	85,4
5,7	35,5	45	13,8	14,6	85,4
6,5	40,5	37,2	15,8	14,7	85,3
6	37,2	40,2	16,6	14,6	85,4
6,2	38,6	41,7	13,5	14,7	85,3

Al variar 10% del valor de cada criterio se logró comprobar que los valores son constantes, y por consiguiente el nuevo método de cálculo del PTNRDS siguió encabezando los resultados.

2. Sensibilidad a la variación mayor al 10%

A continuación, en la Tabla 4.15 se muestran los resultados consolidados de variar los pesos de los criterios hasta por un 50% para el modo distributivo (Normalización por el mayor). Así mismo, la Tabla 4.16 muestra las variaciones en el modo ideal (normalización por el mayor).

Tabla 4.14 Análisis de Sensibilidad para el Modo Distributivo > a 10%

CRITERIOS				ALTERNATIVAS	
Tiempo Estudio Técnico	Riesgo Error en Cálculo	Uso Eficiente de Espectro	Exactitud en Cobertura	Método Antiguo PTNRDS	Método Nuevo PTNRDS
9	36,8	39,8	14,3	14,9	85,1
3	39,2	42,4	15,3	14,3	85,7
4,8	50,8	32,6	11,7	14,7	85,3
8,1	17,4	54,8	19,7	14,5	85,5
4,2	25,9	59,9	10,1	14,4	85,6
8,2	51,2	20,7	19,9	14,8	85,2
5,5	34,5	37,3	22,6	14,3	85,7
6,6	41,2	44,6	7,6	14,9	85,1

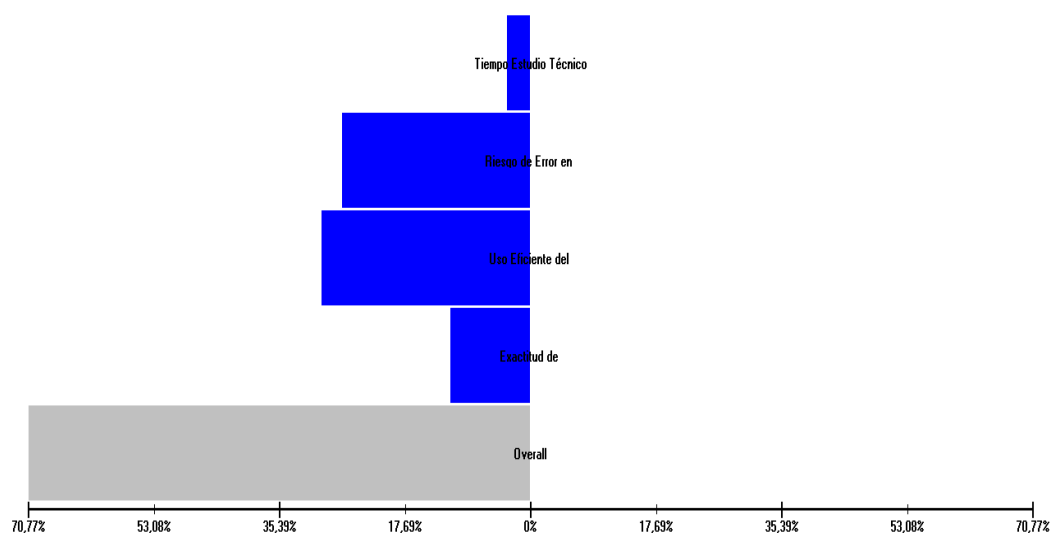
Tabla 4.15 Análisis de Sensibilidad Modo Ideal > a 10%

CRITERIOS				ALTERNATIVAS	
Tiempo Estudio Técnico	Riesgo Error en Cálculo	Uso Eficiente de Espectro	Exactitud en Cobertura	Método Antiguo PTNRDS	Método Nuevo PTNRDS
9,2	36,7	39,7	14,3	15,1	84,9
3	39,2	42,4	15,3	14,3	85,7
4,7	51,7	32	11,5	14,9	85,1
8,1	17,8	54,5	19,6	14,8	85,2
4,1	25,4	60,6	9,9	14,7	85,3
8,2	51	20,9	19,9	15	85
5,5	34,4	37,2	22,8	14,6	85,4
6,7	41,4	44,8	7,1	15,1	84,9

A pesar de las variaciones tan considerables, se sigue estableciendo el nuevo método de cálculo del PTNRDS como la alternativa más sólida.

3. Comparación entre Métodos

Con la ayuda de Expert Choice se realizó una comparación entre los métodos evaluados teniendo como punto de partida el método de cálculo antiguo del PTNRDS. La figura 4.11, presenta la comparación de los métodos.



Gráfica 4.11 Método de Cálculo Nuevo vs Método Antiguo

Fuente: Autor

4. Análisis

Al observar los resultados, se puede afirmar que el nuevo método de cálculo tiene grandes ventajas en todos los niveles evaluados (tiempo de estudio técnico, menor riesgo de error en cálculos, uso eficiente del espectro y exactitud en cobertura. Es de anotar que el nivel de uso eficiente del espectro y de minimización de error al momento del cálculo se presentan como los niveles más robustos desde el punto de vista de su importancia con respecto a los demás niveles evaluados.

Estos resultados son consecuentes con lo encontrado en primera instancia con el análisis de dominancia, en donde se observó que a propuesta del nuevo modelo de cálculo era considerado un óptimo de Pareto, es decir, dominaba en todos los criterios al antiguo modelo que se tenía. Adicionalmente, el resultado de haber aplicado el PAJ corroboró estos resultados de dos formas a saber, una utilizando el método distributivo y otra utilizando el método ideal, en donde las normalizaciones de los datos se hicieron usando el método de normalización por la suma y por el número mayor respectivamente.

El haber aplicado el PAJ permitió determinar un nivel de priorización de criterios y subcriterios, lo que permite dar claridad a las fortalezas que presenta el nuevo modelo de cálculo, situación que se pudo evidenciar en la comparación head to head en el Expert Choice.

Las variaciones realizadas en el software permitieron confirmar que el nuevo método no presenta fragilidades en ninguno de sus criterios, ni tampoco en los subcriterios que se establecieron como objeto de evaluación en este estudio. Por lo anterior, las ventajas de poder contar con este nuevo modelo de cálculo son superlativas en todos los sentidos y es una muestra de que la actualización y constante evaluación de los métodos usados para asignar frecuencias debe hacerse de manera constante.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Considerando los resultados de los numerales 3.1 y 3.2, se concluye que la Figura 7 de la Recomendación UIT-R P. 368 – 9 (Gráfica 8 de este documento) es la que brinda mejores condiciones para realizar la planeación técnica del espectro en Colombia en ondas hectométricas. Por ello, en la modificación del PTNRS en A.M. se establece el supuesto de que el terreno en el país es homogéneo con constante dieléctrica (permitividad) igual a 15 ($\epsilon = 15$) y conductividad eléctrica de 10 a la menos 3 Siemens sobre metro ($\sigma = 10^{-3}$ S/m), como lo establece la Figura 7 de la Recomendación UIT-R P. 368 – 9.

Luego de realizar un análisis de las definiciones que existían en el antiguo Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en AM, se establecen dos conclusiones. La primera es que, al tratarse de recomendaciones internacionales, fue necesario incluir definiciones propias de nuestro territorio colombiano, esto con el fin de adaptar la normatividad a nuestro país. La segunda es que, al tratarse de recomendaciones antiguas, estas han sido modificadas con el tiempo, razón por la cual se incluyeron sus diferentes actualizaciones con respecto a las nuevas recomendaciones.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el Proceso Analítico Jerárquico, la alternativa de optar por la actualización del Plan Técnico de Radiodifusión sonora en AM es la correcta. Adicionalmente, luego de la comprobación de la consistencia de los resultados vemos que la ratio de consistencia es mucho menor al 5%, exactamente de 1,39%, con lo que ratificamos que, de acuerdo con los criterios establecidos y sus ponderaciones, el método de selección es válido.

Al realizar la Identificación del método de cálculo más pertinente, para la planificación de canales de emisoras de radiodifusión sonora en AM en Colombia, se determinó que el método de cálculo del actual PNTRDS es el más pertinente según la valoración de los criterios del estudio seleccionados. Esto quedó reflejado en el desarrollo del método PAJ, el cual ratificó este resultado desde tres puntos de vista complementarios: el análisis de dominancia, el resultado de aplicar el PAJ con los resultados del modo distributivo y del

ideal, y finalmente con el análisis de sensibilidad realizado en el software Expert Choice. En todos los resultados el resultado fue concluyente.

5.2 RECOMENDACIONES

En el contexto de la asignación de espectro para frecuencias en AM en Colombia, una recomendación fundamental es implementar un sistema de revisión y ajuste continuo de métodos y parámetros técnicos. Dada la evolución constante en la tecnología de transmisión, los patrones de interferencia y las necesidades del mercado, es esencial que los procedimientos y criterios utilizados en la asignación de espectro se mantengan actualizados. A continuación, se detallan algunos puntos clave para llevar a cabo esta recomendación:

1. **Establecer un Calendario de Revisión Periódica:** Definir períodos específicos (anualmente o cada dos años) para revisar los métodos y parámetros actuales, con el fin de adaptarse a los cambios tecnológicos y a las nuevas regulaciones internacionales.
2. **Monitorear Avances Tecnológicos y Nuevas Normas:** Mantener un monitoreo activo sobre los avances en simulación, técnicas de asignación y nuevas herramientas que optimicen la eficiencia del espectro. Esto incluye el seguimiento de los cambios en regulaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) o nuevas prácticas adoptadas por países con regulaciones similares.
3. **Incorporar Análisis de Interferencias Actualizados:** Evaluar regularmente los patrones de interferencia entre frecuencias de AM y ajustar los parámetros técnicos para minimizar cualquier impacto. Esto ayuda a mejorar la calidad de las transmisiones y a maximizar la cantidad de emisoras que pueden operar de manera eficiente.
4. **Recibir Retroalimentación de Concesionarios y Usuarios:** Incluir en las revisiones la retroalimentación de concesionarios y usuarios finales, para identificar problemas recurrentes y oportunidades de mejora. Esto permite que los ajustes sean pertinentes y respondan a las necesidades reales del mercado.

5. **Capacitación Continua del Equipo Técnico:** Asegurar que el personal encargado de realizar las asignaciones de espectro esté capacitado en las últimas metodologías y herramientas de análisis. Esto no solo facilita la adaptación a cambios, sino que también mejora la precisión y confiabilidad de los estudios.
6. **Implementar un Sistema de Simulación y Prueba de Nuevas Metodologías:** Antes de aplicar cambios en los métodos de asignación de espectro, realizar pruebas y simulaciones que permitan validar su efectividad. Esto minimiza riesgos y asegura que cualquier ajuste realmente aporte mejoras en la gestión del espectro.
7. **Implementar la Recomendación UIT-R P. 368 – 10:** Si bien al momento de realizar el proyecto de modernización del PTNRS en AM la recomendación UIT-R P. 368 – 9 era la última, hoy en día se encuentra ya vigente la UIT-R P. 368 – 10 con la cual se implementa un software para el cálculo del área de servicio con los parámetros exactos del sistema irradiante y se obtiene una mayor precisión en el cálculo de las distancias.

Al implementar estas recomendaciones, la Agencia Nacional del Espectro podría asegurar que el proceso de asignación de frecuencias en AM se mantenga eficiente, adaptado a los cambios tecnológicos y alineado con las mejores prácticas de gestión del espectro.

6 REFERENCIAS

- [CONGRESO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA, «Ley 1341 de 2009,» 30 Julio 2009.
1 [En línea]. Available:
] <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=36913#:~:text=Establece%20que%20a%20partir%20de,de%20la%20Informaci%C3%B3n%20y%20las>.
- [UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES, «Curvas de propagación por
2 onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz,
] Recomendación UIT-R P.368-9,» Febrero 2007. [En línea]. Available:
<https://extranet.itu.int/brdocsearch/R-REC/R-REC-P/R-REC-P.368/R-REC-P.368-9-200702-I/R-REC-P.368-9-200702-III-PDF-S.pdf>.
- [UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES, «The radio refractive index:
3 its formula and refractivity data,» 08 2019. [En línea]. Available:
] https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.453-14-201908-III-PDF-E.pdf.
- [UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES, «Cálculo de la atenuación en
4 el espacio libre,» 08 2019. [En línea]. Available: [https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-4-201908-III-PDF-S.pdf)
] [r/rec/p/R-REC-P.525-4-201908-III-PDF-S.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-4-201908-III-PDF-S.pdf).
- [UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES, «METHODS
5 FOESTIMATING EFFECTIVE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE
] OF THE EARTH,» 1986. [En línea]. Available: [https://www.itu.int/dms_pub/itu-](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.879-1-1986-PDF-E.pdf)
[r/opb/rep/R-REP-P.879-1-1986-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-P.879-1-1986-PDF-E.pdf).
- [UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES, «ACTAS FINALES de la
6 conferencia administrativa regional de radiodifusión por ondas hectométricas (Región
] 2),» 1981. [En línea]. Available:
<https://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/4.103.43.es.300.pdf>.

[UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES, «Método de predicción de la
7 propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30
] MHz, Recomendación UIT-R P.368-10,» Agosto 2022. [En línea]. Available:
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.368-10-202208-!!!PDF-S.pdf.

[UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES, «Definiciones de la radiación
8 en radiodifusión (ondas kilométricas, hectométricas y decamétricas),» [En línea].
] Available: [https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.561-2-198607-!!!PDF-](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.561-2-198607-!!!PDF-S.pdf)
S.pdf.

[UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES, «Términos y definiciones
9 utilizados en la planificación de frecuencias para radiodifusión sonora,» [En línea].
] Available: [https://1f8a81b9b0707b63-19211.webchannel-](https://1f8a81b9b0707b63-19211.webchannel-proxy.scarabresearch.com/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.638-0-198607-!!!PDF-S.pdf)
proxy.scarabresearch.com/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.638-0-198607-!!!PDF-
S.pdf.

[DEL SOCORRO GARCÍA C., M, «Métodos para la comparación de alternativas
1 mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y Soft Computing,» En:
0 Universidad Polictenica de Cartagena, 2009.
]

[DIETER, G, «Engineering Design. A Materials and Processing Approach,» En: Tokyo:
1 McGraw-Hill, 1983.
1
]

[O. León, «Tomar decisiones difíciles,» En: Segunda Edición ed Universidad, 2001.
1
2
]

[Boer, S.J.D, «Decision Methods and Techniques in Methodical Engineering Design,»
1 En: Ph.D. Thesis De Lier: Academisch Boeken Centrum, 1989..

3

]

[Beltan, Félix Antonio Cortés Aldana Mónica Garcia Melón Pablo A, «Selección de una
1 Tecnología de Banda Ancha para la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá,
4 usando una Técnica de Decisión Multicriterio.,» En: Ingeniería e Investigación, Vol. 27,
] número 001, Universidad Nacional de Colombia, pp. 132-137, Abril de 2007.

[Kaliszewski, I. , «Out of the mist: towards decision-maker-friendly multiple
1 criteriadecision making support.,» En: European Journal of Operational Research, pp.
5 293-307, 2004.

]

[Pomerol, J.C. ; S., Barba Romero, «Multicriterion decision in management: Principles
1 and practice.,» En: Comisión de Regulación de Comunicaciones, 2010.

6

]

[Romero, C, «Teoría de la decisión Multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones.,»
1 En: Alianza Editorial S.A. Madrid, 1993.

7

]

[L. Chemane, O.P. ; Cossa, T., «MCDM Model for Selecting Internet Access
1 Technologies - A Case Study in Mozambique.,» En: Eurocon, Serbia & Montenegro,
8 Belgrade, November 22-24, 2005.

]

[Sasidhar, M. ; Min, K. J., «Desicion support models for the selection of Internet access
1 technologies in rural communities.,» En: Telemat. Inform., vol. 22, no. 3, pp. 201-219,
9 2005.

]

[Nepal, T. , «Evaluation of rural telecommunications infrastructure in South África.,» En:
2 Probl. Nonlin. Anal. Eng. Syst., vol. 3, no. 24, pp. 138-149, 2005.

0

]

[T. N. Andrewa, P. R. ; Nepal. T, «Enhancing the selection of communication
2 Technology for rural telecommunications: An analytic hierarchy process model.,» En:
1 International Journal of Computers, Systems and Signals, Vol. 6, No. 2, 2005.

]

[Gasiea, Yousef A, «An analytical decision approach to rural Telecommunications
2 infrastructure selection. University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace
2 and Civil Engineering Management of Projects, Tesis de Graos, 2010. - 344 p.».

]

[J.M., Moreno-Jiménez: El Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Fundamentos,
2 metodología y aplicaciones En Toma de decisiones con criterios múltiples., En:
3 Caballero R. y Fernández, G.M. Ed. ASEPUMA, Madrid, 2002.

]

[E. H. Forman y S. I. G, «The analytical hierarchy process-an exposition.,» En:
2 Operations Research 49 (4): pp. 469-487, 2001-07.

4

]

[Bhushan, Navneet; Kanwal R., «Strategic Decision Making: Applying the Analytic
2 Hierarchy Process.,» En: London: Springer-Verlag. ISBN 1-8523375-6-7., 2004-01.

5

]

[Saaty, Thomas L., «Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for
2 Decisions in a Complex World.,» En: Pittsburgh, Pennsylvania: RWS Publications. ISBN
0-9620317-8-X, 1999-05.

6

]

[E., Rodriguez, «Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la
2 localización de una pyme.,» En: Real centro Universitario San Lorenzo del Escorial
7 ISSN: 1133-3677, 2007.

]

[AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO, «PLAN TÉCNICO NACIONAL DE
2 RADIODIFUSIÓN SONORA AMPLITUD MODULADA (A.M.),» Diciembre 2021. [En
8 línea]. Available:

] [https://www.ane.gov.co/Sliders/archivos/gesti%C3%B3n%20t%C3%A9cnica/Radiodifusi
%C3%B3n%20sonora/Planes%20t%C3%A9cnicos%20de%20Radiodifusi%C3%B3n%2
0Sonora/Actualizaciones%20del%20PTNRS%20en%20AM%20y%20FM%20a%C3%B
1o%202021/Plan%20T%C3%A9cnico/PTNRS.pdf](https://www.ane.gov.co/Sliders/archivos/gesti%C3%B3n%20t%C3%A9cnica/Radiodifusi%C3%B3n%20sonora/Planes%20t%C3%A9cnicos%20de%20Radiodifusi%C3%B3n%20Sonora/Actualizaciones%20del%20PTNRS%20en%20AM%20y%20FM%20a%C3%B1o%202021/Plan%20T%C3%A9cnico/PTNRS.pdf).

[G. A. C. Pedraza, «Estudio y Análisis de la viabilidad de la implementación de la
2 tecnología PLT (Power Line Telecommunications) en Colombia en el ámbito de la
9 transmisión de datos sobre redes de baja tensión,» 2012.

]

[Saaty, Thomas L., «Relative Measurement and its Generalization in Decision Making:
3 Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of
0 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.

[ANDRÉS FELIPESALAZAR, LEIDY CAROLINA VARGAS, CAMILOERNESTO
3 AÑASCO y JUANPABLOOREJUELA, «PROPUESTA DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA
1 BIETAPA EN AMBIENTES DE MANUFACTURA FLEXIBLE MEDIANTE EL PROCESO
] ANALÍTICO JERÁRQUICO,» Diciembre 2010. [En línea]. Available: [https://research-
ebsco-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/c/3zzo4a/viewer/pdf/jou3vfgjxz](https://research-ebsco-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/c/3zzo4a/viewer/pdf/jou3vfgjxz).

[UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES, «Manual sobre propagación
3 por onda de superficie,» 2014. [En línea]. Available: [https://www.itu.int/dms_pub/itu-
2 r/opb/hdb/R-HDB-59-2014-PDF-S.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-2r/opb/hdb/R-HDB-59-2014-PDF-S.pdf).

]

[AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO, «PLAN TECNICO NACIONAL DE
3 RADIODIFUSIÓN SONORA EN AMPLITUD MODULADA - A.M.,» 19 Diciembre 2022.
3 [En línea]. Available:

] <https://www.ane.gov.co/Sliders/ANE%202021/ResolucionNo000805del19dediciembrede2022.pdf>.

[CONGRESO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA, «CONSTITUCIÓN POLÍTICA,» 20
3 Julio 1991. [En línea]. Available:

4 <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4125>.

]

7 GRÁFICAS

Gráfica 1.1.1: Mapa de Problema.	5
Gráfica 1.1.2: Curvas de propagación de la onda de superficie; agua del mar, salinidad baja, $\sigma = 1$ S/m, $\epsilon = 80$. Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9 [2].....	13
Gráfica 1.1.3: Curvas de propagación de la onda de superficie; agua del mar, salinidad media, $\sigma = 5$ S/m, $\epsilon = 70$. Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9 [2].....	14
Gráfica 1.1.4: Curvas de propagación de la onda de superficie; agua dulce, $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ S/m, $\epsilon = 80$	14
Gráfica 1.1.5: Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra, $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ S/m, $\epsilon = 40$	15
Gráfica 1.1.6: Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra húmeda, $\sigma = 10^{-2}$ S/m, $\epsilon = 30$	15
Gráfica 1.1.7: Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra, $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ S/m, $\epsilon = 22$	16
Gráfica 1.1.8: Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra moderadamente seca, $\sigma = 10^{-3}$ S/m, $\epsilon = 15$. Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9.....	16
Gráfica 1.1.9: Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra seca, $\sigma = 3 \times 10^{-4}$ S/m, $\epsilon = 7$	17
Gráfica 1.1.10: Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra muy seca, $\sigma = 10^{-4}$ S/m, $\epsilon = 3$	17
Gráfica 1.1.11: Curvas de propagación de la onda de superficie; hielo de agua dulce, -1°C , $\sigma = 3 \times 10^{-5}$ S/m, $\epsilon = 3$. Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9.....	18
Gráfica 1.1.12: Curvas de propagación de la onda de superficie; hielo de agua dulce, -10°C , $\sigma = 10^{-6}$ S/m, $\epsilon = 3$. Fuente: Recomendación UIT-R P.368-9.....	18
Gráfica 2.1: Promedio de las diferencias de intensidades de campo eléctrico	23
Gráfica 2.2: Campana de Gauss.	25
Gráfica 2.3: Promedio de las diferencias de intensidad de campo eléctrico.....	26
Gráfica 2.4: Campana de Gauss.	28
Gráfica 2.5: Alcance promedio en kilómetros del área de servicio de los canales del PTNRS en A.M. y canales con problemas de compatibilidad electromagnética según la simulación.	30

Gráfica 2.6: Canales proyectados a eliminar para reducir el número de canales con problemas de compatibilidad electromagnética según la simulación.....	31
Gráfica 4.1: Jerarquía del modelo AHP. Adaptado de [10].....	49
Gráfica 4.2 Árbol jerárquico.....	63
Gráfica 4.3 Pesos de los Niveles y Subniveles en el Expert Choice.....	64
Gráfica 4.4 Resultado Modo distributivo.....	65
Gráfica 4.5 Resultado Modo ideal	65
Gráfica 4.6 Análisis de sensibilidad Modo Distributivo.....	66
Gráfica 4.7 Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Tiempo de Estudio Técnico. 67	
Gráfica 4.8 Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Riesgo de Error de Cálculo . 67	
Gráfica 4.9 Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Uso Eficiente del Espectro .. 68	
Gráfica 4.10 Análisis de sensibilidad Dinámico Para Criterio Exactitud de Cobertura 68	
Gráfica 4.11 Método de Cálculo Nuevo vs Método Antiguo.....	70

8 TABLAS

Tabla 2.2.1 :Diferencia de las mediciones de intensidad de campo eléctrico.....	23
Tabla 2.2.2 Rutas de mediciones de intensidad de campo eléctrico.....	24
Tabla 2.2.3 Promedio de la diferencia en dB μ V/m entre la medición de intensidad de campo eléctrico de la monitora con respecto a la simulación en HTZ realizada para todas las estaciones asignadas del país	26
Tabla 2.2.4 Figura de la Recomendación UIT-R P.368-9 que mejor representa la conductividad del terreno en cada ciudad	27
Tabla 4.1 Tabla de valoración directa de Saaty [27].	49
Tabla 4.2 RIA en función del número de elementos valorados por nivel (n) [26].	50
Tabla 4.3 Matriz de dominancia	56
Tabla 4.4 Matriz de dominancia con Índices de dominancia	57
Tabla 4.5 Ponderación Final de los Criterios Según Niveles	57
Tabla 4.6 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Tecnológico	58
Tabla 4.7 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Económico.....	58
Tabla 4.8 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Ambiental	58
Tabla 4.9 Ponderación Final de los Criterios del Nivel Regulatorio	59
Tabla 4.10 Ratio de Inconsistencia de la Matriz de los Niveles Evaluados.....	59
Tabla 4.11 Matriz de decisión	60
Tabla 4.12 Calculo de la Prioridad Global (Método Ideal)	61
Tabla 4.13 Análisis de Sensibilidad Modo Distributivo < a 10%	69
Tabla 4.14 Análisis de Sensibilidad para el Modo Distributivo > a 10%.....	69
Tabla 4.15 Análisis de Sensibilidad Modo Ideal > a 10%	70