



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO DE
COMUNICACIONES

Planificación de Frecuencias para Televisión Digital Terrestre (TDT) en Sudamérica

Departamento de Comunicaciones
Universitat Politècnica de València

Tesis para el título de
Doctor en Telecomunicación

Valencia, Febrero 2016

Autor:
Jefferson Ribadeneira Ramírez

Directores:
Dr. David Gómez Barquero
Prof. Narcís Cardona Marcet



A mi esposa Anita y mi hijo Sebastián, quienes han llegado a mi vida para enseñarme lo que significa el amor.

A mis padres Estuardo y Alba, a mi hermana Geomara, quienes siempre me han brindado su amor y apoyo incondicional.

Abstract

Digital Terrestrial Television (DTT), offers greater robustness against noise and interference, more efficient use of radio electric spectrum by the possibility of using single frequency networks (SFN) and the possibility of transmitting several television channels for the same radio channel. In addition, it is possible to provide value-added services such as HDTV and 3D.

In the transition from analog to digital television, it must be perform a first stage of simulcast, where both analogue and digital signals should coexist. In this stage, a critical point is the low availability of frequencies. Therefore, first it is necessary to perform a frequency planning at international level between the countries and internally for each country. Due to the high power that DTT transmitters normally radiate, and the locations of the transmitters at high points, frequency planning at international level should take into account coordination areas and protection distances inside the border of each country. Finally, DTT network planning should be perform for the assigned frequencies.

Additionally, the most efficient usage of the radio electric spectrum that involves the introduction of the DTT, have allowed the release of certain frequency bands traditionally allocated for broadcasting. The released bands are known as Digital Dividend (DD), and correspond to the 800 MHz band (790-862 MHz) and 700 MHz (698-806 MHz) in Europe, and 700 MHz band in America. These bands have been allocated for the use of fourth generation mobile communications 4G LTE. The inclusion of LTE in the digital dividend bands, represents an additional problem for the deploy of DTT networks. Because both, DTT and LTE networks must coexist in adjacent frequency channels. Therefore, two coexistence cases must be considered. On the one hand, to the deployment of new DTT networks, the potential interference from LTE networks must be analyzed, as well the possible solutions to mitigate the interferences. Moreover, for DTT networks already deployed, interference problems must be solved at the lowest possible cost and impact.

This thesis deals with DTT frequency planning network in South America, where several DTT standards have been adopted. Most countries in the region

ABSTRACT

have adopted the Japanese-Brazilian standard ISDB-Tb. However, Colombia has adopted the European second generation standard DVB-T2, with the particularity that Colombia is the first country in the world in which DVB-T2 must work with 6 MHz channelization, and must coexist with the analog TV standard NTSC. This along with the late release of the DD band in America, presents a much more complex scenario for DTT planning network in the region.

First the frequency planning at the international level for all countries of South America is studied, later the frequency planning at national level for Colombia is addressed. For this purpose, is investigated the coexistence of the European second generation standard (DVB-T2), the Japanese-Brazilian first generation standard (ISDB-Tb), the American analog TV standard NTSC and the mobile communications standard LTE working in digital dividend bands, as well as different technical solutions to mitigate interference on DTT networks.

Finally, the recommendations of coexistence between analogue television networks NTSC, digital television networks ISDB-T, DVB-T2 and 4G mobile communications networks LTE are presented. These recommendations constitute a useful handbook for DTT network planning in South America.

Resumen

La Televisión Digital Terrestre (TDT) con respecto a la difusión de televisión analógica ofrece, mayor robustez en la señal frente a ruido e interferencias, uso más eficiente del espectro radioeléctrico gracias a la posibilidad de utilizar redes de frecuencia única, en inglés SFNs (Single Frequency Network) y la posibilidad de transmitir varios canales de televisión por un mismo canal radioeléctrico. Además, es posible ofrecer servicios de valor añadido, tales como televisión en alta definición y programación 3D.

En el proceso de transición de televisión analógica a digital, se debe llevar a cabo una primera etapa de simulcast, donde tanto señales analógicas como digitales deben convivir. En esta etapa, un punto crítico es la baja disponibilidad de frecuencias. Por tanto, en primer lugar es necesario hacer una planificación de frecuencias a nivel internacional entre los países y a nivel interno de cada país. Debido a las altas potencias con que normalmente radian los transmisores de TDT, y las ubicaciones de los transmisores en puntos elevados, la planificación de frecuencias a nivel internacional debe tener en cuenta zonas de coordinación y distancias de protección dentro de la frontera de cada país. Finalmente se debe planificar las redes de TDT a las frecuencias asignadas.

Adicionalmente, la utilización más eficiente del espectro radioeléctrico que conlleva la introducción de la TDT, ha permitido la liberación de ciertas bandas de frecuencia asignadas tradicionalmente a radiodifusión. Las bandas liberadas son conocidas como Dividendo Digital (DD), y corresponden a la banda de 800 MHz (790-862 MHz) y 700 MHz (698-806 MHz) en Europa, y la banda de 700 MHz en América. Dichas bandas han sido asignadas para la utilización de servicios de comunicaciones móviles de cuarta generación 4G LTE. La inclusión del estándar LTE en las bandas del dividendo digital, representa un problema adicional para el despliegue de las redes de TDT. Debido a que tanto la TDT como las redes LTE deben coexistir en canales adyacentes en frecuencia. Por tanto, dos casos de convivencia deben ser considerados. Por un lado, para el despliegue de nuevas redes de TDT, se deben analizar las posibles interferencias desde las redes LTE, así como las posibles soluciones para mitigar dichas

RESUMEN

interferencias. Por otra parte para redes de TDT ya desplegadas, los problemas de interferencias deben ser resueltos con el menor impacto y costo posibles.

La presente tesis aborda la planificación de frecuencias para las redes de TDT en Sudamérica, donde varios estándares de TDT han sido adoptados. La mayoría de los países de la región han adoptado el estándar Japonés-Brasileño ISDB-Tb. Sin embargo, Colombia ha adoptado el estándar europeo de segunda generación DVB-T2, con la particularidad de ser el primer lugar en el mundo en que DVB-T2 debe trabajar con canalización de 6 MHz, y debe convivir con el estándar de televisión analógica NTSC. Esto junto con la tardía liberación del Dividendo Digital (DD) en América, presentan un escenario mucho más complejo para la planificación de las redes de TDT en la región.

En primer lugar se estudia la planificación de frecuencias a nivel internacional para todos los países de Sudamérica, para posteriormente abordar la planificación a nivel nacional para Colombia. Con tal fin, se investiga la convivencia entre el estándar de TDT europeo de segunda generación (DVB-T2), el estándar Japonés-Brasileño de primera generación (ISDB-Tb), el estándar americano de televisión analógica NTSC y el estándar de comunicaciones móviles LTE en las bandas del dividendo digital, así como las diferentes soluciones técnicas para mitigar interferencias sobre las redes de TDT.

Finalmente, se presentan las recomendaciones de convivencia entre redes de televisión analógica NTSC, redes de televisión digital ISDB-T, DVB-T2 y redes de comunicaciones móviles 4G LTE, que constituyen un útil manual para la planificación de las redes de TDT en Sudamérica.

Resum

La Televisió Digital Terrestre (TDT) respecte a la difusió de televisió analògica ofereix, major robustesa en el senyal enfront de soroll i interferències, ús més eficient de l'espectre radioelèctric gràcies a la possibilitat d'utilitzar xarxes de freqüència única, en engonals SFNs (Single Frequency Network) i la possibilitat de transmetre uns quants canals de televisió per un mateix canal radioelèctric. A més, és possible oferir servicis de valor afegit, com ara televisió en alta definició i programació 3D.

En el procés de transició de televisió analògica a digital, s'ha de dur a terme una primera etapa de simulcast, on tant senyals analògics com digitals han de conviure. En esta etapa, un punt crític és la baixa disponibilitat de freqüències. Per tant, en primer lloc és necessari fer una planificació de freqüències a nivell internacional entre els països i a nivell intern de cada país. A causa de les altes potències amb què normalment radien els transmissors de TDT, i les ubicacions dels transmissors en punts elevats, la planificació de freqüències a nivell internacional ha de tindre en compte zones de coordinació i distàncies de protecció dins de la frontera de cada país. Finalment s'ha de planificar la les xarxes de TDT a les freqüències assignades.

Adicionalment, la utilització més eficient de l'espectre radioelèctric que comporta la introducció de la TDT, ha permés l'alliberament de certes bandes de freqüència assignades tradicionalment a radiodifusió. Les bandes alliberades són conegudes com a Dividend Digital (DD) , i corresponen a la banda de 800 MHz (790-862 MHz) i 700 MHz (698-806 MHz) a Europa, i la banda de 700 MHz a Amèrica. Les dites bandes han sigut assignades per a la utilització de servicis de comunicacions mòbils de quarta generació 4G LTE. La inclusió de l'estàndard LTE en les bandes de dividend digital, representa un problema addicional per al desplegament de les xarxes de TDT. Pel fet que tant la TDT com les xarxes LTE han de coexistir en canals adjacents en freqüència. Per tant, dos casos de convivència han de ser considerats. D'una banda, per al desplegament de noves xarxes de TDT, s'han d'analitzar les possibles interferències des de les xarxes LTE, així com les possibles solucions per a mitigar les dites

RESUM

interferències. D'altra banda per a xarxes de TDT ja desplegades, els problemes d'interferències han de ser resolts amb el menor impacte i cost possibles.

La present tesi aborda la planificació de freqüències per a les xarxes de TDT a Sud-amèrica, on diversos estàndards de TDT han sigut adoptats. La majoria dels països de la regió han adoptat l'estàndard Japones-Brasileño ISDB-Tb. Sin embargo, Colòmbia ha adoptat l'estàndard europeu de segona generació DVB-T2, amb la particularitat de ser el primer lloc en el món en què DVB-T2 ha de treballar amb canalització de 6 MHz, i ha de conviure amb l'estàndard de televisió analògica NTSC. Açò junt amb el tardà alliberament del DD a Amèrica, presenten un escenari molt més complex per a la planificació de les xarxes de TDT en la regió.

En primer lloc s'estudia la planificació de freqüències a nivell internacional per a tots els països de Sud-amèrica, per a posteriorment abordar la planificació a nivell nacional per a Colòmbia. Amb tal fi, s'investiga la convivència entre l'estàndard de TDT europeu de segona generació (DVB-T2), l'estàndard Japones-Brasileño de primera generació (ISDB-T), l'estàndard americà de televisió analògica NTSC i l'estàndard de comunicacions mòbils LTE en les bandes del dividend digital, així com les diferents solucions tècniques per a mitigar interferències sobre les xarxes de TDT.

Finalment, es presenten les recomanacions de convivència entre xarxes de televisió analògica NTSC, xarxes de televisió digital ISDB-T, DVB-T2 i xarxes de comunicacions mòbils 4G LTE, que constitueixen un útil manual per a la planificació de les xarxes de TDT a Sud-amèrica.

Agradecimientos

Gracias a mi familia, que siempre me han apoyado desde el inicio de esta aventura. Con su guía y consejos siempre han estado presentes, en especial mi madre Alba, mi padre Estuardo, que han sido ejemplo de dedicación y perseverancia. A mi hermana Geomara que me ha escuchado en los momentos que más he necesitado. A mi esposa Anita, que ha constituido un pilar fundamental para la culminación de la presente tesis doctoral. A mi hijo Sebastián, quien es el motor que me impulsa a siempre seguir adelante.

Mis sinceros agradecimientos a mis directores. El Dr. David Gómez Barquero, por su guía, consejos y apoyo incondicional para la realización de la presente tesis doctoral, por brindarme sus conocimientos y dedicación estaré eternamente agradecido. Al Prof. Narcis Cardona Marcet por darme la oportunidad de formar parte del grupo de Comunicaciones móviles(MCG) del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM), por su apoyo en momentos difíciles no solo en el ámbito profesional, sino también personal siempre tendrá mis más sinceros agradecimientos.

Gracias también a la Secretaria de Educación Superior, Ciencia, tecnología e Innovación (SENESCYT) del Ecuador, por brindarme la beca que permitió la realización de la presente tesis.

Un especial agradecimiento a mis colegas y amigos del iTEAM, quienes en estos años me han ayudado a crecer como persona y profesionalmente, en especial a Gerardo, Conchi, Eduardo, Jaime, Manuel, Jordi Joan, David V. y Charly. Ha sido un privilegio compartir estos años de trabajo junto a ustedes.

Quiero agradecer también a mis amigos Gerardo y Lenin, gracias a quienes mi estancia en Valencia ha sido más comfortable. Por su amistad, gracias. Un especial agradecimiento a Gerardo, por haber encontrado en el más que un amigo, a un hermano.

AGRADECIMIENTOS

Índice

Acrónimos	XV
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Descripción General del Problema	7
1.3. Objetivos de la Tesis	9
1.4. Estado del Arte	9
1.5. Descripción de la Tesis y Principales Contribuciones	16
1.6. Diseminación y Lista de Publicaciones	20
2. Fundamentos	23
2.1. Planificación de Cobertura para Redes de TDT	23
2.2. Planificación de Frecuencias de TDT	28
2.3. Interferencias entre Redes de Televisión	47
2.4. Interferencias entre Redes de Televisión y Redes Celulares	56
2.5. Conclusiones	63
3. Planificación de Frecuencias de TDT	67
3.1. Parámetros Utilizados para el Plan de Frecuencias	68
3.2. Nivel de Sudamérica	72
3.3. Colombia	91
3.4. Conclusiones	101
4. Planificación de Cobertura de TDT	103
4.1. Planificación SFN	104
4.2. Interferencias con otras Redes de TV Analógica	107
4.3. Interferencias con otras Redes de TDT	118
4.4. Conclusiones	132

ÍNDICE

5. Interferencias con Redes Celulares 4G LTE	139
5.1. Medidas de Relaciones de Protección	140
5.2. Estudios de Convivencia	144
5.3. Conclusiones	155
6. Conclusiones y Guía para Planificación del Espectro para TDT en Sudamérica	159
6.1. Planificación de Frecuencias	160
6.2. Convivencia entre Redes de Televisión	162
6.3. Convivencia entre Redes de TDT y redes 4G LTE	168
6.4. Trabajo futuro	171
A. Estado de la TDT en América Latina	173
A.1. Argentina	173
A.2. Bolivia	173
A.3. Brasil	174
A.4. Chile	174
A.5. Colombia	174
A.6. Ecuador	177
A.7. Honduras	178
A.8. México	178
A.9. Panamá	179
A.10. Perú	179
A.11. Venezuela	179
A.12. Revisión de la Utilización de Frecuencias en Zona de Frontera .	179
B. Tecnologías	185
B.1. Tecnologías de Televisión Terrestre	185
B.2. Redes Celulares LTE	203
C. Elección del Modelo de Propagación	209
C.1. Elección del Modelo de Propagación	209
Referencias	221

Acrónimos

4G Cuarta Generación

2G Segunda Generación

3G Tercera Generación

ACE Active Constellation Extention

ATSC Advanced Television System Committee

APT Telecomunidad Asia Pacífico

ACK Acknowledgement

ACLR Adjacent Channel Leakage Ratio

ACS Adjacent channel selectivity

ACIR Adjacent Channel Interference Ratio

CNR Relación Portadora Ruido

C/N Portadora a Ruido

CCNP Consorcio de Canales Nacionales Privados

CITEL Comisión Interamericana de Telecomunicaciones

Cod Tasa de codificación FEC

CS Conmutación de Circuitos

CFI Indicador de Formato de Control

CDMA Acceso Múltiple por División de Código

CQI Channel Quality Information

DAB Digital Audio Broadcasting

DTMB Digital Terrestrial Multimedia Broadcast

DVB Digital Video Broadcasting

DVB-T Digital Video Broadcasting- Terrestrial

DVB-T2 Digital Video Broadcasting- Terrestrial 2nd Generation

ACRÓNIMOS

- DVB-H** Digital Video Broadcasting- Handheld
- DVB-SH** Digital Video Broadcasting- Satellite services to Handhelds
- DD** Dividendo Digital
- DD1** Primer Dividendo Digital
- DD2** Segundo Dividendo Digital
- DL** Downlink
- DTT** Digital Terrestrial Television
- EDGE** Enhanced Data Rates for GSM Evolution
- E-UTRA** Evolved Universal Terrestrial Radio Access
- ENTEL** Empresa Nacional de Telecomunicaciones
- EBU** (European Broadcasting Union
- FEC** Forward Error Correction
- FFT** Fast Fourier Transform
- FDD** Duplexación por División de Frecuencia
- FDMA** Acceso Múltiple por División de Frecuencia
- GI** Intervalo de Guarda
- GSM** Global System for Mobile communications
- GPRS** General Packet Radio Service
- HDTV** Televisión de alta definición
- HSPA** High-Speed Packet Access
- ICI** Interferencia entre Portadoras
- ISDB** Integrated Services Digital Broadcasting
- ISDB-T** Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial
- ISDB-Tb** Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial Brazilian version

ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector
IMT	International Mobile Telecommunications
IFFT	Transformada Inversa Rápida de Fourier
ITM	Irregular Terrain Model
LDPC	Low Density Parity Check
LTE	Long Term Evolution
LTE-UE	Equipos de Usuario LTE
LTE-BS	Estaciones Base LTE
LTE-UL	Enlace Ascendente
LTE-DL	Enlace Descendente
LDTV	Televisión de baja definición
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MISO	Multiple-Input Single-Output
MPEG4	Moving Pictures Experts Group version 4
MFN	Multiple Frequency Network
Mod	Modulación
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
NTSC	National Television System Committee
NACK	Negative Acknowledgement
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
OOB	Fuera de Banda
OFDMA	Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PAL	Phase Alternating Line

ACRÓNIMOS

PRT Peak Reduction Tones

PS Conmutación de Paquetes IP

PDSCH Physical Downlink Shared Channel

PBCH Physical Broadcast Channel

PMC Physical Broadcast Channel

PCFICH Physical Control Format Indicator Channel

PDCCH Physical Downlink Control Channel

PHICH Physical Hybrid ARQ Indicator Channel

PUSCH Physical Uplink Shared Channel

PUCCH Physical Uplink Control Channel

PMI Precoding Matrix Indicators

PRACH Physical Random Access Channel

PIRE Potencia Isotrópica Radiada Equivalente

PLP Physical Layer Pipes

RTVC Radio Televisión de Colombia

RF Radio Frecuencia

RP Relación de Protección

RB Resource Blocks

RPC Reference Planning Configuration

SFN Single Frequency Network

SECAM Sequential Color with Memory

SISO Single-Input Single-Output

SNR Relación Señal a Ruido

SC-FDMA Single Carrier - Frequency Division Multiple Access

SR Scheduling Request

TDT Televisión Digital Terrestre

T-DAB Terrestrial Digital Audio Broadcasting

TR Tone Reservation

TDD Duplexación por División de Tiempo

TDMA Acceso Múltiple por División de Tiempo

UHF Ultra High Frequency

UL Uplink

UMTS Universal Mobile Telecommunications System

UCI Uplink Control Information

VHF Very High Frequency

T-DAB Terrestrial- Digital Audio Broadcasting.

WCDMA Wideband Code Division Multiple Access

ACRÓNIMOS

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

La Televisión Digital Terrestre (TDT) con respecto a la difusión de televisión analógica ofrece múltiples ventajas. Estas son: mayor robustez en la señal frente a ruido e interferencias, uso más eficiente del espectro radioeléctrico gracias a la posibilidad de utilizar redes de frecuencia única, en inglés SFNs (Single Frequency Network) [1] y [2], que consiste en múltiples transmisores trabajando a la misma frecuencia, la posibilidad de transmitir varios canales de televisión por un mismo canal radioeléctrico [3]. Además, es posible ofrecer servicios de valor añadido, tales como televisión en alta definición y programación 3D [4]. La mayor robustez de la señal es posible gracias a la utilización de codificación de canal [5] y la utilización de entrelazado frecuencial y temporal para explotar la diversidad en frecuencia y en tiempo del canal, [6]. Además, se optimiza el uso del espectro radioeléctrico, por un lado, gracias a la posibilidad de operar en canales adyacentes [7], algo que no es posible en transmisiones analógicas de televisión, en las cuales un canal de guarda debe ser reservado para emisores con similar cobertura [8]; por otro lado gracias a la posibilidad de utilizar redes SFN, que permite cubrir áreas de gran tamaño con una única frecuencia [9]; y finalmente gracias a la posibilidad de transmitir varios canales de televisión por un mismo canal radio, con el respectivo ahorro de frecuencias.

A nivel mundial existen 3 estándares de televisión analógica: NTSC (National Television System Committee), PAL (Phase Alternating Line) y SECAM (Sequential Color with Memory) y 4 familias de estándares de TDT: ISDB (Integrated Services Digital Broadcasting) [10] desarrollado en Japón por el foro de estandarización de televisión digital Japonés ARIB, ATSC (Advanced Television System Committee) [11] de Estados Unidos, DTMB (Digital

Capítulo 1. Introducción

Terrestrial Multimedia Broadcast) [12] originario de China y el foro de estandarización de TV digital europeo DVB (Digital Video Broadcasting). Por otra parte, la familia DVB cuenta con los estándares de primera y segunda generación DVB-T (Digital Video Broadcasting- Terrestrial) [13] y DVB-T2 (Digital Video Broadcasting- Terrestrial 2nd Generation) [6] que es el actual estado del arte de los sistemas comerciales desplegados de TDT. La familia de estándares ATSC se encuentra actualmente trabajando en el nuevo estándar ATSC 3.0 [14] y [15]. La Figura 1.1 y la Figura 1.2 muestran la adopción a nivel mundial de los diferentes estándares de televisión analógica y TDT, respectivamente.

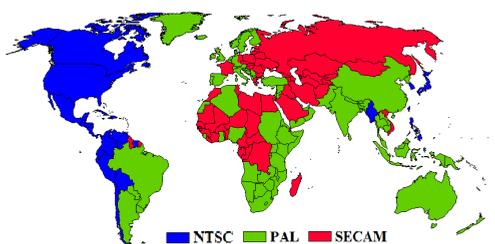


Figura 1.1: Mapa de adopción a nivel mundial de los estándares de televisión analógica [16].

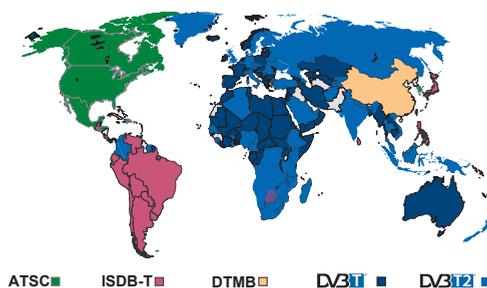


Figura 1.2: Mapa de adopción a nivel mundial de los estándares de TDT [17].

El estándar ISDB-T fue desarrollado en Japón y adoptado por la mayoría de países de Sudamérica, luego de que Brasil incluyó modificaciones, concretamente MPEG4 (Moving Pictures Experts Group version 4) a nivel de codificación de vídeo, y fue nombrado Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial Brazilian version (ISDB-Tb) [10], a nivel de capa física tanto ISDB-T como ISDB-Tb son iguales. El estándar ATSC, desarrollado por Estados Unidos fue adoptado por México, Corea del Sur y varios países del Caribe. El estándar Chino DTMB en América fue adoptado por Cuba. Por otra parte, el estándar

europeo DVB-T que ha sido el estándar con mayor difusión hasta la fecha, fue adoptado en alrededor de 120 países alrededor del mundo. Finalmente, el nuevo estándar DVB-T2 en comparación con los estándares de TDT de primera generación, mejora en aproximadamente 50 % en robustez y capacidad, y triplica la máxima distancia SFN gracias a los elevados tamaños de FFT (Fast Fourier Transform) [18]. La distancia SFN es la separación máxima que puede haber entre dos transmisores que trabajan en la misma SFN. La aparición de DVB-T2 ha representado una gran oportunidad para países con redes de primera generación aún no desplegadas, así como para aquellos en los que estas redes están en una etapa muy temprana de despliegue. Este fue el caso de Colombia, que migró del estándar DVB-T al estándar DVB-T2.

Los primeros países en iniciar el proceso de transición de televisión analógica a digital fueron el Reino Unido y Estados Unidos en 1998. Al momento 53 países han terminado completamente el proceso [19], siendo Holanda el primero en emitir completamente en digital en 2006. Entre los países que han culminado con el apagón analógico están: Holanda, Suecia, Finlandia, Alemania, Suiza, Noruega, Dinamarca, Reino Unido, Estados Unidos, España, Taiwán, Austria, Francia, Croacia, Canadá, Bélgica, Japón, Italia, Corea, Portugal. En América Latina el proceso de migración a televisión digital está aún en marcha. Países como Brasil, Argentina, Ecuador, Colombia, Perú, Venezuela, Chile cuentan ya con servicios comerciales de TDT. La mayoría de países de la región planean realizar el apagón analógico para finales de la presente década [20].

Por otra parte, con la introducción de la TDT y el apagón analógico, se libera parte de la banda Ultra High Frequency (UHF) de 470 MHz a 862 MHz y Very High Frequency (VHF) de 47 MHz a 213 MHz, utilizadas tradicionalmente para la radiodifusión de televisión terrestre. Estas bandas son técnicamente adecuadas para lograr cobertura móvil generalizada fuera de las principales áreas urbanas debido a su excelente características de propagación. Este espectro liberado se conoce como DD [21].

Desde el punto de vista de la organización del espectro, el mundo se divide en tres regiones según la International Telecommunication Union (ITU): Región 1 (Europa y África), Región 2 (Américas) y la Región 3 (Asia y Oceanía). La primera banda del DD liberada, primer dividendo digital DD1, corresponde a la banda de 800 MHz (790-862 MHz) en las Regiones 1 y 3, y la banda de 700 MHz (698-806 MHz) en la Región 2 [22], como se puede ver en la Figura 1.3.

La mayoría de los reguladores de espectro en todo el mundo ya han subastado y adjudicado el Primer Dividendo Digital (DD1) para servicios móviles de cuarta generación (4G) LTE. En Europa, países como Finlandia, Alemania, Suecia y el Reino Unido ya tienen anunciado sus intenciones de asignar la banda de 700 MHz a los servicios móviles mediante la liberación de un segundo Dividendo Digital DD2 (Figura 1.3). En Alemania se ha subastado la banda

Capítulo 1. Introducción

de 700 MHz (Segundo Dividendo Digital (DD2)) el presente año, y se iniciarán los despliegues LTE en el 2017 [23]. Se espera que el DD2 se llevará a cabo en Europa en torno al horizonte de 2020 [24]. En América, los EE.UU. están dando un paso al frente considerando la banda de 600 MHz como un DD2 [25].

En Sudamérica, las redes de TDT están en etapa de despliegue en la mayoría de los países, y la subasta de la banda de 700 MHz se está planeando en países como Brasil, Chile, Colombia, Perú y Uruguay. Brasil ha sido pionero en la licitación de la banda de 700 MHz, completando la licitación en Septiembre de 2014 [20]. México otorgó la concesión experimental de 90 MHz en la banda de 700 MHz. En Chile, la subasta de la banda 700 MHz finalizó en 2014, la primera transmisión en la banda 700 MHz fue realizada en el transcurso de 2015. Colombia planea subastar 90 MHz del DD en el transcurso de 2016 [26]. En Perú, el proceso de licitación de tres bloques del DD inició en Septiembre de 2015. En Honduras y Uruguay se planea subastar el DD en el transcurso del 2016. En los demás países de la región la licitación del DD aún no se ha definido. En la Tabla 1.1 se presenta un resumen de los plazos establecido para la implementación de la TDT en América Latina. La presente tesis doctoral se enfoca concretamente en Sudamérica.

País	Tecnología	Inicio Trasmisiones TDT	Apagón Analógico	Subasta DD
Argentina	ISDB-T	2010	2019	No definida
Bolivia	ISDB-T	Mayo 2012	2016	No definida
Brasil	ISDB-T	Diciembre 2007	2016	2014
Chile	ISDB-T	Junio 2010	2017	2014
Colombia	DVB-T2	Enero 2010	2019	2015
Costa Rica	ISDB-T	Julio 2013	2017	No definida
Cuba	DTMB	Junio 2013	2021	No definida
Ecuador	ISDB-T	Mayo 2013	2018	No definida
Honduras	ATSC	2014	2021	No definida
México	ATSC	2006	2015	No definida
Panamá	DVB-T	Diciembre 2009	2020	No definida
Paraguay	ISDB-T	2011	2022	No definida
Perú	ISDB-T	Marzo 2010	2020	2015
Uruguay	ISDB-T	Agosto 2012	2020	2015
Venezuela	ISDB-T	Junio 2011	2020	No definida

Tabla 1.1: Plazos para la implementación de TDT en América Latina.

Un problema al desplegar redes móviles en las banda del dividendo digital es que pueden aparecer interferencias en las frecuencias adyacentes utilizadas para la TDT [27]. Las posibles soluciones implican ya sea el aumento de la banda de guarda, reducir el número de canales de Radio Frecuencia (RF) para TDT, o con un costo importante, el uso de filtros anti-LTE en los receptores de TDT [28]. La banda de guarda en la banda de 800 MHz es de solo 1 MHz, mientras que en la Región 2 la banda de guarda en la banda de 700 MHz es de 5 MHz. Sin embargo, en la banda de 800 MHz el enlace descendente LTE-DL es situado en la parte inferior de la banda, en lugar del enlace ascendente LTE-UL como tradicionalmente se ha hecho para las redes celulares. En la banda de 700 MHz es el enlace Enlace Ascendente (LTE-UL) el que está situado en la parte inferior de la banda. Por tanto, los equipos de usuario LTE-UE pueden estar más cerca de los receptores de TDT que las estaciones base LTE-BS, bajo este escenario los problemas de interferencias son más críticos [29], y esa es la razón por la cual en Europa se ha propuesto el uso de una banda de guarda de 9 MHz para la banda de 700 MHz.

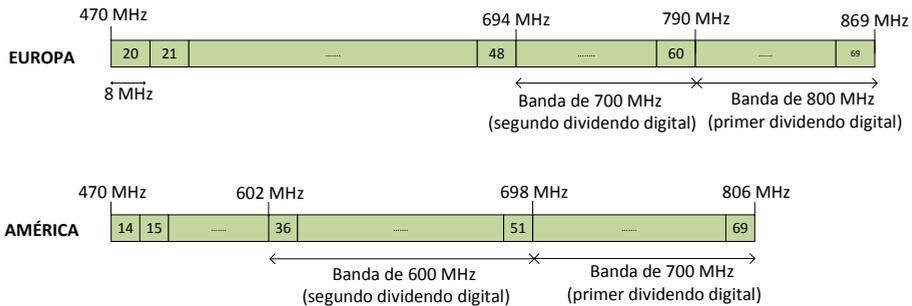


Figura 1.3: Arreglo de canalización armonizada para 4G LTE en las regiones ITU, para la Región 1 en la banda de 700 MHz, para la región 1 en la banda de 800 MHz y para la región 2 en la banda de 700 MHz.

Con respecto a la canalización utilizada para LTE en la banda de 700 MHz, en América dos tipos de canalizaciones han sido adoptadas para el despliegue de LTE en la banda de 700 MHz. Por un lado todos los países de Latino América adoptaron la Canalización de la Telecomunidad Asia Pacífico (APT) [30], y por otro lado EEUU ha propuesto su propia canalización [31]. Los dos arreglos de canalizaciones utilizados se describen a continuación.

Canalización Asia-Pacífico APT Adoptado por los países de Sudamérica. De acuerdo al informe N° APT/AWF/REP-14 [30] de la APT, se proponen 2

Capítulo 1. Introducción

disposiciones de frecuencias para la banda de 700 MHz para International Mobile Telecommunications (IMT), considerando aplicaciones FDD (Duplexación por División de Frecuencia) y TDD (Duplexación por División de Tiempo). Siendo que el arreglo FDD es comúnmente usado.

Arreglo FDD Se considera una estructura de 2x45 MHz, con una banda central de 10 MHz y bandas de guarda de 5 MHz y 3 MHz en la parte inferior y superior de la banda respectivamente, una banda de guarda externa de 4 MHz es considerada en la parte inferior del espectro (694 MHz a 698 MHz). Así, la banda disponible para servicios móviles en banda ancha estaría comprendida de 703 MHz a 748 MHz para uplink y 758 MHz a 803 MHz para downlink, como se muestra en la Figura 1.4. Al estar la parte baja de la banda asignada a uplink, las posibles interferencias de 4G sobre la TDT son más difíciles de controlar.

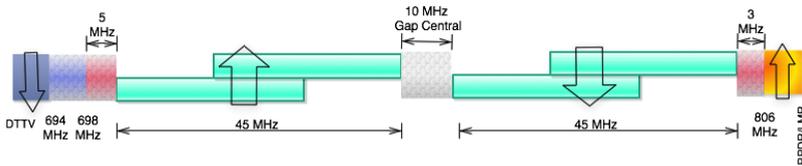


Figura 1.4: Arreglo FDD para la banda 698-806 MHz.

Canalización Estadounidense La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de EEUU, estableció disposiciones para el uso de la banda de 700 MHz para nuevos servicios, teniendo en cuenta el desarrollo de una red de banda ancha de seguridad pública y de acceso comercial [31]. Fue Adoptada por EEUU y Canadá. La distribución acordada se muestra en la Figura 1.5 y la Tabla 1.2

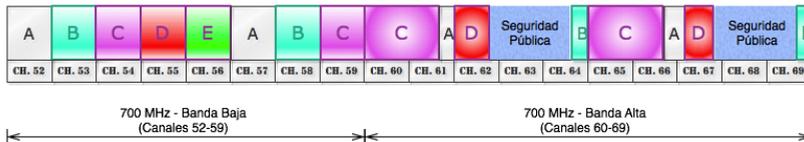


Figura 1.5: Canalización Estadounidense para la banda de 700 MHz.

Donde:

1.2 Descripción General del Problema

Bloques	Frecuencias (MHz)	Ancho de Banda (MHz)	Emparejamiento (MHz)
A	698-704, 728-734	12	2x6
B	704-710, 734-740	12	2x6
C	710-716, 740-746	12	2x6
D	716-722	6	no pareado
E	722-728	6	no pareado
C	746-757, 776-787	22	2x11
D	758-763, 788-793	10	2x5
A	757-758, 787-788	2	2x1
B	775-776, 805-806	2	2x1

Tabla 1.2: Atribución bandas de frecuencia de acuerdo a la canalización de EE.UU. para la utilización de la banda de 700 MHz.

1.2. Descripción General del Problema

Para el proceso de migración de televisión analógica a digital, es fundamental realizar una adecuada planificación de frecuencias. En primer lugar se debe definir la planificación de frecuencias a nivel internacional (fronteras de los países) para luego abordar la planificación interna de cada país. Para ello, se debe determinar áreas de servicio, distancias de protección, áreas de coordinación y distancias de re-uso de frecuencias en las que un transmisor de la red puede compartir la frecuencia con otros transmisores. Adicionalmente las elevadas potencias radiadas y la elevada ubicación de los transmisores de TDT, provoca la aparición de interferencias en las zonas de frontera. Por lo que se requiere cierta coordinación entre países vecinos.

Las condiciones del despliegue de la TDT en Sudamérica son únicas por varios motivos. Por un lado, dos estándares de transmisión de TDT han sido adoptados. La mayoría de los países han adoptado ISDB-T, mientras Colombia ha adoptado DVB-T2 con la particularidad de ser el primer país en el mundo en utilizar DVB-T2 con canalización de 6 MHz. Por tanto, ISDB-T y DVB-T2 deben coexistir por primera vez. Adicionalmente, Colombia es el único país en el mundo en que el sistema europeo DVB-T2 deberá convivir con el sistema analógico americano NTSC durante el periodo de simulcast.

Por otra parte, la banda de 700 MHz del dividendo digital ha sido ya asignada en algunos países para servicios móviles 4G LTE, por lo que se tiene un escenario mucho más complejo por haber menos espectro disponible en el periodo de transición, en el que tanto señales analógicas como digitales deben

Capítulo 1. Introducción

coexistir. Además, debido a que los países de Sudamérica han adoptado la canalización APT para el despliegue de las redes LTE en la banda de 700 MHz, las interferencias son más críticas al tener el enlace LTE-UL en la parte baja del espectro. Cabe recalcar que en Sudamérica se requiere planificar las redes para recepción portable en interiores, ya que en muchas ciudades no hay antenas colectivas. Por tato, para asegurar la misma cobertura, se debe utilizar transmisores de mayor potencia o modos de transmisión más robustos a costa de disminuir la capacidad de transmisión, lo que implica la necesidad de utilizar más radiocanales para tener la misma capacidad que en recepción fija. En este escenario, las interferencias desde las redes LTE son más críticas que para recepción fija.

Para una óptima planificación de redes de TDT, el primer paso consiste en desarrollar la planificación de frecuencias, luego se debe planificar la cobertura a la frecuencia asignada. Para efectuar la planeación de frecuencias, es necesario disponer de valores de relaciones de protección RP frente a interferencias entre las diferentes tecnologías involucradas [32]. Dichas relaciones de protección se utilizan para determinar la convivencia de las tecnologías en escenarios cocanal y adyacentes, así como la re-utilización de frecuencias en escenarios cocanal. Para realizar la planificación de cobertura, es necesario no sólo estimar la cobertura teniendo en cuenta el ruido y las interferencias producidas por la misma red SFN, sino también analizar las interferencias producidas por otras redes de televisión ya sean digitales o analógicas, y las interferencias producidas por redes de otras tecnologías trabajando en canales adyacentes como LTE. En Sudamérica cada país ha empezado el despliegue de sus redes sin ningún tipo de coordinación. Lo que puede acarrear problemas futuros.

Acuerdos como el GE06 [33] en Europa, gobiernan el uso de frecuencias para los servicios de radiodifusión (TDT y radio digital DAB). En este acuerdo se definen las áreas de coordinación entre países, el campo eléctrico a proteger en las áreas de coordinación, métodos para determinar las potenciales interferencias intra e inter países y medidas la protección entre sistemas de televisión digital y analógica para la Región 1 de la ITU. Organismos regionales en Sudamérica como la Comisión Interamericana de Telecomunicaciones (CITEL) son los encargados de promover y facilitar el desarrollo integral y sostenible de las telecomunicaciones en las Américas. Acuerdos como el GE06 no existen al momento a nivel internacional en América Latina, por lo que su necesidad se hace evidente.

En la presente tesis doctoral se aborda el desarrollo del plan de frecuencias de la TDT a nivel internacional para Sudamérica. Los resultados presentados se centran en recepción fija y portable en interiores. Para el desarrollo de la planificación de frecuencias se presta especial interés en Colombia y los países vecinos: Ecuador, Perú, Venezuela y Brasil. Los países seleccionados para el

análisis son relevantes al representar el caso crítico de convivencia, al tener diferentes estándares de TDT trabajando geográficamente cercanos. Los resultados presentados en la presente tesis pueden ser fácilmente extrapolados a los demás países de Sudamérica.

1.3. Objetivos de la Tesis

El objetivo de la presente tesis doctoral es desarrollar un plan de frecuencias para TDT a nivel internacional para Sudamérica. Las soluciones fueron evaluadas mediante simulaciones computacionales, medidas de laboratorio y ejercicios de planificación/cobertura para las redes de difusión tomando en cuenta condiciones específicas de propagación presentes en la región. Este objetivo puede ser dividido en los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el rendimiento de DVB-T2 con canalización de 6 MHz y compararlo con el otro estándar de TDT adoptado en la región ISDB-T.
- Evaluar los márgenes de protección frente a interferencias de señales de televisión bajo condiciones de laboratorio de los estándares de TDT adoptados en Sudamérica.
- Definir bandas de guarda, relaciones de protección y distancias de protección para los estándares de TDT por la inclusión de comunicaciones de cuarta generación 4G LTE en la banda de 700 MHz.
- Desarrollar el plan de frecuencias para TDT a nivel internacional para Sudamérica.
- Proponer planes de frecuencia para TDT a nivel nacional para Colombia.

1.4. Estado del Arte

1.4.1. Interferencias entre Redes de TDT

DVB-T2 actualmente es el sistema más avanzado para transmisiones de TDT, ofrece un rendimiento cercano a los valores teóricos, con una eficiencia al menos un 50 % superior comparada con los anteriores estándares de TDT [34]. DVB-T2 no sólo permite un uso mucho más eficiente del espectro radioeléctrico, sino que también es mucho más robusto frente a ruido e interferencias [35].

El estándar de TDT predominante en América Latina es ISDB-T, aunque además de DVB-T2 en Colombia [35], también se utilizan los estándares DVB-T en Panamá, y ATSC en México y algunos países de Centroamérica [17].

La adopción del estándar de TDT DVB-T2 por parte de Colombia representa condiciones únicas de convivencia en Sudamérica. Debido a que las redes DVB-T2 deben coexistir con las futuras redes de TDT con tecnología ISDB-Tb (en Brasil, Ecuador, Perú y Venezuela). Además, en Colombia las redes DVB-T2 utilizan canalización de 6 MHz, en lugar de la normalmente utilizada (8 MHz) [9].

En [35] se muestra que para realizar la planeación de frecuencias, es necesario disponer de valores de relaciones de protección (RP) frente a interferencias para las diferentes tecnologías de televisión involucradas. Dichas relaciones se utilizan para determinar la reutilización de frecuencias en escenarios co-canal, y la convivencia en canales adyacente. En la recomendación ITU-R BT.1368 [7] se presentan las relaciones de protección para diferentes sistemas de televisión pero no contempla DVB-T2. En [36] y [37] se pueden encontrar algunos valores para convivencia de redes DVB-T2, pero no se consideran las condiciones únicas presentes en Sudamérica.

Además, el uso de nuevas técnicas de reducción de potencia pico PAPR en DVB-T2 puede disminuir las interferencias en canales adyacentes. En [38] se muestra que el uso de reserva de tonos TR disminuye considerablemente la potencia pico de la señal OFDM, y por ende las emisiones fuera de banda se reducen. En [39] se evalúa el uso de la técnica extensión activa de la constelación ACE, con similares resultados. Por otra parte, en [40] se muestra que el uso de constelaciones rotadas mejora la robustez de la señal en canales con grandes desvanecimientos. Sin embargo, no se ha estudiado el comportamiento de estos nuevos mecanismos frente a interferencias, y tampoco se ha cuantificado su efecto sobre los márgenes de protección y planificación de frecuencias.

1.4.2. Interferencias entre Redes de TDT y Redes de Televisión Analógica

En Sudamérica, por primera vez el estándar de televisión digital DVB-T2 debe coexistir con el estándar de televisión analógica americano NTSC [9]. Debido a la menor robustez de las transmisiones de televisión analógica, es más probable que aparezcan interferencia sobre estas redes. Por otra parte, en [13] se definen máscaras espectrales de emisión para DVB-T2. Dichas máscaras fueron desarrolladas para que con su cumplimiento, cuando los transmisores trabajan frecuencias adyacentes, se eviten interferencias sobre las redes de televisión analógicas; siempre y cuando los transmisores analógico y digital tengan el mismo emplazamiento, polarización y potencia de transmisión. En la práctica dos transmisores analógico y digital generalmente no comparten emplazamiento, y tienen distinta potencia de transmisión, por lo que es muy probable que aparezcan interferencias sobre la red analógica. En la literatura no existen

márgenes de protección para el caso particular de convivencia entre NTSC con DVB-T2 a 6 MHz, y tampoco se ha estudiado las implicaciones concernientes a planificación de frecuencias de la convivencia de los dos estándares.

1.4.3. Interferencias entre Redes TDT y Redes LTE

Los problemas de convivencia entre la TDT y 4G LTE se han abordado principalmente por entidades de estandarización y reguladoras. En cuanto a la banda de 800 MHz en Europa. En [41] se presentan requisitos genéricos para la convivencia entre DVB-T y LTE para diferentes escenarios outdoor e indoor. En [42] se concluyó que para evitar interferencias se necesita un filtro externo entre la antena de TV y el receptor TDT en algunos casos. En [43] se aborda la coexistencia entre LTE y DVB-T2 Lite en bandas de frecuencia compartidas. Relaciones de protección RP para DVB-T Y DVB-T2 interferida por LTE se pueden encontrar en [44] y [37], respectivamente.

En cuanto al análisis de la convivencia en la banda de 700 MHz, en [45] se presentan los requisitos genéricos para la convivencia entre DVB-T, DVB-T2 y LTE para recepción fija en exteriores y portable en interiores utilizando el sistema Monte Carlo a nivel de simulaciones. Estudios de coexistencia para otras tecnologías de TDT se pueden encontrar en [46] para ATSC, en [47] y [48] para ISDB-T, y [49] para DTMB. En [50] se compara los niveles máximos de emisiones fuera de banda OOB del Equipos de Usuario LTE (LTE-UE), propuestos por diferentes entidades y aplicadas al escenario europeo.

Los resultados disponibles en la literatura, en general consideran casos muy específicos (e.g. para una banda de protección dada, modo de transmisión, etc.). Por lo tanto, los resultados no pueden ser fácilmente extrapolados a diferentes escenarios.

1.4.4. Planificación de Frecuencias

Para el despliegue de redes de TDT, se pueden utilizar dos topologías de red: redes de frecuencia múltiple MFN y/o redes SFN. La utilización de redes SFN, permite utilizar de manera más eficiente el espectro radioeléctrico [1] y [51]. En [52] se muestra que la ganancia al usar redes SFN en DVB-T2 es hasta 10 db comparada con DVB-T. En [53] se propone una metodología para implementar redes SFN de gran tamaño. También, se propone optimizar el uso del espectro radioeléctrico, en [54] mediante el uso de redes híbridas celulares y de radiodifusión, en [55] mediante el uso de múltiples canales de radiodifusión, en [56] mediante transmisión más eficiente de servicios fijos/móviles y locales. En [57] se investiga el uso de MISO (Multiple Input Single Output) y TFS (Time Frequency Slicing) para mejorar la cobertura de redes DVB-T2. En [58]

se aborda la optimización en cobertura de redes broadcast. En [59] y [60] se propone el uso de redes SFN para mejorar la cobertura en redes DVB. En [61], [62] y [63] se propone un procedimiento metaheurístico para la optimización de los retardos en redes SFN en DVB-T. En [64] se propone una metodología para el cálculo de redes SFN densas. En [65] se propone el uso de MISO para mejorar la cobertura en redes SFN. En [66] y [67] se analiza la ganancia en cobertura y capacidad por el uso de Time Frequency Slicing (TFS). En [68] se evalúa el uso de Time Diversity en redes móviles DVB-T2. En [69] se muestra la ganancia por el uso de redes SFN en DVB-H. En [70] y [71] se presentan medidas de campo realizadas para DVB-T2 y T2-Lite en condiciones de recepción en interiores. En [72] y [73] se presenta un simulador y se evalúa la cobertura para el estándar de recepción móvil DVB-H, respectivamente. En [74] se evalúa las estrategias para la elección de la ventana de sincronización en sistemas DVB-T.

Para realizar la planificación de frecuencias, se acostumbra dividir el área a planificar en pequeñas áreas denominadas áreas de servicio [75], para lo que figuras regulares son habitualmente utilizadas (e.g. hexagonos). En [76] se propone que un modelo de hexágonos para la planificación en general es optimista, comparado con una planificación practica. Principalmente debido a que no tiene en cuenta la topografía del terreno.

Debido a la complejidad computacional de los problemas, se necesitan métodos de planificación sofisticados, así como algoritmos matemáticos avanzados para obtener planes de frecuencia que usen el espectro disponible de una manera eficiente [75]. En [77] se propone la utilización de las redes inalámbricas existentes para la planificación de frecuencias bajo el estándar de recepción móvil de televisión DVB-H. En [78] se analiza el método de suma para planificación de espectro en distribuciones Log-normal. En [79], [80], [81] y [82] se enumeran los métodos de planificación más utilizados.

- Planificación por adjudicación geométrica
- Algoritmos basados en teoría gráfica
 - Coloreado gráfico secuencial
 - Gráficos ponderados
- Síntesis del plan de frecuencias por optimización estocástica

Modelos de Propagación Aplicables a TDT

Según la ITU, en las bandas utilizadas por la TDT no se produce propagación a través de la ionosfera, salvo muy cerca del extremo inferior de la banda.

Los efectos de la climatología se limitan a la super refracción y a la propagación por conducto que puede aparecer a causa de las variaciones del gradiente normal en el índice de refracción del aire.

Otros factores a tener en cuenta son la dispersión troposférica y la difracción provocadas por los obstáculos en el trayecto, entre ellos los accidentes geográficos de la Tierra, y la difracción causada por el terreno y los edificios.

Dependiendo del entorno de propagación concreto pueden considerarse los siguientes factores para estimar las pérdidas de propagación:

- **Atenuación en el espacio libre.** En algunos casos será suficiente suponer que la señal deseada sólo está sometida a la atenuación causada por la propagación en el espacio libre (Recomendación International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector (ITU-R) P.525) [83].
- **Difracción alrededor de una tierra lisa.** Para predecir la señal deseada a distancias superiores a la de visibilidad directa, es posible que se deba tener en cuenta la curvatura de la tierra. En la Recomendación ITU-R P.526 [84] se estudia la propagación por difracción (se puede también ver el Manual de la ITU-R, curvas de propagación de las ondas radioeléctricas sobre la superficie de la Tierra) [85].
- **Propagación por regiones concretas del mundo o sobre superficies de rugosidad específica.** En la Recomendación ITU-R P.1546 [86] se ofrecen estimaciones para diversos servicios de radiocomunicaciones, bandas de frecuencias, regiones del mundo y alturas de antena que pueden ser aplicables a una situación determinada.
- **Propagación sobre un perfil de terreno en particular.** Cuando sea preciso puede hacerse un cálculo detallado de la propagación sobre un perfil de terreno obtenido a partir de una base de datos topográficos. Los algoritmos informáticos se basan en los métodos descritos en la Recomendación ITU-R P.526 [84] .
- **Okumura-Hata.** Este modelo se contempla actualmente en la Recomendación UIT-R P.1546 [86] y utiliza la fórmula de Okumura-Hata que calcula la atenuación en función de la distancia y la altura equivalente de la antena de transmisión. Esta atenuación se corrige con arreglo al porcentaje de edificios que rodean el emplazamiento del receptor y el tipo de trayecto (terrestre, marítimo o mixto).
- **Longley-Rice.** Es un modelo polivalente que puede aplicarse a una gran variedad de problemas de ingeniería. Este modelo, basado en la teoría

electromagnética y el análisis estadísticos tanto de características del terreno como de mediciones radioeléctricas, predice la atenuación de una señal radioeléctrica en función de la distancia y de la variabilidad de la señal en el tiempo y en el espacio. Es aplicable para frecuencias comprendidas entre 20 MHz y 20 GHz [87].

- **Irregular Terrain Model (ITM).** Modelo desarrollado originalmente para la US National Telecommunications Information Administration (Administración Nacional de Información de Telecomunicaciones de Estados Unidos de América).

Además, puede ser necesario tener también en cuenta otros mecanismos de propagación capaces de provocar interferencias. Entre ellos cabe citar los siguientes:

- **Propagación ionosférica.** Durante algunas estaciones del año y horas del día los modos de propagación ionosférica, por ejemplo a través de la capa E esporádica, pueden permitir la propagación a larga distancia en frecuencias de hasta unos 70 MHz (véase [88]).
- **Super refracción y propagación por conducto.** Estos efectos se estudian en [89] y UIT-R P.452 [90].

Además, en [91] se propone un modelo estadístico para cálculo de intensidad de campo eléctrico basado en medidas en Suecia. En [92] se analizan los modelos de propagación: Okumura-Hata, Xia-Bertoni, COST 231 Walfisch-Ikegami y un modelo basado en la fórmulas de Hata añadiendo un término de difracción calculada usando el modelo the Deygout. En [93] y [94] se analizan los modelos de propagación para redes enfocadas a recepción móvil DVB-H y satelital/móvil Digital Video Broadcasting- Satellite services to Handhelds (DVB-SH), respectivamente. En [95] se evalúa el desempeño del modelo ITU-R P.1546 para recepción móvil comparado con medidas de campo.

Modelos de Propagación Aplicables para Redes TDT en Entornos Rurales

En la actualidad, los métodos más utilizados para la predicción de las pérdidas de propagación en entornos rurales son el ITU-R 525/526 [83] y [84], y el ITU-R 1546 [86], incluidos en varias herramientas de simulación. Para la aplicación de estos dos modelos en entornos urbanos, se aplican factores de corrección sobre el modelo de propagación elegido, definiendo factores adaptados a cada tipo de zona (por ejemplo: zona urbana densa, zona con edificios altura media 10 m, zona con edificios altura media 30 m, etc.).

Tras la recomendación ITU-R P.1546, la recomendación ITU-R P.1812 [96] resultó de la idea de desarrollar un modelo físico real que utilice métodos complejos de cálculo de trayectorias teniendo en cuenta los efectos reales de difracción. Así, la recomendación ITU-R P.1812 complementa a la ITU-R P.1546.

De igual manera, se debe acotar que anterior a la recomendación ITU-R P.1546 estaba la recomendación ITU-R P.370 y [97] que es un modelo estadístico que quedó prácticamente obsoleto al publicarse la recomendación ITU-R P.1546, la cual fue el resultado de un largo proceso de correcciones y mejoras sobre la propia ITU-R P.370.

Modelos de Propagación Aplicables para Redes TDT en Entornos Urbanos

El cálculo de las pérdidas de propagación para planificación de redes a gran escala en entornos urbanos, es un procedimiento demasiado complejo como para ser realizado de forma determinista utilizando modelos basados en trazado de rayos. Por este motivo se utilizan modelos de propagación semi-deterministas y empíricos, basados los primeros en aproximaciones de las pérdidas por propagación, y los segundos en modelos relativamente sencillos obtenidos a partir de extensas campañas de medidas. La ventaja de los modelos semi-deterministas y empíricos es que son formulados con ecuaciones cerradas dependientes de pocos parámetros fácilmente calculables. Sin embargo, debido a la gran cantidad de factores que intervienen en la estimación de las pérdidas de propagación (mapas cartográficos disponibles, suposiciones, simplificaciones de los diferentes modelos de propagación, variación del tipo de entorno, variación de la frecuencia, etc.) es deseable calibrar los parámetros de estos modelos utilizando medidas.

Realizando un análisis de los modelos de propagación disponibles en la literatura, y que mejor se ajustan al rango de frecuencias en que serán desplegadas las redes de TDT en Sudamérica en entornos urbanos, se pueden identificar los siguientes:

- *Okumura-Hata* [98]
- *Xia-Bertoni* [99]
- *Hata+Deygout* *Hata más pérdidas por difracción usando el método de Deygout* [100].
- *Genérico de pathloss empírico* obtenido por regresión lineal [101]
- Adicionalmente, las recomendaciones [36] sugieren la utilización del modelo ITU-R 1546 para la planificación de redes TDT de gran tamaño, tanto para entornos urbanos como entornos rurales).

Modelos de Difracción

Para redes de TDT, los modelos de propagación se utilizan en conjunto con los modelos de cálculo de atenuación por difracción descritos en [84] y [96]. Bullington, Deygout 94, Delta Bullington.

1.5. Descripción de la Tesis y Principales Contribuciones

La presente tesis está organizada en 6 capítulos de la siguiente manera:

El capítulo 1 presenta la identificación del problema, los objetivos de la tesis y el estado del arte más representativo con respecto a interferencias entre redes de televisión (digital vs. analógica y digital vs. digital) y entre redes de TDT y redes 4G LTE.

En el capítulo 2 se describen los modelos de propagación, escenarios de despliegue de TDT, cálculos de campo eléctrico mínimo y algoritmos de planificación más utilizados.

En el capítulo 3 se presenta la planificación de frecuencias para un uso eficiente del espectro radioeléctrico. Para ello, en primer lugar se presenta la distribución de frecuencias en frontera donde estándares de TDT ISDB-T y DVB-T2 deben coexistir. Para luego, estudiar un caso de planificación de frecuencias internas para un país en concreto (Colombia). Adicionalmente, se presentan ejercicios de planificación para los casos más representativos. Los resultados presentados en este capítulo pueden ser fácilmente extrapolados a los demás países de Sudamérica. Cabe mencionar que la planificación presentada, es la primera en Sudamérica en contemplar no solo las condiciones específicas de cada país, sino también las condiciones fronterizas de la región y la problemática de incluir LTE en el dividendo digital.

En el capítulo 4 se presentan valores de relaciones de protección y recomendaciones de convivencia entre redes de TDT DVB-T2 y redes analógicas NTSC que deben coexistir en Colombia en el periodo de simulcast, y redes de TDT ISDB-T y DVB-T2 que deben coexistir tanto en la etapa de simulcast como post apagón analógico. Los resultados son presentados para canalización a 6 MHz, debido a que es la canalización utilizada en América. Sin embargo, los resultados son fácilmente extrapolables para distintas canalizaciones. Además, se investiga el efecto de las técnicas incorporadas en DVB-T2 para mitigar interferencias. Los resultados expuestos en esta sección son los primeros que han sido presentados para interferencias entre redes NTSC, ISDB-T y DVB-T2 trabajando con canalización 6 MHz.

En el capítulo 5 se presentan relaciones de protección y recomendaciones

1.5 Descripción de la Tesis y Principales Contribuciones

de convivencia para redes de TDT y redes celulares 4G LTE. Los resultados se presentan adoptando un marco genérico, de manera que pueden ser fácilmente extrapolables a distintos escenarios y bandas. Los resultados son presentados en función de la banda de guarda entre las tecnologías, tanto para el enlace ascendente como descendente trabajando en canales adyacentes a las señales de TDT y para recepción de TDT fija en exteriores y portable en interiores. Además, se investigó el efecto del uso de filtros de rechazo de señales LTE. Los resultados se presentan para la tecnología DVB-T2 [6], pero son también aplicables a otras tecnologías de TDT basados en multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) tales como DVB-T, ISDB-T, DTMB, o incluso el futuro estándar ATSC 3.0. Las recomendaciones presentadas en este capítulo son las primeras recomendaciones existentes en la literatura, para la convivencia entre redes DVB-T2, ISDB-T y LTE en la banda de 700 MHz.

Finalmente, el capítulo 6 resume los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, y se presentan una serie de recomendaciones para la planificación de redes de TDT. En este capítulo también se incluyen futuros temas de investigación.

Además, en el anexo A se presenta el estado de despliegue de las redes de TDT en América Latina. En el Anexo B se presentan las principales tecnologías de TDT desarrolladas hasta el día de hoy y las topologías de red usualmente utilizadas, se pone especial atención en las desarrollada por el foro de estandarización DVB, y las principales características incorporadas en el estándar de segunda generación DVB-T2 que aportan robustez ante interferencias. En el Anexo C se compara simulaciones de predicción de cobertura con medidas de campo tomadas en las ciudades de Cartagena y Cúcuta en Colombia .

Las principales contribuciones de la presente tesis en cada uno de los capítulos se resume a continuación. Si bien el capítulo 2 no presenta una contribución original, este ofrece los fundamentos de los métodos de predicción de señal así como algoritmos de planificación de frecuencias más utilizados. Para ver la lista completa de las publicaciones y diseminación originada de la tesis doctoral, el lector puede dirigirse a la sección 1.6.

Capítulo 3 En este capítulo, se aborda la planificación de frecuencias para Sudamérica, tanto a nivel internacional como a nivel nacional para cada país. Se tomó como referencia la planificación para un país en concreto (Colombia), cuyos resultados pueden ser fácilmente extrapolados a los demás países Sudamericanos. Para lo cual, en primer lugar se definen los parámetros necesarios para realizar el plan de frecuencias (modelo de propagación, áreas de adjudicación, restricciones en fronteras), luego se sintetiza el plan de frecuencias utilizando un método de planificación específico. Además, se analiza el mínimo número de frecuencias necesarias en función del tipo de cobertura requerida

Capítulo 1. Introducción

(nacional, regional o local), y la implementación de redes SFN de gran tamaño. Los resultados y conclusiones presentadas en este capítulo son los primeras en su tipo para Sudamérica. Por lo que constituyen una útil guía para un acuerdo internacional en planificación de frecuencias para TDT.

Capítulo 4 En este capítulo se estudia las interferencias entre diferentes estándares de TDT, y también con el estándar de televisión analógica NTSC utilizado en América. Se evalúa también el rendimiento y robustez frente a interferencias de los estándares de TDT DVB-T2 e ISDB-T, para lo cual se presentan las relaciones de protección medidas en condiciones de laboratorio. Estas relaciones de protección son luego utilizadas en ejercicios de planificación bajo escenarios realistas, y se presentan las mínimas condiciones de convivencia entre los diferentes estándares. Además, las nuevas técnicas para combatir interferencias implementadas en DVB-T2 son evaluadas y su influencia es cuantificada. Los resultados presentados en esta sección son los primeros para DVB-T2 utilizando canalización a 6 MHz, pero pueden ser fácilmente extrapolados a otras canalizaciones. También, son los primeros resultados en los que se aborda la problemática de interferencias entre redes DVB-T2, ISDB-T y NTSC.

Capítulo 5 En este capítulo, se investiga la convivencia entre las redes de comunicaciones móviles de cuarta generación LTE y las tecnologías de TDT en las bandas del dividendo digital. Mediante medidas en condiciones de laboratorio, se cuantifica: la influencia del ancho de banda tanto de las señales LTE como de las señales TDT, la influencia de la banda de guarda entre las dos tecnologías, el efecto del tipo de enlace de la señal LTE (LTE-UL y LTE-DL). Adicionalmente, en este capítulo se determinan las condiciones mínimas de coexistencia para escenarios de recepción fija en exteriores y portable en interiores. Para la banda de 800 MHz (DD1 en Europa), donde el enlace adyacente a la TDT es el enlace descendente LTE-DL, y el caso crítico es recepción portable en exteriores, se presentan distancias mínimas para evitar interferencias entre las estaciones base LTE-BS y los receptores de TDT en función de la potencia TDT recibida. Para la banda de 700 MHz (DD2 en Europa y DD1 en América), donde el enlace adyacente a la TDT es el LTE-UL, y el caso de recepción crítica es la recepción fija en exteriores, se presentan las máximas emisiones Fuera de Banda (OOB) del LTE-UE para evitar interferencias, en el caso de recepción portable en interiores se presenta la distancia mínima que debe existir entre el LTE-UE y el receptor TDT para evitar interferencias. Además, se evalúa y cuantifica la mejora en términos de interferencias por usar filtros anti-LTE domésticos y profesionales. Los resultados en este capítulo se presentan de manera genérica por lo que son útiles para todas las tecnologías de TDT basadas en OFDM, tal como: DVB-T/T2, ISDB-T, DTMB e incluso el

1.5 Descripción de la Tesis y Principales Contribuciones

nuevo estándar en transmisiones de TDT ATSC 3.0, que pretende ser el mejor estándar de TDT a nivel mundial. Los resultados presentados en este capítulo son aplicables para red de TDT ya desplegadas o en proceso de despliegue, y son de interés para radiodifusores de televisión, operadores móviles y entidades reguladores.

Capítulo 6 Este capítulo constituye una guía muy importante para la planificación de redes de TDT, no solo para América Latina, sino también para todos aquellos países en los que la TDT esté en proceso de implantación o migración a tecnologías de radiodifusión de segunda generación DVB-T2; y liberación, subasta o adjudicación de las bandas del DD para comunicaciones móviles de cuarta generación LTE.

1.6. Diseminación y Lista de Publicaciones

Revistas Internacionales

- [RI1] **J. Ribadeneira-Ramirez**, G. Martínez, D. Gómez-Barquero y N. Cardona, “Interference Analysis between Digital Terrestrial Television (DTT) and 4G LTE Mobile Networks in the Digital Dividend Bands,” in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 24-34, March 2016..
- [RI2] **J. Ribadeneira-Ramirez**, C. García-Pardo, M. Fuentes, D. Gómez-Barquero y N. Cardona, “Interference Analysis for DVB-T2 Network Planning in Colombia with other Television Broadcasting Technologies,” aceptado en *IEEE Latin America Transactions*.
- [RI3] **J. Ribadeneira-Ramirez**, E. Garro, D. Gómez-Barquero y N. Cardona, “Interference Analysis between ISDB-T and 4G LTE networks in the 700 MHz Band,” preparando para *IEEE Latin America Transactions*.
- [RI4] G. Martínez, N. Cardona, C. García, A. Fórnés y **J. Ribadeneira-Ramirez**, “Spectrum Sharing for LTE-A and DTT: Field Trial of an Indoor LTE-A Femtocell in DVB-T2 service area,” enviado a *IEEE Transactions on Broadcasting*.

Revistas Nacionales

- [RN1] D. Gómez-Barquero, J. López-Sánchez, G. Martínez, **J. Ribadeneira-Ramirez**, E. Garro, C. García-Pardo, M. Fuentes, N. Cardona, “Frequency and Network Planning and Optimization of the Digital Terrestrial Television DVB-T2 Networks in Colombia,” *WAVES*, vol.6, pp.35-49, 2014.

Contribuciones a Recomendaciones de la ITU

- [CR1] ITU-R WP6A contribución 403, presentada a través del gobierno de Colombia, “Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands,” *International Telecommunication Union (ITU)*, 2014.

Descripción Se presentaron medidas de laboratorio para relaciones de protección con canalización a 6 MHz, entre sistemas de televisión digitales DVB-T2 e ISDB-T, y sistemas de televisión digitales DVB-T2 y analógicos NTSC. Además se cuantificó el efecto de los nuevos mecanismos frente a interferencias de DVB-T2.

Participación en Proyectos

- [P1] “Estudios de compatibilidad electromagnética que permitan establecer las condiciones técnicas para el despliegue de las redes DVB-T2 en Colombia identificando las medidas de mayor relevancia que atañen al uso eficiente del espectro para TDT,” *Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia*, 2012.

Descripción Se hicieron medidas de laboratorio para relaciones de protección con canalización a 6 MHz, entre sistemas de televisión digitales DVB-T2 e ISDB-T, y sistemas de televisión digitales DVB-T2 y analógicos NTSC. Se estudió el efecto sobre los márgenes de protección de diferentes parámetros de las señales de TDT. Estos son: tamaño de la FFT, constelaciones rotadas, modulación, codificación y técnicas de PAPR (Ex-tensión activa de la constelación (ACE), Reserva de tonos (TR)).

- [P2] “Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con otros Servicios de Telecomunicaciones en Bandas de Frecuencias Adyacentes para Colombia,” *Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia*, 2013.

Descripción Se realizaron medidas de laboratorio de relaciones de protección entre sistemas digitales de televisión DVB-T2 y sistemas de comunicaciones móviles de cuarta generación LTE. Se analizó el efecto en las relaciones de protección de parámetros de la señal LTE. Los parámetros analizados fueron: Intervalo de guarda, tipo de enlace (Downlink, Uplink), carga de tráfico y ancho de banda.

- [P3] “Elaboración del Plan Técnico de Televisión considerando la transición de la televisión analógica a la digital, el apagón analógico y la proyección de uso de espectro por parte de los operadores del servicio de televisión radiodifundida en Colombia hasta el año 2022,” *Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia*, 2014.

Descripción Se determinó la cantidad mínima de frecuencias necesarias para el despliegue de canales nacionales, regionales y locales en Colombia. Se elaboró la planificación de frecuencias a nivel nacional de Colombia. Se estudió y determinó la planificación de frecuencias en frontera, para lo que se estableció las zonas y distancias de coordinación con todos los países fronterizos de Colombia. Además, se diseño una base de datos centralizada para el manejo de la asignación de espectro de TDT.

Contribuciones a Especificaciones Técnicas Regulatorias

- [CRS1] Contribución a la resolución 4337 de 2013 de la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) de Colombia, “Por la cual se actualizan y

Capítulo 1. Introducción

complementan las especificaciones técnicas aplicables a la red del servicio de Televisión Digital Terrestre (TDT) establecidas en la resolución CRC 4047 de 2012,”

Descripción Se establecieron las condiciones de convivencia entre los sistemas televisión digitales DVB-T2 e ISDB-T, y sistemas de televisión digitales DVB-T2 y analógicos NTSC con canalización a 6 MHz, que comprenden tanto relaciones de protección entre las tecnologías, como estudios de convivencia en escenarios realistas. Además, se establecen recomendaciones para adjudicación de frecuencias en fronteras.

- [CRS2] Contribución a la resolución 419-2014 de 2014 de la Agencia Nacional del espectro (ANE) de Colombia, “Por la cual se adopta el Plan Técnico de Televisión para la planeación de las frecuencias del espectro atribuido al servicio de televisión radiodifundida en tecnología digital,”

Descripción Se desarrolló el plan de frecuencias a nivel nacional y la distribución de frecuencias en fronteras, tanto para la etapa de simulcast como de post-apagón analógico. Se agendó y priorizó la liberación de la banda de 700 MHz que corresponde al primer dividendo digital en América. Además, se elaboró el cronograma de apagón analógico en todo el territorio nacional y se diseñó una base de datos centralizada para gestión del espectro de TDT. También, se analizaron modelos de propagación y se compararon con medidas de campo realizadas en Sudamérica.

Notas de prensa

- [PN1] Se podrán ver contenidos de 3D en vehículos a través de la TDT
(<http://www.abc.es/agencias/noticia.asp?noticia=1323190>)
- [PN2] La UPV pone en marcha un sistema piloto para ver contenidos digitales 3D en vehículos
(<http://www.europapress.es/sociedad/noticia-20121228141748.html>)
- [PN3] Pruebas piloto para emitir TV-3D a través de la TDT
(<http://www.diesl.com/2013/01/02/pruebas-piloto-tv-3d>)
- [PN4] Investigadores de la Politècnica de València ponen en marcha un sistema piloto para poder ver contenidos digitales 3D en vehículos a través de la TDT de segunda generación.
(<http://www.upv.es/entidades/CTT/noticias42333c.html>)

Capítulo 2

Fundamentos

En este capítulo se da una breve descripción de los métodos de planificación de frecuencias más utilizados para sistemas de TDT, se aborda también la problemática de interferencias entre redes de televisión y entre redes de televisión y redes celulares. El resto del capítulo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 2.1 se describen los métodos más habituales de planificación de cobertura. En la Sección 2.2 se describen los métodos y algoritmos de planificación, modelos de propagación y escenarios de despliegue comúnmente utilizados para las redes de TDT. En la Sección 2.3 se presentan los conceptos de interferencias entre redes de televisión. En la Sección 2.4 se presenta la problemática de interferencias entre redes de televisión y redes celulares de cuarta generación 4G LTE. Finalmente en la Sección 2.5 se presentan las conclusiones del capítulo.

2.1. Planificación de Cobertura para Redes de TDT

Es importante diferenciar entre planificación de frecuencias y planificación de cobertura. La planificación de cobertura se realiza una vez que ha sido ya asignada cierta frecuencia a una zona determinada. Para realizar la planificación de cobertura se debe tener en cuenta:

- Tipo de recepción.
- Método de predicción para propagación y difracción de señales radioeléctricas.
- Umbral de campo eléctrico mínimo recibido para la correcta decodificación de la señal.

- Topología de red.
- Orografía del terreno.

2.1.1. Múltiple de TDT

La TDT gracias a su gran eficiencia espectral permite agrupar varios servicios en un solo canal de frecuencia. Desde el punto de vista de planificación, esta característica permite optimizar el uso del espectro radioeléctrico al poder agrupar varios canal de televisión en un único canal radio. En la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 se muestran los valores típicos de tasas binarias requeridas por tipo de servicio y el número de canales que pueden integrar un múltiple, respectivamente. En Sudamérica se utilizará el estándar de compresión de vídeo H.264, que ofrece mayor tasa de compresión comparado con MPEG-4. Además, nuevos estándares de compresión están en desarrollo, este es el caso de H.265/HEVC que ofrecerá aun mayor tasa compresión, y por tanto permitirá incluir más canales por múltiple.

	SD MPEG-2	SD MPEG-4	HD MPEG-4
Generalista	4 Mpbs	2.5 Mbps	6 Mbps
Informativos	3.5 Mbps	2 Mbps	6 Mbps
Cine/Series	4.5 Mbps	3 Mbps	7 Mbps
Deportes	5 Mbps	3.5 Mbps	9 Mbps
Infantiles	3.5 Mbps	2.5 Mbs	5 Mbps
Teletienda/ Auxiliar	2 Mbps	1.5 Mbps	3 Mbps

Tabla 2.1: Valores típicos de tasa binaria según naturaleza de contenidos.

Formato	Codificación	SFN Fija
SD	MPEG-4	9
HD 720p/50	MPEG-4	5
HD 1080i/25	MPEG-4	5
HD 1080p/50	MPEG-4	3

Tabla 2.2: Valores típicos de número de canales por múltiple local en DVB-T2 y codificación MPEG-4. Modulación 64-QAM y codificación 4/5

2.1.2. Topología de Red

En las transmisiones de TDT, existen dos tipos de topología de red mayormente utilizadas. Cada una de las cuales tiene sus propias características y su estudio debe ser abordado de diferente manera.

Redes de Frecuencia Múltiple MFN En la topología MFN cada transmisor de televisión tiene asignado una frecuencia diferente siendo que dos transmisores aledaños no pueden tener asignada la misma frecuencia. En este caso las interferencias deben ser analizadas de manera global, donde todos los demás transmisores son considerados como posibles fuentes de interferencias. Y por ende la cobertura debe ser calculada para cada uno de los transmisores independientemente. La distancia de re-uso de frecuencia es determinada por la distancia en que un transmisor puede utilizar la misma frecuencia que otro transmisor aledaño.

En la Figura 2.1 se muestra un ejemplo de una red de TDT con topología MFN. Donde cada transmisor tiene una frecuencia de funcionamiento única. Las redes de televisión analógica utilizan esta topología de red. Aunque también puede ser utilizada en redes de TDT. Las evaluaciones de interferencias se realizan utilizando las relaciones de protección.

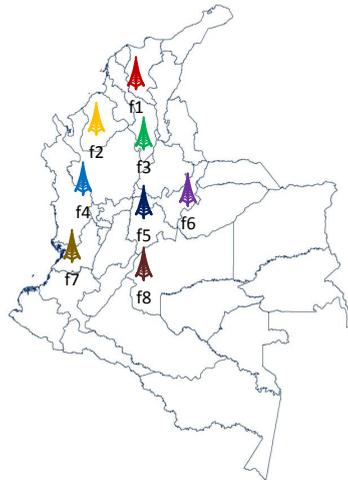


Figura 2.1: Topología de red de múltiples frecuencias MFN

Redes de Frecuencia Única SFN Gracias a las bondades de la modulación Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM), que

Capítulo 2. Fundamentos

introduce un intervalo de guarda para cada símbolo OFDM, es posible asignar la misma frecuencia a varios transmisores aledaños. El cálculo de intensidad de campo eléctrico recibido es la suma de cada una de las señales recibida. De modo que, todas las señales que lleguen con un retardo menor que el intervalo de guarda se consideran constructivas. Por otra parte, aquellas señales que lleguen fuera del intervalo de guarda son consideradas destructivas y degradan la señal.

Por tanto se debe estudiar las interferencias de manera diferente, Por un lado se debe analizar las interferencias intra-SFN, que se producen dentro de la red SFN, por señales que llegan retrasadas un valor mayor al intervalo de guarda. Por otra parte, se deben analizar las interferencias inter-SFN, que son las interferencias que se producen entre dos redes SFNs aledañas. En los dos casos la evaluación de las interferencias se realiza mediante la utilización de las relaciones de protección.

La distancia de re-uso de frecuencia en este caso se determina no para un solo transmisor, sino para todo el grupo de transmisores que comparten una frecuencia. En la Figura 2.2 se presenta un ejemplo de dos redes SFN aledañas, se puede observar que la principal ventaja del uso de redes SFN es que con una sola frecuencia se puede dar cobertura a grandes áreas, lo que conlleva al uso más eficiente del espectro radioeléctrico.

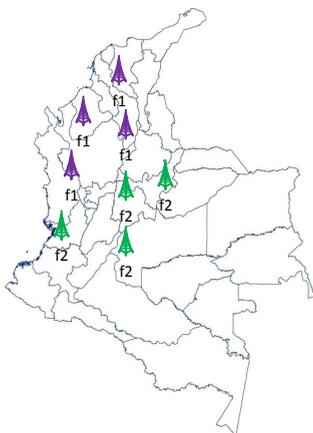


Figura 2.2: Topología de red de frecuencia única SFN

2.1.3. Metodología para Determinar el Modelo de Propagación más Adecuado para Sudamérica a partir de Medidas de Campo

Para determinar el modelo de propagación que mejor se ajusta a las condiciones de Sudamérica, es necesario determinar la correlación entre los valores predichos por los diferentes modelos de propagación y las medidas de campo realizadas en Sudamérica. Se toma como base las medidas de campo realizadas en Colombia al presentar una topografía parecida a los demás países de la región. En [102] se analiza la diferencia entre los modelos de previsión de cobertura y medidas de campo en el Reino Unido.

Como primer paso se utilizó un software profesional para la obtención de los niveles de campo eléctrico recibido, teniendo en cuenta la orografía del terreno. Para lo que utilizó además:

1. Un mapa digital de terreno DTM con resolución de 30 metros
2. Información técnica de las estaciones que corresponden a la cobertura de los puntos medidos, que incluye: diagrama de antenas de transmisión, potencia, altura de antena, coordenadas geográficas, etc.
3. Medidas de campo.

Para obtener la correlación entre las señales se realizaron los siguientes pasos:

1. **Importar archivos de campañas de medidas.** El fichero de medidas importado debe estar compuesto de tres campos, con la siguiente estructura: Coordenada X, Coordenada Y, Valor.
2. **Calcular la cobertura de las estaciones transmisoras.** Se calcula la cobertura bajo las mismas condiciones en las que se han realizado las medidas de campo.
3. **Comparar los valores obtenidos en simulación con sus correspondientes medidas reales.** Se compara los valores teóricos de intensidad de campo obtenidos en simulación a partir de varios modelos de propagación (ITU-R 525, ITU-R 525/526, ITU-R 1546 e ITU-R 1812) y varias configuraciones (métodos de difracción: Deygout 94, forma redondeada, cilindros) con los valores reales obtenidos en medidas de campo, con el objetivo de poder cuantificar el error incurrido en simulación. La herramienta presenta indicadores estadísticos de error como error medio (dB), desviación estándar (dB) y factor de correlación. Además, se puede hacer un análisis donde se representa el comportamiento del modelo

de propagación en función de la distancia entre la estación emisora y el punto de medida.

2.2. Planificación de Frecuencias de TDT

Para la realización del plan de frecuencias se requiere información de:

- Métodos de predicción de propagación para la región dividida en zonas de acuerdo a diferentes condiciones geográficas y climas
- Relaciones de protección para evitar interferencias entre transmisores.
- Escenarios de recepción (fija, portable, móvil)
- Valores de campo eléctrico mínimo en recepción
- Patrón de antenas
- Altitud de las antenas
- Topografía del terreno
- Potencia de radiación

En [75] se especifican los conceptos, métodos de planificación, algoritmos necesarios y pasos a seguir para el desarrollo de un plan de frecuencias:

2.2.1. Definiciones

Se presentan a continuación algunas de las definiciones más utilizadas en planificación de frecuencias.

Frecuencia Disponible Una frecuencia se encuentra disponible cuando, utilizada en una estación de radiocomunicaciones con características específicas, resulta radioeléctricamente compatible con otras estaciones legalmente establecidas, es decir, no provoca interferencias sobre otras estaciones ni recibe la interferencia de ellas.

Asignación (Assignment) Autorización dada por el administrador a una estación radio para usar una radiofrecuencia o canal de radiofrecuencia bajo condiciones específicas.

Adjudicación (Allotment) La entrada de una canal determinado en un plan acordado, adoptado por una conferencia competente, para su uso por una o varias administraciones para un servicio de radiocomunicación terrenal o espacial en uno o más países o zonas geográficas determinados y en las condiciones especificadas.

La mayor diferencia entre estos dos conceptos es que un Assignment corresponde a un transmisor que es especificado en detalle, mientras un Allotment es primordialmente definido por su área geográfica asociada, guiado por la posibilidad de construir SFNs. Ambos conceptos pueden ser usados como objetos básicos para la elaboración del plan de frecuencias.

Área de Servicio (Service Area) El conjunto de todos los puntos de cobertura definen el área de servicio. Por ejemplo, un país puede querer dar servicio a todo el país, solo parte de el o a una ciudad en especial. Con el fin de establecer la relación entre el área de servicio y la adjudicación de una frecuencia (allotment), en el resto del documento a las áreas de servicio se las nombra como áreas de adjudicación. En la Figura 2.3 se presenta un ejemplo de posibles áreas de servicio para Colombia.



Figura 2.3: Áreas de servicio tentativas para Colombia

Redes de Referencia RN (Reference Networks) Son usadas como marcadores de posición que definen una envolvente de interferencias para una adjudicación (allotment).

Configuraciones de Referencia para Planificación RPC (Reference Planning Configurations) Desarrolladas con el objetivo de simplificar la planificación de televisión digital terrestre. La idea es condensar el mayor número de posibles opciones en solo pocas posibilidades representativas. Los parámetros de las RPC deben ser elegidos de manera tal que las combinaciones más importantes de modos de recepción y variantes del sistema puedan ser aproximadas a una de las RPCs. Por ejemplo, en el caso del acuerdo GE06 [33] han sido definidas recepción portable en exteriores y recepción móvil para Terrestrial- Digital Audio Broadcasting. (T-DAB). Así como, recepción fija, portable en exteriores y portable en interiores para DVB-T.

2.2.2. Pasos para Realizar un Plan de Frecuencias

Para realizar un plan de frecuencias se debe definir subtareas que deben ser desarrolladas en forma ordenada y sistemática.

Definir Requisitos Base

En este paso se define todos los requisitos en base a los cuales se asignan las frecuencias o canales de una parte del espectro electromagnético disponible, estos requisitos son:

- La red de referencia RN
- La configuración de referencia RPC.
- Las áreas de servicio (allotments).
- El Modelo de propagación a utilizar.
- Relaciones de protección para la configuración de referencia, que son utilizadas para determinar, la distancia mínima de reuso de frecuencias.
- campo eléctrico mínimo protegido para las áreas de servicio
- la distancia mínima de reuso de frecuencias.
- restricciones adicionales que pueden ser incluidas en el plan de frecuencias, etc.

Evaluar el Cumplimiento de los Requisitos

En esta etapa, se valúa la compatibilidad entre cada par de parámetros de estos requisitos, y si pueden o no compartir una frecuencia. Por ejemplo, se determina el cumplimiento del campo eléctrico mínimo protegido, para lo que se utiliza las relaciones de protección del modo de referencia y el modelo de propagación seleccionado. También se evalúa la distancia mínima de re-uso de frecuencias y el cumplimiento de restricciones adicionales que pueda incluir el plan.

Algoritmo de Asignación de Frecuencias

Los resultados obtenidos en el apartado anterior se alimentan en un algoritmo de asignación de frecuencias, que nos da como resultado el plan de frecuencias final.

2.2.3. Escenarios y Esquemas de Simulación para Analizar Cobertura e Interferencias de los Sistemas de Televisión

A continuación se describirán los escenarios de recepción, la definición de cobertura y el método de cálculo de los niveles de señal, y las relaciones de protección entre los distintos sistemas de televisión.

Escenarios de Recepción

Según la recomendación ITU BT 1368-12 [7], se distinguen los siguientes tipos de recepción :

Recepción Fija en Exteriores Se define como la recepción a través de una antena directiva instalada en un punto elevado de la casa, por lo general la azotea. Para calcular el nivel de campo eléctrico necesario, se supone una altura de la antena receptora a 10 m del suelo.

Recepción Portátil/Portátil Peatonal Se entiende como recepción portátil aquella en la que se usa un receptor portátil pero estacionario, y como recepción portátil peatonal, aquella en la cual se usa un receptor portátil (smartphone, tablet, etc.) a muy baja velocidad. En los dos casos se consideran receptores con antena incorporada o añadida, situados en diversos ambientes (interior, exterior, planta baja o planta alta de un edificio), y con altura de la antena de recepción de 1.5 m. Esta tipología abarca dos clases: recepción portátil en exteriores y recepción portátil en interiores.

Se supone que el receptor portátil no está en movimiento o tiene muy poco movimientos durante la recepción y que objetos de tamaño considerable cercanos a él tampoco se desplazan o se desplazan muy poco. Esto no significa que el canal de transmisión sea estático, más bien se asume que el canal varía lentamente en función del tiempo. Se descartan casos extremos como por ejemplo receptores en habitaciones blindadas.

Para el escenario de recepción portátil peatonal, a menudo es posible mejorar la recepción desplazando el receptor de posición o utilizando una antena más eficiente. Se considera que la cobertura portátil será objetivo en zonas urbanas o suburbanas. Cabe destacar que una diferencia entre recepción portátil y recepción portátil peatonal es la ganancia de antena.

Recepción Móvil Es definida como la recepción de señal por un receptor en movimiento con una antena situada a 1.5 m del suelo. Por movimiento se entienden velocidades que cubren desde una persona andando a un coche o una motocicleta. En algunos países se puede llegar a incluir trenes de alta velocidad, autobuses u otro tipo de vehículos.

Para todos los tipos de recepción es de esperar que habrá diferencias significativas de las condiciones de recepción dependiendo de: la planta del edificio en la que se encuentre el receptor, las pérdidas de penetración de cada edificio, la zona de la habitación dónde se ubique el receptor, la absorción o reflexiones que puede producir cada cuerpo humano, etc.

También cabe esperar que habrá diferencias significativas de las condiciones de recepción dependiendo del entorno dónde se encuentre el receptor (naturaleza del vehículo). Se supone que el receptor móvil de bolsillo y los objetos de tamaño considerable que se encuentren a su alrededor estarán en movimiento durante la recepción. Se descartan casos extremos como por ejemplo encontrarse el receptor en vehículos blindados.

De nuevo, la principal diferencia entre un recepción móvil (e. g. de auto con antena externa) y recepción móvil peatonal, también llamada de bolsillo (smartphone, tablet, etc.), radica en la ganancia de la antena que se asume para cada una de ellas.

2.2.4. Métodos, Técnicas y Modelos de Predicción Aplicables a Sistemas de Radiodifusión de Televisión en las Bandas VHF Y UHF

Hoy en día existe gran variedad de métodos, técnicas y modelos de predicción, a continuación se hará una breve descripción de aquellos que son aplicables a sistemas de radiodifusión de TV en las bandas UHF y VHF.

Modelos de Propagación Aplicables para Redes TDT en Entornos Rurales

Modelo de Propagación ITU-R 525/526 En este modelo determinístico se contemplan las pérdidas por espacio libre (UIT-R 525) y las pérdidas por difracción (ITU-R 526). Particularmente, el modelo contempla dos escenarios:

- Terreno liso
- Obstáculos aislados, donde los obstáculos circundantes no interactúan con el obstáculo en cuestión.

En el primer caso, el modelo ITU-R 526 considera principalmente las pérdidas por difracción en tierra esférica. En el segundo caso, cada obstáculo se considera como aristas independientes en los que se produce el efecto de la difracción. En ambos casos, cada obstáculo se puede modelar como aristas, cilindros, etc.

El modelo de la recomendación ITU-R 526 contempla un tercer tipo de terreno, el terreno ondulado con múltiples colinas, donde ninguna es dominante respecto de las otras. En este caso, la propia recomendación ITU-R 526 recomienda en su lugar, el empleo de la recomendación ITU-R 1546.

Una de las ventajas de este modelo, es su precisión, pues considera el perfil del terreno entre transmisor y receptor para el cálculo de la intensidad de campo en recepción. Sin embargo, este modelo no tiene en cuenta otros mecanismos de propagación como la reflexión en elementos circundantes.

Modelo de Propagación ITU-R P.370 La recomendación ITU-R P.370, propone un modelo de propagación estadístico, basado en curvas obtenidas a través de campañas de medida. Como los demás modelos estadísticos, originalmente se diseñó para proporcionar estimaciones sin necesidad de tener excesivo conocimiento de la cartografía, requiriendo únicamente algunos parámetros geométricos (altura efectiva, tipo de terreno, etc.).

Las curvas de propagación que aporta representan valores de intensidades de campo en ondas métricas y decimétricas, en función de varios parámetros; algunas curvas se refieren a trayectos terrestres y otras a trayectos marítimos. Las curvas de los trayectos terrestres se prepararon sobre la base de datos obtenidos principalmente en climas templados, como los que se dan en Europa y en América del Norte. Las curvas de los trayectos marítimos se prepararon sobre la base de datos obtenidos principalmente en las regiones del Mediterráneo y del Mar del Norte.

Las curvas de propagación representan los valores de las intensidades de campo rebasados en el 50 % de las ubicaciones (dentro de un área de aproximadamente 200 m × 200 m) para distintos porcentajes de tiempo. Corresponden

Capítulo 2. Fundamentos

a diferentes alturas de antenas transmisoras y a la altura de una antena receptora de 10 m. Las curvas de los trayectos terrestres se refieren a un valor de $\Delta h = 50$ m que se aplica generalmente a un terreno medianamente ondulado como el que suele encontrarse en Europa y en América del Norte.

En su implementación, se pueden utilizar términos correctivos geométricos, pero en lo referente a pérdidas, se considerarán despreciables las pérdidas por difracción, por multitrayecto, por gases, por lluvia y por clutter, recopilando las pérdidas en las denominadas del modelo, exceptuando las debidas a propagación por espacio libre.

Este modelo quedó obsoleto siendo sustituido por el ITU-R P.1546, el cual fue el resultado de un largo proceso de correcciones y mejoras sobre la propia ITU-R P.370.

Modelo de Propagación ITU-R 1546 La recomendación ITU-R 1546 [86] está indicada para la predicción de punto a zona de la intensidad de campo en los servicios de radiodifusión, móvil terrestre y móvil marítimo en la gama de frecuencias de 30 a 3.000 MHz y para distancias de 1 km a 1.000 km. Dicha recomendación se emplea principalmente para la planificación de sistemas de radiodifusión.

La recomendación ITU-R 1546 se basa en curvas obtenidas de forma experimental. Dichas curvas se basan en datos obtenidos mediante mediciones y se refieren principalmente a las condiciones climáticas habituales en zonas templadas en las que existen mares fríos y mares cálidos, como por ejemplo, el Mar del Norte y el Mar Mediterráneo. Las curvas de los trayectos terrestres se prepararon con datos obtenidos sobre todo en zonas de clima templado, como es el caso en Europa y América del Norte. La propia recomendación advierte de que si existen zonas de diferente naturaleza a las indicadas, es necesario lograr una caracterización precisa de la propagación radioeléctrica en dicha zona.

En la aplicación del modelo, las curvas provistas por la recomendación son corregidas por frecuencia, terreno circundante, tipo de propagación (tierra, mar o mixto), altura de la antena transmisora y receptora, y variabilidad temporal. Además, el método incluye correcciones por obstrucciones del terreno derivadas del cálculo del perfil del mismo a través del modelo digital del terreno.

La gran ventaja de este modelo es su amplia utilización por todas las entidades implicadas en la planificación de sistemas DVB. De hecho, la Unión de Radiodifusores Europeos, (European Broadcasting Union (EBU)), emplea el modelo ITU-R 1546 para la planificación de las futuras redes DVB-T2.

Sin embargo, presenta la desventaja de que las curvas se propusieron tras realizar medidas en Europa y Norteamérica, presentando falta de información para Sudamérica, Asia y África, por lo que los resultados pueden diferir en entornos considerablemente diferentes a los planteados en la recomendación.

2.2 Planificación de Frecuencias de TDT

La aplicación de la recomendación ITU-R 1546 ha creado una base común para todos los agentes participantes en aspectos de planificación de frecuencias a nivel internacional. Sin embargo, es cierto que cuando se trata de acuerdos más específicos entre países, regiones o empresas se hace necesario disponer de modelos más refinados adecuados al entorno con un mayor nivel de detalle.

Modelo de Propagación ITU-R P.1812 Tras la ITU-R P.1546 que proporciona un método mixto basado en métodos estadísticos y curvas obtenidas a partir de medidas de campo, la ITU-R P.1812 resultó de la idea de desarrollar un modelo físico real que utilice métodos complejos de cálculo de trayectorias teniendo en cuenta los efectos reales de difracción. En la misma recomendación ITU-R P.1812 [96] se hace notar que la recomendación ITU-R P.1812 complementa a la ITU-R P.1546 .

La Recomendación ITU-R P.1812 presenta un método de predicción de la propagación adaptado a servicios terrenales punto a zona en la gama de frecuencias comprendida entre 30 MHz y 3 GHz, cuyo fin es evaluar detalladamente los niveles de señal rebasados durante un porcentaje de tiempo, $p\%$, donde $1\% \leq p \leq 50\%$, y en un porcentaje dado de ubicaciones, p_L , donde $1\% \leq p_L \leq 99\%$.

El método proporciona un análisis detallado basado en el perfil del terreno. Por consiguiente, este método se puede utilizar para predecir:

- El área de servicio y la disponibilidad para un nivel de señal deseado (cobertura).
- La reducción dentro del área de servicio y de la disponibilidad ocasionada por señales no deseadas, co-canal y/o de canal adyacente (interferencias).

El método es adecuado para realizar predicciones en sistemas de radiocomunicaciones que emplean transmisiones terrenales, con trayectos que van desde 0,25 km hasta 3 000 km de longitud, con los dos terminales ubicados a una altura de hasta 3 km sobre el suelo.

El método se describe primero en términos del cálculo de las pérdidas de transmisión básicas (dB) que no se rebasan durante un *porcentaje* % del tiempo para el valor medio de las ubicaciones. Posteriormente, la variabilidad con la ubicación y los elementos de pérdidas debidas a la penetración en edificios se caracterizan estadísticamente con respecto a la ubicación del receptor. Se asume la disponibilidad de perfiles detallados del terreno, obtenidos regularmente de una base de datos digital de las elevaciones del terreno. Si no se dispone de estos perfiles, se debería utilizar la Recomendación ITU-R P.1546 para realizar las predicciones.

Capítulo 2. Fundamentos

A partir de un conjunto inicial de datos, se calculan una serie de parámetros secundarios relacionados con el radio efectivo de la tierra y el efecto de la propagación por conductos, así como otros obtenidos a partir del análisis del perfil del trayecto. El método de predicción de la propagación considera los siguientes elementos:

- Visibilidad directa
- Difracción (abarca los casos de tierra lisa, terreno irregular y subtrayectos)
- Dispersión troposférica
- Propagación anómala (propagación por conductos y reflexión/refracción en capas)
- Variación de la ganancia con la altura debida a la ocupación del suelo
- Variabilidad con la ubicación
- Pérdidas debidas a la penetración en edificios

Comparativa de Modelos ITU-R 1546 y ITU-R 525/526

Para la Zona Terrestre El método ITU-R P.525/526 es aplicable en el caso de Sur América, pues la topología del terreno se ajusta a las contempladas en dicho método determinístico mientras que para el método ITU-R P.1546 [86], que es un método mixto (es decir, añade información obtenida de mediciones reales), presenta la desventaja de que las curvas sobre las que se basa se propusieron tras realizar medidas en Europa y Norteamérica, pero no existe de información para Sudamérica, Asia y África. Con respecto a la aplicación del modelo ITU-R P.1812, se debe tener en cuenta que será válida si no se posee conocimiento en detalle del terreno, por lo que se ha de tener una base de datos de elevación del terreno digital precisa, la propia recomendación indica que es preferible el uso de la recomendación ITU-R P.1546.

En caso de no tener medidas realizadas en campo que nos permitan la calibración, se debe adoptar un modelo conservador para la planificación de frecuencias. Debido a que, es preferible que el modelo indique que se tiene más cobertura (y que por tanto una frecuencia se puede re-utilizar a una mayor distancia), a que muestre una cobertura menor de la real, y se re-utilice la frecuencia en un sitio donde en la práctica habría interferencias. En este sentido, utilizar el ITU-R 1546 con un porcentaje de tiempo del 1 % es más conservador para planificación de frecuencias que el 525/526. Se desaconseja la utilización

de la ITU-R P.370 por ser un modelo obsoleto que fue sustituido por la ITU-R P.1546.

En [103], se realizaron medidas de campo para DVB-T2 para recepción en interiores en España, En nuestro caso, para determinar el modelo de propagación que mejor se ajuste a las condiciones existentes en América del Sur. En la Sección C se realiza un estudio comparativo a través de campañas de medidas, y se obtienen conclusiones al enfrentar las medidas de campo con los resultados obtenidos de la herramienta de simulación para los diferentes modelos. Luego, se determina el modelo que mejor se adapte a las condiciones topográficas del área de medida (terreno montañoso, con valles, colinas y terreno costero mayoritariamente plano).

Para la Zona Marítima Se propone utilizar métodos de propagación aplicados a zona terrestre y obtener en cada caso conclusiones sobre los resultados, Esto debido a que el método ITU-R 1546 contempla este tipo de trayecto basándose en mediciones tomadas tanto para mares fríos como mares cálidos (caso de la zona marítima de los países andinos: Colombia, Ecuador, Perú, y Chile, etc.), mientras que el método ITU-R 525/526 no especifica nada sobre zonas marítimas.

Modelos de Propagación Aplicables para Redes TDT en Entornos Urbanos

Los modelos que mejor se aplican a las condiciones de Sudamérica son los siguientes, ha de tenerse en cuenta que como se mencionó en la Sección 1.2, se requiere planificar las redes en Sudamérica para recepción portable en interiores.

- *Okumura-Hata* [98]
- *Xia-Bertoni* [99]
- *Hata más pérdidas por difracción usando el método de Deygout* [100], que se le denominará a lo largo de la tesis como *Hata+Deygout*.
- *Genérico de pathloss empírico* obtenido por regresión lineal [101]
- Adicionalmente, la recomendación EBU-3348 [36] sugieren la utilización del modelo ITU-R 1546 para la planificación de redes TDT de gran tamaño, tanto para entornos urbanos como entornos rurales).

Modelos de Difracción

A continuación se describen algunos modelos de cálculo de atenuación por difracción utilizados en combinación con los modelos de propagación descritos.

Modelo de Cálculo de Atenuación por Difracción Bullington El método Bullington considera todos los obstáculos presentes como uno solo de mayor tamaño. Para lo que, forma un triángulo tomando como base la línea que une transmisor y receptor, y como altura el punto que une las líneas de vista desde el transmisor y desde el receptor como se puede ver en la Figura 2.4. Este método es claramente muy optimista.

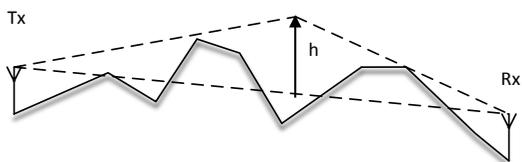


Figura 2.4: Descripción gráfica método Bullington.

Modelo de Cálculo de Atenuación por Difracción Deygout 94 En 1994, Deygout presentó una mejora generalizada del método Deygout propuesto por él mismo en 1966 en el que contempla hasta dos obstáculos. La mejora consistía en plantear un algoritmo recursivo generalizado que permita contemplar el cálculo de las pérdidas por difracción para cualquier número de obstáculos.

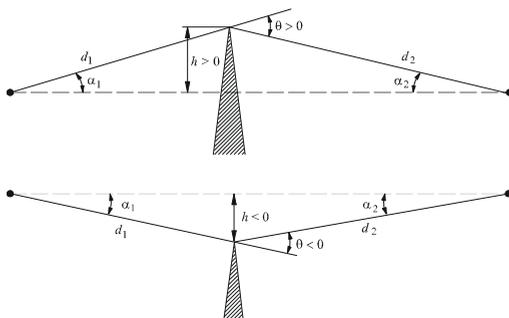


Figura 2.5: Ilustración de un obstáculo modelado como arista en filo de cuchillo [84].

2.2 Planificación de Frecuencias de TDT

Se supone que los obstáculos son del tipo “filo de cuchillo”. En el primer paso se identifica el obstáculo principal en el trayecto, aquel para el que la variable de difracción, denominada V_1 en este caso, toma el valor más alto. Se calculan las pérdidas por difracción $L(V_1)$ que provoca la presencia de este obstáculo en el trayecto total.

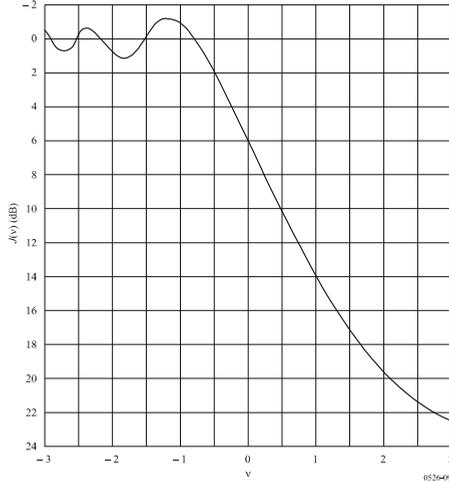


Figura 2.6: Pérdida por difracción en una arista en filo de cuchillo [84].

Si el obstáculo bloquea el rayo ($V_1 > 0$), se definen dos subtrayectos, entre los dos extremos del trayecto principal y el obstáculo. Para cada uno de ellos se identifica el obstáculo principal, se calculan las pérdidas por difracción que produce cada uno de estos obstáculos, $L_D(V_i)$, en el subtrayecto en que está ubicado.

Si alguno de estos dos obstáculos secundarios bloquea el rayo ($V_i > 0$) en el subtrayecto, se utiliza como referencia para definir dos nuevos subtrayectos de forma similar al paso anterior.

El proceso continúa de manera recursiva hasta que no existe ningún obstáculo que bloquee el rayo en ninguno de los subtrayectos resultantes. Las pérdidas que producen los obstáculos que interceptan la primera zona de Fresnel, sin llegar a bloquear el rayo, dentro del mismo subtrayecto, se suman entre sí:

$$L'_D = \sum_i L_D(V_i). \quad (2.1)$$

Modelo de Cálculo de Atenuación por Difracción Delta Bullington

La pérdida por difracción se calcula mediante un método que combina la construcción de Bullington y la difracción en una Tierra esférica. La parte del método correspondiente a la construcción de Bullington amplía la construcción básica de Bullington para controlar la transición entre las condiciones de espacio libre y las obstruidas. Esta parte del método se emplea dos veces: para el perfil real del trayecto y para un trayecto liso de altura cero con altura modificada de la antena, lo que se conoce como altura efectiva de la antena. La altura efectiva de la antena también se emplea para calcular la pérdida por difracción en una Tierra esférica. El resultado final se obtiene mediante una combinación de las tres pérdidas calculadas de acuerdo con el método anterior. Para un trayecto perfectamente liso, la pérdida final por difracción será el resultado del modelo de Tierra esférica.

El método arroja un valor estimativo de las pérdidas por difracción para todos los tipos de trayecto, incluidos los trayectos por mar, por tierra interior y por tierra costera; independientemente de si el trayecto es liso o abrupto, y de si existe visibilidad directa o transhorizonte.

Este modelo es actualmente el propuesto en la ITU-R P.1812 [96].

Mecanismos de Sobrealcance de las Señales en UHF y VHF

La troposfera es la capa de la atmósfera que más afecta las transmisiones de televisión. Sus características físicas influyen notablemente sobre las ondas de radio. Entre estas características tenemos el índice de refracción, el cual varía con la altura y que es el responsable más directo de la curvatura que experimenta la onda transmitida, dando lugar a diferentes tipos de refracción troposféricas [88].

Como se ha comentado, la troposfera causa un efecto de curvatura en el rayo, el cual es más acentuado en las transmisiones de VHF y UHF. Esto es debido a que experimentan una mayor refracción en la troposfera estándar. Uno de los efectos finales es que las ondas de radio que se propagan según un ángulo de elevación pequeño viajaran formando arcos, lo que permitirá mayores alcances.

La atenuación en la troposfera se debe principalmente a cuatro factores:

- La absorción por partículas suspendidas, lluvia, nieve, niebla, etc.
- Absorción por moléculas.
- Dispersión por moléculas y sus colisiones.
- Absorción por sólidos.

Estos efectos de la troposfera dan paso a diferentes aspectos como:

1. Aumento del radio efectivo de la Tierra (las ondas se propagan produciendo un efecto de aumento del radio de la Tierra).
2. Los casos en que la trayectoria de las ondas electromagnéticas alcanzan distancias muy superiores a las previstas teóricamente.
3. La existencia de la súper refracción, que es una de las formas de refracción troposférica, en la cual por condiciones específicas y de carácter aleatorio, en dependencia de las condiciones meteorológicas, se forma lo que es conocido como ductos troposféricos, los cuales producen una serie de reflexiones sucesivas en la superficie terrestre que se extiende hasta distancias bastante grandes.

Túneles (Ductos) Troposféricos

En ITU-R P.834 [89] y ITU-R P.452 [90] se define que, a veces la troposfera puede producir refracción de las ondas de radio. Este fenómeno ocurre cuando sucede una inversión de temperaturas (las capas más altas están más frías y por lo tanto son más densas que las capas bajas, el cambio de temperatura puede ser fácilmente de 10°C o más en 100 metros). La brusca transición entre el frío y el aire caliente, produce que se refracten las ondas de radio en bandas de VHF y UHF, formándose una especie de túnel o ducto troposférico, por donde pueden viajar las señales de VHF y UHF. En algunas ocasiones puede haber múltiples inversiones. Las inversiones de temperatura que producen la refracción o propagación troposférica pueden ocurrir en cualquier día del año, se da principalmente en el océano, pero también puede producirse en la superficie terrestre. Durante una inversión de temperatura las señales son fuertes durante toda la noche y el amanecer, a veces permaneciendo así durante las horas de la mañana. Las condiciones favorables de inversión de temperatura ocurren durante las altas presiones y a la entrada de frentes fríos. También en cualquier día del año cuando el aire es húmedo, caliente y hay niebla, pues el aire más fresco queda atrapado debajo del aire caliente al caer la noche y comenzar a soplar la brisa de un lago o el mar. Un claro ejemplo de existencia de un ducto troposférico es la aparición de señales de televisión de estaciones lejanas que entran con fuerza, a veces, incluso, interfiriendo estaciones locales.

Así pues, según la geografía y el clima de la zona este efecto puede ser más o menos frecuente y fehaciente. En las zonas costeras hay más posibilidad de formación de un ducto troposférico mientras que una zona montañosa se puede combatir este efecto pues las altas montañas taponan estos túneles.

2.2.5. Cómputo de la Intensidad de Campo Requerida en Recepción

En la recomendación ITU BT 1368 [7], para calcular los umbrales de la densidad de flujo de potencia, o de la intensidad de campo equivalente necesaria para asegurar que se superan los umbrales de recepción en un cierto porcentaje de localizaciones, se proponen las siguientes fórmulas según el escenario de recepción:

$$P_n = F + 10\log(kT_0B) \quad (2.2)$$

$$P_{smin} = C/N + P_n \quad (2.3)$$

$$A_a = G + 10\log(1,64\lambda^2/4\pi) \quad (2.4)$$

$$\varphi_{min} = P_{smin} - A_a + L_f \quad (2.5)$$

$$E_{min} = \varphi_{min} + 120 + 10\log(120\pi) \quad (2.6)$$

$$= \varphi_{min} + 145,8 \quad (2.7)$$

Para recepción fija en exteriores:

$$E_{med} = E_{min} + P_{mmn} + C_l \quad (2.8)$$

$$C_1 = \mu \cdot \sigma_t \quad (2.9)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_b^2 + \sigma_m^2} \quad (2.10)$$

Para recepción portable en exteriores y móvil:

$$E_{med} = E_{min} + P_{mmn} + C_l + L_h \quad (2.11)$$

Para recepción portable en interiores y móvil de mano:

$$E_{med} = E_{min} + P_{mmn} + C_l + L_h + L_b \quad (2.12)$$

Donde:

P_n : Potencia recibida del ruido (dBW)

F : Figura de ruido del receptor (dB)

k : Constante de Boltzmann ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ (J/K))

T_0 : Temperatura de referencia ($T_0 = 290$ (K))

B : Ancho de banda del ruido (ancho de banda efectivo de la tecnología de TDT a evaluar)

P_{smin} : Potencia mínima de recepción (dBW)

C/N : Relación portado a ruido requerida por el sistema (dB)

- A_a : Apertura efectiva de antena (dBm^2)
 G : Ganancia de la antena relativa al dipolo de media onda (dBd)
 λ : Longitud de onda de la señal (m)
 φ_{min} : Mínima pfd en la localización del receptor ($\text{dB(W/m}^2\text{)}$)
 L_f : Feeder loss (dB)
 E_{min} : Mínima intensidad de campo equivalente en el receptor ($\text{dB}(\mu\text{V/m})$)
 E_{med} : Mínima intensidad media de campo equivalente en el receptor, valor de diseño ($\text{dB}(\mu\text{V/m})$)
 P_{mmn} : Ruido hecho por el hombre (dB)
 L_h : Pérdidas por altura (al punto de recepción a 1.5 m sobre el piso) (dB)
 L_b : Pérdidas por penetración en edificios o vehículos (dB)
 C_1 : Factor de corrección por localización (dB)
 σ_t : Desviación estándar total (dB)
 σ_m : Desviación estándar a macro-escala ($\sigma_m = 5.5$ (dB))
 σ_b : Desviación estándar por penetración en edificios.
 μ : Factor de distribución, 0.52 para 70 %, 1.28 para 90 %, 1.64 para 95 % y 2.33 para 99 %.

2.2.6. Métodos y Algoritmos de Planificación

Planificación por Adjudicación Geométrica

Las áreas de adjudicación pueden tener formas arbitrarias, dependiendo de restricciones no técnicas como divisiones políticas. Pero, las áreas de servicio asociadas a las asignaciones de frecuencias presentan condiciones muy diferentes, donde la localización de los transmisores y la topografía circundante son factores determinantes para la forma de las áreas de servicio. De esta forma, la planificación entera de la región puede ser cubierta con una red de simples formas geométricas en un plano de 2 dimensiones que no dejen espacios vacíos entre si. El uso de rombos y hexágonos cumplen muy bien con esta función [75]. En la Figura 2.7 se muestra a manera de ejemplo una red de hexágonos que cubre el área de Colombia.

Las frecuencias son asignadas a estas formas geométricas bajo un esquema determinístico, respetando criterios de distancias de re-uso de frecuencias. Estas figuras pueden ser agrupadas en clusters, donde un grupo de frecuencias puede ser utilizado en un cluster y reusado en los demás. Desde un punto de vista práctico, este tipo de asignación no tiene mayor relevancia hoy en día. Sin embargo, La planificación por adjudicación geométrica representa cierto tipo de plan óptimo en el sentido que el uso del espectro es óptimo, pudiendo ser usado para evaluar la eficiencia de otros resultados de planificación.

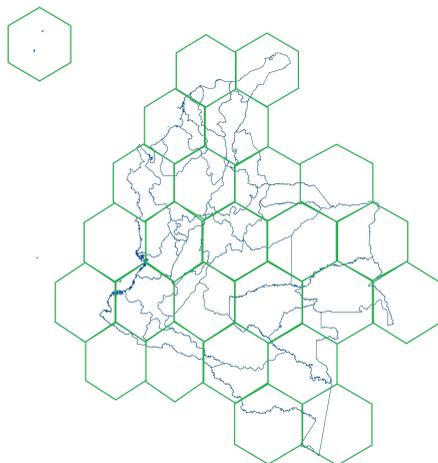


Figura 2.7: Áreas de adjudicación dada en términos de hexágonos para Colombia

Algoritmos Basados en Teoría Gráfica

Un problema de asignación de frecuencias para varias áreas de adjudicación como se muestra en la Figura 2.8, puede ser expresado en función de un gráfico simple en el cual cada polígono está representado por un vértice (Figura 2.9). Donde, dos áreas conectadas en sus bordes no pueden compartir la misma frecuencia.

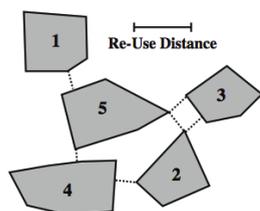


Figura 2.8: Áreas de adjudicación (Allotment) en términos de polígonos simples [75]

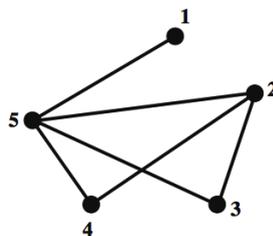


Figura 2.9: Gráfico Simple de las áreas de adjudicación (Allotment) [75]

De tal manera, la tarea de asignar frecuencias es de cierto modo igual al problema de colorear un mapa ([81] y [82]), donde a cada vértice se le asigna un color, siendo que dos vértices conectados por sus bordes no pueden compartir

2.2 Planificación de Frecuencias de TDT

el mismo color. El atributo “color” es representado con un número entero. Se debe cumplir con la restricción de usar el menor número de colores posibles. El número mínimo de colores requerido para un gráfico se denomina número cromático χ del gráfico. Otro parámetro a considerar es el número de las relaciones de adyacencia de los vértices, llamado el grado del vértice κ [75]. Por ejemplo, en la Figura 2.9 el vértice 2 tiene grado $\kappa = 3$.

Coloreado Gráfico Secuencial Se basa en la idea que los vértices con mayor grado κ tendrán una mayor demanda de colores. Por tanto, se debe empezar el proceso de asignación de colores con los vértices de mayor grado, bajo la suposición que para los vértices de menor grado se tendrá mayor libertad para la asignación de colores. La asignación secuencial puede realizarse en orden descendente, empezando en los vértices de mayor grado, o en orden ascendente, empezando en los vértices de menor grado. Es común en la práctica iniciar la asignación con el “color” 0. Se ha comprobado que se tienen mejores resultados utilizando una asignación secuencial descendente, pero ambas posibilidades deben ser analizadas. En la tabla 3 se presenta la asignación de colores para el gráfico de la Figura 2.9 siguiendo una asignación secuencial descendente.

Vértice	5	2	4	3	1
Color	0	1	2	2	1

Tabla 2.3: Resultados asignación secuencial de colores para el gráfico de la Figura 2.9 [75]

El arreglo de vértices de manera ascendente o descendente no son las únicas posibilidades. El ordenamiento llamado “smallest-last” es otra forma de construir la secuencia, aunque a coste de mayor complejidad [104]. Se inicia con una ordenación descendente por el grado de los vértices, luego se toma el último vértice (menor grado) y se lo pasa a una lista auxiliar, este vértice es removido del gráfico principal con todos sus bordes. Así, se tiene otro gráfico secundario en el que se repite el proceso anterior. Este proceso se repite hasta que todos los vértices consten en la lista auxiliar. Luego, el coloreado de los vértices se realiza siguiendo la secuencia de la lista auxiliar.

El utilizar cualquiera de los dos métodos explicados anteriormente, se basa en el hecho que todas las restricciones en términos de adyacencia se cumplen estrictamente. Esto quiere decir que el plan de frecuencias resultante no tiene ninguna interferencia adicional más allá de los niveles aceptados e inevitables.

Gráficos Ponderados El ejemplo de la Figura 2.8 es un ejemplo bastante sencillo en que la decisión se basa en que una frecuencia debe ser asignada o

no. Los problemas reales de asignación de frecuencias no se limitan a simplemente decidir si una frecuencia debe ser asignada o no. Por ejemplo, pueden incluir restricciones de cuanto deben estar separadas dos frecuencias asignadas a dos vértices conectados, o cuando para un conjunto de áreas de cobertura, se debe asignar cierta penalidad en algunas áreas que usen la misma frecuencia. Para este tipo de problemas se utilizan los gráficos ponderados [105], en el que cada borde puede ser provisto de un número que debe ser posteriormente interpretado (Figura 2.10).

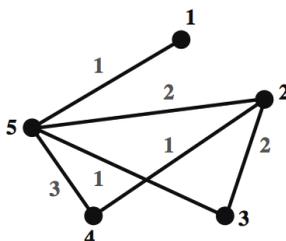


Figura 2.10: Gráfico simple ponderado [75]

Síntesis del Plan de Frecuencias por Optimización Estocástica

Desarrollados para resolver problemas de asignación de frecuencias con alta complejidad, donde el elevado número de restricciones hacen que las estrategias de coloreado pierdan eficacia. Existen varias maneras de aplicar métodos de optimización estocástica. La más sencilla puede ser aplicada al caso de coloreado secuencial, en donde, el orden de selección de los vértices es un factor crucial que determina la calidad de la solución. El algoritmo Great Deluge puede ser utilizado para encontrar una secuencia de vértices [106], que lleve al mínimo número de colores requeridos.

Otra posible aplicación de la optimización estocástica de asignación de frecuencias concierne a la aplicabilidad de la teoría de gráficos. Pues es común, encontrar casos donde el espectro es tan limitado que ninguna de las restricciones puede ser satisfecha exactamente, o los vértices deben cumplir con restricciones completamente diferentes.

La obtención de un eficiente plan de frecuencias para servicios broadcast es un proceso dinámico, en el cual las restricciones pueden variar en el desarrollo del plan. Considerando esto, los algoritmos estocásticos de optimización presentan una gran ventaja con respecto a los métodos gráficos, ya que pueden adaptarse a un ambiente en particular. En la mayoría de los casos se pueden establecer reglas que pueden ser incluidas en un simple algoritmo de optimización que se adapte fácilmente a diferentes escenarios de optimización.

Uno de los mayores problemas de la planificación de frecuencias es la escasez de frecuencias disponibles. Por lo que, los transmisores deben compartir el canal. A pesar de que esto conlleva altos niveles de interferencias mutuas. El objetivo de realizar un plan de frecuencias es reducir las interferencias tanto como sea posible.

2.3. Interferencias entre Redes de Televisión

2.3.1. Relaciones de Protección

La metodología utilizada se ha dividido en dos partes. En primera instancia se evalúan mediante medidas de laboratorio las relaciones de protección frente a interferencias necesarias para realizar estudios de convivencia. En un segundo paso, se realizan ejercicios de planificación con una herramienta software profesional para la planificación de redes de comunicaciones inalámbricas en escenarios realistas.

Medidas de Relaciones de Protección

Las relaciones de protección se definen como el valor mínimo de SIR (Signal-to-Interference Ratio) necesario para asegurar determinado criterio de calidad, medido en dB. Cuanto mayor sea la relación de protección, el sistema es más susceptible a ser interferido y viceversa (cuanto menor es la relación de protección, el sistema es más robusto frente a interferencias). Las relaciones de protección dependen del modo de transmisión y el tipo de recepción. En la presente tesis se consideran condiciones de recepción fija con antena directiva en azotea. El canal se ha modelado como un canal Rice de 21 taps (1 rayo de visión directa y 20 ecos) y Rayleigh para recepción fija en exteriores y portable en interiores, respectivamente.

Los principales parámetros de las señales DVB-T2 evaluados son: Nuevos tamaños de FFT (Fast Fourier Transform) de 16K y 32K para DVB-T2 comparados con la FFT de referencia máxima para DVB-T e ISDB-T de 8K, MODCOD (modulación y tasa de codificación), ancho de banda extendido (en canales de 6 MHz, de 5.71 MHz a 5.83 MHz al usar los modos 16K y 32K extendido), y PP (patrón de portadoras piloto). También se estudió el efecto de la técnica de reducción de la potencia de pico PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) que implementa DVB-T2 conocida como reserva de tonos. La calidad del receptor afecta a las relaciones de protección. En [7] se presentan valores para el 90 percentil de los receptores testeados, con lo que 9 de 10 receptores cumplen con la relación de protección dada, descartando el peor. Para señales DVB-T2 han

sido evaluados un televisor con sintonizador integrado y los dos únicos decodificadores externos STBs (set-top boxes) disponibles en el mercado colombiano. Para señales ISDB-T se han evaluado un receptor profesional y un receptor doméstico. Los valores presentados en el artículo corresponden al receptor con peor desempeño. Mientras para NTSC se ha evaluado un televisor con sintonizador integrado. Se ha comprobado que las señales utilizadas, tanto útil como interferente cumplen con las máscaras espectrales de emisión para cada estándar. El ancho de banda ocupado por la señal varía ligeramente en función la tecnología utilizada. Así tenemos: NTSC 5.75 MHz, ISDB-T 5.57 MHz, DVB-T 5.71 MHz, DVB-T2 modo normal 5.71 MHz y DVB-T2 modo extendido 5.83 MHz. El montaje experimental depende de la tecnología de transmisión a evaluar [7]. La Figura 2.11 muestra el montaje para señales de televisión digitales y la Figura 2.12 para señales analógicas. Para medir las relaciones de protección, se fija la potencia de la señal útil y se realiza un barrido de potencias para la señal interferente. Si se cumple el criterio de calidad definido, se incrementa la potencia de la señal interferente en 0.1 dB y se repite la medida hasta encontrar el valor de SIR en el que el criterio de calidad no se cumpla

Señales de TDT La potencia de la señal digital útil se fija en -60 dBm y se utiliza el montaje de la Figura 2.11 [107]. El criterio de calidad depende de la tecnología:

- Quasi-Error-Free (QEF) para sistemas de primera generación DVB-T e ISDB-T, que consiste en asegurar una tasa máxima de error de BER (Bit Error Rate) de 2×10^{-4} después del decodificador interno, antes del codificador externo [7].
- Picture Failure Point (PFP2) para sistemas de segunda generación DVB-T2, que consiste en asegurar que como mínimo 2 de 3 periodos de 20 segundos consecutivos están libres de errores [36].

En el montaje de la Figura 2.11 el uso de aislador previene que parte de la señal interferente sea reflejada a la salida del generador de la señal útil. El presente trabajo se centra en interferencias co-canal y canal adyacente inmediato superior e inferior, por tanto se ha obviado el uso del filtro paso banda recomendado a partir de los canales $N \pm 3$ [36].

Señales de TV Analógicas La potencia de la señal NTSC útil se fija en -38 dBm utilizando el montaje de la Figura 2.12. Se utiliza como criterio de calidad el método de comparación subjetiva con fuente interferente de referencia sinusoidal [7], el cual consiste en determinar la SIR media experimentada por 5 observadores.

2.3 Interferencias entre Redes de Televisión

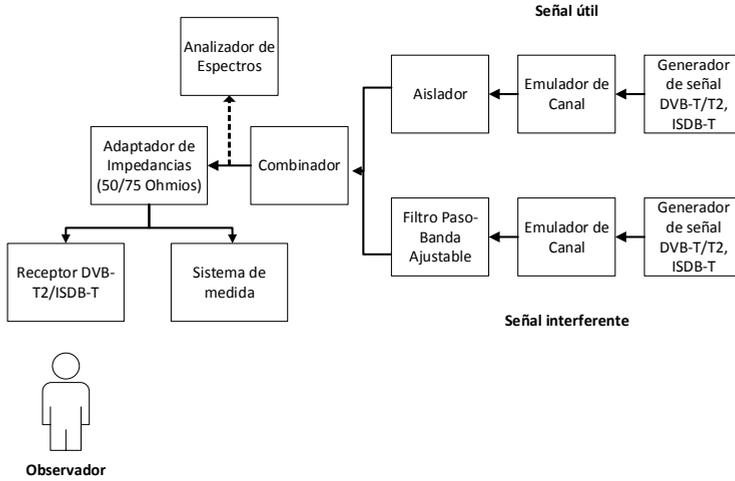


Figura 2.11: Montaje experimental para evaluar señales digitales.

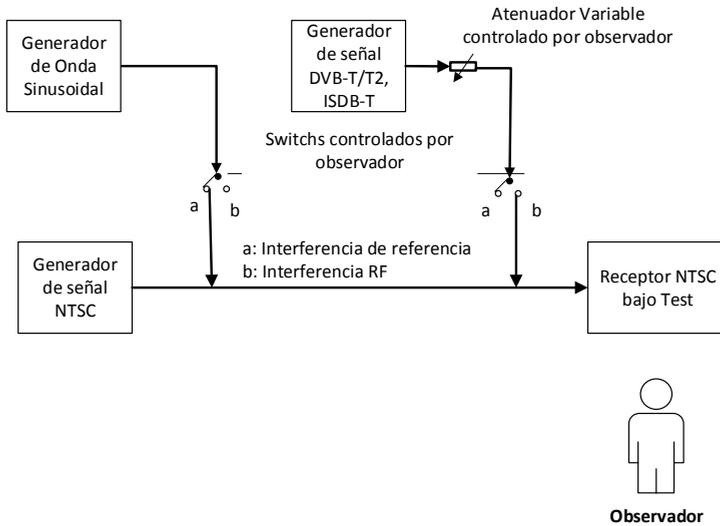


Figura 2.12: Montaje experimental para evaluar señales analógicas.

Instrumentación Empleada Para el montaje experimental se emplearon los equipos descritos a continuación

- SMU 200A Vector Signal Generator
- Receptores DVB-T2 Sony Bravia KDL-32HX757, set-top boxes Transmundial CTM-900HD y Multitech.
- Receptor NTSC Sony Bravia KDL-32HX757
- Receptor Hirakisoft LLP ISDBTB1
- Ranger
- Cables y conectores
- Analizador de vectorial de redes.

2.3.2. Metodología para los Análisis de Convivencia entre Redes de TV

Para los análisis de convivencia se ha utilizado una herramienta software profesional de planificación de redes inalámbricas, cartografía digital con resolución a 90 m e información de distribución poblacional. En cuanto a las redes de televisión, para el caso de Colombia se están desplegando dos redes nacionales DVB-T2, una red pública y una red privada. Se ha tomado como base para el escenario de simulación la información del operador RTVC (Radio y Televisión Pública de Colombia) para su red primaria, la cual consta de 38 transmisores de alta potencia (entre 500 W a 5 kW) que brindan cobertura a las principales ciudades del país. Se asume que la red privada tendrá similar topología. En el caso de Ecuador, se ha utilizado información publicada por el Consejo Nacional de Telecomunicaciones (Conatel). Para el análisis de interferencias entre las redes de televisión digital DVB-T2 (Colombia) e ISDB-T (Ecuador), se han asumido transmisores en frontera, localizados en un radio de 40 km desde la frontera de cada país. Con el fin de analizar todas las posibles interferencias, se ha considerado diagramas de radiación omnidireccional con potencia de transmisión de 5 kW. Las interferencias entre redes de televisión analógica NTSC y digital DVB-T2 se han analizado en un escenario urbano utilizando transmisores colocados de igual potencia de transmisión (5 kW) y patrones de radiación realistas.

2.3.3. Características Espectrales de las Señales de Televisión

Las señales de TDT radiodifundidas deben cumplir con ciertos requerimientos en cuanto a nivel de señal emitida fuera de banda. A estos requerimientos

2.3 Interferencias entre Redes de Televisión

se le denomina máscara RF. La máscara RF es la respuesta que han de tener las señales de TDT a la salida del transmisor. Para lograr dicha respuesta. El cumplimiento de la máscara puede realizarse aplicando un filtrado apropiado, los filtros comerciales de televisión digital utilizados normalmente son de 6 u 8 polos. A mayor número de polos, mayor selectividad del filtro pero a su vez también mayor complejidad, y por tanto mayor coste.

Por otro lado, las máscaras determinan la protección mínima para evitar interferencias entre canales adyacentes para transmisiones digitales y analógicas, donde los transmisores digital y analógico están ubicados en el mismo lugar y son aplicables para casos donde:

- No se utiliza discriminación por polarización entre televisión digital y analógica.
- La potencia radiada por ambos transmisores es la misma (la potencia de pico analógica equivale a la potencia total del transmisor de televisión digital).

Si las potencias radiadas por los dos transmisores no son idénticas, se producirán interferencias, debido a que la respuesta de la máscara está diseñada para transmisores con la misma potencia. Para evitarlas, debe aplicarse una corrección proporcional del siguiente modo:

$$C = ERP_{min}^{ANALOG} - ERP_{max}^{DIG} \quad (2.13)$$

Donde la ERP_{max}^{DIG} y ERP_{min}^{ANALOG} corresponde a la potencia radiada equivalente en digital y analógico, respectivamente. Sin embargo, en la práctica, se producen interferencias entre canales adyacentes, con lo que la solución más utilizada en estos casos es la asignación de frecuencias no adyacentes, lo que equivale a dejar canales de guarda entre distintas tecnologías. Finalmente, en caso de que los transmisores no estén colocalizados habrá que utilizar para la planificación, las relaciones de protección a la hora de evaluar las interferencias en recepción.

Aunque en principio la televisión analógica no se usaba en canales adyacentes, es posible hacerlo con algunas limitaciones. Las máscaras para transmisiones de televisión analógica operando en un canal adyacente, para una misma polarización y en caso de canales de 8 MHz, se pueden ver en la Figura 2.13, aplicables a los sistemas de televisión analógica G/PAL/A2, G/PAL/NICAM, I/PAL/NICAM, K/SECAM, K/PAL y L/SECAM/NICAM [13].

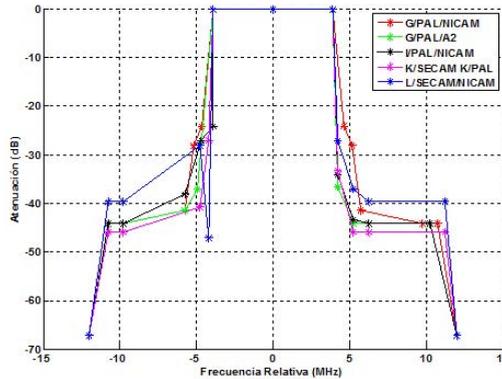


Figura 2.13: Máscara no crítica a 8 MHz para diferentes tecnologías de televisión analógica (no NTSC).

Para el caso particular de televisión digital DVB-T, con canalización a 8 MHz, y para casos denominados como “críticos”, es decir, cuando se transmite con una potencia analógica menor que la digital o existen otros servicios adyacentes, se define la máscara crítica en [13]. En [108], se define también la máscara no crítica común a todas las tecnologías. Ambas máscaras se presentan en la Figura 2.14.

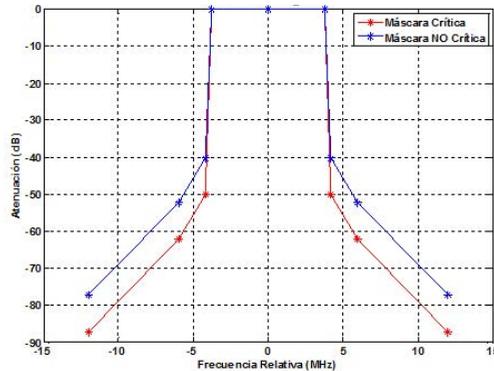


Figura 2.14: Máscara crítica y no crítica para DVB-T con canalización de 8 MHz.

El filtro de máscara crítica viene especificado en [13] para canalización de 8 MHz y se resume en la tabla 2.4, donde la frecuencia relativa viene referida a la frecuencia central del canal.

2.3 Interferencias entre Redes de Televisión

Frecuencia Relativa (MHz)	Atenuación Relativa (dB)
$\pm 3,8$	0
± 4.2	-50.2
± 6	-62.2
± 12	-87.2

Tabla 2.4: Filtro de máscara crítica normalizada para un transmisor DVB-T con potencia de 32.8 dBm con canalización de 8 MHz.

Para canales de 6 MHz, en la literatura todavía no se han definido valores para máscara crítica. Para el caso de canales de 7 MHz en [108] se presentan valores de la máscara crítica, pero corresponden a los valores de la máscara para 8 MHz extrapolados. Por tanto, es posible calcular los valores de la máscara crítica para 6 MHz extrapolando los valores dados para canales a 8 MHz. Para el cálculo de la frecuencia relativa, se ha de tener en cuenta que dichos valores dependen del ancho de banda nominal del canal. Por tanto, para el caso de 6 MHz, los valores dados para un ancho de banda nominal de 7.61 MHz (canal 8 MHz) se escalan a un ancho de banda nominal de 5.71 MHz (canal 6 MHz) como se muestra en la ecuación 2.14.

$$Att_{6MHz} = \frac{5,71}{7,61} \times Att_{8MHz} \quad (2.14)$$

Para el caso de la atenuación relativa, se ha de tener en cuenta que la potencia del canal debe ser medida con un filtro de resolución de 4 kHz, los valores del filtro de máscara crítica calculados para un canal de 6 MHz son resumidos en la tabla 2.5 y se muestran en la Figura 2.15. Cabe destacar que las mismas máscaras son requeridas para transmisiones el estándar de segunda generación DVB-T2.

Frecuencia Relativa (MHz)	Atenuación Relativa (dB)
± 2.9	0
± 3.2	-51.5
± 4.5	-63.5
± 9	-88.5

Tabla 2.5: Puntos del filtro de máscara crítica para un transmisor DVB-T/DVB-T2 y canalización de 6 MHz.

Capítulo 2. Fundamentos

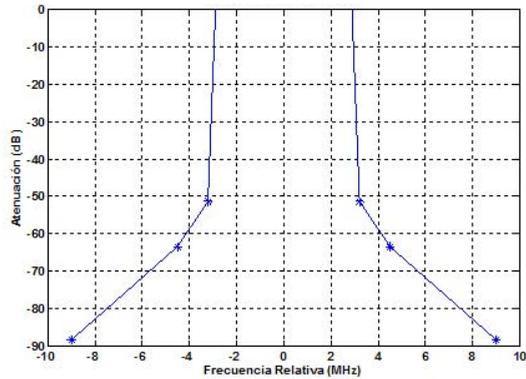


Figura 2.15: Máscara crítica DVB-T/DVB-T2 para canalización de 6 MHz.

A modo de comparación, en la Figura 2.16 se presentan las máscaras críticas para DVB-T/DVB-T2 Y canales de 8, 7 y 6 MHz.

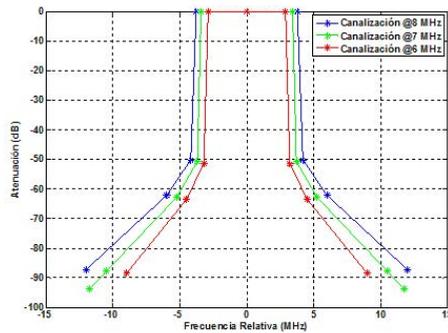


Figura 2.16: Máscara crítica DVB-T/DVB-T2 para canalización de 8, 7 y 6 MHz.

Para el caso de ISDB-T, en [109] se definen las máscaras RF de transmisión. En la Figura 2.17 se muestran las diferentes máscaras: crítica, no crítica y subcrítica en comparación con la máscara crítica de DVB-T2 extrapolada para 6 MHz. El empleo de una u otra máscara en ISDB-T depende de los criterios establecidos en la tabla 2.6 según la clasificación de los transmisores que se puede observar en la tabla 2.7. La figura también muestra cómo la máscara crítica para ISDB-T es más restrictiva que la empleada en DVB-T2 para canales de 6 MHz.

2.3 Interferencias entre Redes de Televisión

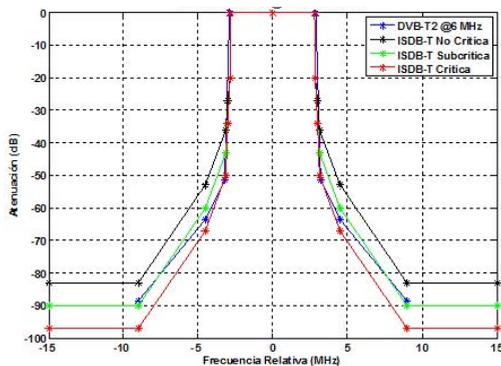


Figura 2.17: Máscaras RF para ISDB-T y DVB-T2 con canalización de 6 MHz.

Clase de estación	A, B y C				Especial		
	< 400m		> 400m		Ausencia canal adyacente	Existe canal adyacente	Ausencia canal adyacente
Tipo de modulación canal adyacente	A	D	A	D			
$P_{dig} < P_{ady} + 3dB$	C	SC	C	C	NC	C	C
$P_{dig} > P_{ady} + 3dB$	C	C	C	C	NC	C	C
A: Analógica D: Digital C: Crítica SC: Subcrítica NC: No crítica							

Tabla 2.6: Criterios para aplicación de las máscaras crítica, subcrítica y no crítica en ISDB-T.

Clases	Máxima potencia (PIRE, kW)	
	Banda VHF alta	UHF
Especial	16	80
A	1.6	8
B	0.16	0.8
C	0.016	0.08

Tabla 2.7: Clasificación de los transmisores para ISDB-T.

2.4. Interferencias entre Redes de Televisión y Redes Celulares

Medidas de Relaciones de Protección

El montaje experimental utilizado para las mediciones se basa en la recomendación ITU-R BT. 2215-4 [107], y se muestra en la Figura 2.18. Cabe señalar que todos los elementos utilizado son dispositivos lineales. Las señales de TDT y LTE se generaron usando un generador de señal digital Aeroflex SGD R & un generador de señales vectoriales SMU 200A con la opción de emulación de canal, respectivamente. Se utilizó además un analizador de red vectorial R & S ZVRE, un filtro paso banda 5BT-375/750-5-O/O, y un aislador MTC C189VFF. La potencia de las señales TDT y LTE fueron medidas en el dominio de la frecuencia.

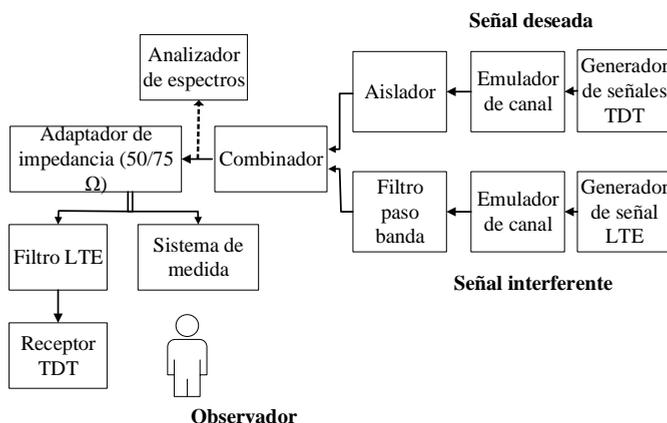


Figura 2.18: Montaje experimental para medidas de relaciones de protección de TDT interferida por LTE

Para la obtención de las relaciones de protección, la señal de TDT deseada se fija a -60 dBm de potencia, y la potencia de señal de interferencia LTE se varía en pasos de 0,1 dB hasta que se logra cumplir el criterio de calidad. Con el fin de modelar la recepción fija en tejado, en las medidas se utilizó un canal de Ricean, mientras que para recepción portable en interiores de TDT se utilizó el modelo de canal Rayleigh. Se han utilizado los canales de 20 que fueron definidos en DVB-T, y también son utilizados para DVB-T2 18. Además, tres televisores y tres decodificadores fueron utilizados en las mediciones. Los resul-

2.4 Interferencias entre Redes de Televisión y Redes Celulares

tados presentados en este documento corresponden al segundo peor receptor. Para cubrir una amplia gama de dispositivos, y no limitar los resultados al peor receptor, por lo general, se proporcionan resultados para el 90 percentil de la los receptores [37].

Las características de los parámetros del sistema de TDT y LTE utilizados en las mediciones se muestran en la Tabla 2.8. Cabe señalar que si se utiliza otra tecnología TDT basada en OFDM, u otro modo de transmisión DVB-T2, los resultados obtenidos serán similares pero añadiendo una corrección en función de la diferencia de la relación portadora a ruido (CNR).

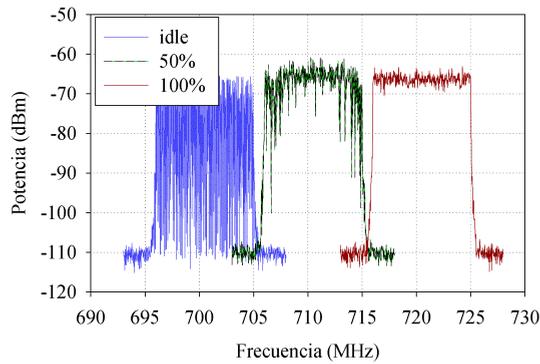
SEÑAL DTT		
Tipo de recepción	PORTABLE EN INTERIORES	FIJA EN EXTERIORES
Estándar	DVB-T2	DVB-T2
Modulación	64QAM	256QAM
Tasa de codificación(CR)	2/3	2/3
Intervalo de guarda (GI)	1/8	1/128
FFT	16KE	32 KE
Bit rate	18.1 Mbps	40.4 Mbps
SNR (dB)	AWGN	13.6
	RICE	16.1
	RAYLEIGH	17.9
Emin (dB μ V/m)	46.6	47.9
Ancho de banda	6 MHz	8 MHz
SEÑAL LTE		
TIPO DE ENLACE	UPLINK (UL)	DOWNLINK (DL)
Multiplex	SC-FDMA	OFDM
FFT	512, 1024, 1536, 2048	512, 1024, 1536, 2048
Intervalo de guarda (GI)	(4.7 μ s el primer símbolo, 5.2 μ s el resto)	(4.7 μ s el primer símbolo, 5.2 μ s el resto)
Ancho de banda	5, 10, 15, 20 MHz	5, 10, 15, 20 MHz
Carga de tráfico	1, 10, 20 Mbps	Idle, 50 %, 100 %

Tabla 2.8: Parámetros de referencia de las señales TDT y LTE

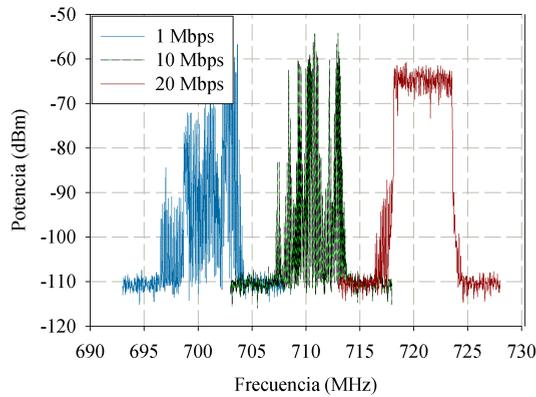
En la Figura 2.19 se muestra el espectro de las señales de LTE-DL y LTE-UL para diferentes cargas de tráfico utilizados en las mediciones. El tráfico DL

Capítulo 2. Fundamentos

se clasifica como: inactivo (que consiste principalmente de señales de sincronización, 50 % de carga (carga media), y 100 % de carga (todos los resource bloks utilizados de forma continua). El tráfico LTE-UL se clasifica como: 1 Mbps (carga ligera, donde se utilizan sólo un pequeño número de resources bloks), 10 Mbps (carga media), y 20 Mbps (alta carga). Cabe señalar que las señales LTE cumplen con las máscaras de emisión LTE-UE y LTE-BS definidos en [110] y [111], respectivamente, y detallados en la Sección 2.4.2.



(a)



(b)

Figura 2.19: Espectro a) Downlink y b) Uplink de señales LTE con 10 MHz de ancho de banda y diferentes cargas de tráfico.

2.4 Interferencias entre Redes de Televisión y Redes Celulares

En las mediciones se han evaluado dos tipos de filtros anti-LTE, domésticos y profesionales. Los filtros domésticos son aquellos que se ubican en la entrada del receptor de TDT, y son resonadores cerámicos (2 filtros domésticos para la banda de 800 MHz) o filtros LC (todos los demás). Los filtros profesionales son filtros de cavidades pensados para ser utilizados en mástiles de antenas comunitarias. El rendimiento de un filtro se caracteriza por su nivel de rechazo a una frecuencia dada. En la Figura 2.20 se muestra la respuesta en frecuencia medida para los 8 diferentes filtros utilizados en las mediciones.

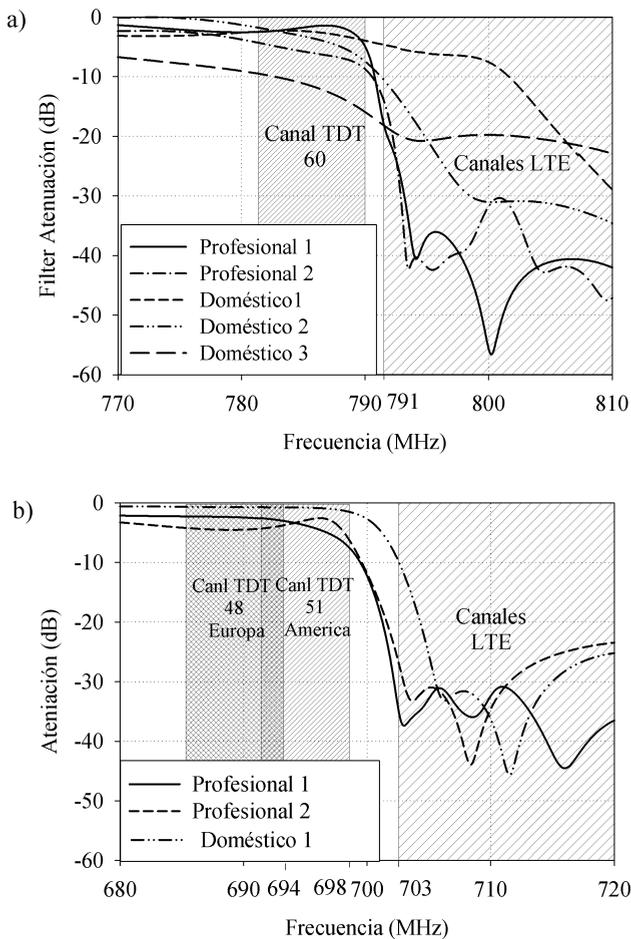


Figura 2.20: Filtros anti-LTE utilizados para a) banda 800 MHz, b) Banda 700 MHz

2.4.1. Escenarios de Coexistencia para Redes TDT y Redes 4G LTE

Los escenarios de convivencia se pueden clasificar en función del tipo enlace interferente LTE: Enlace uplink (LTE-UL) o downlink (LTE-DL), y el tipo de recepción TDT: fija en exteriores, portable de interiores, o móvil. Cuando el LTE-DL es el enlace interferente, el peor caso es cuando la estación base LTE (LTE-BS) está cerca de la antena de TDT en azotea, y está orientada en la misma dirección que la estación de televisión. El escenario de recepción portátil en interiores no es tan crítico, debido a que la señal interferente experimenta una pérdida adicional por penetración en paredes.

Cuando el LTE-UL es el enlace interferente, el peor caso se da para recepción fija en azotea, cuando el equipo de usuario LTE (LTE-UE) está al aire libre y relativamente cerca (suponiendo 10 m altura de la antena, distancia de separación horizontal entre el LTE-UE y la antena de TDT de 22 m y tomando en cuenta la discriminación vertical de la antena del receptor TDT [45]) y en la línea-de-visión (LOS) con la antena de TDT. Para recepción portátil en interiores, el peor caso es cuando el LTE-UE está en la misma habitación que el receptor de TDT. En estos escenarios, el peor de los casos implica que el LTE-UE transmite con la potencia máxima posible (23 dBm).

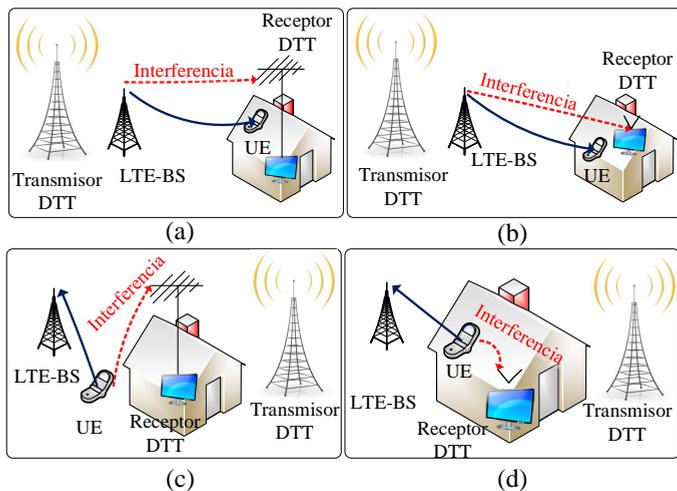


Figura 2.21: Escenarios críticos de coexistencia entre señales TDT y LTE

En la Figura 2.21 se presentan los peores casos de coexistencia, estos implican que el receptor de TDT está en el borde del área de cobertura, y la señal

útil recibida de TDT está justo por encima del umbral.

2.4.2. Máscaras Espectrales para Señales LTE 4G

El espectro de salida de un LTE-UE está compuesto por tres componentes; el ancho de banda del canal, las emisiones fuera de banda OOB y el dominio de las emisiones espurias, tal como se muestra en la Figura 2.22.

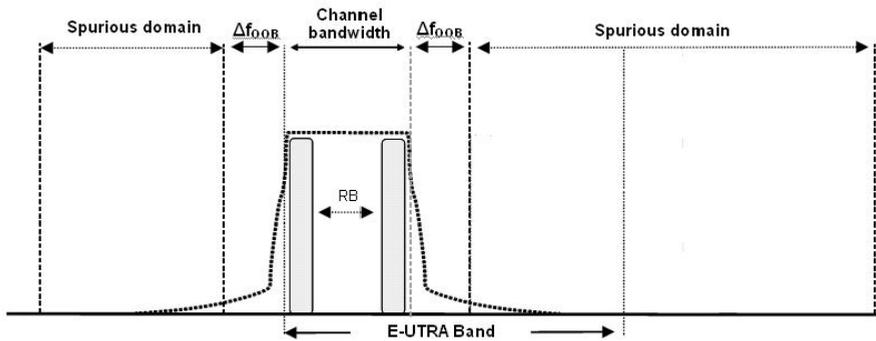


Figura 2.22: Espectro RF de un transmisor LTE-UE [110].

Ancho de Banda Ocupado Definido como el ancho de banda que contiene el 99 % de la potencia media total integrada del espectro de transmisión del canal asignado. El ancho de banda ocupado, para todos los posibles anchos de banda de transmisión (RB) debe ser menor que el ancho de banda teórico total (1.4, 3, 5, 10, 15 ó 20 MHz). Se considera que el 90 % del ancho de banda teórico total contiene el 99 % de la energía, i.e. (1.26, 2.7, 4.5, 9, 13.5, 18 MHz), respectivamente.

Emisión Fuera de Banda (OOB) Las emisiones fuera de banda son emisiones indeseadas situadas inmediatamente adyacentes al canal asignado, resultantes del proceso de modulación y no-linealidades del transmisor, excluyendo emisiones espurias. El límite definido para estas emisiones se expresa en términos de máscara de emisión espectral. La máscara de emisión espectral del transmisor aplica a frecuencias situadas en el rango $\pm\Delta f_{OOB}$, comenzando por el borde del ancho de banda Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) asignado; E-UTRA se define como la interfaz radio de LTE. La potencia de cualquier transmisor LTE no puede exceder los niveles definidos en la tabla 2.9 y la Figura 2.23 [110].

Límite de emisión espectral (dBm) / Ancho de banda					
Δf_{OOB} (MHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	BW de la medida
$\pm 0-1$	-15	-18	-20	-21	30 kHz
$\pm 1-2,5$	-10	-10	-10	-10	1 MHz
$\pm 2,5-2,8$	-10	-10	-10	-10	1 MHz
$\pm 2,8-5$	-10	-10	-10	-10	1 MHz
$\pm 5-6$	-13	-13	-13	-13	1 MHz
$\pm 6-10$	-25	-13	-13	-13	1 MHz
$\pm 10-15$		-25	-13	-13	1 MHz
$\pm 15-20$			-25	-13	1 MHz
$\pm 20-25$				-25	1 MHz

Tabla 2.9: Máscara de emisión espectral general E-UTRA.

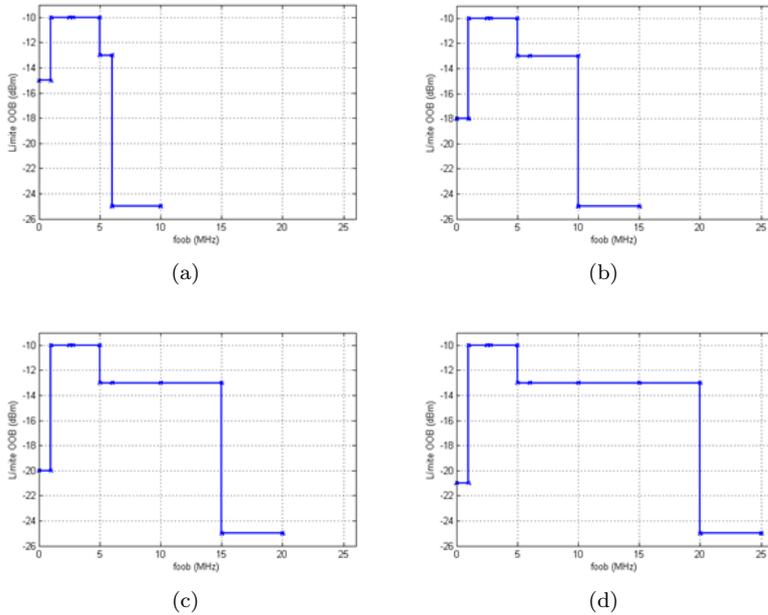


Figura 2.23: Máscara espectrales E-UTRA (frecuencias positivas), para ancho de banda de 5 MHz (a), 10 MHz (b), 15 MHz (c) y 20 MHz (d).

Adjacent Channel Leakage Ratio (ACLR) El ACLR es la relación entre la potencia de una señal centrada en el canal asignado y la potencia de la misma señal centrada en un canal adyacente, como se puede ver en la Figura 2.24.

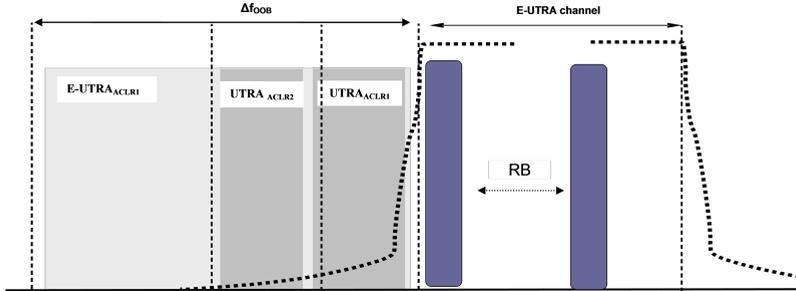


Figura 2.24: Requisitos de ACLR para para LTE [110]

2.5. Conclusiones

En este capítulo se han presentado los conceptos más importantes para planificación de cobertura y frecuencias. Además, se introdujeron conceptos para: interferencias entre redes de TDT y redes de televisión analógica que deben coexistir durante el periodo de simulcast, interferencias entre redes de TDT presentes en Sudamérica, e interferencias entre redes de TDT y redes LTE debido a la inclusión de LTE en las bandas del dividendo digital.

Uno de los mayores problemas de la planificación de frecuencias es la escasez de frecuencias disponibles. Por lo que, los transmisores deben trabajar en frecuencias adyacentes, a pesar de que esto conlleve cierto nivel de interferencias mutuas. El objetivo de realizar un plan de frecuencias es reducir dichas interferencias hasta un nivel que se considere aceptable. Con respecto a la planificación de frecuencias en territorios extensos, el método comúnmente utilizado es la planificación por adjudicación geométrica, que divide el área total en áreas de adjudicación que pueden tomar formas arbitrarias. Por otro lado, los algoritmos de asignación de frecuencias más utilizados son los algoritmos basados en teoría gráfica y síntesis del plan de frecuencias por optimización estocásticas. En los dos casos, la obtención de un eficiente plan de frecuencias para servicios de radiodifusión es un proceso dinámico, en el cual las restricciones pueden variar en el desarrollo del plan.

Para realizar la planificación de frecuencias, a nivel nacional se debe determinar: las áreas de adjudicación, tamaño máximo de las redes SFN, y distancias de reuso de frecuencias; a nivel internacional, se debe tener en cuenta

Capítulo 2. Fundamentos

además zonas de coordinación, distancia de coordinación y restricciones en el uso de frecuencias debido a convenios bilaterales entre los países, Luego con los parámetros y restricciones, se alimenta al algoritmo de planificación de frecuencias seleccionado. Uno de los puntos más importantes para la realización del plan de frecuencias es la adopción de un modelo de propagación adecuado al escenario en que serán desplegadas las redes de TDT, el modelo de propagación más comúnmente utilizado es el ITU-R 1546, que se basa en curvas obtenidas de manera experimental a través de mediciones de campo. La gran desventaja de este modelo es que las curvas fueron propuestas tras realizar mediciones en Europa y Norteamérica, por lo que los resultados pueden diferir bastante en entornos considerablemente diferentes a los presentados en la recomendación. Este es el caso de Sudamérica que presenta condiciones diferentes a las de Europa y Norteamérica. Otros modelos de propagación aplicables a TDT son: ITU-R 525/526, ITU-R 370, P.1812. En todos los casos no se cuenta con información específica para Sudamérica. Por lo que, se debe definir el modelo de propagación que más se ajuste a las condiciones presentes en la región.

Debido a las características de la modulación OFDM utilizada en los sistemas de TDT, es posible formar redes de frecuencia única SFN, en las que todos los transmisores transmiten el mismo contenido en la misma frecuencia (canal RF) de manera sincronizada en el tiempo, lo cual, conllevan al uso más eficiente del espectro radioeléctrico. En cada caso se deben evaluar tanto las interferencias intra-SFN, como inter-SFN. Las interferencias intra-SFN, son las interferencias producidas dentro de la misma red, por señales que llegan con un retraso mayor que el intervalo de guarda. Por otra parte, las interferencias inter-SFN son las interferencias que se producen entre redes SFN aledañas.

Para evaluar determinar el nivel de interferencias que pueden soportar las redes, se utilizan las relaciones de protección, que se definen como la diferencia entre la señal útil y la señal interferente que aseguran determinado criterio de calidad.

Por otra parte, las señales de televisión digital deben cumplir las máscaras espectrales de transmisión definidas para cada tecnología. Las máscaras espectrales se dividen en no críticas, subcríticas y críticas, siendo que se utiliza una u otra dependiendo del escenario en que se despliegan los transmisores. El cumplimiento de las máscaras asegura la no interferencia en canales adyacente para casos concretos i.e. cuando los transmisores emiten con la misma Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE), están colocalizados y tienen la misma polarización. Si estas condiciones no se cumplen, el cumplimiento de las máscaras espectrales no aseguran la no interferencia en canales adyacentes, por lo que interferencias sobre los canales de televisión aledaños ocurrirán.

Además, los transmisores de comunicaciones móviles LTE, al igual que los transmisores de TDT deben cumplir con las máscaras espectrales determinadas

para esta tecnología. Se debe estudiar las posibles interferencias sobre las redes de TDT debido a la inclusión de redes 4G LTE en dividendo digital (Banda de 700 MHz y 800 MHz en Europa, y banda de 700 MHz en América). Para la banda de 800 MHz en Europa, el caso crítico se da para enlace LTE-DL y recepción fija en exteriores. Para la banda de 700 MHz, el caso crítico en Europa es para LTE-UL como enlace interferente y recepción fija en exteriores, mientras que para Sudamérica el caso crítico se da para el enlace LTE-UL y recepción portable en interiores.

El comportamiento de un transmisores LTE, desde el punto de vista de interferencias a los canales adyacentes, se define mediante el ACLR, que es la relación entre la potencia de una señal centrada en el canal asignado y la potencia de la misma señal centrada en un canal adyacente; a partir de donde se obtienen las emisiones fuera de banda OOB, que son las emisiones indeseadas situadas inmediatamente adyacentes al canal asignado. Si dichas emisiones sobrepasan los límites establecidos, se presentarán interferencias en los canales adyacentes. Pero, estos límites tampoco han sido definidos para transmisiones TDT trabajando en los canales inmediatos adyacentes a señales LTE. Para mitigar interferencias sobre las redes de TDT se ha propuesto el uso de filtros anti-LTE o el utilizar los últimos canales de la TDT como canales de guarda. Esta última opción implica un uso poco eficiente del espectro radioeléctrico.

Capítulo 3

Planificación de Frecuencias de TDT

En este capítulo se aborda la planificación de frecuencias para TDT, a nivel internacional y nacional de los países de Sudamérica. En primer lugar, se debe realizar la planificación a nivel internacional para luego planificar las frecuencias a nivel nacional. La planificación de frecuencias se aborda para servicios de cobertura nacional, regional y local.

En el caso de planificación de frecuencias a nivel internacional, el escenario resulta complejo debido a que la asignación de espectro entre países fronterizos se rige por convenios entre los países involucrados. Normalmente para radiodifusión de televisión analógica se asignaban los canales pares para un país e impares para el otro, siempre y cuando no haya injerencia de un tercer país. Estos convenios deben revisarse para la implementación de la TDT, y de ser necesario deben ser modificados para optimizar el uso del espectro radioeléctrico. Se debe recordar que este proceso es dinámico y bilateral por lo que, es evidente que se debe llegar a un acuerdo entre los países en función de sus propias necesidades.

Para la planificación de frecuencias a nivel nacional, se tomó como referencia la planificación de frecuencias para un país en concreto (Colombia), aunque la metodología utilizada pueden ser fácilmente extrapolada a los demás países Sudamericanos. Se debe tener en cuenta que para los países suficientemente grandes, se pueden utilizar todas las frecuencias disponibles en el interior del país, pero no en las zonas fronterizas, donde es imprescindible una planificación donde solo ciertas frecuencias estén disponibles para cada país.

Un punto importante a tener en cuenta para la planificación de frecuencias a nivel nacional e internacional, es determinar áreas de adjudicación adecuadas.

Desde el punto de vista de optimización del espectro radioeléctrico, el resultado óptimo se obtiene cuando se determinan las áreas de adjudicación en función del tipo de cobertura (nacional, regional o local). Por lo que para cada ámbito de cobertura se determinan diferentes áreas de adjudicación. Además, es indispensable determinar zonas de coordinación en las que incidentalmente pueda llegar la señal de un país a otro, distancias de coordinación para cada zona de coordinación e intensidad de campo eléctrico mínimo a proteger dentro de la distancia de coordinación..

El resto del capítulo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 3.1 se presentan los parámetros utilizados para la planificación de frecuencias. En la Sección 3.2 se aborda la planificación de frecuencias a nivel internacional de Sudamérica. En la Sección 3.3 se investiga la planificación de frecuencias para Colombia.

3.1. Parámetros Utilizados para el Plan de Frecuencias

Para la elaboración del plan de frecuencias se debe definir:

- El modelo de propagación.
- La red de referencia.
- Las configuraciones de referencia que condensan el mayor número de posibles opciones de configuración en solo pocas posibilidades representativas.

Para más detalles, ver la Sección 2.2.

3.1.1. Elección del modelo de propagación

Con el fin de ofrecer mayor homogeneidad no solo a nivel de Sudamérica, sino también a nivel mundial. Se utilizó el modelo de propagación ITU-R 1546 [86], por ser el de uso más extendido. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el modelo de propagación que mejor se ajusta a las medidas de campo realizadas en Colombia, es el modelo ITU-R 525 e ITU-R 525/526 con configuraciones de atenuación por difracción forma redondeada y subpath de atenuación fina (Anexo C). Por otra parte, se debe también tener en cuenta que debido a la gran diversidad topográfica de Sudamérica, las medidas realizadas pueden no ser representativas.

3.1 Parámetros Utilizados para el Plan de Frecuencias

3.1.2. Definición de la Configuración de Referencia RPC

El tipo de recepción predominante en Sudamérica es la recepción portátil en interiores. Por tanto, las configuraciones de referencia RPC fueron definidas para este tipo de recepción. Con el fin de representar la mayor cantidad de posibles configuraciones, solo los parámetros más representativos fueron definidos y son mostrados en la Tabla 3.1.

Las RPC elegidas son las actualmente usadas en Sudamérica. Para ISDB-T se eligió un tamaño de FFT de 8k, que es el máximo ofrecido por el estándar. Por otro lado, gracias a la mayor robustez de DVB-T2, es posible elegir un tamaño de FFT mayor 16K o 32K, además de hacer uso de la técnica ancho de banda extendido. Con el fin de ofrecer capacidad suficiente para transmitir contenido de alta definición se eligió en los dos casos modulación 64 QAM. Con tasas de codificación de 3/4 y 2/3 para ISDB-T y DVB-T2, respectivamente. El intervalo de guarda para los dos casos es de 1/8, lo que permite una mayor distancia SFN para las redes DVB-T2. La configuración de referencia elegida para DVB-T2 mejora la cobertura con respecto a ISDB-T, esto debido a que DVB-T2 requiere 4.9 dB menos de CNR para recepción portable en interiores.

SEÑAL TDT			
Estándar		ISDB-T	DVB-T2
Modulación		64QAM	64QAM
Tasa de codificación(CR)		3/4	2/3
Intervalo de Guarda (GI)		1/8	1/8
FFT		8K	16KE
Tasa Binaria		18.25 Mbps	18.1 Mbps
Distancia SFN		60 km	90 km
SNR (dB)	AWGN	20.1	13.6
	RICE	21.1	16.4
	RAYLEIGH	22.8	18.2
Emin portable en interiores (dB μ V/m)		79.9	70
Ubicaciones %		95	95
RP planif. interna (Rayleigh)		23	19
RP fronteras(Rayleigh)		22	17
Ancho de Banda		6 MHz	6 MHz

Tabla 3.1: RPCs utilizados en la síntesis de plan de frecuencias.

3.1.3. Definición de la Red de Referencia RN

Para la síntesis del plan de frecuencias se utilizó una red de referencia abierta como se muestra en la Figura 3.1 y se describe en la Tabla 3.2. La principal razón para seleccionar una red abierta, obedece a la necesidad de establecer el peor de los casos, esto es con una red de referencia que no presente discriminación de antena. La separación permitida entre transmisores es de 90 km y 60 km para DVB-T2 e ISDB-T, respectivamente. La elección de la separación es motivada por la máxima separación permitida para la configuración de referencia mostrada en la Tabla 3.1. Los valores de potencia y altura de antena para los transmisores, fue elegida como la media de la potencia de los transmisores planeados en Colombia. Es de esperarse que el rango de potencias para los demás países sea equivalente. Los valores presentados en la Tabla 3.1 son para recepción portable en interiores, el utilizar diferentes tipos de recepción, por ejemplo recepción fija en exteriores, los requerimientos en términos de CNR , E_{min} y relaciones de protección se ven disminuidos. Esto a su vez influye en la planificación de frecuencias en términos de distancias de reuso.

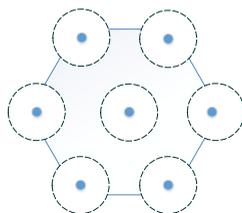


Figura 3.1: Red de referencia RN

Parámetro	Valor
Tipo de Red	Abierta
Distancia entre transmisores	60 km
Altura efectiva	150 m
Potencia Tx central	100 W
Diagrama Tx central	Omnidireccional
Potencia otros Tx	1 kW
Diagrama otros Tx	Omnidireccional

Tabla 3.2: Parámetros de la red de referencia

3.1.4. Distancia de re-uso

Se define como la distancia a la que una misma frecuencia puede ser reasignada a otra zona de adjudicación. Puede ser calculada a partir de la red de referencia, para lo cual se ubicaron dos redes de referencia a una distancia inicial de 100 km, luego se calculó la potencia recibida desde cada transmisor a todos los puntos entre las dos redes, con la ecuación 3.1.

$$P_{Rx_{ij}} = P_{Tx_{ij}} - L_{prop} + G_{ant}, \quad (3.1)$$

donde, $P_{Rx_{ij}}$ es la potencia recibida en cada punto desde el transmisor i de la red j en dBm , $P_{Tx_{ij}}$ es la EIRP del transmisor i de la red j (dBm), L_{prop} son las pérdidas de propagación calculadas con el modelo de propagación ITU-R 1546 [86] y G_{ant} es la ganancia de la antena receptora (9.15 dBi para recepción fija y 2.15 dBi para recepción portable [41]). Se define entonces la potencia total útil ($P_{Rx_{util}}$) como la suma de potencias de todos los transmisores desde la red $j = 1$ y la potencia interferente ($P_{Rx_{int}}$) como la suma de potencia de los transmisores de la red $j = 2$. Luego, se determinaron los puntos donde existe interferencias con la ecuación 3.2.

$$P_{Rx_{int}} > P_{Rx_{util}} - RP. \quad (3.2)$$

Donde, RP es la relación de protección para cada configuración de referencia (ver tabla 3.1). La distancia entre las dos redes de referencia se redujo en saltos de 10 m y se volvió a realizar los cálculos, hasta que se encontró al menos un punto con interferencia.

Las distancias de re-uso calculadas para las diferentes tecnologías utilizadas en Sudamérica se resumen en la Tabla 3.3. Se debe notar que DVB-T2 permite disminuir las distancias de re-uso de frecuencias, gracias principalmente a su mayor robustez.

Ámbito	Tecnología	Distancia re-uso (km)
Nacional	DVB-T2	66
	ISDB-T	70
Fronteras	Países con DVB-T2	65
	Países con ISDB-T	69

Tabla 3.3: Distancias de re-uso de frecuencias para Sudamérica

3.2. Nivel de Sudamérica

El objetivo principal de la planificación internacional es determinar que frecuencias pueden ser usadas por cada país en sus fronteras. Se debe asegurar que el nivel de interferencia de un país sobre otro este bajo un nivel que se considere aceptable. Se plantea como escenario base, la planificación de frecuencias en las fronteras de Colombia, para luego abordar la planificación de frecuencias para las fronteras de todos los países de Sudamérica. La elección de la frontera entre Colombia y Ecuador es representativa en el sentido que DVB-T2 e ISDB-T deben coexistir.

3.2.1. Determinación de las Zonas de Coordinación

Es necesario para cada frontera entre cada país determinar zonas de coordinación, donde ciertas frecuencias serán asignadas a cada zona de coordinación. Para el análisis de las zonas de coordinación, se debe determinar los lugares en que se sobrepasa el campo eléctrico protegido. El campo eléctrico protegido es la intensidad máxima de campo eléctrico que puede sobrepasar la frontera sin causar interferencias, y puede ser calculado con la ecuación (3.3). El campo eléctrico protegido para recepción portable en interiores es de $57,9dB\mu V/m$ y $53dB\mu V/m$ para países que usan DVB-T2 e ISDB-T, respectivamente. En caso de utilizar otro tipo de recepción, por ejemplo recepción fija en tejado, el valor de campo eléctrico protegido será más restrictivo (valor menor). Esto debido a que se incrementa la cobertura y por ende las posibles áreas con interferencias.

$$E_{protDVB-T2} = E_{minISDB-T} - RP_{ISDB-T} \quad (3.3)$$

En 3.3, $E_{protDVB-T2}$ es el campo eléctrico de DVB-T2 que puede ingresar en para países que usan ISDB-T, $E_{minISDB-T}$ es el campo eléctrico mínimo requerido para ISDB-T, RP_{ISDB-T} es la relación de protección para ISDB-T interferida por DVB-T2, respectivamente. El calculo de campo eléctrico protegido ISDB-T puede ser realizado de manera análoga. Para el cálculo se utilizaron los valores de la Tabla 3.1. Después, con la ecuación 3.4 se puede calcular las pérdidas de propagación admitidas. Finalmente, utilizando el modelo de propagación ITU-R 1546 se obtienen distancias de coordinación de 16 km y 21 km para países con DVB-T2 e ISDB-T, respectivamente.

$$L_{prop} = P_{Tx} - E_{min_{pro}} - 20\log_{10}(f) - 77,21 + G_{ant}, \quad (3.4)$$

El número de zonas de coordinación necesarias en cada frontera está directamente relacionada con la longitud y condiciones geográficas (montañas, valles, etc.) de la misma, y a la posible existencia de transmisores de elevada

potencia, que impliquen interferencias en más de una zona de coordinación. Es así que para el caso de la frontera Colombia-Ecuador y Colombia-Brasil, una única zona de coordinación es suficiente. Pero en el caso de la frontera Colombia-Venezuela se necesita más de una zona de coordinación, principalmente debido a la gran extensión de la frontera y la existencia de transmisores de elevada potencia. En el Anexo A.12 se muestran las zonas de coordinación establecidas en los actuales y futuros acuerdos de frontera en Colombia. Cabe destacar que Colombia sólo tiene convenio de distribución de frecuencias de televisión analógica en zonas de frontera con Ecuador (distribución alternada de canales pares/impares), actualmente se está actualizando dicho convenio, y se están negociando convenios con Brasil, Perú y Venezuela.

En [112] fueron definidas 4 zonas de coordinación para la frontera Colombia-Venezuela (Figura 3.2), pero se detectan problemas con estaciones de alta potencia. En la Figura 3.3 se puede apreciar que las estaciones afectan a más de una zona de coordinación, esto implica que las zonas de coordinación no fueron definidas correctamente. Por tanto, deben ser re-definidas.

Para la determinación de las zonas de coordinación se debe: i) Analizar cada frontera y los transmisores que la afectan, ii) Realizar simulaciones para determinar la mejor distribución de zonas de coordinación y iii) Realizar medidas de campo en zonas conflictivas.

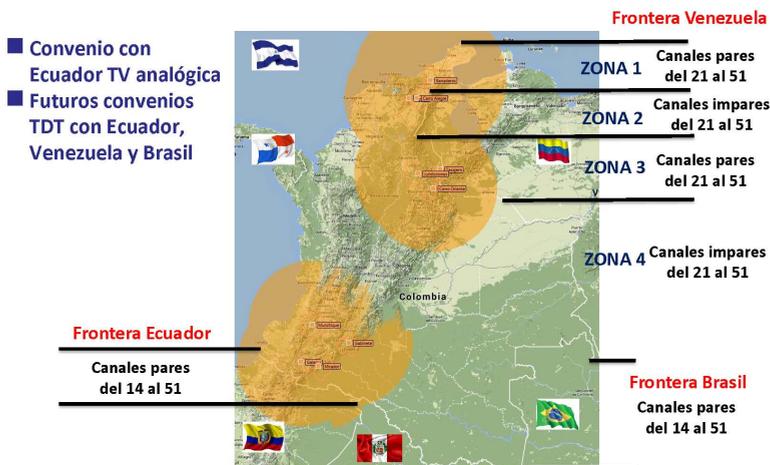


Figura 3.2: Zonas de coordinación por convenios entre Colombia y Venezuela

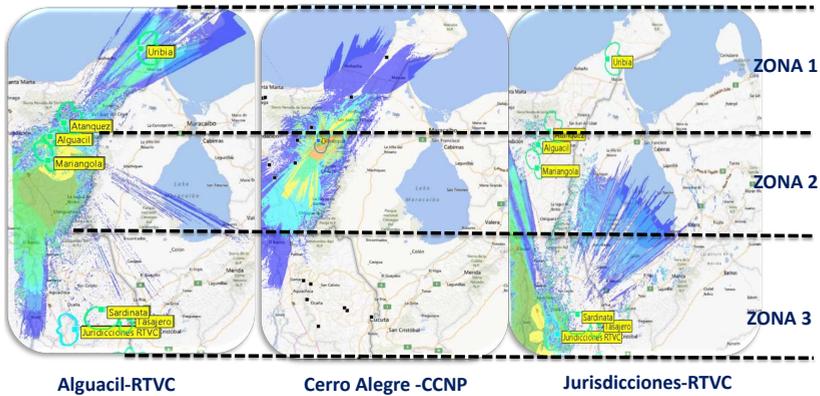


Figura 3.3: Zonas de influencia de Colombia sobre Venezuela para 4 zonas de coordinación.

Caso A: 3 Zonas de Coordinación Al utilizar tres zonas de coordinación, fusionando la zona 2 y a 3 como se muestra en la Figura 3.4. Se evita mayoritariamente el problema de transmisores con interferencias en 2 zonas. A cambio de tener menor flexibilidad para asignar frecuencias en frontera. En la Figura 3.5 se puede apreciar que las interferencias se ven notablemente reducidas

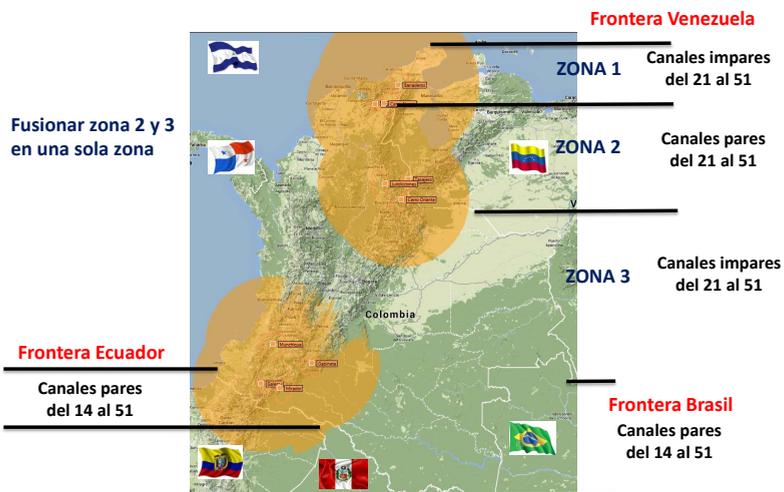


Figura 3.4: Definición de tres zonas de coordinación entre Colombia y Venezuela

3.2 Nivel de Sudamérica

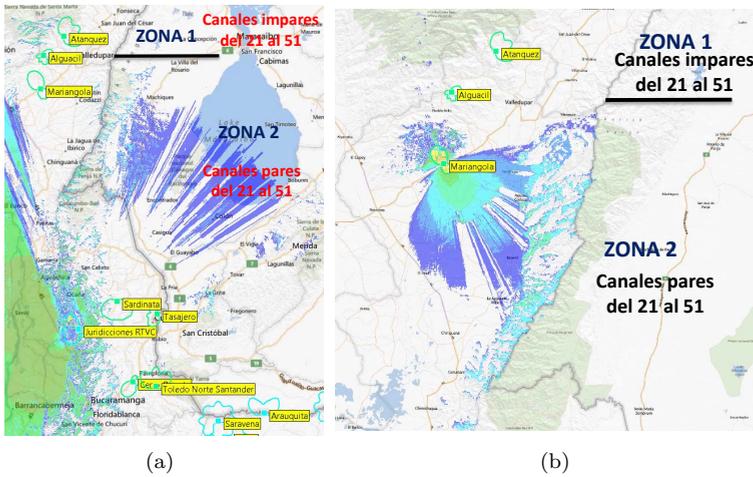


Figura 3.5: Zonas de influencia entre Colombia y Venezuela para 3 zonas de coordinación

Caso B: 2 Zonas de Coordinación En este caso, la influencia de transmisores de alta potencia se limita a una única zona. En la Figura 3.6 se puede apreciar que las ventajas de esta distribución son que: i) reduce al mínimo el número de zonas requeridas en la frontera con Venezuela, ii) no requiere cambio de los sistemas radiantes de los transmisores de alta potencia existentes en la zona, por lo que se respeta el diseño de las redes existentes.

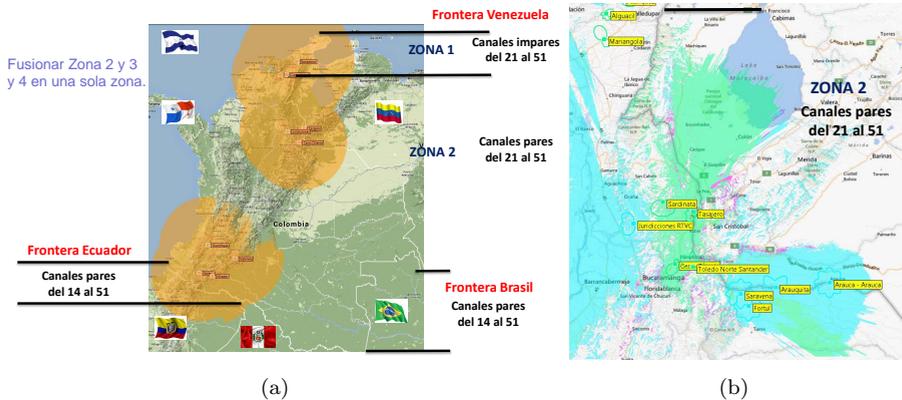


Figura 3.6: Zonas de coordinación (derecha) e influencia (Izquierda) entre Colombia y Venezuela para 2 zonas de coordinación

3.2.2. Determinación de las Áreas de Adjudicación

Las áreas de adjudicación en este caso deben ser determinados en las zonas fronterizas de los países, normalmente la forma de las áreas de adjudicación obedecen a condiciones de carácter administrativo, político, etc. En las zonas de frontera se debe tener en cuenta los posibles acuerdos (análogos) existentes en términos de usos de frecuencias.



Figura 3.7: Posibles áreas de adjudicación para canales nacionales en las fronteras de los países de Sudamérica (44 áreas de adjudicación).

El ámbito de las redes a planificar también es un factor importante, por lo que se recomienda definir un grupo independiente de áreas de adjudicación para redes nacionales, regionales y locales. En la Figura 3.7, Figura 3.8 y Figura 3.9 se presentan las posibles áreas de adjudicación para servicios de ámbito nacional, regional y local en las fronteras de todos los países de Sudamérica,

3.2 Nivel de Sudamérica

respectivamente. El criterio utilizado para determinar las áreas de adjudicación se ha basado en la división política por regiones y municipios para servicios regionales y locales, respectivamente. Para servicios de ámbito nacional las áreas de adjudicación se basa en la división política por provincias, agrupando varias provincias en una sola área de adjudicación de manera que se maximice el tamaño de las redes SFN. Adicionalmente, para los 3 casos se buscó minimizar el número de zonas de coordinación necesarias para cada país en sus fronteras.

Siguiendo el criterio expuesto, para la planificación a nivel internacional en Sudamérica, se necesitan 44, 122 y 790 áreas de adjudicación para servicios, nacionales, regionales y locales, respectivamente.



Figura 3.8: Posibles áreas de adjudicación para canales regionales en las fronteras de los países de Sudamérica (122 áreas de adjudicación).



Figura 3.9: Posibles áreas de adjudicación para canales locales en las fronteras de los países de Sudamérica (790 áreas de adjudicación).

En la Figura 3.10 se presenta un acercamiento de las zonas de adjudicación propuestas para canales locales en las fronteras de Colombia. Se debe notar que, por un lado las áreas de adjudicación cubren áreas pequeñas, y por otra parte, no se aprovecha las ventajas ofrecidas por la formación de redes SFN.

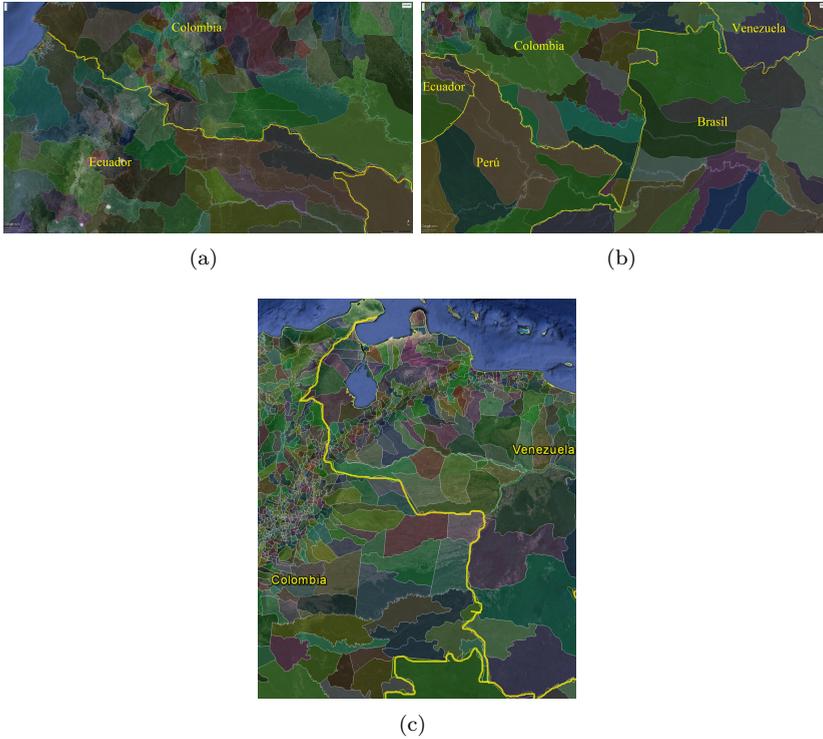


Figura 3.10: Posibles áreas de adjudicación en las fronteras de Colombia, a) frontera con Ecuador, b) frontera con Perú y Brasil, c) frontera con Venezuela.

3.2.3. Síntesis del Plan de Frecuencias

Una vez determinadas las condiciones para el plan de frecuencias (áreas de adjudicación, distancia de re-uso de frecuencias, distancia de coordinación, zonas de coordinación, restricciones por acuerdos de fronteras) se puede realizar la síntesis del plan de frecuencias. Para lo cual se utilizó grafos que corresponden a la adyacencia de cada una de las áreas de adjudicación. Los grafos generados para la distribución de frecuencias en toda Sudamérica son de elevado tamaño y complejidad. Por lo que, con el fin de ejemplificar el procedimiento de adjudicación de frecuencias en la Figura 3.11 y la Figura 3.12 se presenta el grafo que corresponde a la frontera entre Ecuador y Colombia (ver Figura 3.10 (a)). La distancia de coordinación considerada es de 21 km (ver Sección 3.2.1), que es la distancia dentro de la cual pueden aparecer interferencias al re-usar una frecuencia. Esto significa que las áreas de adjudicación que deben

ser analizadas, son aquellas que están dentro de 21 km de la frontera de cada país.

A partir del grafo de áreas de adjudicación, es posible determinar la matriz de distancias D entre cada una de las áreas de adjudicación. Para la cual, la distancia entre dos áreas de adjudicación, queda definida como la distancia entre los dos vértices más cercanos. Con el objetivo de reducir los cálculos, la matriz de distancias se puede definir como se muestra en (3.5);

$$D = \begin{pmatrix} 0 & & Q \\ & \ddots & \\ Q^T & & 0 \end{pmatrix}_{m*m} \quad (3.5)$$

Donde D , es de dimensiones $m * m$ áreas de adjudicación, la diagonal principal es un conjunto de 0s, y Q^T es la matriz transpuesta de Q , siendo que Q está formada por las distancias desde el área i hasta las áreas j . Cada fila de D puede ser expresada como se muestra en (3.6),

$$d_{i(1+n)} \cdots d_{im}; n = 0, 1, 2 \dots (m - 1) \quad (3.6)$$

Una vez determinada la matriz de distancias, la matriz de adyacencia Y , se obtiene comparando la matriz D con la distancia de re-uso de frecuencia. De forma que se coloca 1 si la distancia entre dos áreas de adjudicación es mayor que la distancia de re-uso, y un 0 si la distancia menor. Finalmente, alimentando la matriz de adyacencia a un algoritmo basado en coloreado secuencial, utilizando una distancia de re-uso de frecuencias adecuada (ver Tabla 3.3) y utilizando el método de coloreado secuencial, se puede analizar dos escenarios.

Escenario A: Uso de todas las frecuencias en fronteras

Sin tener en cuenta los convenios bilaterales para fronteras y considerando las áreas de adjudicación mostradas en la Figura 3.11, se obtiene el grafo de la Figura 3.12, y la asignación de colores presentada en la Tabla 3.4.

3.2 Nivel de Sudamérica



Figura 3.11: Determinación de grafos para la frontera Ecuador-Colombia sin considerar convenios analógicos existentes para distribución de frecuencias.

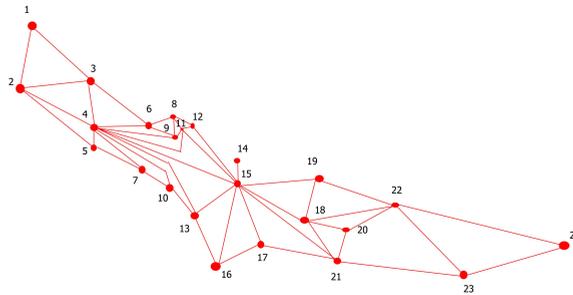


Figura 3.12: Grafo para la frontera Ecuador-Colombia sin considerar convenios analógicos existentes para distribución de frecuencias.

Área de adjudicación	4	15	11	18	21	22	2	3	6	8	9	13
Color	1	2	3	1	3	4	2	4	5	6	7	4
Área de adjudicación	5	7	10	12	16	17	19	20	23	1	24	14
Color	3	8	9	10	5	6	5	7	2	3	1	11

Tabla 3.4: Coloreado para la frontera de Ecuador y Colombia, con libertad de asignación de frecuencias.

En la Tabla 3.4, cada color (número) corresponde a una frecuencia adjudicada. Se puede observar que para cubrir el área de frontera de los dos países,

Capítulo 3. Planificación de Frecuencias de TDT

se necesita un mínimo de 11 frecuencias. Este tipo de asignación presenta la desventaja de requerir un nivel mayor de coordinación entre los dos países. Sin embargo, un organismo a nivel internacional puede realizar las adjudicaciones de frecuencias, lo que permitiría la libertad necesaria en las zonas fronterizas.

Escenario B: Distribución de Frecuencias Pares/Impares en Frontera

Al tener en cuenta las restricciones debidas a los acuerdos fronterizos entre países, por ejemplo usar frecuencias pares en Ecuador e impares en Colombia. El grafo será equivalente, pero sin conexiones entre las áreas de adjudicación de los dos países, como se muestra en la Figura 3.13. Esto, debido a que las frecuencias usadas en un país no serán utilizadas en el otro.



Figura 3.13: Determinación de grafos para la frontera Ecuador-Colombia considerando acuerdos analógicos para distribución de frecuencias en frontera.

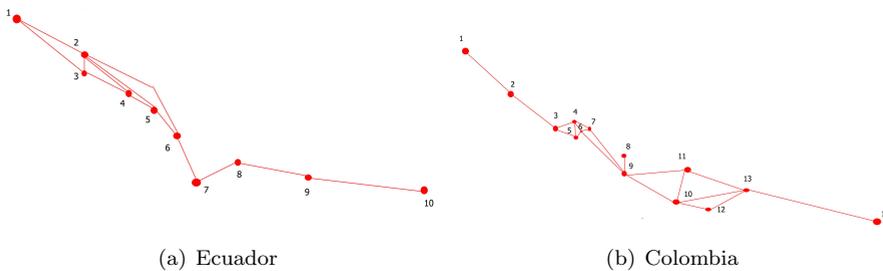


Figura 3.14: Grafos para la frontera Ecuador-Colombia considerando acuerdos analógicos para distribución de frecuencias en frontera.

En este caso, el análisis, se puede realizar de forma separada para cada país. Bajo estas condiciones del lado de Ecuador son necesarias 5 frecuencias,

3.2 Nivel de Sudamérica

mientras que de lado de Colombia se necesitan 7 frecuencias, como se muestra en la Tabla 3.5 y la Tabla 3.6, respectivamente.

Área de adjudicación	2	3	4	5	6	1	7	8	9	10
Color	1	2	3	4	5	4	1	2	3	1

Tabla 3.5: Coloreado para la frontera de Ecuador considerando acuerdos analógicos existentes.

Área de adjudicación	9	4	6	10	13	3	5	7	11	2	12	1	8	14
Color	1	2	3	2	3	4	5	6	4	1	5	2	7	1

Tabla 3.6: Coloreado para la frontera de Colombia considerando acuerdos analógicos existentes.

En este caso, para servir a todas las áreas de adjudicación se necesita una frecuencia adicional comparada con el escenario A. Esto muestra que desde el punto de vista de optimización en el uso del espectro radioeléctrico, la solución óptima, implica permitir libertad en la elección de frecuencias en frontera.

Distribución de Frecuencias para Servicios Nacionales en Sudamérica

Para la síntesis del plan de frecuencias se utilizó distancias de coordinación entre países de 21 km, libertad en la utilización de todas las frecuencias en las zonas fronterizas, y las distancias de reuso de la Tabla 3.3. Utilizando coloreado secuencial se obtiene la distribución presentada la Tabla 3.7 y la Figura 3.15.

Área	1	43	42	13	6	18	29	30	35	44	11	12
Color	1	2	1	2	3	1	1	2	3	3	2	1
Área	26	27	28	4	7	16	20	21	32	33	37	38
Color	1	4	2	4	5	2	4	3	3	2	1	3
Área	15	24	25	34	8	9	10	14	19	31	36	40
Color	5	4	3	2	1	3	1	3	1	4	1	1
Área	22	23	0	3	5	41	17	39	2			
Color	4	3	2	3	2	3	3	2	1			

Tabla 3.7: Coloreado para servicios nacionales a nivel internacional en Sudamérica.



Figura 3.15: Adjudicación de frecuencias para servicios nacionales a nivel internacional en Sudamérica.

3.2 Nivel de Sudamérica

Para canales de ámbito nacional en Sudamérica se necesitan un total de 5 frecuencias, distribuida como se muestra en la Tabla 3.8

	<i>Bolivia</i>	<i>Brasil</i>	<i>Chile</i>	<i>Argentina</i>	<i>Colombia</i>	<i>Ecuador</i>	<i>Guyana</i>
Bolivia	-	1,3	1,4	4	-	-	-
Brasil	2,4	-	-	3	2	-	3
Chile	2	-	-	1,2,3	-	-	-
Argentina	3	-	1,3	-	-	-	-
Colombia	-	3	-	-	-	1,2	-
Ecuador	-	-	-	-	2,3,5	-	-
Guyana	-	1	-	-	-	-	-
Guiana Fr.	-	1	-	-	-	-	-
Paraguay	2	2	-	2,4	-	-	-
Perú	3,4	1,3	3	-	1	1,4	-
Suriname	-	2	-	-	-	-	2
Uruguay	-	2	-	1,2	-	-	-
Venezuela	-	4,5	-	-	1,5	-	4
	<i>Guiana Fr.</i>	<i>Paraguay</i>	<i>Perú</i>	<i>Suriname</i>	<i>Uruguay</i>	<i>Venezuela</i>	
Bolivia	-	3,4	1	-	-	-	
Brasil	3	1,3	2	3	1	2	
Chile	-	-	2	-	-	-	
Argentina	-	3	-	-	3	-	
Colombia	-	-	2,3	-	-	2,3	
Ecuador	-	-	2,3,5	-	-	-	
Guyana	-	-	-	1	-	1	
Guiana Fr.	-	-	-	1	-	-	
Paraguay	-	-	-	-	-	-	
Perú	-	-	-	-	-	-	
Suriname	2	-	-	-	-	-	
Uruguay	-	-	-	-	-	-	
Venezuela	-	-	-	-	-	-	

Tabla 3.8: Adjudicación de frecuencias para servicios nacionales a nivel internacional en Sudamérica.

Distribución de Frecuencias para Servicios Regionales en Sudamérica

Si siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente, pero para áreas de adjudicación definidas para servicios regionales, como se muestra en la Figura 3.8 y utilizando el método de coloreado secuencial, se obtiene la distribución de frecuencias presentada en la Figura 3.16 y resumidos en la Tabla 3.9.



Figura 3.16: Adjudicación de frecuencias para servicios regionales a nivel internacional en Sudamérica.

3.2 Nivel de Sudamérica

Area	Color	Area	Color	Area	Color	Area	Color
28	1	16	3	45	2	69	1
37	2	21	4	47	3	77	3
85	1	34	1	53	3	83	2
38	2	44	1	60	4	84	3
54	1	50	3	67	4	87	1
68	1	52	2	70	4	93	2
86	2	58	4	74	3	94	3
10	1	71	1	75	3	98	2
24	3	73	1	76	2	99	4
56	2	79	2	78	4	106	1
59	2	81	1	82	4	109	3
62	3	88	3	92	2	110	2
95	1	89	3	103	3	114	1
117	1	90	1	105	4	115	2
120	2	91	4	112	2	118	3
15	1	96	2	113	3	119	4
17	4	108	3	2	2	0	3
23	3	111	1	9	3	4	3
51	2	122	4	12	4	5	2
63	2	8	4	14	6	6	2
64	3	13	1	29	3	18	2
65	3	20	1	32	3	19	2
66	4	25	5	36	4	22	2
72	2	26	2	39	1	30	1
97	3	100	4	101	3	7	1
80	3	104	1	42	4	57	3
107	2	27	2	116	3	61	4
121	3	31	3	46	1	102	3
1	1	33	4	48	5	41	3
3	3	35	4	49	1	43	3
11	2	40	3	55	2		

Tabla 3.9: Coloreado para servicios regionales a nivel internacional en Sudamérica.

Se puede observar que para servicios regionales en las zonas fronterizas de los países de Sudamérica son necesarias en total 6 frecuencias, distribuidas para cada país como se muestra en la Tabla 3.10.

Se debe notar que las fronteras que requieren mayor cantidad de frecuencias son las de Argentina-Chile, Paraguay-Brasil, Paraguay-Argentina y Perú-

Capítulo 3. Planificación de Frecuencias de TDT

Ecuador. Esto es debido a que más áreas de adjudicación son necesarias en dichas fronteras.

	<i>Bolivia</i>	<i>Brasil</i>	<i>Chile</i>	<i>Argentina</i>	<i>Colombia</i>	<i>Ecuador</i>	<i>Guyana</i>
Bolivia	-	4,3,1	3,2	2,3,4	-	-	-
Brasil	2,3	-	-	1,2	1	-	2,3
Chile	4,3	-	-	1,2,3,4	-	-	-
Argentina	1,4	-	1,2,3,4	-	-	-	-
Colombia	-	1	-	-	-	2,3	-
Ecuador	-	-	-	-	1,3,4	-	-
Guyana	-	1,2,4,5	-	-	-	-	-
Guiana Fr.	-	1,2	-	-	-	-	-
Paraguay	2,3,4	1,2,3,4	-	1,2,3,4	-	-	-
Perú	2,3	1,2	2	-	2	2,3,4,5	-
Suriname	-	3	-	-	-	-	2,3
Uruguay	-	2,3	-	2,3,4	-	-	-
Venezuela	-	1,4	-	-	1,2,3,4	-	1
	<i>Guiana Fr.</i>	<i>Paraguay</i>	<i>Perú</i>	<i>Suriname</i>	<i>Uruguay</i>	<i>Venezuela</i>	
Bolivia	-	1,3,4	4,1	-	-	-	
Brasil	4	1,2	1,3	2	1	1,3	
Chile	-	-	4	-	-	-	
Argentina	-	1,2,3	-	-	1,2	-	
Colombia	-	-	3,4	-	-	2,3,4	
Ecuador	-	-	1,2,3,4	-	-	-	
Guyana	-	-	-	1,6	-	2,3	
Guiana Fr.	-	-	-	1	-	-	
Paraguay	-	-	-	-	-	-	
Perú	-	-	-	-	-	-	
Suriname	2,3	-	-	-	-	-	
Uruguay	-	-	-	-	-	-	
Venezuela	-	-	-	-	-	-	

Tabla 3.10: Adjudicación de frecuencias para servicios regionales a nivel internacional en Sudamérica.

Capítulo 3. Planificación de Frecuencias de TDT

	<i>Bolivia</i>	<i>Brasil</i>	<i>Chile</i>	<i>Argentina</i>	<i>Colombia</i>	<i>Ecuador</i>	<i>Guyana</i>
Bolivia	-	1-5	1-4	1-5	-	-	-
Brasil	1-7	-	-	1-10	1,3,5	-	1,2
Chile	1-5	-	-	1-7	-	-	-
Argentina	1-5	-	1-6	-	-	-	-
Colombia	-	1,2-5	-	-	-	1-8,11	-
Ecuador	-	-	-	-	1-2 5,7 9-11	-	-
Guyana	-	1-4	-	-	-	-	-
Guiana Fr.	-	1,2	-	-	-	-	-
Paraguay	1,3,5	1-7,9	-	1-13	-	-	-
Perú	1-5	1-3,5	1-3	-	1.3	1,2,4-7	-
Suriname	-	1,4	-	-	-	-	1-5,7
Uruguay	-	1-4	-	1-3,6	-	-	-
Venezuela	-	2-5	-	-	1-9	-	1-4
	<i>Guiana Fr.</i>	<i>Paraguay</i>	<i>Perú</i>	<i>Suriname</i>	<i>Uruguay</i>	<i>Venezuela</i>	
Bolivia	-	2-4	1-3-5	-	-	-	
Brasil	3-5	1-8	1-5	2,3,5	1,3-5	1,2,4	
Chile	-	-	2,5	-	-	-	
Argentina	-	1-10	-	-	2-7	-	
Colombia	-	-	2,4,5	-	-	1-12,15	
Ecuador	-	-	1-9	-	-	-	
Guyana	-	-	-	1-7	-	1-4	
Guiana Fr.	-	-	-	2	-	-	
Paraguay	-	-	-	-	-	-	
Perú	-	-	-	-	-	-	
Suriname	1,3-5	-	-	-	-	-	
Uruguay	-	-	-	-	-	-	
Venezuela	-	-	-	-	-	-	

Tabla 3.11: Adjudicación de frecuencias para servicios locales a nivel internacional en Sudamérica.

3.3. Colombia

Una vez determinadas las condiciones que debe cumplir la planificación de frecuencias a nivel internacional, se deben desarrollar los planes de frecuencias nacionales para cada país, para lo que se presenta el caso de Colombia como ejemplo. Para el análisis de cada país, se asume que toda la banda asignada a la TDT puede ser utilizada, solamente teniendo en cuenta las restricciones propias de cada país y las consideraciones en zonas fronterizas.

Para el caso de servicios nacionales, con el fin de maximizar la eficiencia del uso del espectro radioeléctrico, se pueden definir las áreas de adjudicación basados en el tamaño máximo que pueden tener las redes SFN para el caso particular de cada país. Esto se consigue determinando el número mínimo de redes SFN con las que se puede cubrir el país, o lo que es lo mismo, el número mínimo de frecuencias necesarias para cubrir el país (1 frecuencia por cada SFN), que conlleven a un nivel aceptable de interferencias inter-SFN (menos del 5 % del área de cobertura).

3.3.1. Análisis del Número de Frecuencias Necesarias para Servicios Nacionales

El objetivo principal de esta sección es identificar el número mínimo de frecuencias para las redes de TDT en Colombia garantizando el mínimo nivel de población con interferencia generada por la reutilización de frecuencias. Las interferencias se consideran aceptables si la población interferida es menor al 95 % [113]. Para conseguir este objetivo, en primer lugar se estima el porcentaje de población con cobertura y con interferencia utilizando una única frecuencia (SFN). Luego, con el fin de minimizar el porcentaje de población con auto interferencia SFN, se optimiza los retardos artificiales para cada transmisor de la red SFN. Posteriormente, en función de las zonas con interferencia, se evalúan la utilización de frecuencias adicionales para reducir la población afectada.

En este caso el modelo de propagación utilizado para las estimaciones de cobertura es el ITU-R 1546. Se ha utilizado además, un mapa digital de terreno DTM a 10 metros de todo el país, y una capa de clutter con información del tipo de terreno. También, se utilizó la información técnica de las estaciones del operador RTVC y CCNP publicada por la ANE (ver sección A.5). La frecuencia de operación simulada es 450 MHz, la cual corresponde a la frecuencia central de la banda primaria planificada para TDT (canal 14 al 20). Para la estimación de población con cobertura o interferencia se utiliza una capa vectorial de distribución administrativa de municipios con la población proyectada a 2013¹

¹Información disponible en la página web del DANE (Departamento Nacional de Estadísticas de Colombia).

Capítulo 3. Planificación de Frecuencias de TDT

asociada a cada polígono/municipio. El radio de simulación de pérdidas de propagación para cada estación fue de 150 km.

A continuación se analiza el número de frecuencias necesarias para los canales del operador público RTVC y privados CCNP de Colombia.

Canales Nacionales Públicos

En Colombia existen 3 canales nacionales públicos que serán agrupados en un mismo múltiple (canal de radiofrecuencia). Las fases I y II de despliegue para TDT del operador público RTVC contemplan 22 estaciones primarias para dar la mayor cobertura posible para los canales nacionales en todo el territorio Colombiano. Los parámetros de la configuración utilizados se resumen en la Tabla 3.1. En la Figura 3.18 se muestran las zonas con auto-interferencia SFN (zonas en color rojo) cuando se utilizan 1, 2 y 3 frecuencias. Además, en la Tabla 3.12 se presenta la agrupación SFN derivada del análisis.

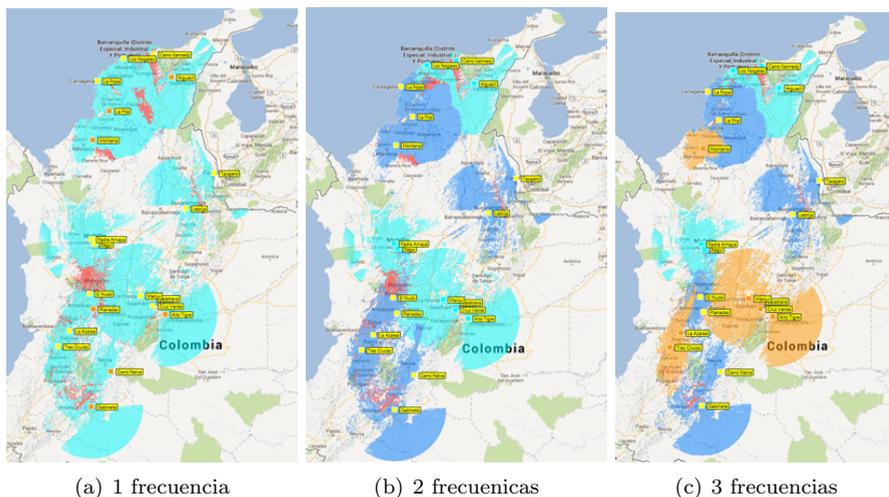


Figura 3.18: Zonas con auto-interferencia SFN (rojo) en la red de servicios nacionales RTVC en función del número de frecuencias utilizadas.

Se puede observar en la Figura 3.18 que el uso de una única frecuencia para todas las estaciones provoca amplias zonas de interferencia SFN principalmente en la zona norte del país (estaciones Alguacil, la Popa y Montería), en la zona de solapamiento entre las estaciones Padre Amaya y el Nudo, y las zonas de solapamiento entre las estaciones Gabinete, Cerro Neiva y Tres Cruces.

Región	Estación	1 Frecuencia	2 Frecuencias	3 Frecuencias
Caribe	Alguacil	A	B	B
	Cerro Kennedy	A	B	B
	La Pita	A	A	A
	La Popa	A	A	A
	Los Nogales	A	B	B
	Montería	A	A	C
Centro	Alto Tigre	A	B	C
	Calatrava	A	B	C
	Cerro Neiva	A	A	A
	Cruz Verde	A	B	C
	Gabinete	A	A	A
	Manjuí	A	B	C
Antioquia	Bello	A	B	B
	Itagüí	A	B	B
	Padre Amaya	A	B	B
Pacífica	La Azalea	A	A	C
	Tres Cruces	A	A	C
Oriente	Lebrija	A	A	A
	Tasajero	A	A	A
Cafetera	El Nudo	A	A	A
	Planadas	A	A	A

Tabla 3.12: Plan de frecuencias para las diferentes topologías SFN nacionales identificadas para RTVC. (A, B y C representan un canal diferente de 6 MHz).

En el caso de dos frecuencias, la distribución se realiza con la premisa de mantener el tamaño de red SFN más grande posible. Las zonas donde se presenta interferencia son las zonas cubiertas por los transmisores La Popa, La Pita y Montería en SFN, El Nudo, La Azalea, Tres Cruces y Planadas en SFN y Cerro Neiva y Gabinete en SFN.

La utilización de 3 frecuencias para los canales nacionales reduce el porcentaje de población con interferencia prácticamente a cero. En este caso la frecuencia adicional permite aislar la estación de Montería, generando dos SFN regionales independizando las estaciones El Nudo y Planadas de las estaciones La Azalea y Tres Cruces, así como independizar las estaciones de Manjuí, Cruz Verde, Alto del Tigre y Calatrava, de las estaciones de la zona Antioqueña (Pa-

Capítulo 3. Planificación de Frecuencias de TDT

dre Amaya, Itagiü y Bello). Las pocas áreas de interferencia que se visualizan en la figura con tres frecuencias, están ubicadas en zonas de muy baja densidad de población.

El plan de frecuencias propuesto cuando se utilizan 1, 2 o 3 frecuencias a nivel nacional es resumido en la Tabla 3.12. Del análisis se puede deducir que para maximizar el uso del espectro radioeléctrico, para los canales nacionales, el territorio de Colombia puede ser dividido en 3 áreas de adjudicación, de manera que el país entero puede ser cubierto únicamente con 3 frecuencias.

Canales Nacionales Privados

En esta sección se evalúa el número mínimo de frecuencias necesarias para la red del operador privado (CCNP), de forma tal que se obtenga el mínimo nivel de población que experimente auto interferencia SFN. La Figura 3.19 muestra las zonas con auto-interferencia SFN (zonas en color rojo) cuando se utilizan 1, 2 y 3 frecuencias. Para el caso 1 frecuencia, son pocas las zonas donde se identifica auto interferencia, presentándose principalmente en las zonas intermedias entre las estaciones Barranquilla, la Popa y Turbaco; así como en las zonas intermedias entre las estaciones La Castellana, El Nudo, Cristo Rey, Suba y Santa Librada.

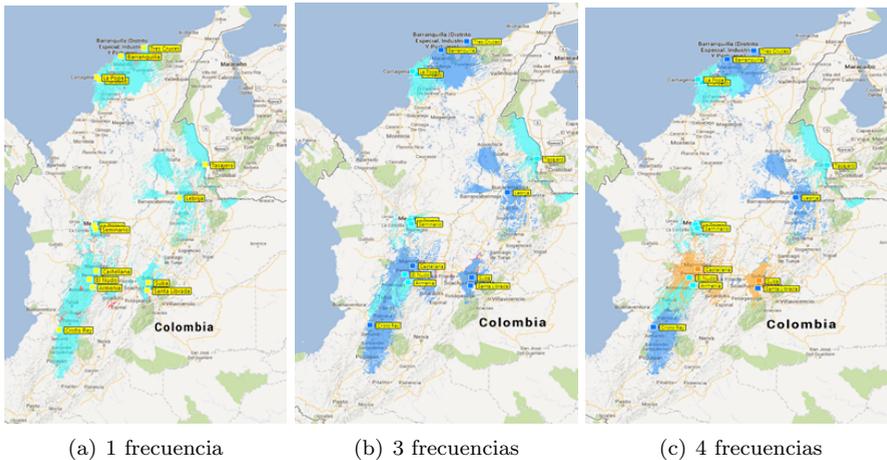


Figura 3.19: Zonas con auto-interferencia SFN (rojo) en la red de servicios nacionales CCNP en función del número de frecuencias utilizadas.

Para el caso de utilizar 2 frecuencias, se presenta el plan de frecuencias de la Tabla 3.13 y presentado en la Figura 3.19. Este diseño crea dos redes SFN en la zona caribe, y 2 SFN en las zonas cafetera, Antioqueña, Valle del Cauca

y Andina (Bogotá y alrededores principalmente), lo cual facilita la posibilidad futuros desencadenamientos (Posibilidad de transmitir contenidos diferentes).

Finalmente, se evalúa la utilización de tres frecuencias, manteniendo las SFN regionales y asignando frecuencias diferentes para las estaciones de la Castellana y la estación de Suba, cercana a Bogotá. Esto prácticamente elimina las interferencias generadas por la estación Castellana a toda la zona cafetera, antioqueña y del Valle, y elimina las interferencias causadas entre las estaciones de Suba y Santa Librada en la zona de Bogotá respectivamente.

El plan de frecuencias propuesto cuando se utilizan 1, 2 o 3 frecuencias a nivel nacional es resumido en la Tabla 3.13. La frecuencia asignada para cada topología, depende de la disponibilidad en las respectivas zonas.

Estación	1 Frecuencia	2 Frecuencias	3 Frecuencias
Barranquilla	A	B	B
Armenia	A	A	A
Cristo Rey	A	B	B
El Nudo	A	A	A
Castellana	A	B	C
La Palma	A	A	A
Turbaco	A	A	A
La Popa	A	A	A
Lebrija	A	B	B
Santa Librada	A	B	B
Seminario	A	A	A
Suba	A	B	C
Tasajero	A	A	A
Tres Cruces	A	B	B

Tabla 3.13: Plan de frecuencias para las diferentes topologías SFN nacionales identificadas para CCNP. (A, B y C representan un canal diferente de 6 MHz)

Canales Regionales Públicos

En Colombia existen seis canales de televisión regionales que conviven con los canales nacionales en ciertas zonas del país. A estos canales les ha sido atribuido un múltiple para su radiodifusión en digital y su red será administrada por el operador nacional público RTVC. Con el ánimo de hacer un eficiente uso

Capítulo 3. Planificación de Frecuencias de TDT

del espectro, se buscó maximizar el área de cobertura de los canales regionales y evitar amplias zonas de interferencia.

En primer lugar se estima la cobertura de cada canal regional utilizando frecuencias independientes, lo cual garantiza la no existencia de interferencia entre ellos y permite identificar la máxima cobertura de cada canal regional. Posteriormente, se redujo el número de frecuencias disponibles y se identificó el mejor plan de frecuencias que minimice las posibles interferencias entre zonas que reutilicen la misma frecuencia. Esto permite establecer un compromiso entre cobertura, interferencia y el número de frecuencias utilizadas. Se identifica entonces el número mínimo de frecuencias necesario.

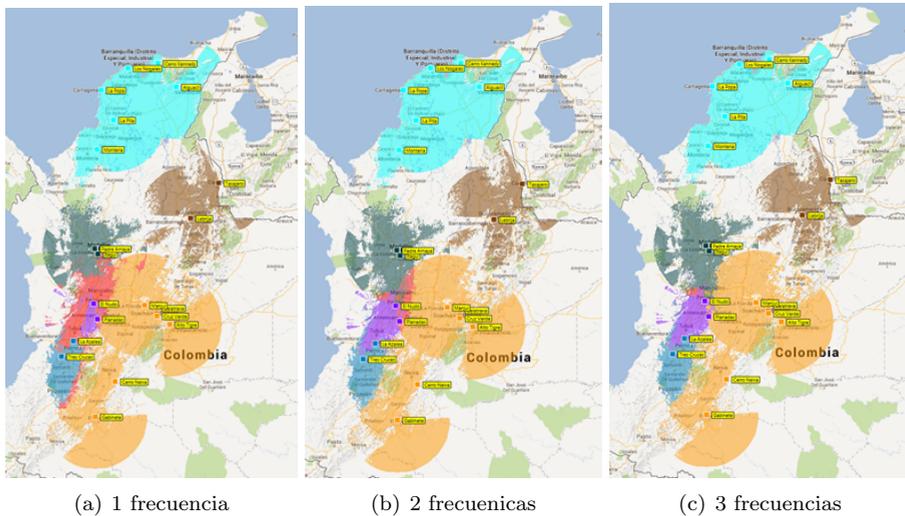


Figura 3.20: Zonas con cobertura e interferencia (rojo) de los canales regionales para el uso de diferentes frecuencias.

Se evaluaron diferentes combinaciones para la distribución de frecuencias de los canales regionales en topología de red SFN (hasta 6 frecuencias). En la Tabla 3.14 se resumen los planes de frecuencias que generan menor interferencia entre canales. En la Figura 3.20 se muestran las zonas de cobertura e interferencia (zonas rojas) entre canales regionales en función del número de frecuencias asignadas. Como paso previo se verificó que cada canal regional puede operar en una sola red SFN, y se optimizó las redes (ajustando retardos artificiales) para minimizar las autointerferencias.

Canal	Estación	Número de Frecuencias		
		1	2	3
Telecaribe	Alguacil	A	A	A
	Cerro Kennedy	A	A	A
	La Pita	A	A	A
	La Popa	A	A	A
	Los Nogales	A	A	A
	Montería	A	A	A
Teveandina	Alto Tigre	A	A	A
	Calatrava	A	A	A
	Cerro Neiva	A	A	A
	Cruz Verde	A	A	A
	Gabinete	A	A	A
	Manjuí	A	A	A
Teleantioquia	Bello	A	B	B
	Itagüí	A	B	B
	Padre Amaya	A	B	B
Telepacífico	La Azalea	A	B	B
	Tres Cruces	A	B	B
TRO	Lebrija	A	A	A
	Tasajero	A	A	A
Telecafé	El Nudo	A	A	C
	Planadas	A	A	C

Tabla 3.14: Plan de frecuencias para los diferentes canales regionales en función del número de frecuencias disponibles. (A, B y C representan un canal diferente de 6 MHz)

Se puede observar que el uso de una única frecuencia provoca amplias zonas de interferencia entre canales, a medida que se utilizan más canales de RF la interferencia se reduce progresivamente. Al utilizar 3 frecuencias la interferencia se reduce a un 5 % del área total de cobertura.

Canales Locales

Los contenidos locales son específicos para cada ciudad, por lo que en este caso las áreas de adjudicación son por obvias razones muy reducidas. Además, para maximizar el espectro radioeléctrico, los contenidos locales que dan cobertura a una misma ciudad deben ser agrupados en un mismo canal radioeléctrico, también se puede dar el caso de un canal con varios transmisores en la misma

ciudad. Incluso, se plantea la posibilidad de unificar en un único múltiple local, los canales correspondientes a varios municipios contiguos. Resulta totalmente ineficiente en términos económicos y de uso de espectro, que operadores locales con zonas de cobertura próxima que pueden ser integrados dentro de una red SFN, operen en frecuencias diferentes. Por tanto, se recomienda unir en un único múltiple diferentes canales locales que técnicamente puedan ser agrupables respetando el objetivo individual de cobertura de cada uno de ellos.

Se realizó un análisis de mutuas interferencias (interferencias de todos contra todos), considerando redes isofrecuenciales, pero no sincronizadas, pues su contenido es a priori diferente. En función de los valores de interferencia obtenidos, se valoró la necesidad de utilizar más de una frecuencia para cubrir determinadas ciudades.

La ciudad de Bogotá representa de por sí un caso especial, al tener 9 canales locales sin ánimo de lucro. La inclusión de todos ellos en tecnología digital requiere de al menos 2 múltiples dedicados en exclusiva para este tipo de operadores, esto debido a que la regulación actual (Acuerdo CNTV 002 de 2012), establece que pueden ser agrupados máximo 5 canales locales sin ánimo de lucro por cada múltiple. Este acuerdo fue adoptado estando vigente la tecnología DVB-T. Actualmente, utilizando DVB-T2 caben 9 canales SD agrupados en un único múltiple, por lo que se podría plantear agrupar todos los canales de locales sin ánimo de lucro en uno múltiple como se plantea en el Anexo 2.1.1. Por otro lado, la existencia de un operador con ánimo de lucro con fines totalmente distintos a los de los operadores sin ánimo de lucro, justifican la existencia de otro múltiple para él.

Se proponen por tanto 2 múltiples, uno para alojar a todos los operadores sin ánimo de lucro, y otro para el operador con ánimo de lucro. Esta opción permite maximizar la liberación de espectro.

3.3.2. Determinación de las Áreas de Adjudicación

En esta sección se presenta a manera de ejemplo, la planificación de frecuencias para canales regionales, por lo que las áreas de adjudicación han sido elegidas de manera que cumpla con los objetivos de cobertura regionales en Colombia. En la Figura 3.21 se muestra las áreas de adjudicación y grafo para canales de ámbito regional para Colombia.

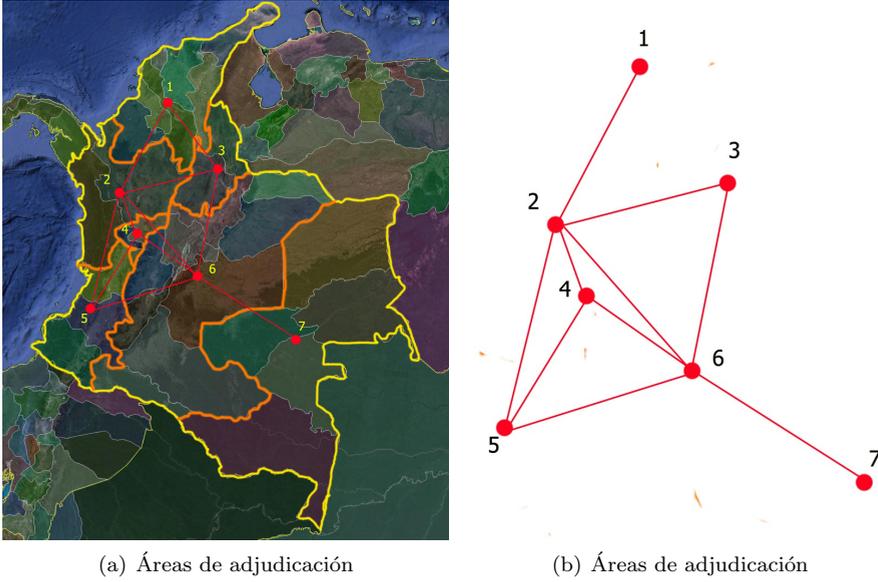


Figura 3.21: Posibles áreas de adjudicación (izquierda) y grafo (derecha) para servicios regionales en Colombia.

3.3.3. Síntesis del Plan de Frecuencias

A partir de la Figura 3.21 (b), la matriz de distancias D y adyacencia Y queda definida como se muestra en las ecuaciones 3.7 y 3.8, respectivamente.

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 141,8 & 242 & 102 & 406 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 405 \\ 0 & 0 & 0 & 36 & 202 & 0 & 236 \\ 141,8 & 0 & 36 & 0 & 0 & 0 & 306 \\ 242 & 0 & 202 & 0 & 0 & 0 & 239 \\ 102 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 406 & 405 & 236 & 306 & 239 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{7 \times 7} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{7 \times 7} \quad (3.8)$$

Capítulo 3. Planificación de Frecuencias de TDT

Aplicando el algoritmo de coloreado gráfico secuencial, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 3.22 y la Tabla 3.15. Se puede notar que únicamente 4 colores (frecuencias) son necesarios para cumplir con los requisitos. Se debe recalcar que en el análisis por cobertura de la Sección 3.3.1, el mínimo número de frecuencias fue 3. Los resultados varían debido a que, por un lado, en este caso no se tiene en cuenta la topología del terreno, la cual presenta pérdidas adicionales y por ende posibilita un mayor nivel de re-uso de frecuencias. Sin embargo, para el peor caso, una cuarta frecuencia debe ser reservada para los canales regionales. Por otra parte, en la sección 3.3.1 las interferencias para 3 frecuencias se consideraron aceptable, mientras que en el desarrollo del plan de frecuencias el criterio es más restrictivo (que no exista interferencia entre las redes).

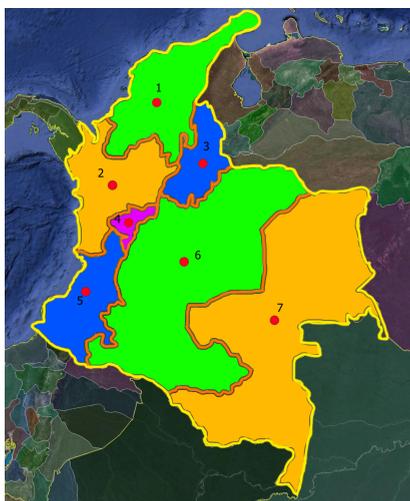


Figura 3.22: Adjudicación de frecuencias regionales para Colombia.

Área de adjudicación	2	6	3	4	5	1	7
Color	1	2	3	4	3	2	1

Tabla 3.15: Coloreado para asignación de frecuencias a nivel internacional para Colombia.

3.4. Conclusiones

En este capítulo se comprobó que para optimizar el uso del espectro radioeléctrico, se debe determinar las áreas de adjudicación en función del ámbito de cobertura de las redes a planificar (nacional, regional o local).

Planificación de Frecuencias a Nivel Internacional en Sudamérica

En el caso de fronteras de extensión pequeña (e.g. frontera Ecuador-Colombia), aproximadamente 700 km, basta con establecer una única zona de coordinación. Para extensiones mayores (e.g. frontera Brasil-Bolivia), se deben definir más zonas de coordinación. El campo eléctrico protegido para recepción portable en interiores es de $57,9dB\mu V/m$ y $53dB\mu V/m$ para países que usan DVB-T2 e ISDB-T, respectivamente. Esto significa que DVB-T2 admite un nivel mayor de interferencia comparado con ISDB-T. Si en algún país se utiliza una configuración diferente, al valor de campo eléctrico protegido se debe sumar un factor de corrección equivalente a la diferencia en términos de CNR. A partir del campo eléctrico protegido y utilizando el modelo de propagación ITU-R 1546 se recomienda utilizar distancias de coordinación de 21 km desde la frontera de cada país. Las distancias de re-uso recomendada en fronteras es de 64.3 km y 68.46 km para países con DVB-T2 e ISDB-T respectivamente.

El utilizar frecuencias pares para un país e impares para el otro ha sido una practica extendida en Sudamérica, siempre y cuando no haya injerencia de un tercer país. Sin embargo se ha comprobado que tener libertad en la elección de frecuencias entre los países, disminuye el número de frecuencias necesarias, y por ende optimiza el uso del espectro radioeléctrico. Esto implica que los convenios analógicos existentes deben revisarse y de ser necesario modificarse. Con relación a la planificación de frecuencias, para todas fronteras de Sudamérica se necesitan 5, 6 y 15 frecuencias para servicios nacionales, regionales y locales.

Planificación de Frecuencias a Nivel Nacional en Colombia

Dependiendo del tamaño del país, y la tecnología de TDT que utilice, una sola red SFN puede cubrir todo el territorio, lo que se traduce en una sola área de servicio nacional (caso de Colombia con DVB-T2). Sin embargo, también implica disminución en la capacidad debido al uso de intervalos de guarda muy grandes. Además, con el fin de facilitar desconexiones regionales y reducir al máximo las interferencias, es deseable determinar más de una área de servicio para las redes nacionales. En el caso de Colombia son necesarias 3 frecuencias para servicios nacionales.

En el caso de servicios regionales, es deseable que exista una red SFN por cada región de cobertura. Si no es posible, la región puede dividirse en más redes SFN, pero siempre independientes de las demás regiones. En el caso de

Capítulo 3. Planificación de Frecuencias de TDT

Colombia son necesarias 4 frecuencias distribuidas en 5 redes SFN para servicios de ámbito regional.

Para la planificación de las redes locales, las áreas de servicio son más pequeñas, generalmente para ciudades. Sin embargo, se puede optimizar el uso del espectro radioeléctrico agrupando a todos los canales con la misma cobertura objetivo en un múltiple de TDT. Además, canales con cubiertas adyacentes pueden ser integrados en un mismo múltiple que genere una red SFN, siempre teniendo en mente que la cobertura objetivo de cada red se verá incrementada.

Capítulo 4

Planificación de Cobertura de TDT

El objetivo principal de este capítulo es planificar la cobertura y las interferencias entre sistemas de transmisión de televisión, tanto digital como analógicos, que deben coexistir durante el periodo de simulcast y post apagón analógico. Para ello, se aborda la planificación de redes SFN, se estudian las mutuas interferencias entre sistemas digitales DVB-T2 e ISDB-T, y se analiza las interferencias entre redes de televisión digital DVB-T2 y redes de televisión analógica NTSC. Los resultados se presentan como relaciones de protección Relación de Protección (RP) que luego son utilizadas en ejercicios de planificación para determinar las condiciones mínimas de convivencia entre los sistemas de televisión. Las RP son presentadas para canal Ricean, que moldea la recepción fija en azote con antena directiva. Los valores para recepción portable en interiores que se modela con un canal Rayleigh, pueden ser obtenidos utilizando un factor de corrección equivalente a la diferencia en términos de CNR. Las nuevas funcionalidades ante interferencias implementadas en DVB-T2 son analizadas y su impacto en condiciones realistas de planificación son introducidas. El uso de tamaños más grandes de FFT proporciona tiempos de símbolo más largos, y por ende tiempos de guarda superiores, esto establece la posibilidad de crear redes SFN de gran tamaño que podrían brindar cobertura nacional, Además, FFTs más grandes proporcionan una caída más rápida en los bordes del espectro, con la respectiva reducción en interferencias canal adyacente. Las técnicas de PAPR permiten trabajar a los amplificadores en su punto de saturación, lo que permite aumentar la cobertura y disminuir las emisiones espureas fuera de banda, ya que un pico en potencia a la entrada del amplificador se traduce en emisiones espureas generadas fuera de banda.

Las recomendaciones de convivencia presentadas en este capítulo, constituyen una útil guía para la implementación de redes TDT, tanto para los operadores de red como para los organismos de planificación y control de cada país.

El resto del capítulo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 4.1 se aborda la planificación y optimización de redes SFN. En la Sección 4.2 se aborda las interferencias entre redes de televisión digital DVB-T2 y analógica NTSC. En la Sección 4.3 se analiza las interferencias entre redes de televisión digital (DVB-T2, ISDB-T). Finalmente en la Sección 4.4 se presentan las conclusiones.

4.1. Planificación SFN

En esta sección se analizan varios modos de transmisión DVB-T2 comparando su desempeño en el entorno de Colombia. Para ello, en primer lugar se analiza la ganancia que ofrece cada modo en capacidad, cobertura y tamaño máximo posible de las redes SFN mediante simulaciones con una herramienta de planificación profesional. Adicionalmente, con el fin de mejorar al máximo la cobertura de las redes SFN, se efectúa una etapa de optimización de retardos artificiales. Para el estudio se ha utilizado la información disponible de la red primaria (38 transmisores) del operador RTVC de Colombia.

4.1.1. Optimización

La etapa de optimización de redes SFN consiste en ajustar adecuadamente los retardos artificiales de cada transmisor, de manera que se minimicen las interferencias inter-SFN. Para el caso de adjudicaciones, los transmisores teóricamente pueden estar localizados indistintamente en cualquier parte dentro del área de adjudicación. Como se ha mencionado en el capítulo 3, una asignación de frecuencia dentro del área de adjudicación, consiste en que cada transmisor que sea ingresado en el dicha área tendrá la frecuencia determinada para adjudicación. Aquí, los retardos artificiales son de gran utilidad para planificar la cobertura de manera que se minimicen las interferencias.

Cálculo Retardo Artificial en los Transmisores

Debido al efecto de la propagación multicamino, varias señales llegan al receptor con diferente potencia y retrasadas con respecto a la contribución principal. Para el cálculo de los retardos artificiales se tomó en cuenta el tiempo de llegada de cada señal con respecto a aquella de mayor potencia (señal principal). Así, si una señal llega fuera del intervalo de guarda es considerada destructiva, y se le asigna un retardo artificial δ de manera que llegue dentro

del intervalo de guarda. Este proceso se repite por cada señal recibida. Debido a que este procedimiento puede resultar complejo para redes SFN con un número elevado de transmisores, otra opción es realizar el cálculo de manera automática con alguna herramienta de planificación. Una ventaja de realizar el procedimiento de forma manual es que los retardos pueden ajustarse de manera que las interferencias sean alejadas de las zonas pobladas. De esta manera aunque existan interferencias en el área de cobertura, estas no son significativas debido a que no afecta en términos de población interferida.

4.1.2. Modos de Transmisión para Colombia

Varios modos de transmisión DVB-T2 fueron evaluados y su desempeño fué comparado con el modo DVB-T seleccionado inicialmente en Colombia (64 QAM, 3/4, FFT 8K, GI 1/4).

Ganancia en Cobertura

Para determinar la ganancia en cobertura se han seleccionado dos modos DVB-T2 que ofrecen la misma capacidad que el modo DVB-T de referencia (Tabla 4.1). Tanto los modos DVB-T2 como DVB-T seleccionados ofrecen la distancia SFN de 90 km.

Parámetros	DVB-T (referencia)	DVB-T2	
		Modo C1	Modo C2
Tamaño FFT	8K	8KE	16KE
Modulación (MOD)	16QAM	16QAM	16QAM
Tasa de Codificación (CR)	3/4	3/4	3/5
Intervalo de Guarda (GI)	1/4	1/4	1/8
Capacidad	11,2 Mbps	11,3 Mbps	11,51 Mbps
CNR Rice	15,7 dB	12,9 dB	9,9 dB
CNR Rayleigh	18.1 dB	14.9 dB	11.47 dB
Población cubierta	Fija	60.3%	62.1%
	Indoor	30.72%	32.4%

Tabla 4.1: Modos DVB-T2 para maximizar la cobertura.

EL modo C2 de DVB-T2 utiliza una FFT de mayor tamaño, lo que permite reducir el intervalo de guarda manteniendo la distancia entre transmisores. Esta reducción del intervalo de guarda implica que se puede utilizar una codificación mas robusta sin mermar la capacidad de transmisión, con la respectiva mejorar en robustez de la señal, 3 dB y 3.43 dB comparado con el modo C1 para

Capítulo 4. Planificación de Cobertura de TDT

recepción fija y portable, respectivamente. En contrapartida el uso de elevados tamaños de FFT implican un menor desempeño en condiciones de movilidad. Además, la mejora en robustez de la señal DVB-T2, permite mejorar la cobertura poblacional para recepción fija del 1.8 % y 3.83 % para los modos C1 y C2. La mejora en cobertura para recepción portable es del 1.68 % y 3.88 % para los modos C1 y C2, respectivamente.

Ganancia en Tamaño SFN

Para analizar la ganancia en tamaño de SFN ofrecida por los modos DVB-T2, se seleccionaron dos modos DVB-T2 con el mismo requerimiento en términos de CNR que el modo DVB-T de referencia. En la Tabla 4.2 se puede ver que manteniendo la CNR, los modos DVB-T2 permiten incrementar la capacidad gracias a la utilización de modulaciones de orden mayor (64 QAM), y la distancia máxima entre transmisores en la res SFN gracias a la utilización de elevados tamaños de FFT, que permite utilizar intervalos de guarda de menor duración.

Parámetros		DVB-T (REF.)	DVB-T2	
			Modo S1	Modo S2
Tamaño FFT		8K	32KE	16KE
Modulación		16QAM	64QAM	64QAM
Tasa de Codificación		3/4	3/5	3/5
Intervalo de Guarda		1/4	19/128	1/4
CNR Fija		15,7 dB	15,1 dB	15,1 dB
Distancia SFN		90 km	212 km	180 km
Capacidad		11,2 Mbps	15,8 Mbps	13,4 Mbps
Población	S.R.	59.2 %	61.6 %	61.6 %
Cubierta	C.R.	60.7 %	62.1 %	61.9 %
Población	S.R.	3.1 %	0.9 %	0.8 %
Interferida	C.R.	1.2 %	0.4 %	0.6 %
SR: Sin optimización de retardos				
CR: Con optimización de retardos				

Tabla 4.2: Modos DVB-T2 para maximizar el tamaño de las redes SFN.

Al realizar la optimización de las redes SFN, es posible disminuir las interferencias en un promedio del 1 % para todos los casos. Como en el caso anterior el uso del modo de transmisión S2 implica distancia más grandes entre transmisores, a costa de una penalización en condiciones de movilidad.

Finalmente, la elección del modo DVB-T2 debe ser un compromiso entre

ganancia en cobertura, capacidad y tamaño máximo de las redes SFN. Se ha comprobado que el uso de FFT elevados ofrece las mejores prestaciones, a costa de una penalización en condiciones de movilidad. Por otro lado el uso de tamaños de FFT de 16K ofrece un mejor compromiso entre capacidad, distancias SFN y recepción en condiciones de movilidad. Los resultados obtenidos en la presente sección son coherentes con los presentados en [9].

4.2. Interferencias con otras Redes de TV Analógica

4.2.1. Relaciones de Protección

Relaciones de Protección para Señales Deseadas de Televisión Analógica NTSC

La Tabla 4.3, muestra las relaciones de protección co-canal y canal adyacentes para señales analógicas NTSC interferidas por señales DVB-T2. En este caso, el efecto del tamaño de la FFT de la señal interferente DVB-T2 es insignificante para ambos casos, cocanal y canal adyacente. Por otra parte, el utilizar el modo ancho de banda extendido si afecta las relaciones de protección canal adyacente. La Tabla 4.4 muestra el factor de corrección para las relaciones de protección canal adyacente debido el uso de diferentes tamaños de FFT y del modo de ancho de banda extendido en la señal interferente DVB-T2.

Canal	Canal Ricean
$N-2$	-20
$N-1$	-3
N	37
$N+1$	-2
$N+2$	-20

Tabla 4.3: Relaciones de protección (dB) cocanal y canal adyacente para señales NTSC interferidas por señales digitales DVB-T2.

Canal	Factor de corrección		
	8K Ext.	16K Ext.	32K Ext.
$N-1$	0	1	1
N	0	1	2
$N+1$	1	2	2

Tabla 4.4: Factores de corrección (dB) para las relaciones de protección cocanal y canal adyacente de señales NTSC interferida por señales de televisión DVB-T2, para diferentes tamaños de FFT y el uso del modo ancho de banda extendido de la señal interferente.

4.2.2. Ejercicios de Planificación

Interferencias entre Redes de Televisión Analógica NTSC y Digital DVB-T2

Descripción del Escenario Para los estudios de planificación se ha elegido el área de Cali como escenario de despliegue, donde existen tres transmisores del operador público Radio Televisión de Colombia (RTVC) que dan servicio de televisión analógica NTSC. Dichos emplazamientos son los de Cristo Rey, Tres Cruces y La Azalea. Los parámetros de dichas estaciones vienen resumidos en la Tabla 4.5.

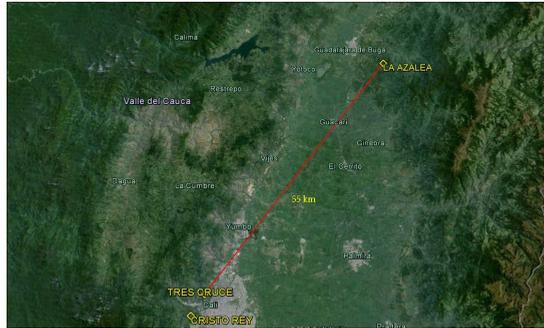
Emplazamiento	Canales	Altura antena Tx (m)	Ganancia antena Tx (dBd)	Potencia Tx (W)
Cristo Rey	39, 41, 43	28	17.37	100
Tres Cruces	45, 47, 49	23	13.0	100
La Azalea	7, 9, 11	112.4	14.12	10000

Tabla 4.5: Parámetros de las estaciones analógicas en el escenario de Cali.

En dichos emplazamientos, tanto el operador público como el privado pretenden instalar también transmisores de televisión digital DVB-T2, como se puede observar en la Figura 4.1 (a). Los parámetros de las estaciones digitales son resumidos en la Tabla 4.6.

Al realizar una vista ampliada sobre la ciudad de Cali se puede observar que los transmisores analógicos/digital de Tres Cruces y Cristo Rey están situados a 6 y 5 km del centro de la ciudad tal y como se muestra en la Figura 4.1 (b).

4.2 Interferencias con otras Redes de TV Analógica



(a) a



(b) b

Figura 4.1: Escenario de Cali.

Emplazamiento	Canal	Altura antena Tx (m)	Ganancia antena Tx (dBd)	Potencia Tx (W)
Cristo Rey	40	28	17.37	100
Tres Cruces	46	23	13	100
La Azalea	10	112.4	14.12	10000

Tabla 4.6: Parámetros de las estaciones digitales en el escenario de Cali.

Interferencia con la configuración de partida Como paso previo se analizan las interferencias producidas para la configuración de partida, es decir, la configuración y condiciones de adyacencia descritas en la Tabla 4.5 y Tabla 4.6.

Capítulo 4. Planificación de Cobertura de TDT

Para los análisis se utilizan las relaciones de protección descritos en la Tabla 4.4 y Tabla 4.3.

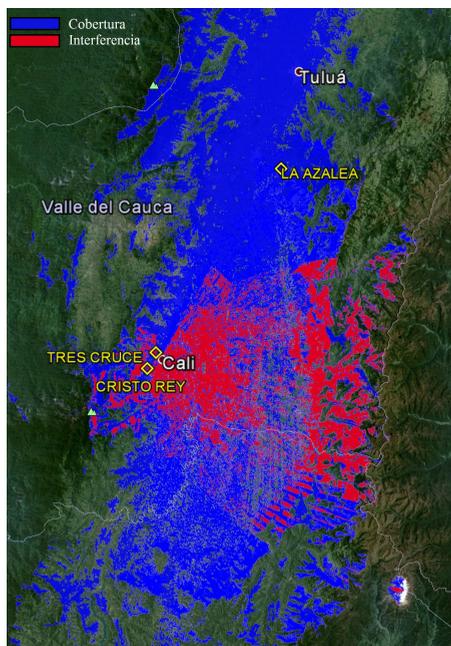


Figura 4.2: Interferencias sobre la red analógica producida por la red digital funcionando en el canal adyacente $N+1$, para los valores de potencia transmitida nominales.

La Figura 4.2 muestra las interferencias sobre la red analógica para los emplazamientos de Tres Cruces, Cristo Rey y la Azalea; donde las interferencias son del 69.18%, 8.47% y 1.98% de sus áreas de cobertura, respectivamente. para el caso de la red analógica interfiriendo a la red digital no se presentan interferencias, debido a la mayor robustez de la señal digital (valor menor de la relación de protección). Se puede observar cómo las relaciones de protección, cuando la señal de televisión analógica es la deseada son mucho peores (valor mayor). De hecho, DVB-T2 permite que el nivel de señal deseada esté por debajo de la interferente hasta en 39 dB (-39 dB de relación de protección) para canal adyacente. Sin embargo, en el caso de NTSC, para que no se produzca interferencia la señal deseada debe tener al menos la misma potencia que la interferente incluso operando en canal adyacente. Por este motivo, en el escenario de partida no se puede evitar la aparición de interferencias en el área de Cali si la red analógica y la digital emiten en condiciones de adyacencia.

4.2 Interferencias con otras Redes de TV Analógica

Si se radia con una diferencia considerable entre la potencia analógica y la digital, o la zona a la que se desea radiar es diferente para el transmisor analógico y digitales, el hecho de que los transmisores posean el mismo diagrama, favorecerá la aparición de interferencias pues en recepción habrá grandes diferencias de potencias entre la señal analógica y la señal digital y no se cumplirá la relación de protección. Sin embargo, para potencias radiadas similares y cuando se desea radiodifundir la señal a una misma área, el uso del mismo diagrama de radiación contribuye a la desaparición de interferencias como se verá en los siguientes análisis.

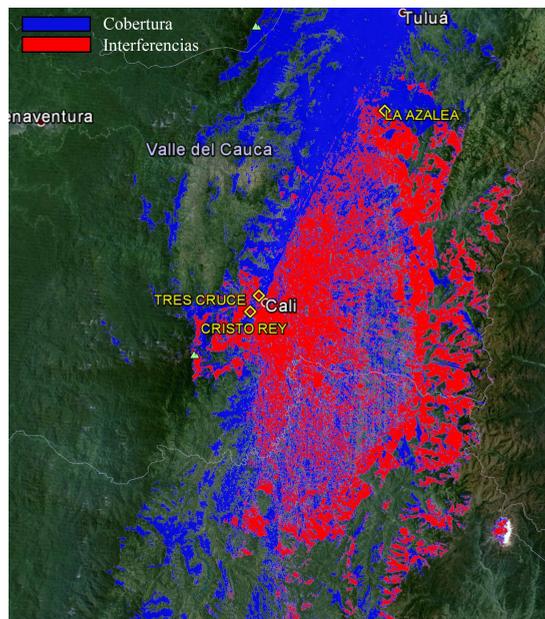


Figura 4.3: Interferencias sobre la red analógica producida por la red digital funcionando en el canal adyacente $N+1$, para los valores de potencia transmitida nominales y diagramas de radiación omnidireccionales.

Por tanto, para los análisis posteriores y de cara a evaluar la problemática de la convivencia entre la red analógica y digital de forma genérica, se tendrán en cuenta diagramas omnidireccionales en todos los emplazamientos. Repitiendo el análisis anterior, pero estableciendo diagramas omnidireccionales en todos los emplazamientos analógicos y digitales, se puede ver en la Figura 4.3 cómo la zona de interferencia es mucho mayor, llegando a ser 76.44 %, 11.14 % y 2.52 % del área de cobertura para los emplazamientos Tres Cruces, Cristo Rey y la

Capítulo 4. Planificación de Cobertura de TDT

Azalea, respectivamente.

Debido a la futura coexistencia de las redes analógicas NTSC y digitales DVB-T2 durante la fase de despliegue, resulta de interés analizar diferentes casos de estudio que proporcionen recomendaciones genéricas para planificar las redes digitales adecuadamente. Con tal fin se proponen los siguientes casos de estudio:

Caso A: Emplazamientos co-localizados Para el análisis se asume que todos los transmisores analógicos y digitales se encuentran en el mismo lugar, emiten con la misma potencia, y los canales digitales y analógicos son adyacentes tal y como se resume en la Tabla 4.7.

Emplazamiento	PIRE analógica (W)	PIRE digital (W)	Canal analógico	Canal digital
Cristo Rey	5000	5000	39, 41, 43	40
Tres Cruces	5000	5000	45, 47, 49	46
La Azalea	5000	5000	7, 9, 11	8

Tabla 4.7: Distribución de canales digitales y analógicos en condiciones de adyacencia.

Si suponemos para todos los transmisores, tanto analógico como digital, la misma potencia radiada PIRE de 5000 W, en la Figura 4.4 se observa que para el caso más restrictivo (canal $N+1$) se producen muy pocas interferencias en el área de cobertura. Esto se debe a que el margen de protección para NTSC interferida por DVB-T2 es de -1 dB y 0 dB para los canales adyacentes $N-1$ y $N+1$ respectivamente ¹. Este valor significa que en condiciones de adyacencia, la potencia analógica ha de ser al menos igual que la digital para evitar interferencias, condición que se cumple en el escenario descrito. Las mínimas zonas de interferencia son debido a la refracción de las señales.

El valor de las relaciones de protección obtenido en medidas de laboratorio demuestra la poca robustez de la señal analógica NTSC frente a la digital DVB-T2, ya que incluso operando en condiciones de adyacencia la señal analógica ha de tener al menos igual potencia que la señal digital para poder ser recibida correctamente. Si la potencia de la señal analógica es menor que la digital las interferencias se ven considerablemente incrementadas.

¹Valor para la configuración DVB-T2 de referencia (Mod 64 QAM, Cod 2/3, FFT 16K extendido)

4.2 Interferencias con otras Redes de TV Analógica



Figura 4.4: Interferencias sobre la red analógica desde la red digital para el canal $N+1$ con todos los emplazamientos emitiendo con la misma potencia (5000 W).

Debido a que en el escenario analizado existen señales de múltiples transmisores, trabajando en adyacencia tanto para canal adyacente superior como para canal adyacente inferior, se ha elegido el emplazamiento de Tres Cruces para hacer un estudio en detalle de la influencia de las relaciones de protección en planificación y extraer conclusiones genéricas. En la Tabla 4.8 se aprecia las frecuencias seleccionadas para los estudios.

	Frecuencia canal analógico (MHz)	Frecuencia canal digital (MHz)
$N+1$	669.25	677
$N-1$	669.25	665

Tabla 4.8: Frecuencias adyacentes para el caso $N+1$ y $N-1$.

Interferencias para el canal Adyacente Inferior ($N+1$) Para el emplazamiento de Tres Cruces, asumiendo un transmisor digital y uno analógico de igual potencia radiada, diagramas de radiación omnidireccionales y frecuencias descritas en la Tabla 4.8.

La relación de protección es de 0 dB, esto quiere decir que para evitar interferencias la potencia de la señal digital debe tener como mucho la misma potencia que la señal analógica. Si se necesita mayor potencia digital un canal de guarda debe ser utilizado. En la Figura 4.5 se observa que al respetarla relación de protección de 0 dB Las interferencias son mínimas (0.43 % del área de cobertura), Esto debido a la refracción de las señales. Por otra parte, en la Figura 4.6 se observa como al transmitir en digital con 2 dB mas de potencia que en analógico, las interferencias se incrementan hasta el 100 % del área de cobertura.

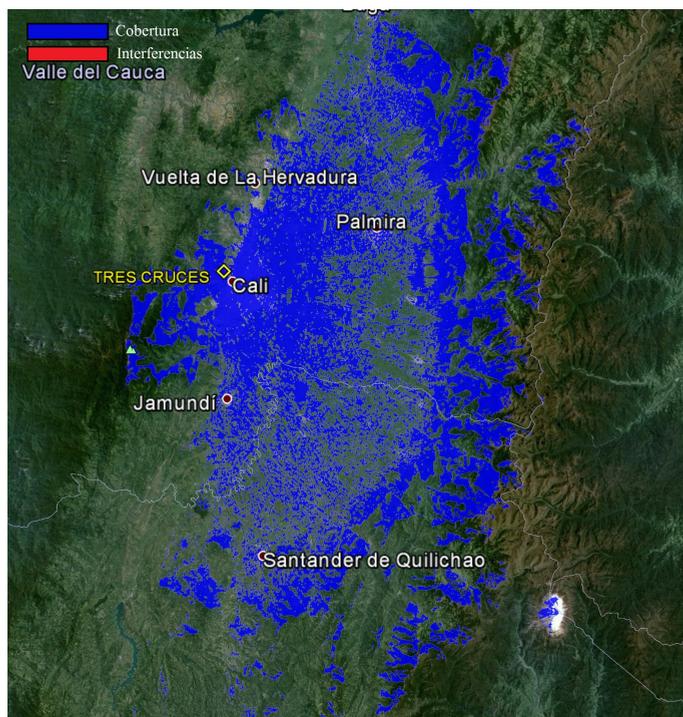


Figura 4.5: Interferencias sobre la red analógica desde la red digital para el canal $N+1$ emplazamiento Tres Cruces.

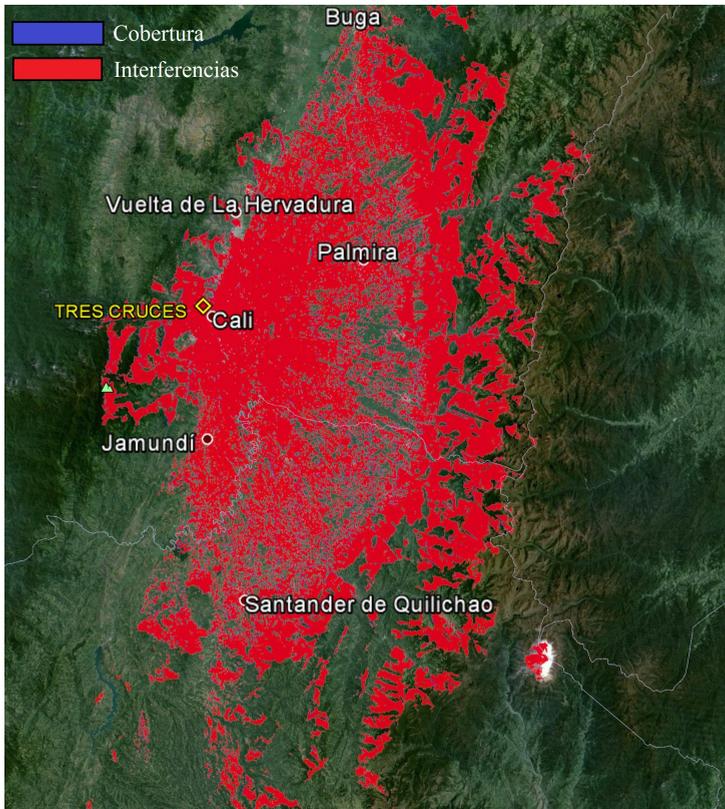


Figura 4.6: Interferencias sobre la red analógica desde la red digital para el canal $N+1$, emplazamiento Tres Cruces transmitiendo 2 dB más de potencia digital que analógica.

Interferencias Canal Adyacente Superior ($N-1$) A continuación se analiza el mismo escenario pero en el caso de tener adyacencia por el canal adyacente inferior. En este caso, las frecuencias a analizar en cada estación vienen definidas en la Tabla 4.8.

La relación de protección para este caso es de -1 dB (la potencia digital puede ser hasta 1 dB superior a la analógica). Por tanto, cuando transmisores colocalizados emiten a la misma potencia no se presentan interferencias. En la Figura 4.7 se muestra que las interferencias nuevamente son del 100% del área de cobertura cuando el transmisor digital transmite con solo 2 dB más de potencia que el analógico.

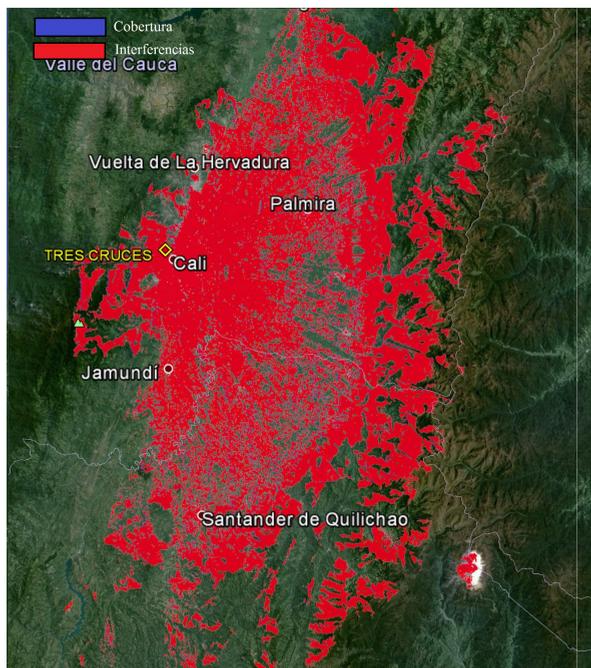


Figura 4.7: Interferencias sobre la red analógica desde la red digital para el canal $N-1$, emplazamiento Tres Cruces transmitiendo 2 dB más de potencia digital que analógica.

Nuevamente, del análisis se desprende la poca robustez que tiene la señal de NTSC frente a la de DVB-T2, donde los márgenes de protección requeridos para evitar la interferencia indican que para convivencia de ambas tecnologías en canal adyacente, la potencia analógica ha de estar por encima de la digital 2 dB en el peor de los casos.

Si por otro lado, se desea recibir la señal digital correctamente, se ha de tener en cuenta que el margen de protección cuando DVB-T2 es la señal deseada y se opera en canal adyacentes es de -31 dB. Por lo tanto, la potencia analógica se puede aumentar hasta en 31 dB por encima de la digital para recibir correctamente ambas señales.

Caso B: Emplazamientos NO co-localizados Hasta ahora se ha evaluado el caso en el que, los transmisores analógico y digital se encuentran ubicados en el mismo emplazamiento y emiten en condiciones de adyacencia. Otro caso a tener en cuenta, es aquel en el que los canales están en adyacencia, pero sin embargo, los transmisores analógico y digital se encuentran en distintas ubicaciones. Como se dedujo en el apartado anterior, el peor caso de adyacencia

4.2 Interferencias con otras Redes de TV Analógica

es el canal adyacente $N+1$, de tal manera el análisis en la presente sección se centra en dicho canal. Para analizar este caso y obtener recomendaciones genéricas para planificación, se han elegido las configuraciones de la Tabla 4.9.

Emplazamiento	Tecnología	Frecuencia Central (MHz)	Diagrama de Radiación	Potencia Radiada (W)
La Azalea	DVB-T2	665	Omni	5000
Cristo Rey	NTSC	657.25	Omni	5000

Tabla 4.9: Configuración del escenario B, donde la red analógica y digital operan en adyacencia y los transmisores no están colocalizados.

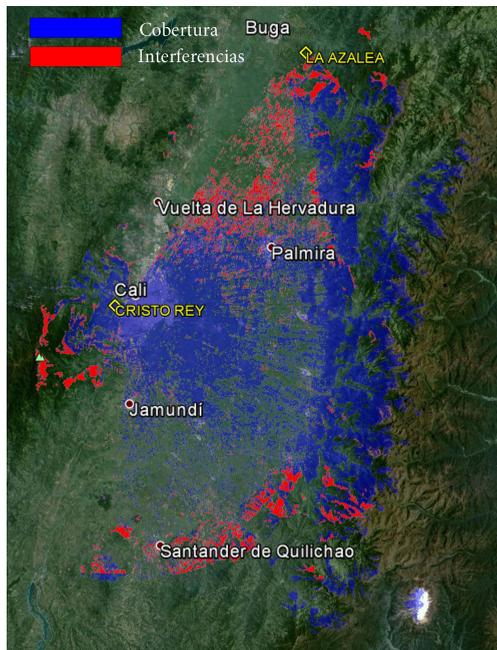


Figura 4.8: Interferencia en la señal analógica NTSC de Cristo Rey producida por una señal digital de La Azalea cuando ambos transmisores emiten con la misma potencia y en condiciones de adyacencia $N+1$.

En la Figura 4.8 se observa la zona de cobertura e interferencias. Se puede notar que en la zona cercana al al transmisor analógico no existen interferencias.

Esto debido a que la potencia digital en dicha zona no supera la la potencia analógica. Esta distancia corresponde a un radio de aproximadamente 30 km alrededor del transmisor analógico Cristo Rey. Mientras más distante al transmisor analógico, menor es la potencia analógica y mayor la potencia digital recibida. Esto provoca que no se cumpla la relación de protección y por ende, aparecen interferencias en el 12.17% de la zona de cobertura.

Del análisis de la Figura 4.8, también se puede deducir cómo a medida que se separan los transmisores analógico y digital, mayor nivel de interferencias se produce a los bordes de la cobertura analógica

4.3. Interferencias con otras Redes de TDT

4.3.1. Relaciones de Protección

Relaciones de Protección para Señales Deseadas de Televisión Digital Terrestre DVB-T2

Protección de una Señal de Televisión Digital Terrestre DVB-T2 Interferida por una Señal de Televisión Digital Terrestre DVB-T2 Las relaciones de protección cocanal son equivalentes la relación portadora a ruido (C/N), debido a que la interferencia introducida es similar a la de ruido térmico en el ancho de banda del canal, y en consecuencia son independientes del ancho de banda (es decir, 6, 7 o 8 MHz) [114].

Las relaciones de protección cocanal dependen de la modulación Mod, la codificación Cod y el patrón de portadoras piloto de la señal deseada. Ni el tamaño de la FFT de la señal interferente ni el uso del modo de ancho de banda extendido afecta a las relaciones de protección cocanal. Se ha encontrado que este aproximación es correcta para el Rx1, mientras que para los receptores Rx2 y Rx3, los valores de relaciones de protección cocanal son en promedio 1 dB peores que las C/N teórica propuesta en [36].

En la Tabla 4.10 se presentan las relaciones de protección cocanal en función de la modulación y tasa de codificación de la señal útil.

4.3 Interferencias con otras Redes de TDT

Modulación	Cod	RP	Modulación	Cod	RP
QPSK	1/2	6	64-QAM	1/2	13
QPSK	3/5	6	64-QAM	3/5	15
QPSK	2/3	7	64-QAM	2/3	16
QPSK	3/4	8	64-QAM	3/4	18
QPSK	4/5	8	64-QAM	4/5	19
QPSK	5/6	9	64-QAM	5/6	20
16-QAM	1/2	11	256-QAM	1/2	17
16-QAM	3/5	12	256-QAM	3/5	20
16-QAM	2/3	13	256-QAM	2/3	21
16-QAM	3/4	14	256-QAM	3/4	23
16-QAM	4/5	15	256-QAM	4/5	24
16-QAM	5/6	16	256-QAM	5/6	26

Tabla 4.10: Relaciones de protección (dB) cocanal para señales DVB-T2 interferida por señales DVB-T2, canal Rice.

Los valores recomendados a partir de los estudios realizados en la presente tesis se muestran en la Tabla 4.10 y dependen sólo de la modulación y la tasa de codificación Forward Error Correction (FEC). El efecto del patrón de portadoras piloto puede considerarse insignificante porque las variaciones son del orden de décimas de dB.

El uso de constelaciones rotadas mejoran las relaciones de protección en menos de 1 dB para la configuración de ganancia máxima (modulación QPSK y tasa de codificación 5/6). La ganancia depende del algoritmo de procesamiento de señales implementado en el receptor, incluso habiendo medido casos que presentan ganancias negativas, aunque siempre inferiores a 1 dB. Como la variación en la mayoría de los casos es despreciable, se recomienda que este factor no se debe tener en cuenta para el cálculo de las relaciones de protección cocanal.

Las relaciones de protección de canal adyacente para señales DVB-T2 interferidas por señales DVB-T2 se ven afectados por la modulación, la tasa de FEC de la señal deseada, así como el tamaño de FFT y el uso de ancho de banda extendido de la señal interferente. La Tabla 4.11 muestra las relaciones de protección para canales adyacentes $N-1$ y $N+1$. Para el canal adyacente $N\pm 2$ la relación relaciones de protección medida fue de -45 dB.

Las relaciones de protección de canal adyacente para diferentes tamaños de FFT de la señal interferente se pueden obtener aplicando los factores de corrección que se muestran en Tabla 4.12.

Capítulo 4. Planificación de Cobertura de TDT

Modulación	Cod	$N \pm 1$	Modulación	Cod	$N \pm 1$
QPSK	1/2	-43	64-QAM	1/2	-39
QPSK	3/5	-43	64-QAM	3/5	-39
QPSK	2/3	-42	64-QAM	2/3	-39
QPSK	3/4	-42	64-QAM	3/4	-39
QPSK	4/5	-42	64-QAM	4/5	-37
QPSK	5/6	-42	64-QAM	5/6	-35
16-QAM	1/2	-42	256-QAM	1/2	-39
16-QAM	3/5	-42	256-QAM	3/5	-38
16-QAM	2/3	-41	256-QAM	2/3	-36
16-QAM	3/4	-40	256-QAM	3/4	-33
16-QAM	4/5	-40	256-QAM	4/5	-31
16-QAM	5/6	-40	256-QAM	5/6	-29

Tabla 4.11: Relaciones de protección (dB) canal adyacente para señales DVB-T2 interferidas por señales DVB-T2, canal Rice.

Modo	Canal	1K	2K	4K	8K	16K	32K
Normal	$N-1$	4	3	2	0	-1	-1
	$N+1$	3	2	1	0	-1	-1
Extendido	$N-1$	n/a	n/a	n/a	1	0	0
	$N+1$	n/a	n/a	n/a	1	0	0

Tabla 4.12: Factores de corrección (dB) para las relaciones de protección canal adyacente de señales DVB-T2 interferidas por señales DVB-T2, para diferentes tamaños de FFT de la señal interferente.

Protección de una Señal de Televisión Digital Terrestre DVB-T2 Interferida por una Señal de Televisión Digital Terrestre ISDB-T Las relaciones de protección cocanal para una señal DVB-T2 deseada interferida por una señal ISDB-T se muestran en la Tabla 4.13. Estas relaciones de protección se ven afectados principalmente por la modulación y tasa de codificación de la señal útil. El tamaño FFT y el uso de modo de ancho de banda extendido de la señal no afecta significativamente a las relaciones de protección cocanal.

La norma ISDB-T proporciona la inclusión de un desplazamiento de frecuencia de 1/7 MHz de la portadora central de la modulación OFDM. El no usar el desplazamiento de frecuencia en la señal ISDB-T deteriora las relaciones de protección cocanal en 1 dB.

4.3 Interferencias con otras Redes de TDT

En la Tabla 4.15 se muestran las relaciones de protección canal adyacente $N+1$ para una señal DVB-T2 interferida por señal ISDB-T. Estas relaciones de protección se ven afectadas por la modulación y tasa de codificación de la señal útil, así como por el tamaño de la FFT y el desplazamiento en frecuencia (1/7 MHz) de la señal interferente. Debido al offset de frecuencia que implementa ISDB-T, las relaciones de protección canal $N-1$ son 2 dB mejores.

Modulación	Cod	RP	Modulación	Cod	RP
QPSK	1/2	5	64-QAM	1/2	12
QPSK	3/5	5	64-QAM	3/5	14
QPSK	2/3	6	64-QAM	2/3	15
QPSK	3/4	7	64-QAM	3/4	17
QPSK	4/5	7	64-QAM	4/5	18
QPSK	5/6	8	64-QAM	5/6	19
16-QAM	1/2	10	256-QAM	1/2	16
16-QAM	3/5	11	256-QAM	3/5	19
16-QAM	2/3	12	256-QAM	2/3	20
16-QAM	3/4	13	256-QAM	3/4	22
16-QAM	4/5	14	256-QAM	4/5	23
16-QAM	5/6	15	256-QAM	5/6	25

Tabla 4.13: Relaciones de protección (dB) cocanal para señales DVB-T2 interferidas por señales ISDB-T, canal Rice.

El desplazamiento en frecuencia obligatorio de ISDB-T mejora las relación de protección para el canal adyacente superior ($N + 1$), pero deteriora la relación de protección canal adyacente inferior ($N - 1$). Esto se traduce en relaciones de protección asimétricas. Los factores de corrección de la Tabla 4.14 se deben aplicar a las relaciones de protección canal adyacente, debido al uso de diferentes tamaños de FFT de la señal ISDB-T interferente.

Canal	2K	4K	8K
$N-1$	3	1.5	0
$N+1$	1.5	1	0

Tabla 4.14: Factores de corrección (dB) para las relaciones de protección canal adyacente de señales DVB-T2 interferidas por señales ISDB-T, para diferentes tamaños de FFT de la señal interferente.

Capítulo 4. Planificación de Cobertura de TDT

Modulación	Cod	$N + 1$	Modulación	Cod	$N + 1$
QPSK	1/2	-46	64-QAM	1/2	-42
QPSK	3/5	-46	64-QAM	3/5	-42
QPSK	2/3	-45	64-QAM	2/3	-42
QPSK	3/4	-45	64-QAM	3/4	-42
QPSK	4/5	-45	64-QAM	4/5	-40
QPSK	5/6	-45	64-QAM	5/6	-38
16-QAM	1/2	-45	256-QAM	1/2	-42
16-QAM	3/5	-45	256-QAM	3/5	-41
16-QAM	2/3	-44	256-QAM	2/3	-39
16-QAM	3/4	-43	256-QAM	3/4	-36
16-QAM	4/5	-43	256-QAM	4/5	-34
16-QAM	5/6	-43	256-QAM	5/6	-32

Tabla 4.15: Relaciones de protección (dB) canal adyacente para señales DVB-T2 interferidas por señales ISDB-T sin desplazamiento de frecuencia, canal Rice.

Protección de una Señal de Televisión Digital Terrestre DVB-T2 Interferida por una Señal de Televisión Analógica NTSC En el caso de señales de televisión digital terrestre DVB-T2 interferidas por señales de televisión analógica NTSC, las relaciones de protección cocanal no pueden aproximarse a su respectiva C/N como en el caso de interferencias digitales. En este caso, además de la modulación y la tasa de codificación de la señal DVB-T2, las relación de protección también depende del tamaño de la FFT de la señal DVB-T2.

La Tabla 4.16 muestra las relaciones de protección cocanal en función de la modulación y la tasa de codificación. Los factores de corrección de la Tabla 34 se deben aplicar para el uso de diferentes tamaños de FFT de la señal deseada DVB-T2.

En el caso de interferencias canal adyacente, las relaciones de protección son principalmente afectadas por los mismos factores que en el caso de interferencias cocanal. Estos son: modulación, tasa de codificación FEC, y tamaño de la FFT de la señal útil DVB-T2.

En la Tabla 4.17 se presentan los valores para los canales adyacentes superior e inferior $N \pm 1$. Los factores de corrección debido a la utilización de diferentes tamaños de FFT son los mismos que para el caso co-canal, presentados en la Tabla 4.18.

Para los canales adyacentes $N \pm 2$ se han realizado mediciones para las configuraciones 64-QAM 2/3 y 64-QAM 3/4. Los valores de relación de protección son -39 dB y -35 dB respectivamente.

4.3 Interferencias con otras Redes de TDT

Modulación	Cod	RP	Modulación	Cod	RP
QPSK	1/2	-13	64-QAM	1/2	-5
QPSK	3/5	-12	64-QAM	3/5	-3
QPSK	2/3	-11	64-QAM	2/3	-1
QPSK	3/4	-9	64-QAM	3/4	2
QPSK	4/5	-9	64-QAM	4/5	4
QPSK	5/6	-7	64-QAM	5/6	5
16-QAM	1/2	-10	256-QAM	1/2	-3
16-QAM	3/5	-8	256-QAM	3/5	2
16-QAM	2/3	-8	256-QAM	2/3	3
16-QAM	3/4	-5	256-QAM	3/4	6
16-QAM	4/5	-4	256-QAM	4/5	6
16-QAM	5/6	-5	256-QAM	5/6	9

Tabla 4.16: Relaciones de Protección (dB) cocanal para señales DVB-T2 interferidas por señales de televisión analógica NTSC, canal Rice.

Modulación	Cod	$N \pm 1$	Modulación	Cod	$N \pm 1$
QPSK	1/2	-41	64-QAM	1/2	-29
QPSK	3/5	-39	64-QAM	3/5	-27
QPSK	2/3	-36	64-QAM	2/3	-25
QPSK	3/4	-33	64-QAM	3/4	-22
QPSK	4/5	-32	64-QAM	4/5	-20
QPSK	5/6	-30	64-QAM	5/6	-19
16-QAM	1/2	-34	256-QAM	1/2	-25
16-QAM	3/5	-32	256-QAM	3/5	-22
16-QAM	2/3	-29	256-QAM	2/3	-20
16-QAM	3/4	-27	256-QAM	3/4	-17
16-QAM	4/5	-26	256-QAM	4/5	-16
16-QAM	5/6	-24	256-QAM	5/6	-14

Tabla 4.17: Relaciones de Protección (dB) canal adyacente para señales DVB-T2 interferidas por señales de televisión analógica NTSC, canal Rice.

Capítulo 4. Planificación de Cobertura de TDT

Modo	Canal	1K	2K	4K	8K	16K	32K
Normal	$N \pm 1$	2	2	2	1	0	0
	N	4	3	3	3	0	-1
Extendido	$N \pm 1$	n/a	n/a	n/a	1	0	0
	N	n/a	n/a	n/a	3	0	0

Tabla 4.18: Factores de corrección (dB) para las relaciones de protección co-canal de señales DVB-T2 interferida por señales de televisión NTSC, para diferentes tamaños de FFT de la señal útil.

Relaciones de Protección para Señales Deseadas de Televisión Digital Terrestre ISDB-T

Protección de una Señal de Televisión Digital Terrestre ISDB-T Interferida por una Señal de Televisión Digital Terrestre DVB-T2 En la Tabla 4.19 se muestran las relaciones de protección cocanal para señales ISDB-T interferidas por señales DVB-T2, que dependen de la modulación y la tasa de codificación de la señal útil ISDB-T. En este caso, las mediciones han demostrado que los resultados son independientes de la modulación y tasa de codificación de la señal DVB-T2 interferente, y que la influencia del tamaño de la FFT y el modo ancho de banda extendido es insignificante.

La no utilización del desplazamiento de frecuencia de 1/7 MHz de la señal ISDB-T empeoran en 1 dB la relación de protección cocanal. El uso de la técnica de PAPR TR y ACE de DVB-T2 reduce el margen de protección en aproximadamente 2 dB.

Modulación	Cod	RP	Modulación	Cod	RP
DQPSK	1/2	5	16-QAM	5/6	15
DQPSK	2/3	7	16-QAM	7/8	16
DQPSK	3/4	8	64-QAM	1/2	16
DQPSK	5/6	8	64-QAM	2/3	19
DQPSK	7/8	9	64-QAM	3/4	20
16-QAM	1/2	11	64-QAM	5/6	21
16-QAM	2/3	13	64-QAM	7/8	22
16-QAM	3/4	14			

Tabla 4.19: Relaciones de Protección (dB) cocanal para señales ISDB-T interferidas por señales DVB-T2, canal Rice.

Las relaciones de protección canal adyacente depende de la modulación y

4.3 Interferencias con otras Redes de TDT

la tasa de codificación de la señal deseada ISDB-T, el tamaño de la FFT y el uso del modo de ancho de banda extendido de la señal interferente DVB-T2 .

En la Tabla 4.20 se presentan las relaciones de protección para canal adyacente inferior y superior en base a la modulación y tasa de codificación de la señal ISDB-T interferida por una señal DVB-T2 con una FFT de 8K y usar el modo de ancho de banda extendido. La Tabla 4.21 muestra los factores de corrección para diferentes tamaños de la FFT y utilización del modo de ancho de banda extendido de la señal interferente DVB-T2.

En el caso de no utilizar el desplazamiento frecuencia, las relaciones de protección para el canal inferior $N-1$ son 1 dB peores, mientras que las relaciones de protección para el canal superior $N+1$ mejoran en 1 dB.

El uso de la técnica de PAPR TR mejora el margen de protección aproximadamente en 1 dB y 1.5 dB para el canal $N-1$ y $N+1$ respectivamente. Esta asimetría se debe también al *offset* que implementa ISDB-T. Al utilizar ACE la mejora es todavía mayor, 1 dB y 2 dB para los canales $N-1$ y $N+1$, respectivamente.

Modulación	Cod	$N-1$	$N+1$
QPSK	1/2	-30	-28
QPSK	2/3	-30	-28
QPSK	3/4	-30	-27
QPSK	5/6	-29	-27
QPSK	7/8	-29	-27
16-QAM	1/2	-29	-27
16-QAM	2/3	-29	-27
16-QAM	3/4	-28	-26
16-QAM	5/6	-28	-26
16-QAM	7/8	-28	-26
64-QAM	1/2	-28	-26
64-QAM	2/3	-27	-25
64-QAM	3/4	-27	-25
64-QAM	5/6	-26	-25
64-QAM	7/8	-24	-25

Tabla 4.20: Relaciones de Protección (dB) canal adyacente para señales ISDB-T interferidas por señales DVB-T2.

Modo	Canal	1K	2K	4K	8K	16K	32K
Normal	$N-1$	4	1	0	0	-1	-2
	$N+1$	5	2	1	0	0	-1
Extendido	$N-1$	n/a	n/a	n/a	1	2	2
	$N+1$	n/a	n/a	n/a	2	2	2

Tabla 4.21: Factores de corrección (dB) para las relaciones de protección canal adyacente de señales ISDB-T interferida por señales de televisión DVB-T2, para diferentes tamaños de FFT de la señal interferente.

Las relaciones de protección obtenidos cuando la señal útil es ISDB-T y la interferente es DVB-T2 son más restrictivos que las relaciones de protección propuestos por la ITU en la Recomendación ITU-R BT.1368 [7] para ISDB-T interferida por ISDB-T. Esto se debe a la confluencia de varios factores.

- La señal ISDB-T presenta un offset en frecuencia que implica que el margen de protección sea más restrictivo cuando la señal DVB-T2 interferente se encuentra en frecuencias superiores (caso $N+1$).
- El uso del modo extendido de DVB-T2, lo cual aumenta el ancho de banda nominal de 5,71 MHz a 5,83 MHz, mientras que el ancho de banda efectivo de la señal ISDB-T es de 5,57 MHz.

4.3.2. Ejercicios de Planificación

Interferencias entre Redes de Televisión Digital DVB-T2 e ISDB-T

En este apartado se aborda la planificación de cobertura en fronteras desde dos enfoques, primero considerando que no existan acuerdos bilaterales en fronteras, y luego considerando una distribución de canales pares e impares.

Descripción del Escenario Se ha tomado como escenario de análisis la frontera entre Colombia y Ecuador, en donde DVB-T2 e ISDB-T deben coexistir. Para el análisis se tomaron las estaciones digitales proyectadas para Ecuador y Colombia que se muestran en la Tabla 4.22. Con el objetivo de estudiar todas las posibles interferencias y obtener conclusiones genéricas, se asume diagramas de radiación omnidireccionales para todas las estaciones, y que las estaciones de cada país forman una red SFN por país. Además, según el actual acuerdo de fronteras entre Ecuador y Colombia (desarrollado para la televisión analógica), se adopta una distribución de canales pares e impares para Ecuador y Colombia, respectivamente. Sin embargo, en la presente sección se analiza también la posibilidad de reutilizar frecuencias en el país vecino.

4.3 Interferencias con otras Redes de TDT

Estación	Posición Geográfica (Lat. y Long.)	Altura Antena Tx (m)	PIRE Tx (W)	Operador
Montería	8° 52' 23.0" N 75° 38' 27.0" O	86	5000	Colombia
Mirador	1° 4' 10.5" N 76° 44' 10.3" O	35.79	5000	Colombia
Troya bajo	0° 39' 31.5" N 77° 42' 25.5" O	36	5000	Ecuador
Bermejo	0° 8' 29.6" N 77° 20' 0.9" O	30	5000	Ecuador

Tabla 4.22: Parámetros de Transmisores fronterizos entre Ecuador y Colombia.

Caso A: Reuso de Frecuencias en Frontera Según los acuerdos de frontera que se muestran en la Sección A.12, se debe asegurar una intensidad de campo eléctrico mínima a proteger. Esto quiere decir que las emisiones de un país dentro de otro no puede sobrepasar determinado umbral, dicho umbral asegura la no interferencia a las redes internas de país interferido. El campo eléctrico protegido es de $(53dB\mu V/m)$ para DVB-T2 interfiriendo ISDB-T y $57,9dB\mu V/m$ en la situación opuesta). Para mayor detalle el lector puede dirigirse a las Sección 3.2.1.

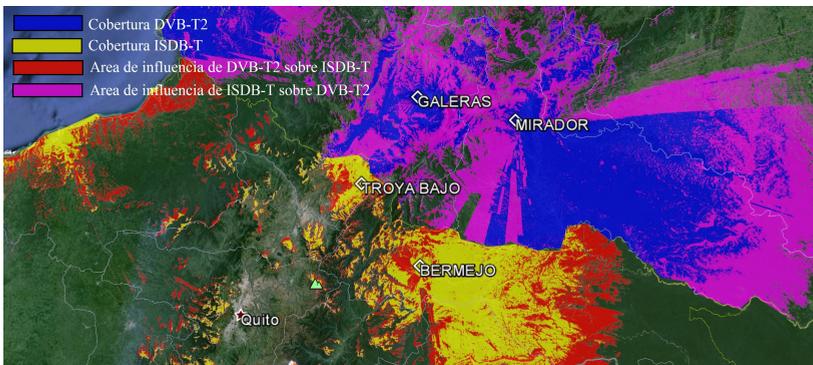


Figura 4.9: Cobertura y zonas de influencia co-canal para ISDB-T y DVB-T2 en zona de frontera entre Ecuador y Colombia.

En la Figura 4.9 se muestra la cobertura y el área en frontera (fucsia y rojo)

donde no se asegura la intensidad de campo eléctrico mínimo a proteger, lo que impide re-usar la frecuencia usada por el país vecino.

Caso B: Distribución de Frecuencias Pares/Impares En la Figura 4.10 se aprecia que a pesar de estar las señales en canales adyacentes (distribución par/impar), siguen existiendo interferencias perjudiciales en la zona de frontera de los países.



Figura 4.10: Cobertura e interferencias canal adyacente para ISDB-T y DVB-T2 en zona de frontera entre Ecuador y Colombia.

El offset de la frecuencia central de canal obligatorio en ISDB-T de 1/7 MHz hacen que la distribución de frecuencias alternadas por canales pares e impares para cada país no sea la distribución óptima del espectro. Distribuir el espectro por bloques de canales para cada tecnología permite mejor uso del mismo. Además, la utilización de bloques de canales tiene la ventaja de ser menos exigente desde el punto de vista de planificación de redes al tener que asegurar la convivencia en frontera solo del canal superior e inferior del bloque. Por otro lado, la mayor robustez de DVB-T2, permite reutilizar frecuencias a menor distancia de la frontera que otras tecnologías como ISDB-T.

Interferencias entre Redes de Televisión Digital DVB-T2

Descripción del Escenario Para el análisis de convivencia entre redes de DVB-T2 con canalización a 6 MHz, se tomó como base el escenario de despliegue de dos transmisores trabajando en canal adyacente. En este escenario RTVC tiene instalado un transmisor pensado para dar cobertura indoor, Montería, de 5000 W de potencia al lado de la ciudad de Ciénaga de Oro, concretamente a 3km de la ciudad, tal y como se observa en la Figura 4.11. Por otro

4.3 Interferencias con otras Redes de TDT

lado, el CCNP transmite desde el emplazamiento de La Barra con una potencia de 10000 W. Como se dedujo en la Sección 4.2.2, el caso crítico se da cuando los transmisores no están colocalizados y transmiten a diferente potencia. Por tanto, en esta sección el análisis se centra en dicho escenario menos favorable. Además, para tener en cuenta todas las posibles interferencias se asumen diagramas de radiación omnidireccionales para todos los emplazamientos. En la Tabla 4.23 se resumen los parámetros de las dos estaciones.

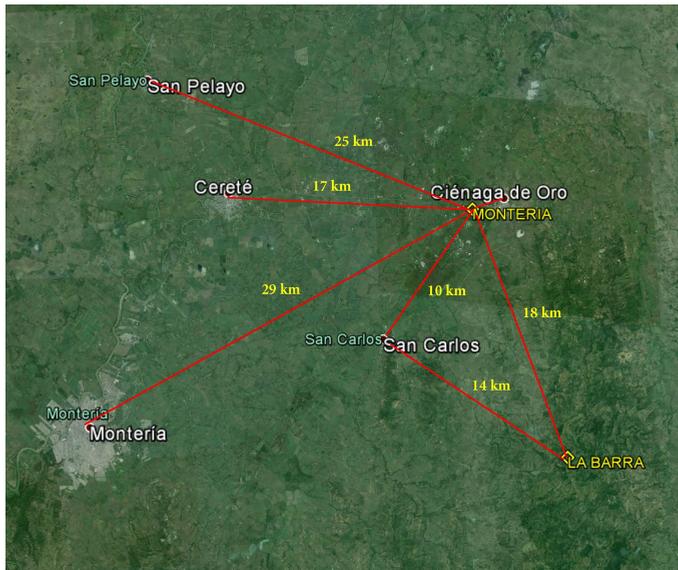


Figura 4.11: Escenario La Barra-Montería

Estación	Posición Geográfica (Lat. y Long.)	Altura Antena Tx (m)	Potencia Tx (W)	Ganancia antena Tx (dBi)	Operador
Montería	8° 52' 23.0" N 75° 38' 27.0" O	86	5000	7	RTVC
La Barra	08° 43' 20.1" N 75° 35' 24.6" O	106	10000	15.26	CCNP

Tabla 4.23: Parámetros de Transmisores en el Montería y La Barra.

Capítulo 4. Planificación de Cobertura de TDT

Interferencia entre Redes En esta sección se estudia conjuntamente las interferencias entre la red de RTVC y la red de CCNP en la zona entre Montería y La Barra. Para lo que, primero se realizó un análisis de cobertura, para luego evaluar las mutuas interferencias. Para el caso de interferencia entre redes DVB-T2, la relación de protección para el canal adyacente $N \pm 1$ es -39 dB² (ver Tabla 4.11).

Cuando la red deseada es la del operador CCNP, en la Figura 4.12 (a) se observa que las interferencias son insignificantes. Esto es debido a la elevada potencia que tiene el transmisor La Barra en comparación con el transmisor Montería de RTVC. Sin embargo, en un acercamiento Figura 4.12 (b) se puede notar que existen ciertas interferencias cerca del transmisor interferente que perjudica a una cantidad muy pequeña de la población. Esto debido a que cerca del transmisor interferente la potencia interferente será mucho más elevada que en otros puntos de cobertura.

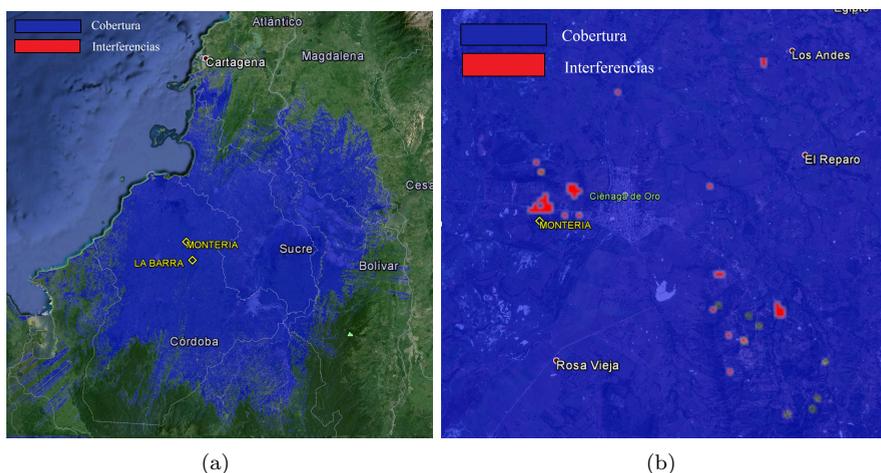


Figura 4.12: Interferencias canal adyacente $N+1$ sobre la estación La Barra de CCNP desde la estación Montería de RTVC

Si la red deseada es la red RTVC, en la Figura 4.13 (a) las interferencias son del 3.65 % del área de cobertura, tanto para el canal adyacente superior ($N+1$) como inferior ($N-1$). Nuevamente la zona más notable de interferencias es aquella aledaña al transmisor interferente, donde la relación o margen de protección es sobrepasado.

²Para la configuración de referencia

4.3 Interferencias con otras Redes de TDT

Una posible solución al momento de planificar frecuencias es utilizar un canal de guarda. Atendiendo esta posible solución, en la Figura 4.13 (b) se presenta las interferencias para el canal $N \pm 2$ ³. Se puede apreciar que la interferencia disminuye al 1.1 %, pero siguen siendo considerables incluso con la utilización de un canal de guarda.

En el escenario planteado no es posible solucionar los problemas de interferencias utilizando un canal de guarda entre una red y otra. Además, utilizar un canales de guarda es una opción muy poco óptima de cara al aprovechamiento del espectro radioeléctrico.

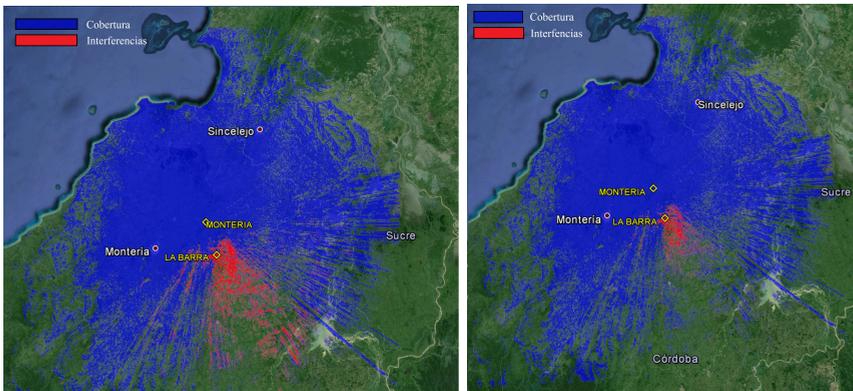


Figura 4.13: Interferencias canal adyacente $N+1$ (a) y $N+2$ (b) sobre la estación Montería de RTVC desde la estación La Barra CCNP.

Los resultados muestran que si los transmisores de dos redes trabajando en canal adyacente no están colocados se presentan mayores interferencias, si adicionalmente una red proporciona cobertura indoor y otra no, las interferencias se ven incrementadas. Por tanto, es importante para el despliegue de las redes que los transmisores estén colocados, brinden el mismo nivel de cobertura y su despliegue sea simultáneo. Por lo que se debe acordar entre los operadores de TDT el mismo nivel de cobertura en todas las ciudades de los países.

³La relación de protección obtenida experimentalmente para el canal $N \pm 2$ es de -45 dB ver la Sección 4.3.1

4.4. Conclusiones

En el presente capítulo se han presentado medidas hechas en laboratorio de relaciones de protección entre señales de TDT DVB-T2, ISDB-T y señales de televisión analógica NTSC a 6 MHz. También se han realizado ejercicios de planificación en escenarios realistas para analizar y obtener recomendaciones genéricas para la convivencia entre las redes analógicas y digitales que deben coexistir en Sudamérica. Además, se ha comparado el desempeño de los estándares DVB-T2 e ISDB-T frente a interferencias. Los resultados presentados son clave para una exitosa planificación de frecuencias en la región.

4.4.1. Relaciones de Protección

Interferencia entre Redes Digitales DVB-T2 y Analógicas NTSC.

Protección de una señal de televisión analógica NTSC interferida por una señal de televisión digital DVB-T2 Para el caso de interferencias cocanal, en las medidas se observó que al aumentar el tamaño de la FFT disminuye ligeramente la interferencia. La norma ITU-R 1368 no refleja este comportamiento, en la cual los resultados son independientes del tamaño de la FFT. La explicación es que al aumentar el tamaño de la FFT, aumenta la resolución en frecuencia (número de portadoras), por lo que la interferencia generada por la señal de TV analógica, que puede considerarse de banda estrecha por las portadoras de luminancia y crominancia, disminuye. En cuanto al uso de patrones de portadoras pilotos, se observó que patrones de portadoras más densos (PP1) proporcionan márgenes de protección 2 dB mejores comparado con el uso de patrones de portadoras menos densos (PP8), debido a una mejor estimación del canal.

En el caso de interferencias canal adyacente, los márgenes de protección obtenidos son hasta 18 dB más restrictivos comparados con DVB-T2 interferida por NTSC debido a la menor robustez de la tecnología analógica. En este caso, los márgenes de protección apenas varían con la FFT de la señal interferente digital. Aunque disminuya el tamaño de la FFT y por tanto, disminuya la caída fuera de banda de la señal DVB-T2, ésta no afecta a la portadora de vídeo de la señal NTSC ($N-1$), y aún menos a la de audio que es más robusta que la de vídeo ($N+1$). Se puede observar además que el peor caso de adyacencia para NTSC es el canal adyacente superior $N+1$, siendo la relación de protección hasta 2 dB más restrictiva que el canal adyacente inferior $N-1$.

Protección de una señal de televisión digital DVB-T2 interferida por una señal de televisión analógica NTSC Las relaciones de protección

cocanal no pueden ser aproximadas a la relación C/N . Para las relaciones de protección canal adyacente, el efecto del tamaño de la FFT de la señal útil DVB-T2 es insignificante para ambos casos, cocanal y canal adyacente. Por otra parte, el utilizar el modo ancho de banda extendido afecta las relaciones de protección canal adyacente en 1 dB y 2 dB para los tamaños de FFT de 8K y 16K-32K respectivamente.

Interferencia entre Redes Digitales DVB-T2.

En el caso de interferencia cocanal, las relaciones de protección cocanal son equivalentes a la relación C/N , debido a que la interferencia introducida es similar a la de ruido térmico en el ancho de banda del canal. Las relaciones de protección dependen de la modulación, la tasa de codificación y el patrón de portadoras piloto de la señal deseada. Ni el tamaño de la FFT de la señal interferente, ni el uso del modo de ancho de banda extendido afecta a las relaciones de protección cocanal. El efecto del patrón de portadoras piloto puede considerarse insignificante porque las variaciones son del orden de décimas de dB. El uso de constelaciones rotadas mejoran las relaciones de protección en menos de 1 dB para la configuración de ganancia máxima (modulación QPSK y tasa de codificación 5/6). La ganancia depende del algoritmo de procesamiento de señales implementado en el receptor, incluso habiendo medido casos que presentan ganancias negativas, aunque siempre inferiores a 1 dB. Como la variación en la mayoría de los casos es despreciable, se recomienda que este factor no se debe tener en cuenta para el cálculo de las relaciones de protección cocanal.

Para el caso de interferencias canal adyacente, las relaciones de protección para señales DVB-T2 interferidas por señales DVB-T2 se ven afectados por la modulación, la tasa de codificación de la señal deseada; así como por el tamaño de la FFT y el uso del modo ancho de banda extendido en la señal interferente. El usar tamaños de FFT de 32K y 16K en la señal interferente mejora en 1 y 5 dB la relación de protección comparada con el uso de FFTs de 1K y 8K, respectivamente. El uso de del modo ancho de banda extendido en la señal interferente empeora las relaciones de protección en 1 dB.

Interferencia entre Redes Digitales DVB-T2 e ISDB-T.

Protección de una señal de televisión digital DVB-T2 interferida por una señal de televisión digital ISDB-T Para el caso de interferencias cocanal. Las relaciones de protección pueden ser aproximadas a la CNR y se ven afectados principalmente por la modulación y tasa de codificación de la señal útil. El tamaño FFT y el uso de modo de ancho de banda extendido

de la señal no afecta significativamente a las relaciones de protección cocanal. Además, el no usar el desplazamiento de frecuencia en la señal ISDB-T deteriora las relaciones de protección cocanal en 1 dB.

Para interferencias canal adyacente los valores de las relaciones de protección no se ven afectados por el tamaño de la FFT de la señal útil, pero sí del tamaño de la FFT de la señal interferente. Cuando ISDB-T es la señal interferente, el uso de una FFT de 8K, que es la FFT comúnmente utilizada, es la que genera menos interferencia ya que el uso de FFTs grandes mejora hasta en 3 dB y 1.5 dB las relaciones de protección en comparación al uso de FFTs de 2K y 4K, respectivamente. Cabe destacar que no se espera que otros países empleen FFTs más pequeñas ya que la distancia máxima entre transmisores de la red SFN disminuye, y el overhead del intervalo de guarda aumenta. Cuando la señal DVB-T2 es la señal interferente el uso de FFTs de 32K mejora hasta en 6 dB, 2 dB y 1 dB las relaciones de protección en comparación al uso de FFTs de 1K, 8K y 16K respectivamente.

Protección de una señal de televisión digital ISDB-T interferida por una señal de televisión digital DVB-T2 Las relaciones de protección cocanal, dependen de la modulación y la tasa de codificación de la señal útil ISDB-T. En este caso, las mediciones han demostrado que los resultados son independientes de la modulación y tasa de codificación de la señal DVB-T2 interferente, y que la influencia del tamaño de la FFT y el modo ancho de banda extendido es insignificante. La no utilización del desplazamiento de frecuencia de 1/7 MHz de la señal ISDB-T empeoran en 1 dB la relación de protección cocanal. El uso de la técnica de PAPR TR y ACE de DVB-T2 reduce el margen de protección en aproximadamente 2 dB.

Para el caso de relaciones de protección canal adyacente, el uso del modo ancho de banda extendido en la señal interferente DVB-T2 empeora las relaciones de protección hasta en 2 dB. El impacto del uso del modo ancho de banda extendido es 1 dB menor para 8K en comparación con 16K y 32K.

Las relaciones de protección obtenidos cuando la señal útil es ISDB-T y la interferente es DVB-T2 son más restrictivos que las relaciones de protección propuestos por la ITU en la Recomendación ITU-R BT.1368 para ISDB-T interferida por ISDB-T. Esto se debe a al offset de frecuencia de la señal ISDB-T y el uso del modo extendido de DVB-T2.

De los estudios realizados también se ha podido concluir que las relaciones de protección para el canal adyacente $N-1$ y $N+1$ son asimétricas. Esto debido a que la señal ISDB-T añade un offset en frecuencia de 1/7 MHz (142,857 kHz) con relación a la frecuencia central del canal. En caso de no emplear el offset en frecuencia el margen de protección para adyacencia $N-1$ mejora y el caso $N+1$ empeora, corrigiéndose así en cierto modo la asimetría provocada por el

efecto del offset en frecuencia anteriormente mencionado.

El uso de la técnica de PAPR TR mejora el margen de protección aproximadamente en 1 dB y 1.5 dB para el canal $N-1$ y $N+1$ respectivamente. Esta asimetría se debe también al offset que implementa ISDB-T. Al utilizar ACE la mejora es todavía mayor, 1 dB y 2 dB para los canales $N-1$ y $N+1$, respectivamente.

Comparativa entre DVB-T2 e ISDB-T

Los resultados muestran que DVB-T2 supera a ISDB-T, no solo en términos de eficiencia espectral sino también en términos de inmunidad frente a interferencias. Se ha comprobado que las relaciones de protección cocanal y canal adyacente para la misma modulación y tasa de codificación son 2 dB y 13 dB mejores para DVB-T2 que para ISDB-T, respectivamente. Esto quiere decir que para la misma RP cocanal, utilizando DVB-T2 se puede transmitir con mayor capacidad que para ISDB-T.

Cuando la señal DVB-T2 actúa como señal interferente, las interferencias que genera disminuyen en 1 dB y 2 dB en comparación con la FFT máxima de ISDB-T (8K), gracias al uso de tamaños de FFT de 16K y 32K, respectivamente. Adicionalmente, el uso de TR y ACE disminuye las interferencias hasta en 1.5 dB y 2 dB, respectivamente. ISDB-T no cuenta con estos mecanismos.

Para la misma modulación y tasa de codificación (64 QAM 3/4) DVB-T2 ofrece una mejora en capacidad del 18 % en comparación con ISDB-T. Por otra parte, para la misma CNR (16.8 dB) DVB-T2 ofrece una mejora en capacidad del 72 % comparada con ISDB-T. Para capacidades similares (19 Mbps) DVB-T2 es 4 dB y 16 dB mas robusto que ISDB-T contra interferencias cocanal y canal adyacente, respectivamente. Por tanto, es mas probable que aparezcan interferencias sobre los países que adoptaron ISDB-T.

4.4.2. Recomendaciones de Convivencia

Convivencia entre Redes de Televisión Digital DVB-T2 y Analógica NTSC

Se ha comprobado que los modos DVB-T2 que maximizan la cobertura, la capacidad o el tamaño de las redes SFN, son aquellos que utilizan tamaños de FFT de 32K. La elección de este tamaño de FFT implica tener un menor desempeño en condiciones de movilidad. A pesar que en Latinoamérica específicamente en Colombia, las redes de TDT son planificadas para recepción fija en interiores, sin considerar movilidad, es deseable encontrar un compromiso frente a condiciones de movilidad, por lo que la elección de una FFT de 16K es justificada.

De cara a la planificación de las redes de TDT DVB-T2, el caso crítico es la interferencia producida por la red de TDT a la red analógica, debido a la poca robustez de las señales de televisión analógicas. Se comprobó que, para que las redes digitales DVB-T2 puedan trabajar en canales adyacentes con las redes analógicas NTSC, y utilizando transmisores colocalizados, se debe cumplir una relación de protección de 0 dB, es decir los transmisores digitales deben transmitir como máximo a la misma potencia que los analógicos. Es decir, para dos frecuencias adyacentes, para evitar interferencias es suficiente con que la señal DVB-T2 cumpla con el filtro de máscara crítica especificado en el estándar de DVB y transmitan a la misma potencia. En caso de que la potencia transmitida por cada transmisor no sea la misma, se debe evaluar el margen de protección en recepción para determinar si existen o no interferencias.

Por otro lado, también se ha evaluado la posibilidad de trabajar en adyacencia con transmisores situados en distintas ubicaciones. A mayor separación entre el transmisor analógico y el digital, o mayor diferencia entre las potencias transmitidas, mayor probabilidad de producirse interferencias. También se ha demostrado que un factor muy importante es el diagrama de radiación. Si los patrones de radiación tienen como objetivo cubrir la misma zona y los transmisores están colocalizados, cuanto más parecidos sean los diagramas, menos problemas de interferencia.

Para el canal adyacente $N \pm 2$, experimentalmente se ha determinado que la relación de protección es de -20 dB. Este caso equivale a dejar un canal de guarda entre la red analógica y la digital, y permite que la potencia digital sea mayor que la analógica sin que ocurran interferencias. En concreto, la potencia analógica puede ser hasta 20 dB menor que la digital. Sin embargo, esta configuración realiza un uso ineficiente del espectro radioeléctrico.

Otra conclusión extraída del estudio realizado, es que las relaciones de protección para NTSC interferida por ISDB-T, son hasta 3 dB menos restrictivas, principalmente debido a que la señal DVB-T2 ocupa mayor ancho de banda efectivo (5.71 MHz para DVB-T2 y 5.57 MHz para ISDB-T) y al uso del modo ancho de banda extendido en DVB-T2 (de 5.71 MHz a 5.83 MHz para FFTs de 16k y 32K). Esto implica que para la planificación de redes en la etapa de simulcast, la planificación de las redes digitales DVB-T2 es más crítica que la planificación de redes ISDB-T.

Convivencia entre Redes de Televisión Digital DVB-T2

Para el despliegue de las redes DVB-T2 en Colombia, se debe tener en cuenta que el caso crítico se da para transmisores de dos redes DVB-T2 trabajando en canal adyacente no colocalizados. Si adicionalmente una red proporciona cobertura en interiores y otra no, las interferencias se ven incrementadas. Es

importante para el despliegue de las redes que los transmisores estén colocados, brinden el mismo nivel de cobertura y su despliegue sea simultáneo.

En el caso de transmisores colocados funcionando en canales adyacentes se debe evaluar la relación de protección en recepción para determinar si existen o no interferencias. Para señales DVB-T2 interfiriendo señales DVB-T2, la potencia interferente recibida debe ser como mucho -39 dB superior a la potencia de la señal deseada. Igualmente, en el caso de que los transmisores se encuentren situados en distintos lugares, es necesario realizar ejercicios de planificación para evaluar en recepción la existencia o no de interferencia.

También se ha de tener en cuenta, que para recepción fija sobre tejado, las antenas receptoras suelen ser directivas, lo que de por sí disminuye el nivel de potencia recibida en ciertos ángulos. Esto debido a que a medida que aumenta el ángulo de la antena receptora respecto del lóbulo principal de la antena transmisora, aumenta el rechazo a la señal recibida. De esta forma, pueden limitarse de forma directa las interferencias entre canales. Este hecho se puede ver como un incremento virtual del margen de protección (o una reducción en términos absolutos ya que el margen de protección suele ser negativo). Pero, como los transmisores TDT de diferentes redes suelen estar en diferentes ubicaciones geográficas, no es viable desde el punto de vista práctico colocar una antena orientada por cada canal de televisión que se desea recibir.

Convivencia entre Redes de Televisión Digital DVB-T2 e ISDB-T

Con respecto a la planificación de redes en países fronterizos en los que DVB-T2 debe convivir con ISDB-T, debido a la mayor robustez de la señal DVB-T2, se debe tener mayor cuidado en la planificación de las redes ISDB-T más susceptibles a interferencias.

Si se consideran los actuales acuerdos fronterizos, que especifican distribución par/impar de frecuencias, Por un lado, el re-uso de frecuencias no es posible en zonas dentro de la distancia de coordinación entre los países. Por tanto, dichas distancias de coordinación deben ser muy cuidadosamente determinadas. Además, el offset de la frecuencia central de canal obligatorio en ISDB-T de 1/7 MHz hacen que la distribución de frecuencias alternadas por canales pares e impares para cada país no sea la distribución óptima del espectro. Distribuir el espectro por bloques de canales para cada tecnología o permitir libertad en la asignación de frecuencias permite mejor uso del mismo. La distancia de re-uso de frecuencias en este caso se ve limitada a la tecnología menos robusta (ISDB-T) que es de 68.46 km, comparada con una distancia de 64.3 km para los países con DVB-T2.

Capítulo 5

Interferencias con Redes Celulares 4G LTE

En este capítulo, se investiga las interferencias sobre las redes de TDT, debido a la inclusión de redes de comunicaciones móviles LTE en las bandas de dividendo digital. Para lo cual, en primer lugar se obtienen las relaciones de protección mediante medidas de laboratorio, y se estudia el efecto de los parámetros de las señales LTE y TDT sobre las relaciones de protección. Para la obtención de las relaciones de protección, un marco de trabajo general fue adoptado de manera que los resultados puedan ser fácilmente extrapolados a diferentes configuraciones, e incluso diferentes tecnologías de TDT basadas en OFDM, ISDB-T, DVB-T/T2, DTMB e incluso el nuevo estándar de TDT ATS 3.0. En segundo lugar, se realiza el balance de enlace para determinar las condiciones de convivencia mínimas entre sistemas de televisión TDT y de comunicaciones móviles LTE. Estas condiciones de convivencias incluyen: distancias mínimas de protección entre las estaciones base LTE (LTE-BS), los equipos de usuario LTE-UE y los receptores de TDT, potencias máximas de transmisión de las LTE-BS para evitar interferencias, potencia mínima necesaria de TDT en recepción. Además, se analiza la banda de 800 MHz en Europa y de 700 MHz en Europa y América, y los escenarios más representativos, que son recepción fija en exteriores y recepción portable en interiores.

El resto del capítulo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 5.1 se presentan las medidas de relaciones de protección para sistemas de comunicaciones móviles LTE interfiriendo sistemas de TDT, se analiza la influencia en las relaciones de protección del tipo de tráfico LTE (Downlink, Uplink), el ancho de banda de las señales TDT y LTE, el tipo de recepción y el uso de filtros anti-LTE. En la Sección 5.2 se investiga las condiciones mínimas de con-

vivencia por la inclusión de LTE en las bandas del dividendo digital, el análisis fue realizado tanto en la banda de 800 MHz en Europa, como en la banda de 700 MHz en América y Europa, teniendo en cuenta los casos críticos de recepción. Finalmente las conclusiones se presentan en la Sección 5.3.

5.1. Medidas de Relaciones de Protección

En esta sección se presentan las relaciones de protección medidas bajo condiciones de laboratorio, y son presentadas en función de la banda de guarda entre las señales TDT y LTE. Se presenta el efecto sobre las relaciones de protección de parámetros de la capa física de las señales LTE y TDT. Los parámetros de configuración evaluados son: carga de tráfico y tipo de enlace LTE, ancho de banda, tipo de recepción y efecto del uso de filtros para rechazo de señales LTE. Para las medidas de las relaciones de protección se utilizó la metodología descrita en la Sección 2.4.

5.1.1. Influencia de la Carga de Tráfico y el Tipo de Enlace LTE

En las medidas se observó que el enlace LTE-UL es hasta 10 dB más interferente que el enlace LTE-DL, esto se debe a la gran variabilidad temporal de la señal uplink. También se observó que cuando el enlace interferente es el enlace LTE-UL, cargas de tráfico menores generan mayor interferencia, esto se debe a que cuanto menor es la carga de tráfico, mayor es la variabilidad temporal de la señal. Por otra parte, cuando el enlace interferente es el enlace LTE-DL, se presenta mayor interferencia cuando se transmite con 100 % de la carga, esto es debido a la modulación OFDM, en donde, cuanto mayor es la carga, mayor es la potencia de señal.

Banda de guarda (MHz)	100 %	50 %	idle
0	-50	-51.35	-52.7
1	-51	-52	-53.4
5	-53.2	-54.4	-55.7
9	-54.7	-55.7	-56.8
10	-54.7	-55.75	-56.9
11	-54.8	-55.8	-56.9
15	-54.8	-55.9	-57

Tabla 5.1: Relaciones de protección para DVB-T2 interferida por una señal LTE-DL, con 10 MHz de ancho de banda

5.1 Medidas de Relaciones de Protección

En la Tabla 5.1 y la Tabla 5.2 se puede observar las relaciones de protección obtenidas para el modo de referencia para recepción portable en interiores, definido en la Sección 2.4. Los resultados son resumidos en la Figura 5.1.

Banda de guarda (MHz)	1 Mbps	10 Mbps	20 Mbps
0	-39.5	-44.6	-51
1	-40.9	-45.8	-51.8
5	-46	-50.4	-53.7
9	-48.9	-52.4	-54.3
10	-49.2	-52.8	-54.4
11	-49.4	-53.2	-54.5
15	-49.6	-53.4	-54.6

Tabla 5.2: Relaciones de protección para DVB-T2 interferida por una señal LTE-UL, con 10 MHz de ancho de banda

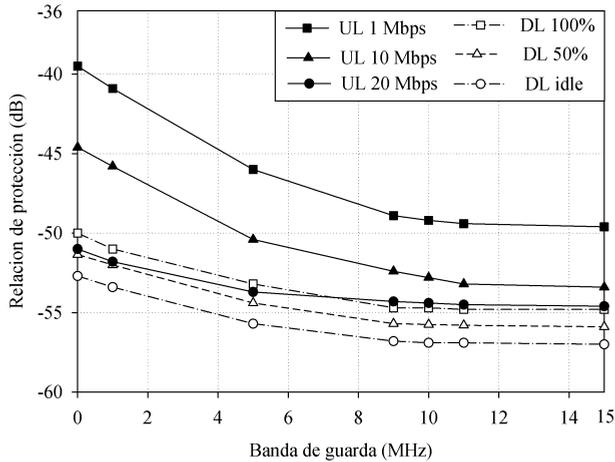


Figura 5.1: Relaciones de protección para DVB-T2 interferida por una señal LTE-UL y LTE-DL, con 10 MHz de ancho de banda

5.1.2. Influencia del ancho de banda de las señales TDT y LTE

Las relaciones de protección dependen de la guarda de banda entre las tecnologías. En la Figura 5.2 se muestran las relaciones de protección para di-

Capítulo 5. Interferencias con Redes Celulares 4G LTE

ferentes anchos de banda de la señal LTE. Con respecto a las interferencias LTE-UL, para bandas de guarda inferiores a 4 MHz, las señales LTE con anchos de banda menores i.e. 5 MHz provocan más interferencia. Sin embargo, si aumenta la banda de guarda, las señales con ancho de banda más grande son más interferentes. Para el caso del enlace LTE-DL, también aparece este punto de inflexión, pero a 2 MHz de banda de guardia. Este comportamiento es debido a que el ancho de banda ocupado de la señal LTE es el 90% de la ancho de banda nominal, y por lo tanto hay una banda de protección adicional que es 0,25, 0,5, 0,75 y 1 MHz para 5, 10, 15 y 20 MHz, respectivamente. Este efecto es significativo para bandas de guarda pequeñas, pero no para bandas de guarda más grandes, donde el ancho de banda de la señal LTE es el efecto dominante. La alta variabilidad temporal de las señales LTE-UL causa que el efecto de la banda de protección intrínseca de señales LTE desaparece antes que para las señales de LTE-DL (2 MHz en lugar de 4 MHz).

En cuanto al ancho de banda de la señal TDT, el uso de canales de 8 MHz, da lugar a una degradación de alrededor de 1 dB en la relación de protección, debido al aumento de ancho del banda de ruido.

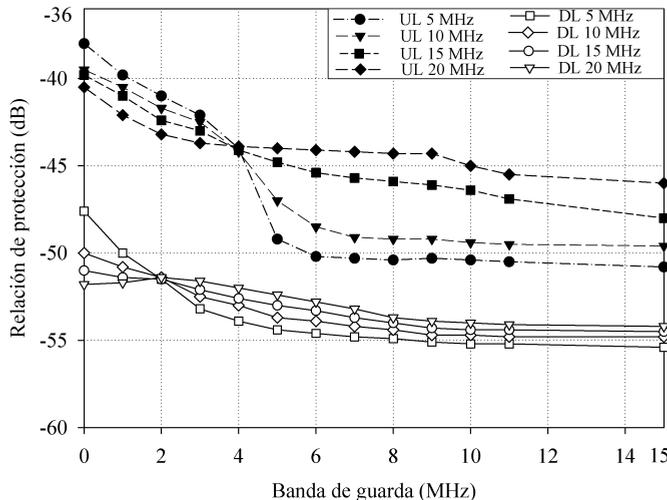


Figura 5.2: Relaciones de protección para DVB-T2 interferida por una señal LTE-UL (1 Mbps) y LTE-DL (100% de carga de tráfico), y diferentes anchos de banda.

5.1.3. Tipo de Recepción TDT

Con el fin de generalizar el estudio, en el presente capítulo se presentan resultados de relaciones de protección para un canal Gaussiano. Sin embargo, en la Figura 5.3 se puede observar las relaciones de protección para canales Gaussiano, Rice y Rayleigh. En el gráfico se puede notar que la diferencia en las relaciones de protección, es equivalente a la diferencia en CNR para cada canal. Es decir, la relación de protección se ve incrementada para modelos de canal realistas.

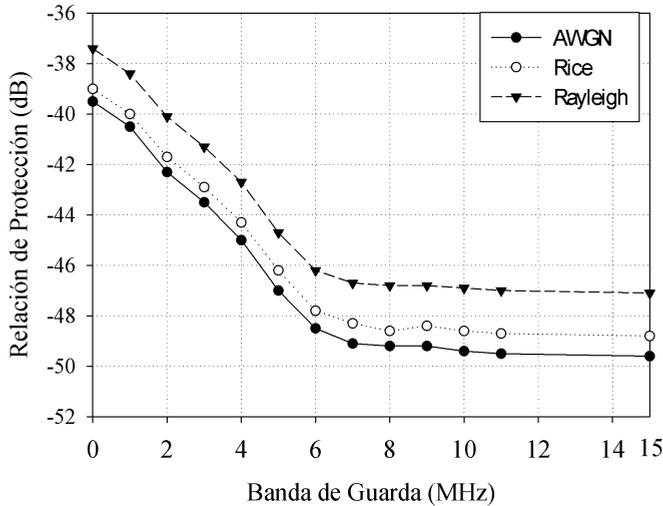


Figura 5.3: Relaciones de protección para DVB-T2 interferida por una señal LTE-UL (1 Mbps) con 10 MHz de ancho de banda, diferentes canales.

5.1.4. Filtros Anti-LTE

El uso de filtros preparados para rechazar señales LTE influye directamente en las relaciones de protección. Cuanto mayor es el rechazo fuera de banda del filtro, mayor es la mejora en las relaciones de protección. En general, al usar filtros profesionales, las relaciones de protección mejoran hasta en 15 dB, debido al uso de filtros domésticos, la mejora es de hasta 13 dB. Además, se observó que la mejora en las relaciones de protección es mayor, cuanto mayor es el ancho de banda de la señal LTE. Esto es debido a la característica de la modulación OFDM, donde a mayor ancho de banda, más lenta es la caída del espectro a los extremos de la señal OFDM. Por tanto, más potencia se

Capítulo 5. Interferencias con Redes Celulares 4G LTE

introduce a los canales adyacentes. Si la señal interferente es la señal LTE-DL, la mejora en las relaciones de protección debido al uso de filtros es equivalente. En la Tabla 5.3 se presentan las relaciones de protección debido al uso de los diferentes filtros estudiados.

Filtros a 800 MHz					
Ancho de banda (MHz)	Filtro profesionales		Filtros domésticos		
	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
5	12.5	12.4	2.9	11.2	10.1
10	15.6	15.6	3.8	13.4	12.8
15	18.7	18.8	6.7	17.1	16.7
20	19.4	19.6	9.1	18.3	17.7

Filtros a 700 MHz			
Ancho de banda (MHz)	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 1
	5	12.6	12.7
10	15.7	15.8	13.8
15	18.5	18.4	16.6
20	19.5	19.4	17.6

Tabla 5.3: Relaciones de protección para DVB-T2 interferida por una señal LTE-UL (1 Mbps), 5 MHz de guarda de banda con filtros anti-LTE para diferentes anchos de banda LTE.

5.2. Estudios de Convivencia

Una vez introducidas las relaciones de protección, Es de vital importancia analizar su impacto en el despliegue y convivencia de redes de comunicaciones móviles LTE en las bandas del dividendo digital. En la Figura 5.4 se muestra la distribución de espectro para el dividendo digital en Europa (banda de 800 MHz y 700 MHz) y en América (banda de 700 MHz).

Se debe notar que el caso crítico en la banda de 800 MHz en Europa, se da para LTE-DL operando en adyacencia a las bandas de la TDT, en este caso al estar el enlace LTE-UL más alejado de la TDT (mayor banda de guarda) resulta menos interferente. Por otro lado, tanto para Europa como para América, el caso crítico para la banda de 700 MHz es con el LTE-UL adyacente a la TDT.

Con relación al tipo de recepción, la recepción predominante en Europa es la recepción fija en Azotea. Por otra parte, en América existen pocas antenas comunitarias, por lo cual, el tipo de recepción predominante es la recepción portable en interiores.

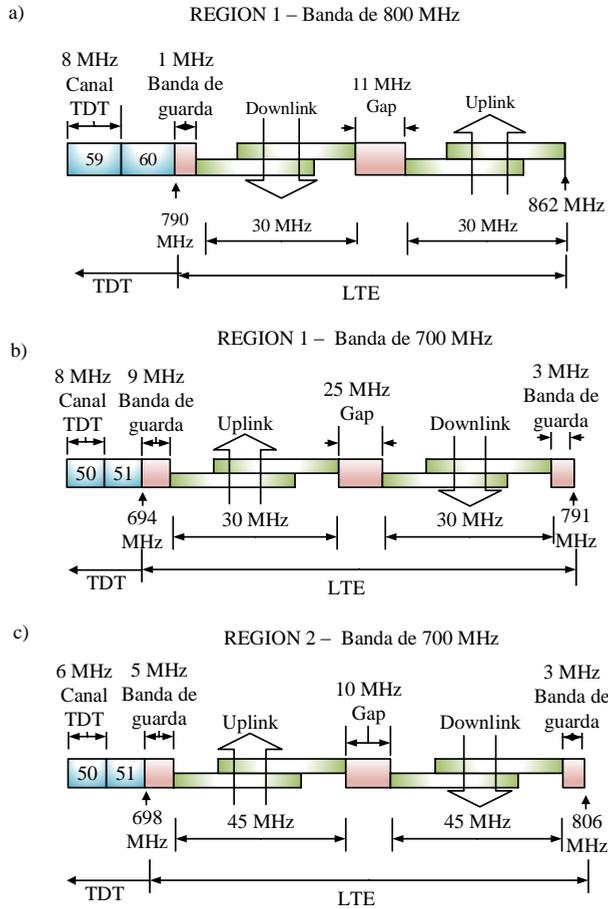


Figura 5.4: Dividendo Digital en Europa a) banda de 800 MHz, b) banda de 700 MHz y en América c) banda de 700 MHz

5.2.1. Cálculo del Balance de Enlace

En el caso de recepción fija en exteriores, siendo el enlace interferente el enlace uplink. El análisis del balance del enlace, lleva por un lado a determinar la Adjacent Channel Interference Ratio (ACIR), que para evitar interferencias debe ser siempre menor que la Adjacent channel selectivity (ACS) del receptor. Si esta condición no se cumple un filtro de rechazo de señales LTE debe ser utilizado. Siendo que la atenuación mínima adicional requerida del filtro es

la diferencia entre la ACIR y la ACS del receptor. Por otro lado, al realizar el balance del enlace también se puede determinar la ACLR requerida del LTE-UE para evitar interferencias. El valor de ACLR a su vez puede traducirse en las emisiones fuera de banda OOB máximas permitidas. Cabe señalar que cuanto mayor es la ACLR, más estricto es el nivel de emisiones fuera de banda (es decir, se requiere una máscara de espectro LTE-UE más restrictiva).

Para recepción TDT portátil en interiores, siendo interferida por el LTE-UL, mediante el análisis del balance del enlace se obtiene la distancia mínima requerida entre el LTE-UE y el receptor TDT para evitar interferencias. En este caso, cuanto menor sea el nivel de emisiones fuera de banda del LTE-UE, más corta es la distancia mínima permitida.

En el caso de recepción fija en exteriores, siendo el enlace interferente el enlace LTE-DL, el análisis del balance de enlace conlleva a obtener la distancia de protección que evita interferencias, dicha distancia de protección se define entre la estación base LTE y la antena TDT en azotea. El mismo análisis se puede utilizar para el caso de recepción de TDT portable en interiores, aunque en este caso la distancia es mucho menor, debido a las pérdidas adicionales de penetración de las señales TDT [45].

Para el cálculo del balance de enlace se ha seguido la metodología descrita a continuación [41].

LTE-UL como enlace interferente para el caso de recepción de TDT fija en exteriores

En primer lugar se encuentra el ACS ACS_{RX} del receptor de TDT con 5.1.

$$ACS_{RX} = -10\log_{10} \left(10^{-\frac{(PR_{co-ch} - PR_{adj-ch})}{10}} - 10^{-\frac{ACLR}{10}} \right) \quad (5.1)$$

Donde, PR_{co-ch} y PR_{adj-ch} son las relaciones de protección cocanal y canal adyacente, respectivamente, y el $ACLR$ es el adjacent-channel leakage ratio del generado de señales LTE utilizado en las medidas (en nuestro caso, 75 dB). EL ACS_{RX} puede ser mejorado con el uso de un filtro externo. Siendo, ACS_{filter} la atenuación adicional por el uso del filtro, el ACS total viene dado por la ecuación 5.2.

$$ACS_{Total} = ACS_{RX} + ACS_{filter} \quad (5.2)$$

en este punto, el ACIR generado por el LTE-UE se puede obtener con 5.3.

$$ACIR = PR_{co-ch} - PR_{adj-ch-REQ}, \quad (5.3)$$

Donde, el $PR_{adj-ch-REQ}$ es la relación de protección canal adyacente requerida, que se puede obtener con 5.4.

$$PR_{adj-ch-REQ} = P_{DTT,min} - I_{RX} + \delta, \quad (5.4)$$

Donde, $P_{DTT,min}$ es la potencia mínima requerida a la entrada del receptor de TDT, y la I_{RX} es la interferencia recibida en el receptor TDT, y δ es el nivel de desensibilización que corresponde a 1 dB de pérdida de sensibilidad en el receptor ($\delta = 5.78$ dB [41]).

$$P_{DTT,min} = P_N + SNR_{min}, \quad (5.5)$$

donde SNR_{min} es la relación señal a ruido (SNR) requerida del modo de recepción usado (ver Tabla 2.8), y P_N es el poder del ruido que se obtiene con 5.6.

$$P_N = 10\log_{10}(KTB) + NF + 30 \quad (5.6)$$

Donde, K es a constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K), T es la temperatura del ruido, B es el ancho de banda equivalente del ruido del receptor TDT (7.6 MHz para canales de TDT de 8 MHz), y NF es la figura del ruido del receptor TDT (7 dB [41]).

$$I_{RX} = P_{UE,TX} + G_{UE,TX} - L \quad (5.7)$$

Donde, $P_{UE,TX}$ es la potencia máxima del transmisor LTE-UE (23 dBm [41]), $G_{UE,TX}$ es a ganancia de antena del LTE-UE (-3 dBi [41]), y L son las pérdidas de acoplo obtenidas con 5.8.

$$L = FSL - G_{DTT,DIR} - G_{DTT,RX} + L_{BODY}, \quad (5.8)$$

Donde, FSL son las pérdidas en espacio libre calculadas para una distancia horizontal de separación de 22 m entre el LTE-UE y la antena receptora de DTT, $G_{DTT,RX}$ es la ganancia de la antena receptora de TDT incluyendo pérdidas de alimentación (9.15 dBi, [41]), $G_{DTT,DIR}$ es la ganancia por discriminación de antena (-0.45 dB para el peor caso de separación horizontal [45]), y L_{BODY} es la pérdida del LTE-UE (6 dB [41]).

Por último, el ACLR requerido del LTE-UE $ACLR_{REQ}$, se calcula con:

$$ACLR_{REQ} = -10\log_{10} \left(10^{-\frac{PR_{co-ch} - PR_{adj-cj-REQ}}{10}} - 10^{-\frac{ACST_{total}}{10}} \right) \quad (5.9)$$

y las máximas emisiones fuera de banda permitidas OOB_{max} , se pueden obtener con 5.10.

$$OOB_{Max} = P_{UE,TX} + G_{UE,TX} - ACLR_{REQ} \quad (5.10)$$

LTE-UL como enlace interferente para el caso de recepción de TDT portable en interiores

El calculo del balance de enlace en este caso, permite determinar la distancia mínima d_{min} que debe existir entre el LTE-UE y el receptor de TDT con 5.11

$$d_{\min} = 10^{\frac{147,56 - 20 \log_{10}(f) - G_{CG} + G_{WL} + L_{BODY} + G_{DTT,RX}}{20}}, \quad (5.11)$$

Donde, L_{BODY} son las perdidas de cuerpo del transmisor LTE-UE (6 dB), G_{WL} son las perdidas por penetración en paredes, asumiendo que tanto el LTE-UE como el receptor TDT están en la misma habitación $G_{WL} = 0dB$, $G_{DTT,RX}$ es la ganancia de la antena del receptor de TDT (2.15 dBi para recepción portatil), y G_{CG} es la ganancia total de acoplamiento calculada con 5.12.

$$G_{CG} = P_{DTT,min} + \delta - PR_{co-ch} - 10 \log_{10} \left(10^{\frac{P_{TX} - ACS_{RX}}{10}} + 10^{\frac{OOB_{UE}}{10}} \right) \quad (5.12)$$

Donde OOB_{UE} son las emisiones fuera de banda del LTE-UE.

LTE-UD como enlace interferente para el caso de recepción de TDT fija en exteriores y portable en interiores

Cuando el enlace interferente es el enlace LTE-DL, se debe determinar la distancia de protección alrededor de las LTE-BSs (d_{min-BS}). La distancia de protección se define como la mínima distancia necesaria alrededor de las LTE-BS, dentro de la cual es posible que se produzcan interferencias sobre las señales de TDT.

En primer lugar, se calculan las pérdidas mínimas de propagación L_P permitidas para la LTE-BS con 5.13.

$$L_P = EIRP_{BS} - G_{WL} + G_{DTT,RX} - P_{BS,TARGET}, \quad (5.13)$$

Donde, $EIRP_{BS}$ es la PIRE de la LTE-BS (59 dBm), $G_{WL} = 8dB$ para recepción en interiores y 0 dB para recepción fija en exteriores, $G_{DTT,RX}$ de 9.15 dBi para recepción fija y 2.15 dBi para recepción en interiores, y $P_{BS,TARGET}$ es la potencia mínima permitida desde la LTE-BS, calculada con 5.14.

$$P_{BS,TARGET} = P_{DTT,\min} - PR_{adj-ch} \quad (5.14)$$

Como resultado del análisis, finalmente, dos valores pueden obtenerse:

- La distancia de protección d_{min-BS} , utilizando un modelo de pérdidas de propagación.
- El porcentaje del área de la celda LTE en la que se pueden presentar interferencias sobre los receptores de TDT.

En los dos casos, el peor caso debe ser considerado, que es cuando la celda LTE es desplegada en el borde del área de cobertura TDT. Donde, la potencia TDT es cercana al umbral de recepción.

5.2.2. Convivencia en la Banda de 800 MHz

El problema de convivencia en la banda de 800 MHz, es representativa en Europa (Región 1 de la ITU), caracterizada principalmente por recepción de TDT con antena direcciva en tejado. El escenario crítico de coexistencia es con la señal LTE-DL como señal interferente y con recepción de TDT fija en exteriores, como se describe en la Figura 2.21 de la Sección 2.4.1.

El plan de canalización para la región 1 de la ITU, contempla dos posibles canalizaciones preferidas para el despliegue de redes LTE en la banda de 800 MHz (ver Figura 5.5).

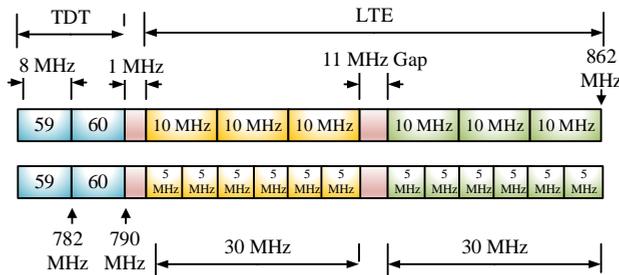


Figura 5.5: Arreglo de canalización preferido para la banda de 800 MHz en la región 1 de la ITU (Europa)

Se puede notar que la banda de guarda entre las tecnologías es de únicamente 1 MHz. Por tanto, a pesar de que el enlace LTE-DL es menos interferente, existe cierto nivel de interferencias al rededor de la estación base. Para el estudio de convivencia se han considerado los últimos 3 canales de TDT: canal 58 (766 - 774 MHz), canal 59 (774 - 782 MHz) y canal 60 (782 - 790 MHz). Las medidas de relaciones de protección fueron hechas para canal Rice que modela

Capítulo 5. Interferencias con Redes Celulares 4G LTE

la recepción fija en exteriores, y para la carga de tráfico más interferente, i.e. con una carga de tráfico en downlink del 100 %.

La relaciones de protección para las dos canalizaciones son presentadas en la Tabla 5.4. Se puede observar que la relación de protección para el canal 59 es 9 dB mejor que para el canal 60. También, se puede observar que cuando se utiliza canalización de 5 MHz, las interferencias (relación de protección empeora) aumentan en 1 dB comparado con usar canales de 10 MHz. Al utilizar filtros las relaciones de protección aumentan en 13 y 15 MHz para filtro domésticos y profesionales, respectivamente (ver Tabla 5.3).

Canal TDT Canal	Canalización LTE 1	Canalización LTE 2
58	-48.8	-49.7
59	-48.2	-49.4
60	-39.5	-38.8

Tabla 5.4: Relaciones de protección (dB) para la banda de 800 MHz en Europa.

Al tener en cuenta el peor caso, esto es: con potencia TDT recibida igual al umbral de recepción para el modo seleccionado (i.e. $48dB\mu V/m$), la estación base transmite con una potencia PIRE de 59 dBm, y bloques de canales LTE DE 10 MHz, en la Tabla 5.5. se muestra la distancia mínima de protección alrededor de la LTE-BS. Para el peor caso la distancia de protección es de 1.49 km, usando el modelo de propagación de Okumura-Hata. Por otra parte, la potencia mínima recibida de la señal TDT, para asegurar la no interferencia es de $99dB\mu V/m$. El uso de filtro domésticos y profesionales, que tienen una mejora de 13 y 15 dB en las relaciones de protección, respectivamente. Lo que reduce la distancia de protección a 585 m y 502 m, respectivamente.

Campo eléctrico TDT ($dB\mu V/m$)	Sin Filtro		Con Filtro Profesional		Con Filtro Doméstico	
	Rmin	(%)	Rmin	(%)	Rmin	(%)
Umbral	1.49	55.2	0.59	21.9	0.5	18.5
+10 dB	0.73	27	0.27	10	0.24	8.9
+20 dB	0.34	12.6	0.13	4.8	0.11	4.1

Tabla 5.5: Distancias de protección (km) alrededor de las LTE-BS para la banda de 800 MHz.

5.2.3. Convivencia en la Banda de 700 MHz

Para la banda de 700 MHz, Se ha tomado en cuenta, tanto el escenario de Europa caracterizado por recepción fija en exteriores, como el escenario de América, en donde debido a que existen muy pocas antenas colectivas, el tipo de recepción dominante es la recepción portable en interiores.

Recepción Fija en Exteriores

Al igual que para la banda de 800 MHz, en la banda de 700 MHz, dos posibles canalizaciones para LTE fueron estudiadas, usando bloques espectrales de 5 MHz y 10 MHz. Las principal diferencia con relación a la banda de 800 MHz son: la banda de guarda a sido incrementada a 9 MHz en lugar de 1 MHz, el enlace inmediatamente adyacente a la TDT es el enlace LTE-UL en lugar del LTE-DL. En este caso, el escenario crítico es recepción fija en exteriores, descrito en la Sección 2.4.1.

Al igual que para el caso anterior, se han analizado los últimos 3 canales de TDT. Estos son: canal 47 (678 - 686 MHz), canal 48 (686 to 694 MHz) y canal 49 (678 to 686 MHz). Para las dos posibles canalizaciones mostradas en la Figura 5.6 y para el modo para recepción fija en exteriores DVB-T2 de referencia mostrado en la Sección 2.4.

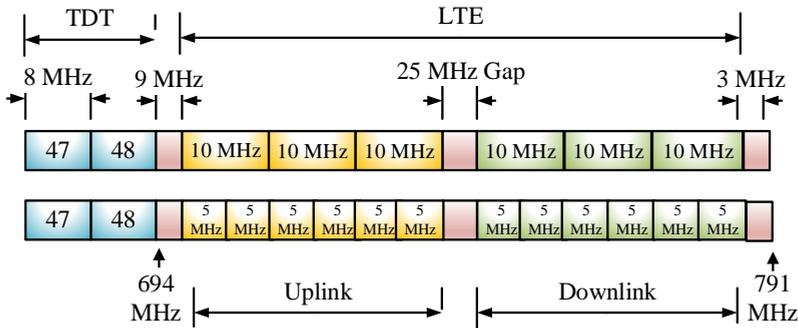


Figura 5.6: Arreglo de canalización preferido para la banda de 700 MHz en la región 1 de la ITU (Europa)

Debido al aumento de la banda de guarda, de 1 MHz a 9 MHz, las relaciones de protección son 5 dB menos restrictiva que en la banda de 800 MHz, incluso si el enlace LTE-UL es más interferente que el enlace LTE-DL. El uso de filtros

Capítulo 5. Interferencias con Redes Celulares 4G LTE

domésticos y profesionales mejoran las relaciones de protección en 13 y 15 dB, respectivamente. Es interesante observar que la canalización LTE usando bloques de espectro de 5 MHz genera menos interferencia. Esto es coherente con los resultados presentados en la Sección 5.1.2, en la que puede verse que para interferencias LTE-UL, si la banda de guarda es inferior a 4 MHz, bloques de espectro más grande de LTE reducen las interferencias. Bloques de espectro LTE más pequeños, reducen el nivel de interferencia para bandas de guarda superior a 4 MHz. En la Tabla 5.6 se presentan las relaciones de protección para los últimos 3 canales TDT.

Canal TDT	Canalización LTE 1	Canalización LTE 2
46	-44.2	-44.7
47	-43.3	-44.3
48	-42.6	-43.8

Tabla 5.6: Relaciones de protección (dB) para la banda de 700 MHz en Europa.

En cuanto al análisis del balance de enlace (descrito en la Sección 5.2.1), suponiendo una relación de protección de -42 dB (canal de la TDT 48, canalización LTE 10 MHz), obtenemos un ACS del receptor TDT de 61,18 dB, y un ACIR de 69,06 dB. Por lo tanto, se producirían interferencias a menos que se utilice un filtro con un rechazo de 9 dB. Los filtros domésticos para la banda de 700 MHz ofrecen aproximadamente 20 dB de rechazo para el primer canal LTE (ver Figura 2.20), y por lo tanto un filtro externo sería suficiente para evitar interferencias. Cabe señalar que un filtro también es necesario para proteger canal de TDT 47 y 46, debido a que la diferencia en la relación de protección es menor que 9 dB. En cuanto a los requisitos de ACLR y emisiones fuera de banda para el LTE-UE, asumiendo 9 dB de rechazo del filtro, el ACLR requerido es de 75.49 dB, y el nivel de emisiones fuera de banda es -55,5 dBm / 8MHz. Si se asume el uso de un filtro externo (rechazo de 20 dB) la ACLR requerida disminuye hasta 69.33 dB, y el nivel de emisiones fuera de banda es de -49,3 dBm / 8MHz. Se debe notar que estos resultados son para el peor caso, es decir, el LTE-UE transmitiendo a la máxima potencia (23 dBm) y con potencia TDT recibida igual al umbral de recepción (-78.2 dBm). En un escenario realista, los LTE-UEs rara vez transmiten a la máxima potencia, y la potencia recibida de la TDT es mayor que el umbral a menos que se esté en el borde de la zona de cobertura de la TDT. La Tabla 5.7 muestra la ACLR y el nivel de emisiones OOB del LTE-UE requerido para diferentes potencias de transmisión y diferentes potencias recibidas de TDT. Los valores obtenidos en nuestro estudio son en general más bajos (es decir, más restrictivos) que los umbrales propuestos por el 3GPP y la CEPT, y están de acuerdo con los requi-

sitos de protección existentes (véase la referencia [23] para una comparación de los requisitos en términos de las emisiones fuera de banda LTE-UE propuestos por las diferentes entidades). Para una emisión fuera de banda LTE-UE de -56 dBm / 8MHz, y manteniendo los valores de protección existentes, todavía sería necesario un filtro con el fin de evitar interferencias en el último canal de TDT (canal 48) en el peor de los casos. Sin embargo, no sería necesario el filtro si:

- La potencia de transmisión LTE-UE es inferior a 15 dBm. Para potencias típicas de ambientes rurales y urbanas (2 y -9 dBm, respectivamente) no se necesita el filtro.
- La potencia recibida de TDT es superior a -70 dBm.

Potencia de transmisión LTE-UE	Potencia recibida TDT	Rechazo del filtro (dB)	LTE-UE ACLR (dB)	LTE-UE emisiones OOB (dBm/8MHz)
Max Potencia: 23 dBm	Umbral +10 dB	9	75.5	-55.5
Rural: 2 dBm	Umbral +10 dB	0	49.3	-49.3
Urbano: -9 dBm	Umbral +10 dB	0	37.1	-49.1
		0	28.9	-40.9

Tabla 5.7: Requisitos mínimos del LTE-UE para evitar interferencias sobre la TDT en la banda de 700 MHz Europa

Recepción Portátil en Interiores

Al igual que en los casos anteriores, En la Figura 5.7 se presentan dos posibles canalizaciones LTE para la banda de 700 MHz en América (ITU Región 2), usando el plan de la Telecomunidad Asia-Pacífico, en inglés (APT). En este caso, la banda de guarda es de 5 MHz y el enlace LTE interferente es de nuevo el enlace uplink, igual que en el caso de la banda de 700 MHz en Europa. Cabe señalar que el ancho de banda de los canales de TDT es 6 MHz en lugar de 8 MHz. En Sudamérica, el porcentaje de antenas de televisión en la azotea es muy limitado, y por lo tanto la mayoría de las redes de TDT tiene como objetivo la recepción portátil en interiores. El escenario crítico de convivencia es entonces LTE-UL interfiriendo a la recepción de la TDT en interiores portátil, descrita en la Sección 2.4.1.

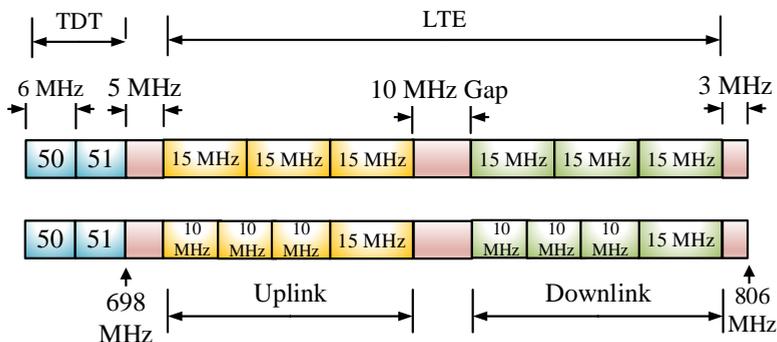


Figura 5.7: Arreglo de canalización preferido para la banda de 700 MHz en la región 2 de la ITU (América)

La Tabla 5.8 muestra las relaciones de protección para las dos canalizaciones LTE consideradas además de para el uso de bloques de espectro de 5 MHz. Las medidas fueron realizadas para el modo DVB-T2 portable en interiores y el enlace ascendente de LTE con carga de 1 Mbps descrito en la Sección 2.4. En este caso, debido a que la banda de guarda es de 5 MHz, el usar bloques LTE de 15 MHz genera más interferencia. Este resultado es acorde con lo mostrado en la Figura 5.2. Para el último canal de TDT (canal 51), las relaciones de protección mejoran aproximadamente 2 dB y 5 dB para bloques 10 MHz y 5 MHz, respectivamente. Cabe señalar que los resultados mostrados son válidos para otras tecnologías TDT basadas en OFDM, con igual requerimiento en CNR (aproximadamente 18 dB para canal Rayleigh). La diferencia de, por ejemplo, usar ISDB-T en comparación con DVB-T2 es que la capacidad sería menor. Para la CNR considerada, alrededor de 33% menor (16QAM 3/4 en lugar de 64QAM 2/3). Para el caso del nuevo estándar de TDT ATSC 3.0, la misma relación de protección sería válida para una mayor capacidad.

Canal TDT	Canalización LTE 1	Canalización LTE 2	Canalización LTE 3 (5 MHz)
49	-46.2	-47.8	-49.2
50	-44.1	-47.6	-48.2
51	-41.8	-43.1	-46.9

Tabla 5.8: Relaciones de protección (dB) para la banda de 700 MHz en América.

El caso crítico para el balance de enlace, es cuando el enlace LTE-UE y el receptor de TDT están en la misma habitación, por lo que no hay pérdidas

adicionales de penetración de la pared. Para la potencia máxima de transmisión, la distancia mínima entre el LTE-UE y el receptor de TDT es de 7.76 m, y 5.79 m para una potencia de transmisión de -9 dBm. El uso de un filtro comercial reduciría la distancia de protección hasta 5.82 m para la potencia máxima de transmisión, pero las distancias se mantienen para -9 dBm de potencia de transmisión LTE-UE, respectivamente. Para evitar interferencias, el nivel de señal de TDT recibido debe ser 55 dB superior al umbral de recepción, para la potencia máxima de transmisión del LTE-UE, y 53 dB para una potencia de transmisión de -9 dBm.

5.3. Conclusiones

En esta tesis se han investigado los posibles problemas de coexistencia entre las redes de TDT y 4G LTE en las bandas de UHF de 700 MHz y 800 MHz, mediante la medición de las relaciones de protección en condiciones de laboratorio y el análisis del balance de enlace. Se han considerado escenarios de recepción de TDT fija en exteriores y portable en interiores; el efecto de la banda de guarda y el uso de filtros anti-LTE, junto con diferentes parámetros de la señal LTE tales como la carga de tráfico, ancho de banda, y el enlace interferente (Uplink y Downlink).

Relaciones de Protección Cuando el enlace uplink es el enlace interferente, se determinó que cargas más ligeras implican mayor variación temporal de la forma de onda de la señal, y por tanto, las relaciones de protección, son peores (hasta casi 10 dB), y esa es la razón por la que el enlace ascendente LTE genera más interferencia que el enlace descendente. El uso de filtros comerciales y profesionales (para instalaciones en la azotea) anti-LTE puede mejorar las relaciones de protección en 13 dB y 15 dB, respectivamente. Además, se observó que la mejora en las relaciones de protección es mayor, cuanto mayor es el ancho de banda de la señal LTE. Esto es debido a la característica de la modulación OFDM, donde a mayor ancho de banda, más lenta es la caída del espectro a los extremos de la señal OFDM. Por tanto, más potencia se introduce a los canales adyacentes. Si la señal interferente es la señal LTE-DL, la mejora en las relaciones de protección debido al uso de filtros es equivalente.

Con relación al ancho de banda de la señal LTE, para bandas de guarda inferiores a 4 MHz, las señales LTE con anchos de banda menores i.e. 5 MHz provocan más interferencia. Sin embargo, si aumenta la banda de guarda, las señales con ancho de banda más grande son más interferentes. Para el caso del enlace LTE-DL, también aparece este punto de inflexión, pero a 4 MHz de banda de guardia. Este comportamiento es debido a que el ancho de banda

ocupado de la señal LTE es el 90 % del ancho de banda nominal, y por lo tanto hay una banda de protección adicional que es 0,25, 0,5, 0,75 y 1 MHz para 5, 10, 15 y 20 MHz, respectivamente. En relación al tipo de recepción, la diferencia en las relaciones de protección, es equivalente a la diferencia en CNR para cada canal.

Recomendaciones de Convivencia

Banda 700 MHz América Caracterizada por recepción portable en interiores, el caso crítico es cuando el enlace LTE-UE y el receptor de TDT están en la misma habitación, por lo que no hay pérdidas adicionales de penetración de la pared. Para la potencia máxima de transmisión (23 dBm), la distancia mínima entre el LTE-UE y el receptor de TDT es de 7.76 m, y 5.79 m para una potencia de transmisión de -9 dBm. El uso de un filtro comercial reduce la distancia de protección hasta 5.82 m para la potencia máxima de transmisión, pero las distancias se mantienen para -9 dBm de potencia de transmisión LTE-UE, respectivamente. Para evitar interferencias, el nivel de señal de TDT recibido debe ser al menos 55 dB superior al umbral de recepción para la potencia máxima de transmisión del LTE-UE, y 53 dB para una potencia de transmisión de -9 dBm.

Banda 700 MHz Europa En Europa el tipo de recepción predominante es la recepción fija en exteriores, siendo el enlace LTE-UL es el más cercano a la TDT. Asumiendo una relación de protección de -42 dB (canal 48 de la TDT, canalización LTE 10 MHz), se producirían interferencias a menos que se utilice un filtro con un rechazo de 9 dB. Los filtros domésticos para la banda de 700 MHz ofrecen aproximadamente 20 dB de rechazo para el primer canal LTE, y por lo tanto un filtro doméstico sería suficiente para evitar interferencias. Cabe señalar que un filtro también es necesario para proteger el canal 47 y 46 de TDT, debido a que la diferencia en la relación de protección es menor que 9 dB.

Con respecto a los requisitos de ACLR y emisiones fuera de banda para el LTE-UE, asumiendo 9 dB de rechazo del filtro, el ACLR requerido es de 75.49 dB, y el nivel de emisiones fuera de banda es -55.5 dBm/8MHz. Si se asume el uso de un filtro externo (rechazo de 20 dB) el ACLR requerido disminuye hasta 69.33 dB, y el nivel de emisiones fuera de banda es de -49.3 dBm/8MHz. Cabe señalar que estos resultados son para el peor caso, es decir, con el LTE-UE transmitiendo a la máxima potencia (23 dBm) y con potencia TDT recibida igual al umbral de recepción (-78.2 dBm). En un escenario realista, los LTE-UEs rara vez transmiten a la máxima potencia, y la potencia recibida de la TDT es

mayor que el umbral a menos que se esté en el borde de la zona de cobertura de la TDT. Los valores obtenidos como resultado de la presente tesis son en general más bajos (es decir, más restrictivos) que los umbrales propuestos por el 3GPP y la CEPT, y están de acuerdo con los requisitos de protección existentes. Para una emisión fuera de banda LTE-UE de -56 dBm / 8MHz, y manteniendo los valores de protección existentes, todavía sería necesario un filtro con el fin de evitar interferencias en el último canal de TDT (canal 48) en el peor de los casos. Sin embargo, el filtro no sería necesario si:

- La potencia de transmisión LTE-UE es inferior a 15 dBm. Para potencias típicas de ambientes rurales y urbanas (2 y -9 dBm, respectivamente) no se necesita el filtro.
- La potencia recibida de TDT es superior a -70 dBm.

Banda 800 MHz Europa Al igual que en la banda de 700 MHz la recepción predominante es la recepción fija en exteriores, y el enlace interferente es el LTE-DL. La distancia de protección es de 1.49 km, usando el modelo de propagación de Okumura-Hata. Por otra parte, para evitar interferencias la potencia mínima recibida de la señal TDT debe ser mayor que 99 dB μ V/m. El uso de filtros domésticos y profesionales, reducen la distancia de protección a 585 m y 502 m, respectivamente.

Los resultados obtenidos muestran que es muy difícil evitar interferencias en los peores casos (por ejemplo, con máxima potencia de transmisión LTE, recibiendo la potencia de la señal de TDT justo por encima del umbral, con la estación base LTE en la línea de visión a la antena de TDT en la azotea, equipos de usuario LTE en el mismo cuarto que un receptor de TDT portátil, etc.), siendo especialmente crítica la co-existencia para recepción de TDT portable en interiores, con LTE trabajando en la banda de 700 MHz, ya que el enlace ascendente LTE se coloca en la parte inferior de la banda. En este caso, se recomiendan estándares de alta calidad en términos de emisiones fuera de banda para los LTE-UE. Naturalmente, las interferencias LTE dependerá del nivel de las señales útiles de TDT, y por lo tanto los posibles problemas de convivencias se deben estudiar caso por caso, sobre todo para las redes de TDT planificadas para recepción fija en exteriores.

Capítulo 6

Conclusiones y Guía para Planificación del Espectro para TDT en Sudamérica

En la presente tesis se ha investigado la planificación de frecuencias para Sudamérica. Para lo que se ha abordado 3 aspectos claves

- Planificación de frecuencias a nivel internacional de Sudamérica e internacional para cada país.
- Convivencia de los estándares de televisión digital DVB-T2 e ISDB-T con canalización de 6 MHz y el estándar de televisión analógica NTSC.
- Convivencia de los estándares de televisión digital con sistemas de comunicaciones móviles 4G LTE en las bandas del dividendo digital.

Los resultados presentados son de naturaleza genérica por lo que pueden ser aplicados a los futuros estándares de televisión digital, como es el estándar ATSC 3.0. Para asegurar la precisión de los resultados obtenidos, se han llevado a cabo simulaciones computacionales junto con medidas de laboratorio, que posteriormente han sido comparadas con medidas de campo realizadas en Colombia. La aplicabilidad de los resultados ha sido analizada en escenarios realistas, de manera particular se han llevado a cabo simulaciones de cobertura utilizando herramientas de planificación profesional e información del estado actual de despliegue de las redes de TDT en Colombia.

6.1. Planificación de Frecuencias

Con el fin de optimizar al máximo el uso del espectro radioeléctrico, se analizaron diversas posibilidades para determinar áreas de servicio, distancias de coordinación, zonas de coordinación y estrategias de distribución de frecuencias. Además, se determinó las distancias óptimas de re-uso de frecuencias para cada tecnología adoptada en Sudamérica. Para finalmente presentar un plan de frecuencias óptimo para la región.

6.1.1. Planificación de Frecuencias a Nivel Internacional en Sudamérica

Se comprobó que con el fin de optimizar el espectro radioeléctrico, las áreas de servicio se deben determinar en función del ámbito de cobertura de las redes a planificar (nacional, regional o local).

En el caso de fronteras de extensión pequeña, aproximadamente 700 km (fronteras Ecuador-Colombia, Perú-Colombia, Brasil-Colombia, Venezuela-Guyana, Bolivia-Chile, Argentina-Uruguay, Brasil-Uruguay, Argentina-Bolivia, Bolivia-Perú, etc.), basta con establecer una única zona de coordinación. Para extensiones mayores (Brasil-Perú, Brasil-Bolivia, Paraguay-Argentina, Argentina-Chile), se deben definir más zonas de coordinación. Para las configuraciones de referencia (ISDB-T 64 QAM 3/4 FFT 8k, DVB-T2 64 QAM 2/3 FFT 16KE), el campo eléctrico protegido para recepción portable en interiores es de $57,9dB\mu V/m$ y $53dB\mu V/m$ para países que usan DVB-T2 e ISDB-T, respectivamente. Si en algún país se utiliza una configuración diferente, al valor de campo eléctrico protegido se debe sumar un factor de corrección equivalente a la diferencia en términos de CNR. A partir del umbral de campo eléctrico protegido se recomienda utilizar distancias de coordinación de 21 km desde la frontera de cada país. Las distancias de re-uso recomendada en fronteras es de 64.3 km y 68.46 km para países con DVB-T2 e ISDB-T, respectivamente.

El utilizar frecuencias pares para un país e impares para el otro ha sido una practica extendida en Sudamérica, siempre y cuando no haya influencia de un tercer país. Sin embargo se ha comprobado que tener libertad en la elección de frecuencias entre los países, disminuye el número de frecuencias necesarias, y por ende optimiza el uso del espectro radioeléctrico. Esto se debe a que se logra un mayor grado de reuso de frecuencias, e.g. para la frontera Ecuador-Colombia las frecuencias necesarias disminuyen de 12 a 11 solo por tener libertad en la elección de frecuencias. Esto implica que los convenios analógicos existentes deben revisarse y de ser necesario modificarse para optimizar el uso del espectro radioeléctrico. Con relación a la planificación de frecuencias, para todas las fronteras de Sudamérica se necesitan 5, 6 y 15 frecuencias para servicios

nacionales, regionales y locales, respectivamente.

6.1.2. Planificación de Frecuencias a Nivel Nacional en Colombia

Dependiendo del tamaño del país, y la tecnología de TDT utilizada, una sola red SFN puede cubrir todo el territorio, lo que se traduce en una sola área de servicio nacional. Sin embargo, también implica disminución en la capacidad debido al uso de intervalos de guarda muy grandes y un número elevado de emplazamientos, además con el fin de facilitar desconexiones y reducir al máximo las interferencias, es deseable determinar más de una área de servicio para las redes nacionales. En el caso de Colombia son necesarias 3 frecuencias para servicios nacionales. Esto comparado con el uso de una sola red SFN nacional, posibilita ofrecer diferentes contenidos por región, además de disminuir las interferencias a un 3.18 % de población interferida, al utilizar 2 y 1 frecuencia la población interferida aumenta al 5.65 % y 9.5 %, respectivamente. El utilizar más de 3 frecuencias no disminuye de manera representativa la población interferida, pero posibilita utilizar intervalos de guarda más pequeños e.g. 1/32 con la respectiva ganancia en capacidad de aproximadamente el 12 %, a costa de no ser óptimo desde el punto de vista de utilización del espectro radioeléctrico.

Sin embargo, en el caso de Colombia es posible desplegar una red SFN nacional. Con una posterior etapa de optimización de retardos artificiales en los transmisores, es posible reducir el porcentaje de población interferida al 5 % de la población total, que podría ser fácilmente eliminadas usando transmisores de baja potencia o gap-fillers. Esta red SFN sería la más grande del mundo, con una distancia máxima entre transmisores entre 180 km y 212 km. A partir de los resultados, se deduce que 180 km es suficiente para la distribución geográfica de los transmisores planificados.

En el caso de servicios regionales, es deseable que exista una red SFN por cada región de cobertura. Si no es posible, la región puede dividirse en más redes SFN, pero siempre independientes de las demás regiones. En el caso de Colombia son necesarias 4 frecuencias distribuidas en 5 redes SFN para servicios de ámbito regional. El utilizar 3 o 2 frecuencias presenta amplias zonas de interferencia en los bordes de las redes SFN que compartan frecuencia, 9 % y 5 % del área de cobertura. Por otra parte utilizar más frecuencias (i.e. 5) no ofrece una ganancia representativa en disminución de interferencias, además de ser poco eficiente desde el punto de vista de optimizar el uso del espectro radioeléctrico.

Para la planificación de las redes locales, las áreas de servicio son más pequeñas, generalmente ciudades y zonas urbanas o áreas metropolitanas. Sin embargo, se puede optimizar el uso del espectro radioeléctrico agrupando a

todos los canales con la misma cobertura objetivo en un múltiple de TDT. Además, canales con áreas de cobertura adyacentes pueden ser integradas en un mismo múltiple que genere una red SFN, siempre teniendo en mente que la cobertura objetivo de cada red se verá incrementada.

6.2. Convivencia entre Redes de Televisión

En el ámbito de la tesis se han presentado medidas de laboratorio de relaciones de protección entre señales de TDT DVB-T2, ISDB-T y señales de televisión analógica NTSC a 6 MHz. También se realizaron ejercicios de planificación en escenarios realistas para analizar y obtener recomendaciones genéricas para la convivencia entre las redes analógicas y digitales que deben coexistir en Sudamérica, y se ha comparado el desempeño de los estándares DVB-T2 e ISDB-T frente a interferencias. Los resultados presentados son clave para una exitosa planificación de frecuencias en la región.

6.2.1. Relaciones de Protección

Interferencia entre redes digitales DVB-T2 y analógica NTSC.

Protección de una señal de televisión analógica NTSC interferida por una señal de televisión digital DVB-T2 Para el caso de interferencias cocanal, en las medidas se observó que al aumentar el tamaño de la FFT disminuye ligeramente la interferencia. La norma ITU-R 1368 no refleja este comportamiento, y los resultados son independientes del tamaño de la FFT. La explicación es que al aumentar el tamaño de la FFT, aumenta la resolución en frecuencia (número de portadoras), por lo que la interferencia generada por la señal de TV analógica, que puede considerarse de banda estrecha por las portadoras de luminancia y crominancia, disminuye. En cuanto al uso de patrones de portadoras pilotos, se observó que patrones de portadoras más densos (PP1) proporcionan relaciones de protección 2 dB mejores comparado con el uso de patrones de portadoras menos densos (PP8), debido a una mejor estimación del canal.

En el caso de interferencias canal adyacente, las relaciones de protección obtenidas son hasta 18 dB más restrictivos comparados con DVB-T2 interferida por NTSC debido a la menor robustez de la tecnología analógica. En este caso, las relaciones de protección apenas varían con la FFT de la señal interferente digital. Aunque disminuya el tamaño de la FFT y por tanto, disminuya la caída fuera de banda de la señal DVB-T2, ésta no afecta a la portadora de vídeo de la señal NTSC ($N-1$), y aún menos a la de audio que es más robusta que la de vídeo ($N+1$). Se puede observar además que el peor caso de adyacencia para

NTSC es el canal adyacente superior $N+1$, siendo la relación de protección hasta 2 dB más restrictiva que el canal adyacente inferior $N-1$.

Protección de una señal de televisión digital DVB-T2 interferida por una señal de televisión analógica NTSC Las relaciones de protección cocanal no pueden ser aproximadas a la relación C/N . Para las relaciones de protección cana adyacente, el efecto del tamaño de la FFT de la señal útil DVB-T2 es insignificante, para el ambos casos, cocanal y canal adyacente. Por otra parte, el utilizar el modo ancho de banda extendido afecta las relaciones de protección canal adyacente en 1 dB y 2 dB para los tamaños de FFT de 8K y 16K-32K respectivamente.

Interferencia entre redes digitales DVB-T2.

En el caso de interferencia cocanal, las relaciones de protección cocanal son equivalentes la relación C/N , debido a que la interferencia introducida es similar a la de ruido térmico en el ancho de banda del canal. Las relaciones de protección dependen de la modulación, la tasa de codificación y el patrón de portadoras piloto de la señal deseada. Ni el tamaño de la FFT de la señal interferente ni el uso del modo de ancho de banda extendido afecta a las relaciones de protección cocanal. El efecto del patrón de portadoras piloto puede considerarse insignificante porque las variaciones son del orden de décimas de dB. El uso de constelaciones rotadas mejoran las relaciones de protección en menos de 1 dB para la configuración de ganancia máxima (modulación QPSK y tasa de codificación 5/6). La ganancia depende del algoritmo de procesamiento de señales implementado en el receptor, incluso habiendo medido casos que presentan ganancias negativas, aunque siempre inferiores a 1 dB. Como la variación en la mayoría de los casos es despreciable, se recomienda que este factor no se debe tener en cuenta para el cálculo de las relaciones de protección cocanal.

Para el caso de interferencias canal adyacente, las relaciones de protección para señales DVB-T2 interferidas por señales DVB-T2 se ven afectados por la modulación, la tasa de codificación de la señal deseada; así como por el tamaño de la FFT y el uso del modo ancho de banda extendido en la señal interferente. El usar tamaños de FFT de 32K y 16K en la señal interferente mejora en 1 y 5 dB la relación de protección comparada con el uso de FFTs de 1K y 8K, respectivamente. El uso de del modo ancho de banda extendido en la señal interferente empeora las relaciones de protección en 1 dB.

Interferencia entre redes digitales DVB-T2 e ISDB-T.

Protección de una señal de televisión digital DVB-T2 interferida por una señal de televisión digital ISDB-T Para el caso de interferencias cocanal. Las relaciones de protección pueden ser aproximadas a la CNR y se ven afectados principalmente por la modulación y tasa de codificación de la señal útil. El tamaño de la FFT y el uso de modo de ancho de banda extendido de la señal no afecta significativamente a las relaciones de protección cocanal. Además, el no usar el desplazamiento de frecuencia en la señal ISDB-T deteriora las relaciones de protección cocanal en 1 dB.

Para interferencias canal adyacente los valores de las relaciones de protección no se ven afectados por el tamaño de la FFT de la señal útil, pero sí del tamaño de la FFT de la señal interferente. Cuando ISDB-T es la señal interferente, el uso de una FFT de 8K, que es la FFT comúnmente utilizada, es la que genera menos interferencia ya que el uso de FFTs grandes mejora hasta en 3 dB y 1.5 dB las relaciones de protección en comparación al uso de FFTs de 2K y 4K, respectivamente. Cabe destacar que no se espera que otros países empleen FFTs más pequeñas ya que la distancia máxima entre transmisores de la red SFN disminuye, y el overhead del intervalo de guarda aumenta. Cuando la señal DVB-T2 es la señal interferente el uso de FFTs de 32K mejora hasta en 6 dB, 2 dB y 1 dB las relaciones de protección en comparación al uso de FFTs de 1K, 8K y 16K respectivamente.

Protección de una señal de televisión digital ISDB-T interferida por una señal de televisión digital DVB-T2 Las relaciones de protección cocanal, dependen de la modulación y la tasa de codificación de la señal útil ISDB-T. En este caso, las mediciones han demostrado que los resultados son independientes de la modulación y tasa de codificación de la señal DVB-T2 interferente, y que la influencia del tamaño de la FFT y el modo ancho de banda extendido es insignificante. La no utilización del desplazamiento de frecuencia de 1/7 MHz de la señal ISDB-T empeoran en 1 dB la relación de protección cocanal. El uso de la técnica de PAPR TR y ACE de DVB-T2 reduce el margen de protección en aproximadamente 2 dB.

Para el caso de relaciones de protección canal adyacente, el uso del modo ancho de banda extendido en la señal interferente DVB-T2 empeora las relaciones de protección hasta en 2 dB. El impacto del uso del modo ancho de banda extendido es 1 dB menor para 8K en comparación con 16K y 32K. Esto se debe a que con el modo 8K sólo aumenta un 1 % el número de portadoras con respecto al modo normal, mientras que para los modos 16K y 32K el aumento es del 2 %.

Las relaciones de protección obtenidas cuando la señal útil es ISDB-T y la

interferente es DVB-T2 son más restrictivos que las relaciones de protección propuestos por la ITU en la Recomendación ITU-R BT.1368 para ISDB-T interferida por ISDB-T. Esto se debe a al offset de frecuencia de la señal ISDB-T y el uso del modo extendido de DVB-T2.

De los estudios realizados también se ha podido concluir que las relaciones de protección para el canal adyacente $N-1$ y $N+1$ son asimétricas. Esto debido al offset en frecuencia de la señal ISDB-T. En caso de no emplear el offset de frecuencia la relación de protección para adyacencia $N-1$ mejora y el caso $N+1$ empeora, corrigiéndose así en cierto modo la asimetría provocada por el efecto del offset en frecuencia anteriormente mencionado.

El uso de la técnica de PAPR TR mejora el margen de protección aproximadamente en 1 dB y 1.5 dB para el canal $N-1$ y $N+1$ respectivamente. Esta asimetría se debe también al offset que implementa ISDB-T. Al utilizar ACE la mejora es todavía mayor, 1 dB y 2 dB para los canales $N-1$ y $N+1$, respectivamente.

Comparativa entre DVB-T2 e ISDB-T

Los resultados muestran que DVB-T2 supera a ISDB-T, no solo en términos de eficiencia espectral sino también en términos de inmunidad frente a interferencias. Se ha comprobado que las relaciones de protección cocanal y canal adyacente para la misma modulación y tasa de codificación son 2 dB y 13 dB mejores para DVB-T2 que para ISDB-T, respectivamente. Esto quiere decir que para la misma RP cocanal, utilizando DVB-T2 se puede transmitir con mayor capacidad que para ISDB-T.

Cuando la señal DVB-T2 actúa como señal interferente, las interferencias que genera disminuyen en 1 dB y 2 dB en comparación con la FFT máxima de ISDB-T (8K), gracias al uso de tamaños de FFT de 16K y 32K, respectivamente. Adicionalmente, el uso de TR y ACE disminuye las interferencias hasta en 1.5 dB y 2 dB, respectivamente. ISDB-T no cuenta con estos mecanismos.

Para la misma modulación y tasa de codificación (64 QAM 3/4) DVB-T2 ofrece una mejora en capacidad del 18 % en comparación con ISDB-T. Por otra parte, para la misma CNR (16.8 dB) DVB-T2 ofrece una mejora en capacidad del 72 % comparada con ISDB-T. Para capacidades similares (19 Mbps) DVB-T2 es 4 dB y 16 dB más robusto que ISDB-T contra interferencias cocanal y canal adyacente, respectivamente. Por tanto, es más probable que aparezcan interferencias sobre los países que adoptaron ISDB-T.

6.2.2. Recomendaciones de convivencia

Convivencia entre redes de televisión digital DVB-T2 y analógica NTSC

Se ha comprobado que los modos DVB-T2 que maximizan la cobertura, la capacidad o el tamaño de las redes SFN, son aquellos que utilizan tamaños de FFT de 32K. La elección de este tamaño de FFT implica tener un menor desempeño en condiciones de movilidad. A pesar que en Latinoamérica específicamente en Colombia, las redes de TDT son planificadas para recepción fija en interiores, sin considerar movilidad, es deseable encontrar un compromiso frente a condiciones de movilidad, por lo que la elección de una FFT de 16K es justificada.

De cara a la planificación de las redes de TDT DVB-T2, el caso crítico es la interferencia producida por la red de TDT a la red analógica, debido a la poca robustez de las señales de televisión analógicas. Se comprobó que, para que las redes digitales DVB-T2 puedan trabajar en canales adyacentes con las redes analógicas NTSC, y utilizando transmisores colocalizados, se debe cumplir una relación de protección de 0 dB, es decir los transmisores digitales deben transmitir como máximo a la misma potencia que los analógicos. Es decir, para dos frecuencias adyacentes, para evitar interferencias es suficiente con que la señal DVB-T2 cumpla con el filtro de máscara crítica especificado en el estándar de DVB y transmitan a la misma potencia. En caso de que la potencia transmitida por cada transmisor no sea la misma, se debe evaluar el margen de protección en recepción para determinar si existen o no interferencias.

Por otro lado, también se ha evaluado la posibilidad de trabajar en adyacencia con transmisores situados en distintas ubicaciones. A mayor separación entre el transmisor analógico y el digital, o mayor diferencia entre las potencias transmitidas, mayor probabilidad de producirse interferencias. También se ha demostrado que un factor muy importante es el diagrama de radiación. Si los patrones de radiación tienen como objetivo cubrir la misma zona y los transmisores están colocalizados, cuanto más parecidos sean los diagramas, menos problemas de interferencia.

Para el canal adyacente $N \pm 2$, experimentalmente se ha determinado que la relación de protección es de -20 dB. Este caso equivale a dejar un canal de guarda entre la red analógica y la digital, y permite que la potencia digital sea mayor que la analógica sin que ocurran interferencias. En concreto, la potencia analógica puede ser hasta 20 dB menor que la digital. Sin embargo, esta configuración realiza un uso ineficiente del espectro radioeléctrico.

Otra conclusión extraída del estudio realizado, es que las relaciones de protección para NTSC interferida por ISDB-T, son hasta 3 dB menos restrictivas, principalmente debido a que la señal DVB-T2 ocupa mayor ancho de banda

efectivo (5.71 MHz para DVB-T2 y 5.57 MHz para ISDB-T) y al uso del modo ancho de banda extendido en DVB-T2 (de 5.71 MHz a 5.83 MHz para FFTs de 16k y 32K). Esto implica que para la planificación de redes en la etapa de simulcast, La planificación de las redes digitales DVB-T2 es más crítica que la planificación de redes ISDB-T.

Convivencia entre redes de televisión digital DVB-T2

Para el despliegue de las redes DVB-T2 en Colombia, se debe tener en cuenta que el caso crítico se da para transmisores de dos redes DVB-T2 trabajando en canal adyacente no colocalizados. Si adicionalmente una red proporciona cobertura en interiores y otra no, las interferencias se ven incrementadas. Es importante para el despliegue de las redes que los transmisores estén colocalizados, brinden el mismo nivel de cobertura y su despliegue sea simultáneo.

En el caso de transmisores colocalizados funcionando en canales adyacentes se debe evaluar la relación de protección en recepción para determinar si existen o no interferencias. Para señales DVB-T2 interfiriendo señales DVB-T2, la potencia interferente recibida debe ser como mucho -39 dB superior a la potencia de la señal deseada. Igualmente, en el caso de que los transmisores se encuentren situados en distintos lugares, es necesario realizar ejercicios de planificación para evaluar en recepción la existencia o no de interferencia.

También se ha de tener en cuenta, que para recepción fija sobre tejado, las antenas receptoras suelen ser directivas, lo que de por sí disminuye el nivel de potencia recibida en ciertos ángulos. Esto debido a que a medida que aumenta el ángulo de la antena receptora respecto del lóbulo principal de la antena transmisora, aumenta el rechazo a la señal recibida. De esta forma, pueden limitarse de forma directa las interferencias entre canales. Este hecho se puede ver como un incremento virtual del margen de protección (o una reducción en términos absolutos ya que el margen de protección suele ser negativo). Pero, como los transmisores TDT de diferentes redes suelen estar en diferentes ubicaciones geográficas, no es viable desde el punto de vista práctico colocar una antena orientada por cada canal de televisión que se desea recibir.

Convivencia entre redes de televisión digital DVB-T2 e ISDB-T

Con respecto a la planificación de redes en países fronterizos en los que DVB-T2 debe convivir con ISDB-T, debido a la mayor robustez de las señal DVB-T2, se debe tener mayor cuidado en la planificación de las redes ISDB-T más susceptibles a interferencias.

Si se consideran los actuales acuerdos fronterizos, que especifican distribución par/impar de frecuencias, Por un lado, el re-uso de frecuencias no es posible

en zonas dentro de la distancia de coordinación entre los países. Por tanto, dichas distancias de coordinación deben ser muy cuidadosamente determinadas. Además, el offset de la frecuencia central de canal obligatorio en ISDB-T de 1/7 MHz hacen que la distribución de frecuencias alternadas por canales pares e impares para cada país no sea la distribución óptima del espectro. Distribuir el espectro por bloques de canales para cada tecnología o permitir libertad en la asignación de frecuencias permite mejor uso del mismo. La distancia de re-uso de frecuencias en este caso se ve limitada a la tecnología menos robusta (ISDB-T) que es de 68.46 km, comparada con una distancia de 64.3 km para los países con DVB-T2.

6.3. Convivencia entre Redes de TDT y redes 4G LTE

En esta tesis se han investigado los posibles problemas de coexistencia entre las redes de TDT y 4G LTE en las bandas de UHF de 700 MHz y 800 MHz, mediante la medición de las relaciones de protección en condiciones de laboratorio y el análisis del balance de enlace. Se han considerado escenarios de recepción de TDT fija en exteriores y portable en interiores; el efecto de la banda de guarda y el uso de filtros anti-LTE, junto con diferentes parámetros de la señal LTE tales como la carga de tráfico, ancho de banda, y el enlace interferente (Uplink y Downlink).

6.3.1. Relaciones de Protección

Cuando el enlace uplink es el enlace interferente, se determinó que cargas más ligeras implican mayor variación temporal de la forma de onda de la señal, y por tanto, las relaciones de protección, son peores (hasta casi 10 dB), y esa es la razón por la que el enlace ascendente LTE genera más interferencia que el enlace descendente. El uso de filtros comerciales y profesionales (para instalaciones en la azotea) anti-LTE puede mejorar las relaciones de protección en 13 dB y 15 dB, respectivamente. Además, se observó que la mejora en las relaciones de protección es mayor, cuanto mayor es el ancho de banda de la señal LTE. Esto es debido a la característica de la modulación OFDM, donde a mayor ancho de banda, más lenta es la caída del espectro a los extremos de la señal OFDM. Por tanto, más potencia se introduce a los canales adyacentes. Si la señal interferente es la señal LTE-DL, la mejora en las relaciones de protección debido al uso de filtros es equivalente.

Con relación al ancho de banda de la señal LTE, para bandas de guarda inferiores a 4 MHz, las señales LTE con anchos de banda menores i.e. 5 MHz

provocan más interferencia. Sin embargo, si aumenta la banda de guarda, las señales con ancho de banda más grande son más interferentes. Para el caso del enlace LTE-DL, también aparece este punto de inflexión, pero a 4 MHz de banda de guarda. Este comportamiento es debido a que el ancho de banda ocupado de la señal LTE es el 90 % del ancho de banda nominal, y por lo tanto hay una banda de protección adicional que es 0,25, 0,5, 0,75 y 1 MHz para 5, 10, 15 y 20 MHz, respectivamente. En relación al tipo de recepción, la diferencia en las relaciones de protección, es equivalente a la diferencia en CNR para cada canal.

6.3.2. Recomendaciones de Convivencia

Banda 700 MHz América Caracterizada por recepción portable en interiores, el caso crítico es cuando el enlace LTE-UE y el receptor de TDT están en la misma habitación, por lo que no hay pérdidas adicionales de penetración de la pared. Para la potencia máxima de transmisión (23 dBm), la distancia mínima entre el LTE-UE y el receptor de TDT es de 7.76 m, y 5.79 m para una potencia de transmisión de -9 dBm. El uso de un filtro comercial reduce la distancia de protección hasta 5.82 m para la potencia máxima de transmisión, pero las distancias se mantienen para -9 dBm de potencia de transmisión LTE-UE, respectivamente. Para evitar interferencias, el nivel de señal de TDT recibido debe ser al menos 55 dB superior al umbral de recepción para la potencia máxima de transmisión del LTE-UE, y 53 dB para una potencia de transmisión de -9 dBm.

Banda 700 MHz Europa En Europa el tipo de recepción predominante es la recepción fija en exteriores, siendo el enlace LTE-UL es el más cercano a la TDT. Asumiendo una relación de protección de -42 dB (canal 48 de la TDT, canalización LTE 10 MHz), se producirían interferencias a menos que se utilice un filtro con un rechazo de 9 dB. Los filtros domésticos para la banda de 700 MHz ofrecen aproximadamente 20 dB de rechazo para el primer canal LTE, y por lo tanto un filtro doméstico sería suficiente para evitar interferencias. Cabe señalar que un filtro también es necesario para proteger el canal 47 y 46 de TDT, debido a que la diferencia en la relación de protección es menor que 9 dB.

Con respecto a los requisitos de ACLR y emisiones fuera de banda para el LTE-UE, asumiendo 9 dB de rechazo del filtro, el ACLR requerido es de 75.49 dB, y el nivel de emisiones fuera de banda es -55.5 dBm/8MHz. Si se asume el uso de un filtro externo (rechazo de 20 dB) el ACLR requerido disminuye hasta 69.33 dB, y el nivel de emisiones fuera de banda es de -49.3 dBm/8MHz. Cabe señalar que estos resultados son para el peor caso, es decir, con el LTE-UE

Capítulo 6. Conclusiones y Guía para Planificación del Espectro para TDT en Sudamérica

transmitiendo a la máxima potencia (23 dBm) y con potencia TDT recibida igual al umbral de recepción (-78.2 dBm). En un escenario realista, los LTE-UEs rara vez transmiten a la máxima potencia, y la potencia recibida de la TDT es mayor que el umbral a menos que se esté en el borde de la zona de cobertura de la TDT. Los valores obtenidos como resultado de la presente tesis son en general más bajos (es decir, más restrictivos) que los umbrales propuestos por el 3GPP y la CEPT, y están de acuerdo con los requisitos de protección existentes. Para una emisión fuera de banda LTE-UE de -56 dBm / 8MHz, y manteniendo los valores de protección existentes, todavía sería necesario un filtro con el fin de evitar interferencias en el último canal de TDT (canal 48) en el peor de los casos. Sin embargo, el filtro no sería necesario si:

- La potencia de transmisión LTE-UE es inferior a 15 dBm. Para potencias típicas de ambientes rurales y urbanas (2 y -9 dBm, respectivamente) no se necesita el filtro.
- La potencia recibida de TDT es superior a -70 dBm.

Banda 800 MHz Europa Al igual que en la banda de 700 MHz la recepción predominante es la recepción fija en exteriores, y el enlace interferente es el LTE-DL. La distancia de protección es de 1.49 km, usando el modelo de propagación de Okumura-Hata. Por otra parte, para evitar interferencias la potencia mínima recibida de la señal TDT debe ser mayor que $99dB\mu V/m$. El uso de filtros domésticos y profesionales, reducen la distancia de protección a 585 m y 502 m, respectivamente.

Los resultados obtenidos muestran que es muy difícil evitar interferencias en los peores casos (por ejemplo, con máxima potencia de transmisión LTE, recibiendo la potencia de la señal de TDT justo por encima del umbral, con la estación base LTE en la línea de visión a la antena de TDT en la azotea, equipos de usuario LTE en el mismo cuarto que un receptor de TDT portátil, etc.), siendo especialmente crítica la co-existencia para recepción de TDT portable en interiores, con LTE trabajando en la banda de 700 MHz, ya que el enlace ascendente LTE se coloca en la parte inferior de la banda. En este caso, se recomiendan estándares de alta calidad en términos de emisiones fuera de banda para los LTE-UE. Naturalmente, las interferencias LTE dependerá del nivel de las señales útiles de TDT, y por lo tanto los posibles problemas de convivencias se deben estudiar caso por caso, sobre todo para las redes de TDT planificadas para recepción fija en exteriores.

6.4. Trabajo futuro

En el contexto de planificación de frecuencias, se deben realizar medidas de campo para verificar la planificación de frecuencia propuesta.

Para la calibración de los modelos de propagación, en la presente tesis se han utilizado medidas de campo realizadas en 2 ciudades de Colombia, pero dada la gran diversidad geográfica de Sudamérica, se deben realizar muchas más medidas para diferentes condiciones geográficas de la región.

Con el fin de ajustarnos más las condiciones de la región se debe realizar la planificación de frecuencias utilizando métodos de planificación más complejos (i.e grafos ponderados) y comparar los resultados obtenidos.

Realizar la planificación de frecuencias interna para los demás países de Sudamérica.

En relación a la convivencia entre TDT y LTE, se deben realizar experimentos reales para comprobar el cumplimiento de las distancias de protección. Por ejemplo con un receptor TDT recibiendo en el último canal de la TDT y un equipo de usuario LTE ubicado en la misma sala y transmitiendo en la banda de 700 MHz.

La liberación de más bandas para el dividendo digital es un tópico de investigación de interés. Países como Colombia han expuesto el interés de utilizar la banda de 450 MHz para provisión de servicios de comunicaciones móviles 4G LTE. Desde el punto de vista de planificación, se debe estudiar las posibles interferencias por agregar LTE en esta banda y soluciones para mitigar dichas interferencias. Esta banda es técnicamente adecuada para dar cobertura a zonas rurales por sus buenas características de propagación.

La creciente necesidad de espectro por parte de las comunicaciones móviles, llevan a pensar en maneras de compartir el espectro de la TDT con comunicaciones LTE. Esto puede ser posible para femtoceldas de baja potencia en interiores y redes de TDT planificadas para recepción fija en tejado compartiendo el espectro co-canal de la TDT, siempre y cuando no implique interferencias a la TDT. Se debe investigar la propagación entre las señales LTE en interiores y los receptores de TDT.

Los espacios en banco son bien conocidos en el ámbito de las redes de TDT, es necesario estudiar métodos más eficientes de utilizar los espacios en blanco por servicios de comunicaciones móviles. Soluciones como cognitive ratio han sido propuestas para aprovechar los espacios en blanco de forma oportunista por otros servicios de comunicaciones. Se deben investigar mecanismos de testeo canal más eficiente y con menor complejidad computacional.

Capítulo 6. Conclusiones y Guía para Planificación del Espectro para TDT en Sudamérica

Apéndice A

Estado de la TDT en América Latina

A.1. Argentina

En 2009 se selecciona el estándar ISDB-T, para marzo de 2012 finaliza la primera fase de implementación en 50 provincias. Actualmente existen un total de 18 canales comerciales transmitiendo en digital en la ciudad de Buenos Aires y Gran Buenos Aires en los canales 26-27, 31-36 y 56. El gobierno nacional administra 4 frecuencias UHF: canales 22 al 25, que contiene algunos canales de producción propia y han sido asignadas para todo el territorio nacional. Una SFN ha sido implementada en el corredor Rosario - San Nicolás - Baradero - Campana - Buenos Aires - La Plata. El apagón analógico se planea sea para finales de 2019 y la banda de 614 a 806 MHz está atribuida a servicios de radiodifusión y fijo. No se ha seleccionado la canalización a utilizar para IMT en el dividendo digital.

A.2. Bolivia

En 2010 se selecciona el estándar ISDB-T. En mayo de 2012 inician las transmisiones del canal estatal digital de Bolivia TV HD en la ciudad de la Paz. Se ha asignado 2 canales de 12 MHz del dividendo digital a la Empresa Nacional de Telecomunicaciones (ENTEL) para pruebas de despliegue de redes 4G. El apagón analógico se planea para fines de 2016. Se optó por la canalización Estadounidense en lugar de la canalización APT para IMT en el dividendo digital.

A.3. Brasil

Fue el primer país de Sudamérica en seleccionar el estándar ISDB-T en 2006. En diciembre 2007 empiezan las primeras transmisiones de TDT, teniendo cobertura con transmisiones comerciales de televisión digital en 448 ciudades para el 2012, incluidas todas las capitales de Estados. Se logra así una penetración del 46 % de la población, en agosto de 2013 inicia la propuesta de contribuciones para cambios de los planes básicos de distribución de canales de televisión en las banda UHF y VHF. La banda del dividendo digital se lanzará a subasta para comunicaciones IMT en abril de 2014, para esto la canalización APT ha sido seleccionada. Además, Brasil es pionero en plantear el uso de IMT 3G (CDMA EvDo) en la banda UHF de 470 MHz. El apagón analógico esta planeado para el 2015,

A.4. Chile

Adopta ISDB-T en 2009. En 2012 inician las primeras transmisiones experimentales de televisión digital en la región de la Concepción. El mismo año el canal local de la Universidad Autónoma de Chile UATV inicia sus transmisiones en la región de la Araucanía. La banda de 614 a 806 MHz se encuentra atribuida a servicios de radiodifusión y fijo. Se ha optado por la canalización APT para comunicaciones IMT en la banda del dividendo digital.

A.5. Colombia

En primera instancia seleccionó el estándar DVB-T para la transmisión de TDT, posteriormente gracias a la salida de DVB-T2 como estándar de segunda generación se decidió actualizar a este estándar. Las transmisiones de televisión digital se ha dividido en 2 grupos: RTVC y CCNP y se planea crear dos grandes redes SFN para brindar cobertura nacional. Se han realizado ya las fases iniciales de despliegue de las redes de TDT. En la Tabla A.1 y Tabla A.2 se muestra la información de las estaciones de la fase I y fase II del operador privado CCNP, respectivamente. En la Tabla A.3, Tabla A.4 y Tabla A.5, se presenta la información de las Fases I, II Y III del operador público RTVC.

A.5 Colombia

Estación	Latitud (gg mm ss)	Longitud (gg mm ss)	PIRE (dBm)
Turbaco	10 20 11.6 N	75 25 39.6 O	84 (251 kW)
Tasajero	07 59 47.7 N	72 27 38.5 O	82 (158 kW)
El Nudo	04 50 37.6 N	75 43 02.5 O	77 (50 kW)
castellana	05 03 45.5 N	75 31 31.0 O	76 (39.8 kW)
Lebrija	07 04 58.9 N	73 11 44.9 O	78 (63 kW)
Tres Cruces	11 14 05.7 N	74 10 59.3 O	75 (31 kW)
Armenia	04 36 40.3 N	75 37 49.0 O	80 (100 kW)
La Popa	10 25 22.8 N	75 31 30.15 O	79 (79.5 kW)
Santa Librada	04 31 13.6 N	74 06 09.7 O	82 (158 kW)
Seminario	06 13 07.1 N	75 32 42.5 O	77 (50 kW)
Cristo Rey	03 25 57.3 N	76 33 57.0 O	81 (125 kW)
Barranquilla	10 59 48.6 N	74 49 47.8 O	81 (125 kW)

Tabla A.1: Estaciones de la red de TDT DVB-T2 pertenecientes a la fase I del CCNP.

Estación	Latitud (gg mm ss)	Longitud (gg mm ss)	PIRE (dBm)
Bañaderos	11 08 07.5 N	72 47 16.8 O	80 (100 kW)
Buenavista	04 09 17.9 N	73 41 01.8 O	82 (158 kW)
Cerro Neiva	02 48 39.4 N	75 09 47.8 O	80 (100 kW)
Galeras	1 12 38.3 N	77 21 25.8 O	84 (251 kW)
La barra	08 43 20.1 N	75 35 24.6 O	84 (251 kW)
La pita	09 38 12.6 N	75 12 24.9 O	77 (50 kW)
Laguna seca	05 51 50.6 N	73 03 26.6 O	78 (63 kW)
Martinica	04 24 25.0 N	75 13 30.0 O	78 (63 kW)
Munchique	02 30 55.8 N	76 57 17.4 O	79 (79.5 kW)
Cerro alegre	10 30 30.9 N	73 15 30.7 O	78 (63 kW)

Tabla A.2: Estaciones de la red de TDT DVB-T2 de Colombia pertenecientes a la fase II del CCNP.

APÉNDICE A. ESTADO DE LA TDT EN AMÉRICA LATINA

Estación	Latitud (gg mm ss)	Longitud (gg mm ss)	PIRE (dBm)
Bello	06 16 56. 80 N	75 32 01.8 O	76.51
Calatrava	04 43 37.4 N	74 04 50.2 O	73.21
Cerro kennedy	11 06 46.4 N	74 02 11.0 O	80.51
Cruz verde	04 31 16.0 N	74 04 27.2 O	74.81
Itagüí	06 08 36.2 N	75 36 05.4 O	76.91
La azalea	03 52 04.2 N	76 14 39.7 O	82.69
La popa	10 25 13.0 N	75 31 33.0 O	78.79
Lebrija	07 04 34.4 N	73 11 48.2 O	75.59
Manjui	04 48 11.1 N	74 23 36.5 O	80.49
Nogales	10 59 39.6 N	74 49 48.0 O	74.01
Padre amaya	06 16 47.8 N	75 41 10.3 O	80.49
Tasajero	07 59 31.3 N	72 27 43.9 O	79.71
Tres cruces	03 28 04.75 N	76 32 45.2 O	78.89
El nudo	04 50 50.5 N	75 42 52.8 O	74.81

Tabla A.3: Estaciones de la red de TDT DVB-T2 de Colombia pertenecientes a la fase I de RTVC.

Estación	Latitud (gg mm ss)	Longitud (gg mm ss)	PIRE (dBm)
Alto del tigre	4 18 08.30 N	73 44 30.60 O	78.91
Cerro neiva	2 48 36.5 N	75 09 43.00 O	70.09
El alguacil	10 30 27.0 N	73 33 25.0 O	80.99
Gabinete	01 53 5.6 N	75 40 26.7 O	73.15
La pita	09 38 12.0 N	75 12 17.0 O	68.09
Monteria	8 52 23.0 N	75 38 27.0 O	66.24
Planadas	4 26 20.3 N	75 37 24.7 O	73.50

Tabla A.4: Estaciones de la red de TDT DVB-T2 de Colombia pertenecientes a la fase II de RTVC.

Estación	Latitud (gg mm ss)	Longitud (gg mm ss)	PIRE (dBm)
Cristo rey	03 26 03.2 N	76 33 56.1 O	78.01
La rusia	05 53 29.0 N	73 05 0.0 O	63.21
Buenavista	02 20 9.4 N	75 43 38.2 O	51.61
Cerro carepa	07 43 46.0 N	76 39 28.0 O	70.89
Cerro oriente	07 20 05.0 N	72 42 03.0 O	74.61
Galeras	01 12 35.01 N	77 21 26.06 O	74.01
Jurisdicciones	7 50 52.50 N	73 13 26.30 O	76.51
Leticia	04 13 3.0 S	69 56 26.1 O	61.49
Málaga	06 39 35.0 N	72 45 59.0 O	58.4
Martinica	04 24 26.0 N	75 13 23.0 O	73.21
Mirador	01 04 10.5 N	76 44 10.3 O	70.1
Montezuma	05 15 27.9 N	76 07 16.6 O	76.21
Munchique	02 31 11.0 N	76 57 33.0 O	66.69
El ruiz	04 57 15.1 N	75 21 17.6 O	69.30
Saboya	05 42 55.0 N	73 48 45.0 O	58.9
San gil	06 35 31.8 N	73 10 52.8 O	51.61
El cable	04 37 51.6 N	74 03 02.1 O	74.21

Tabla A.5: Estaciones de la red de TDT DVB-T2 de Colombia pertenecientes a la fase III de RTVC.

La banda de 700 MHz del dividendo digital será asignada a comunicaciones IMT dejando inicialmente una banda de guarda de 5 MHz (698 MHz a 703 MHz). El apagón analógico en Colombia está planeado para fines del 2019. La canalización APT será utilizada para el despliegue de LTE en el dividendo digital. El espectro radioeléctrico asignado para TDT es el mostrado en la Fig A.1.



Figura A.1: Distribución de espectro para TDT en Colombia.

A.6. Ecuador

En 2010 se adopta ISDB-T como norma de transmisión, para mayo de 2013 el canal público TC Televisión inicia la transmisión de televisión digital.

APÉNDICE A. ESTADO DE LA TDT EN AMÉRICA LATINA

Además, servicios de TDT comerciales ya se han puesto en marcha en las principales ciudades del país: 7 operadores en Quito, 8 en Guayaquil y 1 en Manta. El plan inicial de frecuencias contempla la asignación de un canal adyacente a la transmisión analógica para la etapa de simulcast por cada operador, compartir un mismo canal por dos operadores se contempla únicamente en el caso de no haber espectro disponible. Se tiene un total de 82 operadores de televisión siendo 7 de ellos a nivel nacional. Se ha autorizado el uso de 30 MHz del dividendo digital en la banda de 700 MHz para pruebas de redes 4G a partir del segundo semestre del 2013, para lo que se utilizará la canalización APT en el dividendo digital. La distribución de frecuencias para la etapa de transición se puede ver en el la figura A.2. El apagón analógico está planeado para diciembre de 2018.

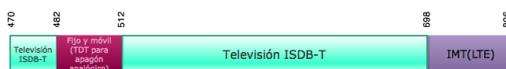


Figura A.2: Distribución de espectro para TDT en Ecuador.

A.7. Honduras

En 2010 se selecciona ATSC como estándar de transmisión de TDT. Se han lanzado a licitación 37 frecuencias para el uso de televisión digital. El apagón analógico se planea para el 2021. No se ha seleccionado la canalización a utilizar para el dividendo digital, así como tampoco se ha planeado su uso.

A.8. México

En 2004 se elige ATSC para la transmisión de televisión digital. Existen aproximadamente 146 estaciones de TDT funcionales de las cuales 123 son estaciones comerciales, al momento la ciudad de Tijuana es la primera que ha dejado de emitir completamente en analógico en julio de 2013, convirtiéndose en la primera ciudad de Latinoamérica en finalizar con las transmisiones analógicas de televisión, el apagón analógico total se planea sea para el 2015. La banda de 698-806 MHz se ha asignado para el despliegue de comunicaciones IMT. Así, la licitación para la asignación de frecuencias para comunicaciones móviles 4G en dicha banda se planeó para el 2014. Se optó por la canalización APT para el dividendo digital.

A.9. Panamá

Se elige el estándar DVB-T en 2009. La primera fase de implementación de la TDT inició en Septiembre del 2011 y culminó en Marzo del 2013 en las provincias de Panamá y Colón, en esta primera etapa se transmite simultáneamente la señal analógica y digital. La fecha del apagón analógico se planea sea para el 2020.

A.10. Perú

En 2012 se elige ISDB-T como estándar de transmisión de TDT empezando su implementación en 4 territorios , la fecha del apagón analógico para el territorio 1 (Lima y Callao) se planea sea en el 2020, en el territorio 2 (Arequipa, Cusco, Trujillo, Chiclayo, Piura y Huancayo) para el 2022, para el territorio 3 (Ayacucho, Chimbote, Ica, Iquitos, Juliaca, Pucallpa, Puno y Tacna) en 2024, mientras que para el territorio 4 (Localidades no incluidas en los territorios 1 a 3) la fecha es indefinida. Al momento un total de 15 canales en la ciudad de Lima están transmitiendo en digital. No se ha optado por un tipo de canalización aún para el dividendo digital, pero la tendencia apunta a elegir la canalización APT.

A.11. Venezuela

Adopta ISDB-T en 2009, se lanzaron pilotos de transmisión de televisión digital al mismo tiempo que se firmó un convenio con empresas argentinas para la instalación de 13 estaciones de transmisión en 2012. En febrero de 2013 se puso en marcha las transmisiones de televisión digital en 13 estados del país. Además, se planea el lanzamiento de servicios comerciales de televisión digital en los próximos meses. La fecha del apagón analógico está definida para el 2020. No se ha seleccionado la canalización a utilizar para el dividendo digital.

A.12. Revisión de la Utilización de Frecuencias en Zona de Frontera

A.12.1. Frontera Ecuador Colombia

La convivencia en términos de uso del espectro para servicios de televisión entre Colombia y Ecuador está reglamentado actualmente por el “Convenio entre el Ministerio de Comunicaciones de la República de Colombia y el Consejo

APÉNDICE A. ESTADO DE LA TDT EN AMÉRICA LATINA

Nacional de Radiodifusión y Televisión de la República de Ecuador – Conartel, para la asignación y uso de frecuencias radioeléctricas para la operación de estaciones de radiodifusión sonora y de televisión abierta VHF y UHF en el área de frontera” [115].

Siguiendo el acuerdo entre Colombia y Ecuador, los canales disponibles por Colombia para la transmisión de servicios de TDT son los listados en la tabla A.6.

	Grupo	Canales
Colombia	VHF-2	3, 5, 7, 9, 11, 13
	UHF-1	22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60, 62, 64, 66, 68
Ecuador	VHF-1	2, 4, 6, 8, 10, 12
	UHF-2	21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 51, 53, 55, 57, 59, 61, 63, 65, 67

Tabla A.6: Canales VHF y UHF disponibles en la frontera entre Colombia y Ecuador, de acuerdo al Convenio bilateral [115].

En [115] se establece una **zona de coordinación de 15 km** a lado y lado de la frontera en los que se aplican los valores de intensidad de campo mínima a proteger y las relaciones de protección.

Los estudios realizados por Tachyon ltda para la ANE en el marco del proyecto [112] para actualizar o formalizar los acuerdos de uso del espectro con los países vecinos, sugieren actualizar el acuerdo con Ecuador de la forma reflejada en la Tabla A.7.

	Grupo	Canales
Colombia	VHF-2	3, 5, 7, 9, 11, 13
	UHF-1	14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50.
Ecuador	VHF-1	2, 4, 6, 8, 10, 12
	UHF-2	15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 51.

Tabla A.7: Canales VHF y UHF propuesto por Tachyon para actualizar el acuerdo de uso del espectro en la frontera entre Colombia y Ecuador.

A.12 Revisión de la Utilización de Frecuencias en Zona de Frontera

Los canales 14 al 20, que corresponden a la banda primaria reservada por la ANE de Colombia para los servicios de TDT no están incluidos en el acuerdo entre Colombia y Ecuador. De acuerdo a los estudios contratados por la ANE a Tachyon ltda., ésta banda de canales es utilizada en Ecuador para comunicaciones militares.

A.12.2. Frontera con Brasil Colombia

Entre Colombia y Brasil, no existe ningún convenio para la convivencia del servicio de radiodifusión de televisión, ni acto que establezca o regule una zona que se identifique como fronteriza.

En cuanto a Brasil, de acuerdo con [116] el servicio de radiodifusión para uso de televisión está atribuido en las siguientes frecuencias: de 54 - 72 MHz, de 76 - 87,4 MHz, de 87,4 a 87,8MHz, de 174-216 MHz, de 470 - 608 MHz y de 614 a 806 MHz.

Por otra parte, la ANATEL establece las canalizaciones para TV digital en VHF y UHF, que comprenden los canales 7 al 13 en VHF; 14 al 36 y 38 al 59 en UHF. Actualmente la ANATEL también ha atribuido la banda de 698 - 806 MHz a título primario para los servicios fijo y móvil.

En este sentido y sin establecer ningún acuerdo con Brasil se puede afirmar que Colombia puede utilizar cualquier canal de la banda VHF y UHF para la emisión de los contenidos de TV digital. Sin embargo, con el ánimo de mantener una armonía en el uso del espectro **en la zona de frontera de Brasil es conveniente elegir frecuencias en los canales 14 al 50.**

Los estudios realizados por Tachyon ltda para la ANE sugieren establecer un acuerdo con Brasil de la forma reflejada en la Tabla A.8.

	Grupo	Canales
Colombia	VHF-2	3, 5, 7, 9, 11, 13
	UHF-1	14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50.
Brasil	VHF-1	2, 4, 6, 8, 10, 12
	UHF-2	15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 51.

Tabla A.8: Canales VHF y UHF propuesto por Tachyon para establecer un acuerdo de uso del espectro en la frontera entre Colombia y Brasil.

A.12.3. Frontera con Venezuela Colombia

Entre Colombia y Venezuela, tampoco existe un convenio para la convivencia del servicio de radiodifusión de televisión. De acuerdo con [117] el servicio de radiodifusión para uso de televisión está atribuido en las siguientes frecuencias: de 54 - 72 MHz, de 76 - 88 MHz y de 174 a 216 MHz mediante la nota V4 y, de 512 a 806 MHz mediante la nota V14.

Respecto a la banda de 470 a 512 MHz, atribuida en Colombia a radiodifusión de televisión, según el CONATEL de Venezuela, esta banda está atribuida a servicios móviles y asignada para uso gubernamental en 470 – 490 MHz. Por último según decreto 1521 de 2001, La televisión comunitaria utiliza la banda de frecuencia de 512 a 806 MHz.

Ubicación	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Latitud límite superior	12°34'30"	10°33'00"	9°11'00"	7°10'00"
Latitud límite inferior	10°33'00"	9°11'00"	7°10'00"	1°13'50"

Tabla A.9: Límites geográficos de las zonas de coordinación para estaciones de radiodifusión de televisión en la frontera con Venezuela [Fronteras].

Los estudios realizados por Tachyon Ltda para la ANE, sugieren establecer un acuerdo con Venezuela basado en la división de la frontera en 4 zonas como se detallan en la Tabla A.10. La propuesta de distribución de espectro para cada zona es resumida en la Tabla A.9. Con el ánimo de mantener una armonía en el uso del espectro **en la zona de frontera de Venezuela es conveniente elegir frecuencias en los canales 21 al 50.**

En la Figura A.3 se resumen las zonas de coordinación establecidas en los actuales acuerdos de frontera en Colombia. Se debe notar que la distribución de canales en la frontera con Venezuela inician en el canal 21, y no en el canal 14(inicio de la banda de TDT). Esto se debe a que Venezuela usa los canales 14 al 20 para servicios militares por lo que no pueden ser considerados para la distribución de TDT.

A.12 Revisión de la Utilización de Frecuencias en Zona de Frontera

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Colombia	VHF-1 (2, 4, 6, 8, 10, 12)	VHF-2 (3, 5, 7, 9, 11, 13)	VHF-1 (2, 4, 6, 8, 10, 12)	VHF-2 (3, 5, 7, 9, 11, 13)
	UHF-1 (14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50)	UHF-2 (15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 51)	UHF-1 (14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50)	UHF-2 (15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 51)
Venezuela	VHF-2 (3, 5, 7, 9, 11, 13)	VHF-1 (2, 4, 6, 8, 10, 12)	VHF-2 (3, 5, 7, 9, 11, 13)	VHF-1 (2, 4, 6, 8, 10, 12)
	UHF-2 (15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 51)	UHF-1 (14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50)	UHF-2 (15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 51)	UHF-1 (14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50)

Tabla A.10: Distribución propuesta para la asignación de grupos de canales de radiodifusión de televisión en VHF y UHF para el Acuerdo con Venezuela.

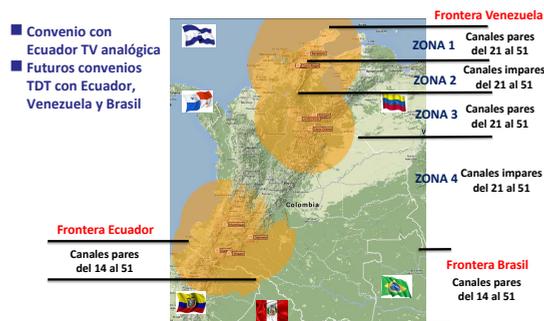


Figura A.3: Zonas de coordinación en las fronteras de Colombia, con uso de la banda primaria (14 al 20) solo en las fronteras con Ecuador y Brasil.

APÉNDICE A. ESTADO DE LA TDT EN AMÉRICA LATINA

Apéndice B

Tecnologías

B.1. Tecnologías de Televisión Terrestre

B.1.1. NTSC

Espectro de la señal NTSC/M

La señal de televisión analógica NTSC es una señal de vídeo compuesto, es decir, una señal compuesta de las componentes de luminancia, que aporta la imagen en blanco y negro (información de luz); la crominancia, que aporta la información del color; y sincronismo que indica las características del barrido efectuado en la captación de la imagen.

Tanto NTSC como PAL modulan las componentes de color (crominancia) mediante una modulación de amplitud en cuadratura (I-Q). La particularidad de PAL estriba en que los ejes de esta modulación en cuadratura están rotados 33° . Asimismo, se asigna a la señal Q un ancho de banda de 500 kHz y al eje I, un ancho de banda de 1.5MHz. También en ambos sistemas se transmite la crominancia de forma simultánea con la luminancia. La señal de luminancia se trasmite por modulación de amplitud con banda lateral vestigial, cuya portadora se encuentra a 3.58 MHz de la portadora de la señal de crominancia.

Finalmente el sonido se transmite de forma separada empleando una modulación en frecuencia (FM) de ancho de banda 0.5 MHz, encontrándose su portadora a 4.5 MHz de la portadora de vídeo tal y como se puede observar en la figura B.1. De esta forma, el ancho de banda de la señal NTSC ocupa 6 MHz.

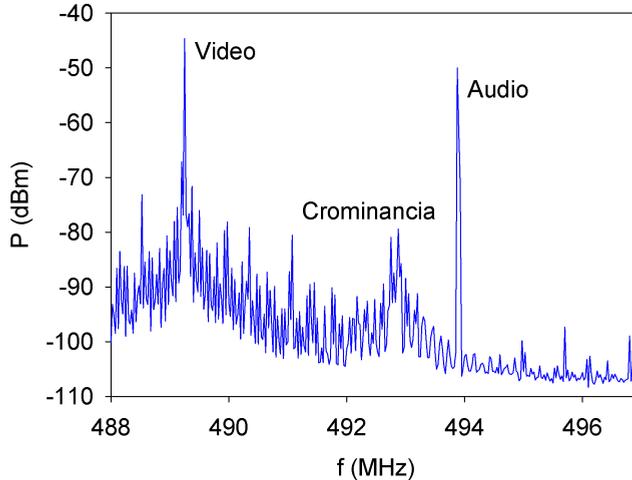


Figura B.1: Espectro de la señal NTSC.

B.1.2. ISDB-T

ISDB es un conjunto de normas creadas en Japón para la transmisión de radio digital y televisión digital. Como la norma europea DVB, ISDB está conformado por una familia de componentes:

ISDB-T: estándar de televisión digital terrestre implantado actualmente en Japón.

ISDB-Tb: estándar de televisión digital terrestre internacional con modificaciones Brasileñas.

ISDB-S: estándar de televisión satelital.

ISDB-C: estándar de televisión por cable.

ISDB-Tmm: empleado para servicios multimedia.

ISDB-Tsb: estándar de radio digital

Además de transmisión de audio y video, ISDB también define conexiones de datos (transmisión de datos) con Internet como un canal de retorno sobre varios medios y con diferentes protocolos. Esto se usa, por ejemplo, para interfaces interactivas como la transmisión de datos y guías electrónicas de programas. Tanto ISDB-T como su variante Brasileña ISDB-Tb habilita recepción de señales de televisión digital con teléfonos móviles, este tipo de servicio de recepción móvil se denomina One-Seg.

Intervalo de guarda

La interferencia de símbolos con ISDB-T se evita gracias a la utilización de un intervalo de guarda. Los receptores no solo reciben la señal directa, sino que también llegan a la antena, con un cierto tiempo de retardo debido al efecto de la multiplicidad de caminos son réplicas de la señal original o “ecos”, que a su vez llegan con diferentes atenuaciones con respecto a la señal original, por tanto, la parte inicial de cada nuevo símbolo OFDM puede ser afectado por el final del símbolo anterior. Para evitar este efecto, se inserta el intervalo de guarda como se muestra en la figura B.3.

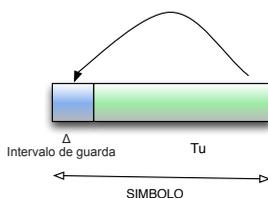


Figura B.3: Inserción del intervalo de guarda.

Señalización, Sincronización y estimación de canal

ISDB-T emplea una señalización, sincronización y estimación de canal muy similares a las que emplea DVB-T, por el simple hecho de utilizar la misma modulación OFDM:

- Señalización: Los parámetros de señalización, se sitúan de dos formas : dispersa en tiempo y dispersa en frecuencia, y también sobre determinadas portadoras (portadoras piloto).
- Sincronización: Ignora el periodo de señal correspondiente al intervalo de guarda. DVB-T/T2 utiliza el mismo método.
- Estimación de canal: Estima el comportamiento del canal comparando los pilotos recibidos con los que teóricamente se han transmitido, eliminando así dentro de lo posible cualquier comportamiento de ruido o interferencia. Se hace de manera similar en DVB-T/T2

Tasa de codificación, mapeo y entrelazado

Se codifican los datos en la etapa de codificación interna con posibles tasas de $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$ y $7/8$, es decir, las mismas que se emplean en DVB-T, pero

ligeramente diferentes a las empleadas en DVB-T2. Estas tasas de codificación permitirán evaluar diferentes comportamientos del estándar para una misma CNR, observando así cómo aumentando la tasa de codificación se consigue transmitir con un nivel de CNR menor.

Respecto al esquema de modulación que se puede utilizar en la etapa de *Mapping*, ISDB-T incorpora, además de las que ya implementaba DVB-T (QPSK, 16-QAM y 64-QAM), una nueva modulación: DQPSK.

En cuanto al entrelazado, ISDB-T incorpora, para mejorar la robustez de la modulación OFDM y atenuar algunos efectos como el desvanecimiento dentro de un canal en un grupo de frecuencias determinado, entrelazado en frecuencia. En la recepción móvil, este desvanecimiento puede presentarse durante periodos de tiempo más prolongados, afectando a varios símbolos OFDM consecutivos. Además de ello, los receptores sufrirán el efecto Doppler, que se traduce como ruido sobre las portadoras. Para compensar estos efectos indeseados, también se incorpora la función de entrelazado temporal, que se aplica sobre símbolos OFDM consecutivos. Este proceso, sumado al entrelazado en frecuencia, permite distribuir sucesiones contiguas de bits entre distintos símbolos OFDM separados en el tiempo, distribuyendo de igual manera los bits erróneos.

Transmisión jerárquica y recepción parcial

La principal novedad, y la parte más importante de éste estándar de televisión digital terrestre es, sin duda, la transmisión jerárquica en capas o Layers. El sistema ISDB-T permite organizar la información a transmitir en tres capas jerárquicas diferentes, denominadas A, B y C. Motivo por el cual el canal se divide en 13 segmentos, convirtiéndose así en un sistema de banda segmentada.

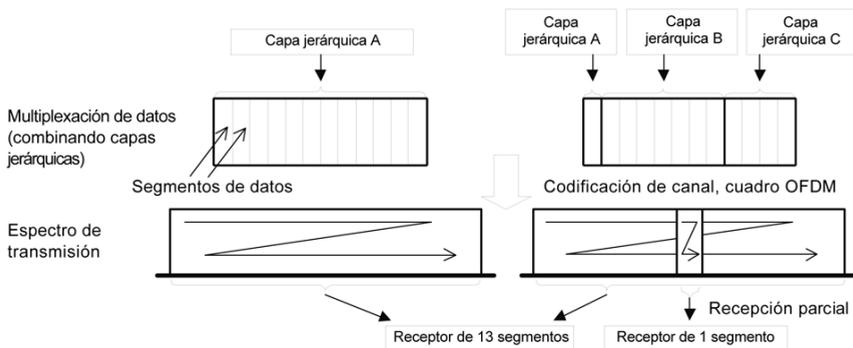


Figura B.4: Ejemplo de una transmisión jerárquica con recepción parcial [10].

APÉNDICE B. TECNOLOGÍAS

Además diferentes servicios pueden ser asignados a los distintos segmentos como se muestra en la figura B.4, se presenta también la reordenación de segmentos (entrelazado entre segmentos) que utiliza ISDB-T para enviar la señal a través del canal.

Cada capa jerárquica se conforma con uno o más segmentos OFDM, tantos como requiera la anchura de banda del servicio. El conjunto de parámetros de codificación de cada capa son independientes, y pueden ser configurados por el radiodifusor, siendo posible especificar parámetros como esquema de modulación de portadoras, codificación interna y entrelazado temporal.

El segmento central puede ser utilizado para recepción parcial One-Seg y en ese caso, se le considera como una capa jerárquica. El servicio apunta principalmente a ofrecer servicios de Televisión de baja definición (LDTV) a teléfonos móviles y dispositivos de tamaño reducido.

Offset de frecuencia

Es importante destacar que la señal ISDB-T en el espectro añade un *offset* en frecuencia. La frecuencia de la señal de transmisión terrestre debe ser obligatoriamente desplazada positivamente en $1/7$ MHz (142,857 kHz) con relación a la frecuencia central del canal utilizada (figura B.5).

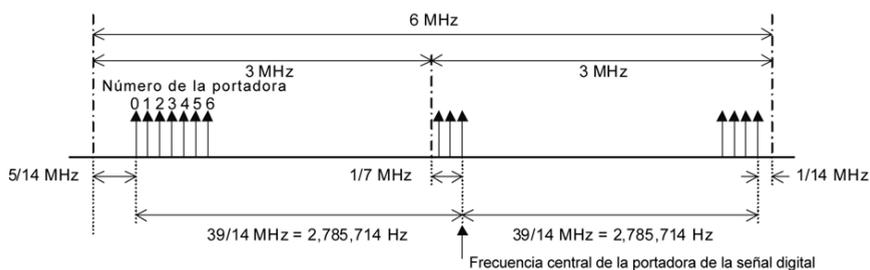


Figura B.5: Offset en frecuencia utilizado con ISDB-T [10].

Espectro de la señal ISDB-T

Los parámetros principales del espectro de la señal presentados en [10] se muestran en la tabla B.1.

B.1 Tecnologías de Televisión Terrestre

Parámetros	Modo 1 (2K)	Modo 2(4K)	Modo 3(8K)
Nº de segmentos	13	13	13
Ancho de banda del segmento	428,57 kHz	428,57 kHz	428,57 kHz
Banda UHF	5,575 MHz	5,573 MHz	5,572 MHz
Nº de portadoras	1405	2809	5617
Duración de los símbolos activos	252 μ s	504 μ s	1008 μ s
Separación de portadoras	Bws/108 = 3,968 kHz	Bws/216 = 1,984 kHz	Bws/432 = 0,992 kHz
Duración del intervalo de guarda (1/4, 1/8, 1/16, 1/32)	63; 31,5; 15,75; 7,875 μ s	126; 63; 31,5; 15,75 μ s	252; 126; 63; 31,5 μ s
Duración total de los símbolos	315; 283,5; 267,75; 259,875 μ s	628; 565; 533,5; 517,75 μ s	1260; 1134; 1071; 1039,5 μ s
Nº de símbolos OFDM	204	204	204
Entrelazado interno	0; 380; 760; 1520 símbolos	0; 190; 380; 760 símbolos	0; 95; 190; 380 símbolos

Tabla B.1: Parámetros OFDM para un sistema ISDB-T a 6MHz.

Los segmentos se deben someter obligatoriamente a la codificación de canal requerida. Posteriormente, se deben agregar obligatoriamente las señales piloto al segmento en la sección de cuadro OFDM para formar un segmento OFDM (con ancho de 6/14 MHz). Todos los segmentos deben obligatoriamente ser convertidos colectivamente en señales de transmisión OFDM mediante una Transformada Inversa Rápida de Fourier (IFFT). En cuanto al segmento OFDM, sus características se presentan en la tabla B.2.

Como se especifica en [10], se debe usar obligatoriamente un ancho de banda de frecuencia de 5,7 MHz. La frecuencia nominal de la portadora central debe ser obligatoriamente la frecuencia central de todo el ancho de banda. Concretamente, el ancho de banda debe ser obligatoriamente de 5,7 MHz cuando el ancho de banda de la portadora OFDM es de 5,572 MHz. Ese ancho de banda se debe aplicar obligatoriamente, independientemente del modo elegido, y se adopta para asegurar que el ancho de banda de 5,610 MHz tenga algún margen para determinar que cada portadora del límite inferior y límite superior de la banda de 5,572 MHz incluya el 99% de su energía.

APÉNDICE B. TECNOLOGÍAS

Parámetros		Modo 1 (2K)	Modo 2(4K)	Modo 3(8K)
Separación entre frecuencias portadoras		250/63 kHz	125/63 kHz	125/126 kHz
Nº de portadoras	Total	108	216	432
	Datos	96	192	384
	SP	9	18	36
	CP	0	0	0
	TMCC	1	2	4
	AC1	2	4	8
	AC2	0	0	0
Símbolos por cuadro		204	204	204
Ts efectivo		252 μ s	504 μ s	1008 μ s
Longitud del cuadro	1/4	64,26 ms	128,52 ms	257,04 ms
	1/8	57,834 ms	115,668 ms	231,336 ms
	1/16	54,621 ms	109,242 ms	218,484 ms
Frecuencia de muestreo IFFT		512/63 MHz	512/63 MHz	512/63 MHz
Entrelazado interno		1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8		

Tabla B.2: Parámetros para un segmento OFDM en ISDB-T a 6 MHz.

B.1.3. DVB-T2

El estándar DVB-T2 surgió gracias a la gran aceptación internacional de DVB-T y a la necesidad de ofrecer servicios de televisión de alta definición HDTV, por el que el principal objetivo de diseño fue ofrecer una alta capacidad de transmisión. DVB-T2 tiene una capacidad de transmisión de hasta 37,9 Mbps en canales de 6 MHz, que representa un incremento aproximado del 50% comparado con DVB-T y una mejora aproximadamente el 16% en la robustez de la señal gracias al uso del último estado del arte Low Density Parity Check (LDPC) [6], [18]. Técnicas tales como el uso de constelaciones rotadas incrementan aún más la robustez de la señal. Por otra parte el uso de elevados tamaños de FFT (ej: 16K y 32K) reducen las interferencias en canal adyacente, gracias a que ofrecen una caída más abrupta al borde del espectro, además de permitir mayor distancia entre transmisores lo que permite tener redes SFN de gran tamaño (hasta aproximadamente 179 km de separación entre transmisores para canales de 6 MHz).

El estándar también contempla el uso de técnicas de reducción de PAPR, ACE [118] y TR [119], permiten trabajar a los amplificadores de transmisión en el punto de saturación, con lo que se reducen las emisiones fuera de banda, ya

B.1 Tecnologías de Televisión Terrestre

que un pico de potencia en el amplificador representa un pico de interferencia fuera de banda.

Espectro de la señal DVB-T2

DVB-T2 utiliza modulación OFDM por lo que el espectro de la señal cumple con las características mencionadas en el sección B.1.2 del presente documento. Las configuraciones de las portadoras en DVB-T2 son presentadas en la tabla B.3 y tabla B.4, así como el tiempo útil de símbolo en función del periodo elemental, que viene definido por el ancho de banda utilizado [6].

Ancho de Banda	1,7 MHz	5 MHz	6 MHz	7 MHz	8 MHz	10 MHz ¹
Periodo Elemental T	$\frac{71}{131} \mu s$	$\frac{7}{40} \mu s$	$\frac{7}{48} \mu s$	$\frac{1}{8} \mu s$	$\frac{7}{64} \mu s$	$\frac{7}{80} \mu s$
1 Anchos de banda de 10 MHz es solo para aplicaciones profesionales y no se espera que sea soportado por receptores domésticos						

Tabla B.3: Periodo elemental para señales DVB-T2 en función del ancho de banda.

Parámetro\modo		1K	2K	4K	8K	16K	32K
Ktotal	N	853	1 705	3 409	6 817	13 633	27 265
	E	NA	NA	NA	6 913	13 921	27 841
Kmin	N	0	0	0	0	0	0
	E	NA	NA	NA	0	0	0
Kmax	N	852	1 704	3 408	6 816	13 632	27 264
	E	NA	NA	NA	6 912	13 920	27 840
Portadoras aum. en modo E		0	0	0	48	144	288
Tu ¹		1 024T	2 048T	4 096T	8 192T	16 384T	32 768T
Tu ms		112	224	448	896	1 792	3 584
Espacio entre portadoras 1/Tu (Hz)		8 929	4 464	2 232	1 116	558	279
Espacio entre portadoras ^{1 2}	N	7,61	7,61	7,61	7,61	7,61	7,61
	E	NA	NA	NA	7,71	7,77	7,77
1 Valores para canalización 8 MHz							
2 (Ktotal-1)/Tu							
N= Normal, E= Extendido, aum.= aumentadas							

Tabla B.4: Parámetros OFDM de DVB-T2 en función del tamaño de la FFT y el modo ancho de banda extendido.

Los símbolos OFDM constiuyen una yuxtaposición de portadoras ortogonales equi-espaciadas, donde las portadoras de datos van variando símbolo a símbolo de acuerdo con el proceso de mapeo.

La densidad espectral de potencia total de las portadoras de datos moduladas es la suma de la densidad espectral de cada una de ellas. Debido a que la duración de símbolo OFDM es mayor que el inverso del espaciado entre portadoras el lóbulo principal de la densidad espectral de potencia de cada una de las portadoras es más estrecho que dos veces la separación de portadoras, por tanto la densidad espectral no es constante dentro del ancho de banda nominal.

B.1.4. Características técnicas de DVB-T2 frente a interferencias

DVB-T2 al ser un estándar de segunda generación de televisión digital, ha incluido varias funcionalidades avanzadas, que mejoran su desempeño y permiten mejorar tanto su capacidad como su cobertura. A continuación se presentan las funcionalidades avanzadas de DVB-T2, prestando especial cuidado en aquellas funcionalidades que representan una mejora frente a interferencias, tanto co-canal como canal adyacente.

Codificación FEC

En DVB-T2 la codificación FEC es configurable de acuerdo con dos parámetros, el tamaño de LDPC y la tasa de codificación. La configuración LDPC puede ser de 16200 o 64800 bits. Influye en la capacidad y Robustez del sistema.

A mayor tamaño de LDPC los posibles errores introducidos por el canal, se encontraran más dispersos. Por lo que, la ganancia introducida en términos de protección de datos será mayor. Para un canal AWGN la diferencia de rendimiento entre un tamaño de LDPC de 16200 (16K) y 64 800 (64K) es menos de un dB y la latencia introducida por un LDPC de 64 800 es 4 veces mayor. Cabe destacar que la latencia introducida en una red TDT es despreciable por lo que se usa normalmente un tamaño de LDPC de 64800. Los valores de codificación que pueden ser utilizados son: Codificaciones: $1/2$, $3/5$, $2/3$, $3/4$, $4/5$, $5/6$. Existe un compromiso entre robustez (tasas de codificación bajas e.g. $1/2$) y capacidad (tasas de codificación altas e.g. $5/6$) que debe ser tomado en cuenta para la elección de este parámetro. A mayor robustez menor capacidad y viceversa.

Esquema de modulación

Los esquemas de modulación utilizados en DVB-T2 se presentan en la figura B.6 y Figura B.7. Donde, QPSK, 16-QAM, 64-QAM y 256-QAM corresponden a utilizar 2, 4, 6 y 8 bits por símbolo, respectivamente.

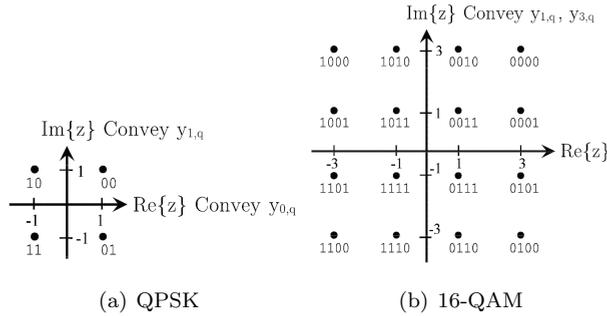


Figura B.6: Esquemas de modulación en DVB-T2 [6]

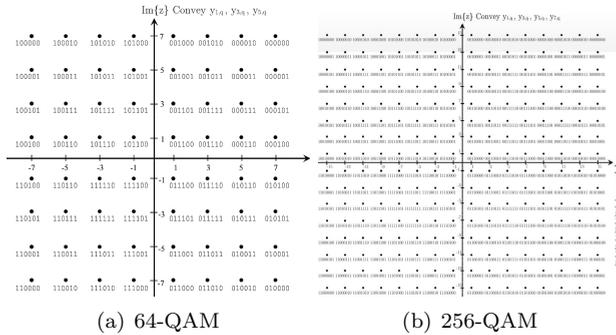


Figura B.7: Esquemas de modulación en DVB-T2 [6]

La elección del esquema de modulación implica un compromiso entre la capacidad del sistema y la robustez de la transmisión como se ve en la tabla B.5.

APÉNDICE B. TECNOLOGÍAS

Modulación	Ganancia en capacidad	Ganancia en CNR (dB)
QPSK	0 %	16.8
16-QAM	100 %	10.7
64-QAM	200 %	5.3
256-QAM	300 %	0

Tabla B.5: Ganancia relativa de los diferentes esquemas de modulación con respecto a QPSK, canal AWGN.

Constelaciones rotadas

Consiste en rotar todos los puntos de la constelación en un ángulo determinado, como se muestra en la figura B.8 de acuerdo a los valores presentados en la tabla B.6. La idea principal es que los símbolos puedan reconstruirse a partir de un único eje de la constelación, de manera que si se pierde el valor del otro eje en la transmisión todavía es posible reconstruir el símbolo enviado gracias a que cada componente I y Q contiene información suficiente del símbolo transmitido.

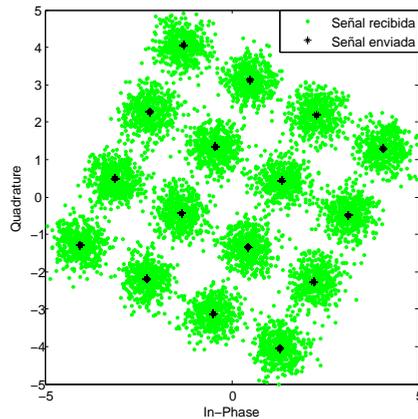


Figura B.8: Diagrama constelación 16-QAM rotada.

Modulación	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
ϕ (grados)	29.0	16.8	8.6	$\text{atan}(1/16)$

Tabla B.6: Ángulo de rotación para cada tipo de modulación [6].

B.1 Tecnologías de Televisión Terrestre

La componente I y Q son enviadas en diferentes celdas. Lo que en caso de desvanecimientos aumenta la probabilidad de que solo una componente I o Q de un símbolo sea afectada, permitiendo recuperar el símbolo a partir de la otra componente.

El uso de constelaciones rotadas es opcional y mejora la robustez de la señal en canales con desvanecimientos selectivos en tiempo y frecuencia. Se experimenta una mayor ganancia para constelaciones de orden bajo (QPSK, 16QAM) y tasas de codificación altas (3/4, 5/6, 7/8). Por otro lado su principal desventaja es que es incompatible con el uso la técnica ACE de PAPR.

Patrón de portadoras piloto (PP)

Las portadoras piloto son símbolos con amplitud y fase conocida por los receptores que son usadas para estimar/ecualizar las características del canal en tiempo y frecuencia. Existen portadoras que son utilizadas continuamente como pilotos y otras que son asignadas dinámicamente. En DVB-T, una de cada 12 celdas OFDM es una portadora piloto, lo cual representa un 8% de *overhead*. La densidad de portadoras piloto óptima depende de la variabilidad del canal, siendo necesarias un mayor número de ellas en recepción móvil que en recepción fija. DVB-T2 define 8 patrones de portadoras piloto con el fin de minimizar el *overhead* en función del tipo de recepción a la que está orientado el servicio. Las portadoras piloto son moduladas con una secuencia pseudo-aleatoria que puede ser utilizada para mejorar la sincronización en el tiempo y con un mayor nivel de potencia comparado con DVB-T, lo cual mejora la estimación de canal. En DVB-T2 existen 8 patrones de portadoras pilotos adaptados a distintos escenarios (espaciados en tiempo Dy y frecuencia Dx), en la figura B.9 se muestra el patrón de portadoras PP1.

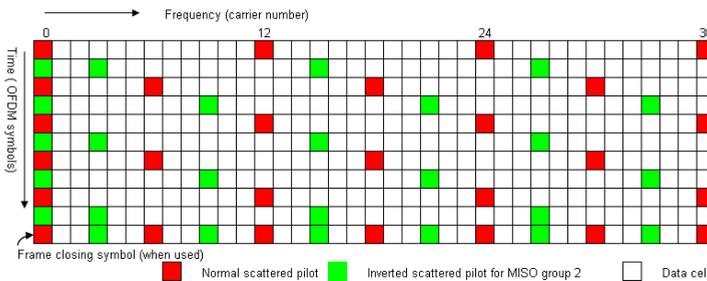


Figura B.9: Patrón de portadoras PP1, $Dx=3$ y $Dy=4$ [6].

La acertada elección del patrón de portadoras implica un compromiso entre capacidad y rendimiento:

APÉNDICE B. TECNOLOGÍAS

- Rendimiento Doppler: Mejor con patrones con tiempo de repetición alto ($D_f=2$). Para entorno móvil/portátil se recomiendan patrones más densos $D_f=2,4,6$. Por otro lado patrones más densos requieren mayor C/N debido ya que los pilotos se transmiten con mayor potencia con respecto a los datos. Lo que implica reducir la C/N para los datos.
- Capacidad: Máxima capacidad con patrones poco densos (disminución de *overhead*).

Los patrones disponibles están acordes con el tamaño FFT, el intervalo de guarda y la transmisión Single-Input Single-Output (SISO) o Multiple-Input Single-Output (MISO). El patrón 8 es incompatible entre otras funcionalidades con el uso de entrelazado temporal y multiple PLPs (Physical Layer Pipes). En [6] se presentan las combinaciones permitidas de tamaño de la FFT e intervalo de guarda, aquellas permitidas para transmisiones SISO se muestran en la tabla B.7. Además, los parámetros que definen la distribución de los pilotos se muestran en la tabla B.8.

Tamaño FFT	Intervalo de guarda						
	1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	
32K	PP7	PP4 PP6	PP2 PP8 PP4	PP2 PP8 PP4	PP2 PP8	PP2 PP8	NA
16K	PP7	PP7 PP4 PP6	PP2 PP8 PP4 PP5	PP2 PP8 PP4 PP5	PP2 PP3 PP8	PP2 PP3 PP8	PP1 PP8
8K	PP7	PP7 PP4	PP8 PP4 PP5	PP8 PP4 PP5	PP2 PP3 PP8	PP2 PP3 PP8	PP1 PP8
4K,2K	NA	PP7 PP4	PP4 PP5	NA	PP2 PP3	NA	PP1
1K	NA	NA	PP4 PP5	NA	PP2 PP3	NA	PP1

Tabla B.7: Patrón de pilotos permitidos para cada combinación del tamaño de FFT e intervalo de guarda en modo SISO [6].

B.1 Tecnologías de Televisión Terrestre

	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	PP7	PP8
D_x	3	6	6	12	12	24	24	6
D_y	4	2	4	2	4	2	4	16
$\frac{1}{D_x D_y}$ (%)	8.33	8.33	4.17	4.17	2.08	2.08	1.04	1.04

Tabla B.8: Parámetros que definen el patrón de portadoras piloto [6].

Tamaño de la FFT

DVB-T2 incluye nuevos tamaños de FFT que permiten por un lado mejorar el rendimiento de las redes SFN (tamaños más grandes, 16K o 32K) y por otro mejorar el rendimiento en movilidad (1K o 4K).

Existen 6 valores distintos de tamaño de FFT:

- **1K**. Uso en banda III y banda L con anchos de banda de 1.7 MHz.
- **2K, 4K, 8K, 16K, 32K**. Usados en el resto de bandas.

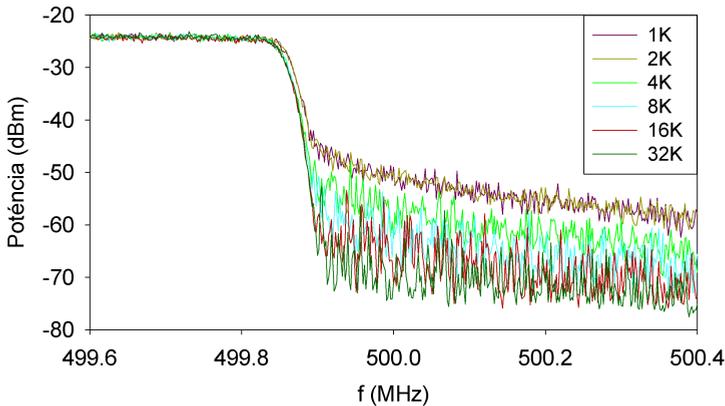


Figura B.10: Espectro de la señal OFDM para distintos tamaños de FFT, DVB-T2 a 6 MHz centrada en 497 MHz.

El incluir tamaños grandes de FFT de 16Ky 32K, permite reducir las interferencias de canal adyacente gracias a su rápida caída del espectro fuera de banda. En la figura B.10, se puede notar claramente la rápida caída en el espectro fuera de banda que produce la utilización de tamaños de FFT de 16K y 32K con la correspondiente reducción de interferencias en canal adyacente.

APÉNDICE B. TECNOLOGÍAS

Por otro lado los tamaños inferiores de FFT (1k - 4k) tienen menor número de portadoras lo que implica una mayor separación en frecuencia disminuyendo la probabilidad de ICI provocada por el efecto Doppler, lo que significa un mayor rendimiento en los casos de recepción móvil.

Además el incremento en tamaño de la FFT se traduce en periodos de símbolo OFDM más largos, lo que permite a su vez aumentar el tamaño del intervalo de guarda hasta en 4 veces comparado con DVB-T (máximo tamaño FFT 8k) lo cual se traduce en mayor distancia entre los transmisores. Por otro lado, la utilización de modos más altos de FFT permite la utilización de un modo extendido permitiendo aumentar el número de portadoras proporcionando una ganancia de aproximadamente el 2% de la capacidad de transmisión (tabla B.4) y manteniendo la respuesta espectral muy cercana a los modos convencionales DVB-T.

Por otra parte, las largas duraciones de símbolo OFDM de los modos 16K y 32K significan menor porcentaje de la capacidad de transmisión dedicada a protección (*overhead*). Este efecto puede verse en la figura B.11, para un mismo intervalo de guarda en el modo más amplio de DVB-T (8K), podemos observar que la longitud del símbolo OFDM en el modo 32K es 4 veces más grande que la longitud en 8K y por tanto, para un modo DVB-T con FFT 8K, un GI de 1/4 significa una penalización en capacidad del 25 %, mientras que para el mismo tiempo de Intervalo de Guarda (GI) en un modo DVB-T2 con FFT 32K, este significa tan solo el 6 %.



Figura B.11: Reducción del overhead al aumentar el tamaño de FFT en DVB-T2.

Modo extendido FFT

Define el número de portadoras activas en un símbolo OFDM (influye en la máxima capacidad de transmisión como se muestra en la tabla B.9, al incrementar el número de portadoras OFDM se influye en el rendimiento frente a interferencias co-canal y canal adyacente. Este aumento se realiza aprovechando los tamaños elevados de FFT.

La señal OFDM presenta un espectro aproximadamente rectangular con un factor de roll-off en los extremos que depende del espaciado entre portadoras

B.1 Tecnologías de Televisión Terrestre

Modo	Modo de portadoras		
	Normal	Extendido	
	Portadoras	Portadoras	Ganancia
1K	853	-	0.00 %
2K	1705	-	0.00 %
4K	3409	-	0.00 %
8K	6817	6913	1.41 %
16K	13633	13921	2.11 %
32K	27265	27841	2.11 %

Tabla B.9: Ganancia en la capacidad por el uso del modo de portadora extendido.

OFDM. Para un mismo ancho de banda, el uso de un mayor tamaño de FFT (y, por consiguiente, un menor espaciado entre portadoras) propicia una caída más abrupta del espectro fuera de la banda (ver figura B.10). Su utilización está recomendada para tamaños de FFT mayores de 8K con el fin de evitar interferencias de canal adyacente. En la tabla B.10 se muestra el número de portadoras en función del modo seleccionado.

Parámetro	1K	2K	4K	8K	16K	32K	
K_{total}	N	853	1 705	3 409	6 817	13 633	27 265
	E	NA	NA	NA	6 913	13 921	27 841
-Duración T_U	1	2	4	8	16	32	
	024T	048T	096T	192T	384T	768T	
N= Normal, E= Extendido							

Tabla B.10: Número de portadoras en función del modo seleccionado.

Mecanismos PAPR

OFDM es una modulación multiportadora que tiene una elevada relación pico a nivel medio de potencia PAPR, la cual impide que el amplificador de potencia RF trabaje al máximo nivel de salida permitido (punto de saturación). DVB-T2 utiliza dos técnicas para la reducción de PAPR que permiten una reducción de los picos de potencia del amplificador de hasta un 25 %, y al mismo tiempo reducir el nivel de emisiones fuera de banda, lo que ayudará a corregir las interferencias sobre otros canales; estas técnicas dan además la posibilidad de trabajar los amplificadores de potencia en su punto de saturación y por tanto aumentar el nivel de cobertura, o reducir los costos de operación

APÉNDICE B. TECNOLOGÍAS

de una red al utilizar menor energía. Las técnicas utilizadas son:

Reserva de tonos (TR) En esta técnica el 1% de las portadoras son reservadas para la inserción de valores pre calculados que contrarresten los picos de potencia de las otras portadoras, dichas portadoras son llamadas Peak Reduction Tones (PRT), esta técnica proporciona mayores ganancias para modos de transmisión con constelaciones altas, la transmisión se señala de modo tal que estas portadoras con valores insertados para PAPR sean descartadas por el receptor. En una red SFN, cada modulador puede calcular sus propios tonos de corrección y pueden ser diferentes entre transmisores

Extensión activa de la constelación (ACE) Consiste en separar del centro de la constelación los símbolos que están en los bordes de la misma como se muestra en la figura B.12, causando una reducción en los picos de la señal, esto implica un leve aumento en la CNR requerida en el receptor para una correcta decodificación. Esta técnica proporciona ganancias mayores para constelación de orden bajo y resulta no compatible con la técnica de constelaciones rotadas. En una red SFN, todos los transmisores deberían aplicar la misma modificación de la constelación para conservar las ventajas de esta topología.

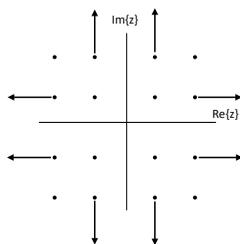


Figura B.12: Mecanismo ACE.

Ancho de Banda

El ancho de banda en DVB-T2 influye en la protección sobre el problema de ICI, se entiende que al ser el número de portadoras fijo para cada tamaño de FFT y los diferentes anchos de banda, la utilización de un ancho de banda mayor o menor influye directamente sobre el espaciado entre las portadoras OFDM, a mayor espaciado entre portadoras menor será el problema de ICI en el mismo escenario de propagación, por lo que la utilización de mayores anchos de banda nos proporcionan mayor robustez en términos de ICI para un mismo tamaño de FFT. Además, al utilizar anchos de banda mayores (i.e 8 MHz), la

capacidad aumenta de manera directamente proporcional al aumento del ancho de banda.

B.2. Redes Celulares LTE

B.2.1. Descripción General de la Tecnología

Es un estándar de comunicaciones inalámbrico de cuarta generación para telefonía móvil y terminales de datos. Este estándar mejora la velocidad de transmisión de datos con respecto a las tecnologías celulares precedentes de segunda generación 2G GSM/EDGE (Global System for Mobile communications/Enhanced Data Rates for GSM Evolution) y de tercera generación 3G UMTS/HSPA (Universal Mobile Telecommunications System/High-Speed Packet Access). Hasta 326.5 Mbps y 86.5 Mbps para LTE-DL y LTE-UL, respectivamente (release 8, utilizando Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 4x4), las principales características del sistema LTE son:

- Multiplexación multiportadora OFDM.
- Alta eficiencia espectral con utilización de sistemas basados en múltiples antenas MIMO.
- Anchos de banda de operación: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.
- Modulaciones utilizadas en Uplink (UL)/Downlink (DL): QPSK, 16-QAM y 64-QAM.
- Permite trabajar en diferentes bandas de frecuencia.
- Posibilidad de formar redes de frecuencia única.
- Velocidades de pico:
 - Bajada: 326,5 Mbps para MIMO 4x4 y 172,8 Mbps para MIMO 2x2 (Release 8).
 - Subida: 86,5 Mbps (Release 8).
- Óptimo para desplazamientos Doppler de hasta 15 km/h. Permite hasta 500 km/h.
- Soporta más de 200 usuarios por celda para 5 MHz.

APÉNDICE B. TECNOLOGÍAS

- Traspasos entre tecnologías 2G, General Packet Radio Service (GPRS), Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE), Tercera Generación (3G) Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA), High-Speed Packet Access (HSPA) y LTE transparentes para los usuarios.
- Para el transporte de voz, Tanto 2G como 3G están basadas en técnicas de Conmutación de Circuitos (CS), mientras que LTE propone la técnica de Conmutación de Paquetes IP (PS).
- Mejora flexibilidad del uso del espectro radioeléctrico al usar Duplexación por División de Frecuencia (FDD) y Duplexación por División de Tiempo (TDD) haciendo una gestión más eficiente del mismo, lo que incluiría servicios unicast y broadcast.

Enlace Descendente LTE (Downlink)

El mecanismo de acceso al medio en el enlace DL es OFDM, debido a su gran eficiencia espectral y a la reducción del tiempo de latencia. En OFDM, los usuarios tienen asignados un número específico de subportadoras durante un periodo de tiempo predeterminado. Al número de subportadoras asignadas se conoce Resource Blocks (RB) [120].

Canales físicos Los canales físicos LTE transmiten la información de las capas superiores. Se pueden clasificar en:

Canales de transporte

- Physical Downlink Shared Channel (PDSCH): canal de datos, que se asignan a los usuarios de forma dinámica y oportunista.
- Physical Broadcast Channel (PBCH): transmite un número limitado de parámetros esenciales para el acceso inicial a la celda, como por ejemplo el ancho de banda.
- Physical Broadcast Channel (PMCH): define la estructura de la capa física para transmitir servicios y archivos Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS).

Canales de control

- Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH): transmite el Indicador de Formato de Control (CFI), que incluye el número de símbolos OFDM usados para el canal de control.

- Physical Downlink Control Channel (PDCCH): asignación de recursos entre usuarios.
- Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH): si el dato recibido contiene errores, el receptor almacena el dato en vez de desecharlo y solicita una retransmisión al transmisor. Cuando el receptor recibe el dato retransmitido, lo combina con el dato almacenado anteriormente. Es decir, dos o más paquetes recibidos, cada uno con un Relación Señal a Ruido (SNR) insuficiente para permitir la decodificación de manera individual pueden combinarse de tal manera que puede ser decodificada la señal total.

Diagrama de bloques del canal físico DL Con el fin de transmitir los canales físicos hacia el terminal de usuario, se sigue la secuencia presentada en la figura B.13.

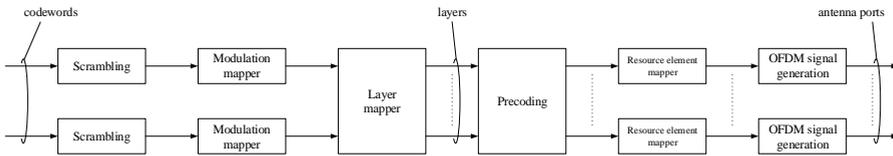


Figura B.13: Diagrama de bloques del proceso de generación del canal físico Downlink [120].

Se pueden distinguir los siguientes procesos:

- *Scrambling*: Aleatorización de los bits codificados.
- *Modulation Mapper*: Modulación de los bits aleatorizados para la generación de símbolos de valor complejo.
- *Layer Mapper*: Mapeo de los símbolos de valor complejo modulados en una o más capas de transmisión.
- *Precoding*: Precodificación de los símbolos de valor complejo modulados en cada capa de transmisión en los puertos de antena.
- *Resource Element Mapper*: Mapeo de los símbolos de valor complejo modulados de cada puerto de antena en los Resource Elements correspondientes.
- *OFDM Signal Generation*: Generación de la señal OFDM en el dominio del tiempo para cada puerto de antena. La salida de este bloque se transmite directamente hacia el terminal de usuario.

Enlace Ascendente LTE (Uplink)

Para el enlace ascendente LTE utiliza la técnica Single Carrier - Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA), que puede ser definida como una señal Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia (OFDMA) con una transformada de Fourier previa. SC-FDMA es un esquema de acceso múltiple que utiliza modulación de portadora única, multiplexación en frecuencia ortogonal y ecualización en el dominio de la frecuencia. Al igual que otros esquemas de acceso múltiple (Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA), Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA), Acceso Múltiple por División de Código (CDMA), OFDMA), se ocupa de la asignación de varios usuarios a un recurso de comunicación compartido.

EL utilizar SC-FDMA también implica una asignación de recursos distinta. Con OFDM, los *Resource Blocks* se asignan a los usuarios a lo largo de la frecuencia durante un *slot* completo en el tiempo (7 símbolos OFDM), mientras que con SC-FDMA sucede lo contrario, se asigna a un usuario todas las portadoras a lo largo de un símbolo completo OFDM.

SC-FDMA tiene una gran eficiencia espectral y un tiempo de latencia muy bajo igual que OFDM. Además, reduce la potencia de pico de la señal PAPR. Esto se traduce en que el terminal móvil necesite una menor potencia de transmisión para ofrecer la misma cobertura, al permitir trabajar al amplificador de los terminales más cerca del punto de saturación, haciendo un uso más eficiente del mismo.

Como en DL, la señal LTE-UL se divide en diferentes RB (en tiempo y frecuencia), de manera que cada usuario pueda utilizar un número determinado de ellos para enviar datos a la estación base.

Canales Físicos

- Physical Uplink Shared Channel (PUSCH): para envío de datos (con o sin *frequency hopping*).
- Physical Uplink Control Channel (PUCCH): se utiliza principalmente para:
 - Transmisión de Acknowledgement (ACK)/Negative Acknowledgement (NACK), Channel Quality Information (CQI)/Precoding Matrix Indicators (PMI), Scheduling Request (SR).
 - Transmisión de datos de control mediante los RB de ambos extremos en frecuencia, o mediante *frequency hopping* en el último slot.
- Uplink Control Information (UCI) con PUSCH.

- Physical Random Access Channel (PRACH): utilizado por el móvil para el acceso al medio.

Diagrama de bloques del canal físico UL El proceso de generación de la señal LTE-UL es muy similar al de la señal DL.

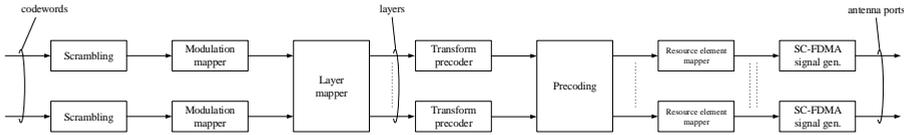


Figura B.14: Diagrama de bloques del proceso de generación del canal físico LTE-UL [120].

Como se puede observar en la figura B.14, se siguen los mismos pasos que en Downlink cambiando únicamente el último bloque SC-FDMA. El bloque SC-FDMA sitúa los símbolos correspondientes a cada LTE-UE en tiempo y frecuencia para transmitir directamente a la LTE-BS. Como se mencionó, la única diferencia entre este bloque y el bloque OFDM es una FFT previa adicional.

Apéndice C

Elección del Modelo de Propagación

C.1. Elección del Modelo de Propagación

A la hora de realizar estudios de redes de radiocomunicaciones, que implica el cálculo de simulaciones de cobertura se ha de seleccionar el modelo de propagación que más se ajuste al escenario evaluado. Los modelos de propagación más utilizados en TDT no toman en cuenta las condiciones presentes en Sudamérica, debido principalmente a que no existen medidas de campo disponibles. Por tanto, como primer paso se ha realizado una comparativa de resultados entre campañas de medidas, es decir, valores de señales reales y resultados teóricos obtenidos con diferentes modelos de propagación.

Se analiza y compara el rendimiento de varios modelos de propagación radio para redes de TDT con medidas de campo realizadas en dos ciudades principales de Colombia (Cartagena y Cucuta) por el Consorcio de Canales Nacionales Privados (CCNP).

El objetivo, como se ha dicho anteriormente, es seleccionar el modelo de propagación que mejor se adapte a las medidas realizadas, distinguiéndose por la presencia de entornos montañosos, valles y colinas en el caso de Cúcuta y zonas costeras en el caso de Cartagena. Los modelos de propagación estudiados son el modelo de propagación ITU-R 525, ITU-R 525/526, ITU-R 1546 e ITU-R 1812. Una descripción más detallada de las características de dichos modelos podrá encontrarse en la Sección 2.2.4. Estos modelos de propagación han sido seleccionados debido a que son utilizados dentro de la banda de UHF, tienen en cuenta la información sobre el terreno y el tipo de entorno que puede ser

APÉNDICE C. ELECCIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN

modelado por una capa de clutter.

La calibración de los modelos de propagación consiste en variar sus parámetros característicos (atenuación, difracción) a fin de minimizar la diferencia entre predicciones y medidas. Cuando se realizan campañas de medidas para calibrar modelos de propagación es importante obtener un conjunto significativo de muestras para cada entorno (urbano denso, urbano, suburbano, rural, etc.), ya que las condiciones de propagación son distintas en cada uno de ellos. Otro aspecto importante es la distribución de las medidas. Las rutas de medidas deben ser más densas cuanto más próximo se esté al transmisor y menos densas al alejarse de éste. Antes de la calibración, las medidas han de ser filtradas a fin de eliminar los efectos de desvanecimiento rápido (*fast fading*) producidos por la propagación multicamino.

C.1.1. Medidas de Campo

Las medidas de campo utilizadas para la calibración del modelo de propagación en el entorno Colombiano, han sido llevadas a cabo por el CCNP. Estas medidas se realizaron en dos ciudades principales de Colombia, una de ellas, fue realizada en la ciudad de Cartagena con municipios aledaños Turbaco y Arjona, y la otra, ha sido realizada en la ciudad de Cúcuta y zonas aledañas. Como se detalla a continuación. Para los dos casos las medidas fueron realizadas para un entorno suburbano y urbano denso.

Medidas en la Ciudad de Cartagena y Municipios Aledaños

La campaña de medida realizada en la ciudad de Cartagena y municipios aledaños Turbaco y Arjona han sido realizadas para el estándar DVB-T2 emitiendo en el canal 14 (Caracol TV, centrado a 473 MHz). Estas medidas han sido tomadas para las huellas de cobertura de los transmisores La Popa y Turbaco, emitiendo con una emitiendo con un PIRE de 41 y 147 kW, respectivamente. Para el sistema de medida se utilizó una antena con 2 dBi de ganancia ubicada a una altura de 2 metros. En total se han tomado 5872 medidas, en una ruta de longitud de 45 km, y con separación entre muestras de aproximadamente 8 m. Los valores intensidad de campo obtenidos oscilan entre 42 y 107 dB μ V/m. En la Figura C.1 se aprecia la ruta llevada a cabo en la campaña de medidas.

Se debe notar que las muestras con mayor intensidad de campo recibida son aquéllas que se encuentran cercanas al transmisor de Turbaco, debido a que es el que mayor PIRE transmite. Por otra parte, en todo el casco urbano de Cartagena la intensidad de campo recibida nunca supera los 81 dB μ V/m.

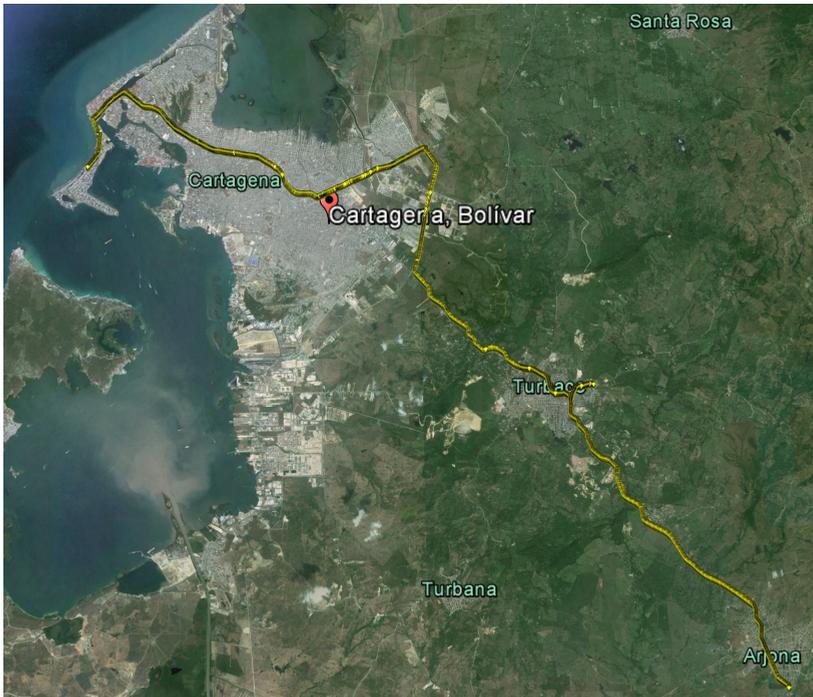


Figura C.1: Ruta de campaña de medidas en la ciudad de Cartagena y municipios aledaños.

Medidas en la Ciudad de Cúcuta y Zonas Aledañas

Esta campaña de medidas, también ha sido realizada para el estándar DVB-T2, aunque esta vez emitiendo en el canal 38 (Caracol TV, centrado a 617 MHz). El sistema radiante se ubicó en el cerro Tasajero, emitiendo con una potencia radiada aparente de 132 kW. Se usa el mismo sistema de recepción que en las medidas hechas en Cartagena. Se hicieron cuatro campañas de medida y en total se han tomado aproximadamente 16400 muestras, en rutas con 62 km de longitud total, y separación entre muestras de aproximadamente 3.7 m. Los valores de intensidad de campo obtenidos oscilan entre 42 y 107 dB μ V/m. En la Figura C.2 se puede observar las locaciones donde las muestras fueron tomadas.

De nuevo, las zonas con mayor intensidad de campo recibida son aquellas cercanas al transmisor. Sin embargo, en estas campañas se vio que en gran parte del casco urbano de Cúcuta (entorno urbano denso) se recibían intensidades de campo superiores a 81 dB μ V/m.



Figura C.2: Ruta de campaña de medidas en la ciudad de Cúcuta llevada a cabo por el operador privado CCNP.

C.1.2. Correlación de los métodos de predicción con medidas de campo

A partir de las medidas de campo realizadas, es posible determinar cual es el modelo de propagación que mejor se ajusta a las condiciones de propagación presentes en el escenario medido. El análisis se efectúa determinando la correlación entre las los valores de campo eléctrico en recepción obtenidos me-

C.1 Elección del Modelo de Propagación

diante los métodos de predicción, con los valores obtenidos mediante medidas de campo, siguiendo la metodología descrita en la Sección 2.1.3

ITU-R P.525 e ITU-R P.525/526

Se presentan los dos modelos en un mismo apartado debido a que los resultados son similares. Encontrándose diferencias en el Error Medio de alrededor $\pm 0,3dB$ entre ambos.

Se evaluaron tres tipos de difracción (D: Deygout 94, Forma Redondeada y Cilindros) y dentro de cada tipo se seleccionaron dos métodos de subruta (S: ITU-R 526 rápido e Integración Fina). En la Figura C.3, Figura C.4 y Figura C.5 y se muestran los resultados obtenidos para el modelo de propagación ITU-R 525. Para el caso del modelo ITU-R 525/526 los resultados son similares. En la Tabla C.1 se pueden observar los resultados numéricos para el modelo de propagación ITU-R P.525, con cada una de sus posibles combinaciones.

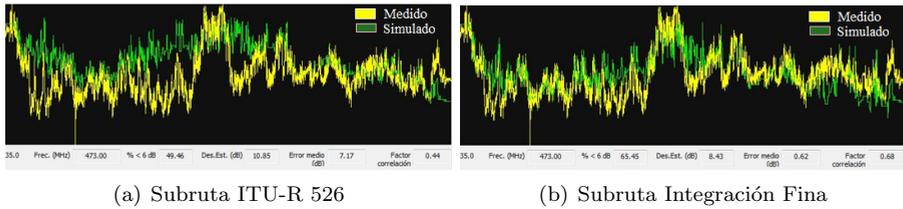


Figura C.3: Correlación entre modelo propagación ITU-R P.525 con difracción Deygout94 y medidas de campo

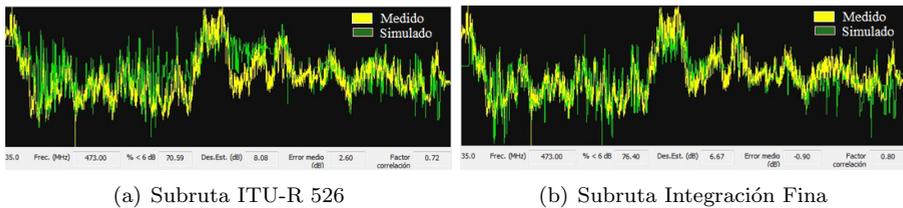


Figura C.4: Correlación entre modelo propagación ITU-R P.525 con difracción Forma Redondeada y medidas de campo

APÉNDICE C. ELECCIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN

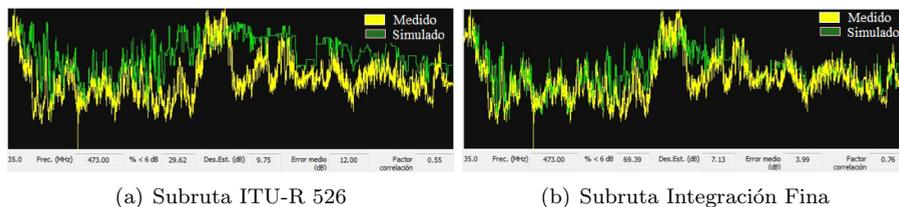


Figura C.5: Correlación entre modelo propagación ITU-R P.525 con difracción de Cilindros y medidas de campo

Modelo Propagación	Modelo Difracción	Modelo Subpath	Modelo Correlación	Desviación Estándar (dB)
ITU-R P.525	Deygout94	ITU-R 526	0,44	10,85
		Integración fina	0,68	8,43
	Forma Redondeada	ITU-R 526	0,72	8,08
		Integración fina	0,80	6,67
	Cilindros	ITU-R 526	0,55	9,75
		Integración fina	0,76	7,13

Tabla C.1: Factor de correlación y desviación estándar entre el modelo propagación ITU-R P.525 y medidas de campo.

El método de difracción que más se acerca a los resultados obtenidos mediante medidas por el CCNP, es aquél con un mayor factor de correlación. Para el modelo de propagación ITU-R P.525 e ITU-R P.525/526 el método de difracción más adecuado sería el de forma redondeada, aunque se observan mínimas diferencias con el método de los Cilindros. En cuanto a la atenuación por subruta, la Integración Fina permite un mejor ajuste frente a la opción ITU-R 526 Rápido.

ITU-R 1546

Este modelo de propagación es un modelo semi-determinista, basado principalmente en medidas de campo con factores de corrección en donde ya se tienen en cuenta atenuaciones por difracción y por subruta. En la tabla C.6 se

C.1 Elección del Modelo de Propagación

muestra la correlación para el 50 % de ubicaciones y para diferentes valores de intensidad de campo rebasados el 1 % o el 50 % del tiempo.

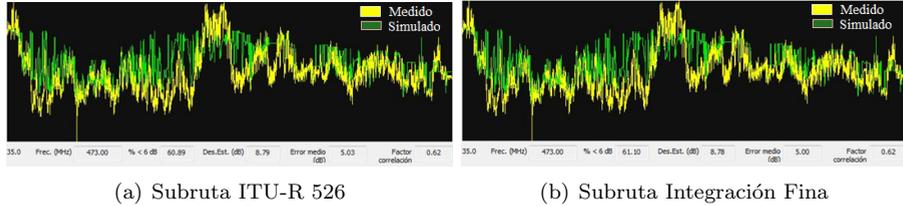


Figura C.6: Correlación entre modelo propagación ITU-R 1546 y medidas de campo

Modelo Propagación	Método Difracción	Método Subpath	Factor Correlación	Desviación Estándar (dB)
ITU-R 1546 Localización 50 % Tiempo 1 %	_____	_____	0,62	8,79
ITU-R 1546 Localización 50 % Tiempo 50 %	_____	_____	0,62	8,78

Tabla C.2: Factor Correlación y Desviación Estándar entre Modelo Propagación ITU-R 1546 y Medidas CCNP.

Como se puede observar tanto en la Figura C.6 como en la tabla C.2, la diferencia entre los factores de correlación para los diferentes porcentajes de tiempo es imperceptible. Al comparar el modelo ITU-R P.525 y el modelo ITU-R 1546, se puede observar que el primero tiene una mayor correlación con las medidas que este último.

ITU-R 1812

Debido a que este modelo de propagación proporciona un análisis detallado teniendo en cuenta el perfil del terreno, contrario a lo que sucedía con el modelo ITU-R 1546, se han evaluado las medidas para el 50 % del tiempo, y para un porcentaje de ubicaciones del 70 % y 95 %.

APÉNDICE C. ELECCIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN

Localización: 70 %, Tiempo: 50 %

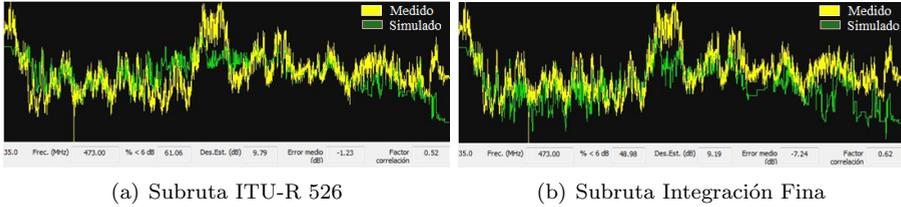


Figura C.7: Correlación entre modelo propagación ITU-R P.1812 con difracción Deygout94, para el 70 % de las localizaciones y el 50 % del tiempo y medidas de campo

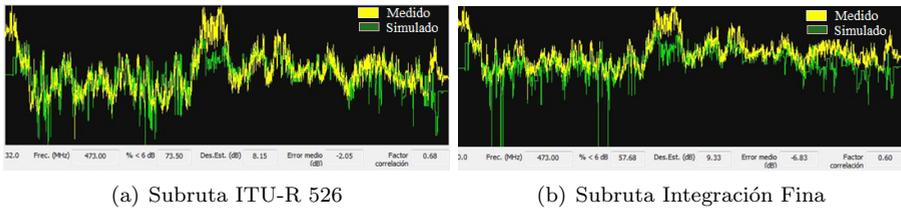


Figura C.8: Correlación entre modelo propagación ITU-R P.1812 con difracción de formas redondeadas, para el 70 % de las localizaciones y el 50 % del tiempo y medidas de campo

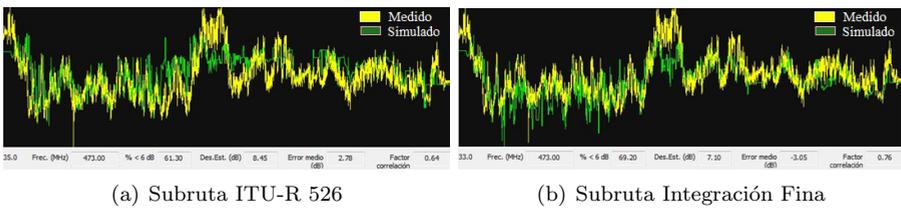


Figura C.9: Correlación entre modelo propagación ITU-R P.1812 con difracción de cilindros, para el 70 % de las localizaciones y el 50 % del tiempo y medidas de campo

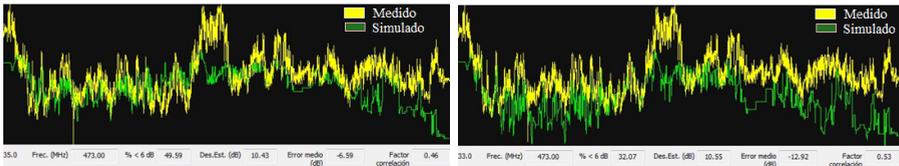
Como se observa en la tabla C.3 y en la tabla C.4 los factores de correlación oscilan entre 0.46 y 0.76, proporcionando mejores correlaciones que el modelo ITU-R 1546 para algunas configuraciones.

C.1 Elección del Modelo de Propagación

Modelo de Propagación	Modelo de Difracción	Modelo de Subpath	Modelo de Correlación	Desviación Estándar (dB)
ITU-R 1812 Localización 70 % Tiempo 50 %	Deygout94	ITU-R 526	0,52	9,79
		Integración fina	0,62	9,19
	Forma Redondeada	ITU-R 526	0,68	8,15
		Integración fina	0,60	9,33
	Cilindros	ITU-R 526	0,64	8,45
		Integración fina	0,76	7,10

Tabla C.3: Factor Correlación y Desviación Estándar entre Modelo Propagación ITU-R 1812 (L=70 %, T=50 %) y Medidas de campo.

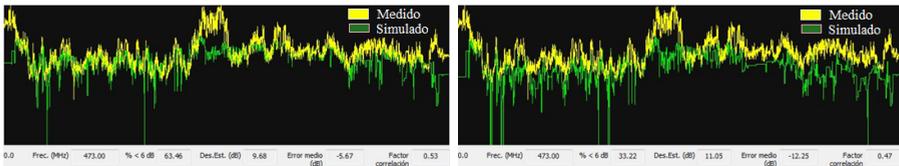
Localización: 95 %, Tiempo: 50 %



(a) Subruta ITU-R 526

(b) Subruta Integración Fina

Figura C.10: Correlación entre modelo propagación ITU-R P.1812 con difracción Deygout94, para el 95 % de las localizaciones y el 50 % del tiempo y medidas de campo



(a) Subruta ITU-R 526

(b) Subruta Integración Fina

Figura C.11: Correlación entre modelo propagación ITU-R P.1812 con difracción de formas redondeadas, para el 95 % de las localizaciones y el 50 % del tiempo y medidas de campo

APÉNDICE C. ELECCIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN

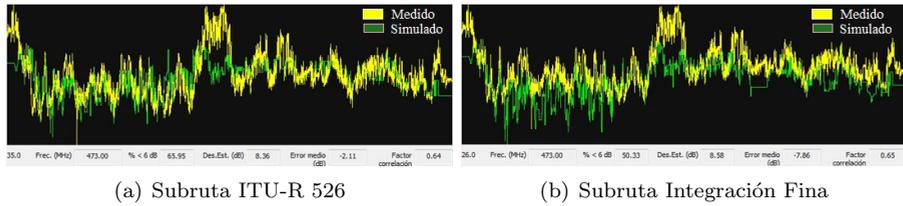


Figura C.12: Correlación entre modelo propagación ITU-R P.1812 con difracción de cilindros, para el 95 % de las localizaciones y el 50 % del tiempo y medidas de campo

Modelo de Propagación	Modelo de Difracción	Modelo de Subpath	Modelo de Correlación	Desviación Estándar (dB)
ITU-R 1812 Localización 95 % Tiempo 50 %	Deygout94	ITU-R 526	0,46	10,43
		Integración fina	0,53	10,55
	Forma Redondeada	ITU-R 526	0,53	9,68
		Integración fina	0,47	11,05
	Cilindros	ITU-R 526	0,64	8,36
		Integración fina	0,65	8,58

Tabla C.4: Factor Correlación y Desviación Estándar entre Modelo Propagación ITU-R 1812 (L=95 %, T=50 %) y Medidas de campo.

En la tabla C.5 se resumen los factores de correlación obtenidos para diferentes modelos de propagación. Se puede observar que el modelo de propagación que mejor se ajusta a las medidas es el ITU-R 525 e ITU-R 525/526. Referente al método de difracción utilizado, el que mejor resultados ofrece para el modelo ITU-R 525 fue modelado de obstáculos con forma redondeada. Si comparamos el método de atenuación Subpath la configuración integración fina es la que mejores resultados ofrece casi en la totalidad de configuraciones. Por tanto, la configuración del modelo de propagación que mejor se ajusta a las medidas es el ITU-R 525 e ITU-R 525/526 con configuraciones de atenuación por difracción forma redondeada y Subpath atenuación fina. Sin embargo, debe notarse que las medidas realizadas son insuficientes para ser representativas en toda Sudamérica. Por lo que con el fin de tener cierta homogeneidad a nivel internacional, en la elaboración del plan de frecuencias se utilizó el modelo ITU-R 1546 por ser el más usado para planificación de redes broadcast.

C.1 Elección del Modelo de Propagación

Modelo de Propagación	Modelo de Difracción	Modelo de Subpath	Modelo de Correlación	Desviación Estándar (dB)
ITU-R P.525	Deygout94	ITU-R 526	0,44	10,85
		Integración fina	0,68	8,43
	Forma Redondeada	ITU-R 526	0,72	8,08
		Integración fina	0,80	6,67
	Cilindros	ITU-R 526	0,55	9,75
		Integración fina	0,76	7,13
ITU-R 1546 Localización 50 % Tiempo 1 %	_____	_____	0,62	8,79
ITU-R 1546 Localización 50 % Tiempo 50 %	_____	_____	0,62	8,78
ITU-R 1812 Localización 70 % Tiempo 50 %	Deygout94	ITU-R 526	0,52	9,79
		Integración fina	0,62	9,19
	Forma Redondeada	ITU-R 526	0,68	8,15
		Integración fina	0,60	9,33
	Cilindros	ITU-R 526	0,64	8,45
		Integración fina	0,76	7,10
ITU-R 1812 Localización 95 % Tiempo 50 %	Deygout94	ITU-R 526	0,46	10,43
		Integración fina	0,53	10,55
	Forma Redondeada	ITU-R 526	0,53	9,68
		Integración fina	0,47	11,05
	Cilindros	ITU-R 526	0,64	8,36
		Integración fina	0,65	8,58

Tabla C.5: Comparativa medidas y predicción para diferentes modelos de propagación.

APÉNDICE C. ELECCIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN

Referencias

- [1] A. Ligeti, “Single Frequency Network Planning,” Ph.D. dissertation, KTH, Superseded Departments, Signals, Sensors and Systems, Stockholm, Sweden, 1999.
- [2] T. Kratochvil and V. Ricny, “Simulation and experimental testing of the DVB-T broadcasting in the SFN networks,” in *Radioelektronika, 2008 18th International Conference*, April 2008, pp. 1–4.
- [3] M. Cave and K. Nakamura, *Digital Broadcasting: Policy and Practice in the Americas, Europe and Japan*. 136 West Street: Digital Broadcasting: Policy and Practice in the Americas, Europe and Japan, 2006.
- [4] “La UPV pone en marcha un sistema piloto para ver contenidos digitales 3D en vehículos,” Nota de prensa, europapress, 2012.
- [5] Y. Iano, D. Gara Caetano, R. Arthur, E. Carrara, and C. Akamine, “Performance comparison of convolutional and turbo convolutional codes for ISDB-T in AWGN and Brazilian channels,” in *Telecommunications Symposium, 2006 International*, Sept 2006, pp. 361–366.
- [6] *Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*, ETSI Std. EN 302 755, Rev. 1.3.1, 2012.
- [7] ITU, “Criterios para la planificación, incluidas las relaciones de protección, de los servicios de televisión digital terrenal en las bandas de ondas métricas/decimétricas,” ITU-R, Recommendation BT.1368, Dic. 2011.
- [8] ITU, “Características de los sistemas de televisión,” ITU-R, Recommendation BT.624, May. 1990.
- [9] G. Martinez, J. Sanchez, D. Barquero, and N. Cardona, “Optimization of the Digital Terrestrial Television Transmission Mode of DVB-T2 in

REFERENCIAS

- Colombia,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 7, pp. 2144–2151, July 2015.
- [10] *Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting*, ARIB Std. STD–B31, Rev. 1.6-E2, 2005.
- [11] *ATSC. Digital Television Standard*, ATSC Std. A/53, 2007.
- [12] C. yen Ong, “Latest Development of Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting DTMB Technologies,” White Paper, Hong Kong Applied Science and Technology Research Institute, 2009.
- [13] *ETSI EN 300 744. Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*, ETSI Std. EN 300 744, Rev. 1.6.1, 2009.
- [14] L. Fay, L. Michael, D. Gomez-Barquero, N. Ammar, and M. Caldwell, “An Overview of the ATSC 3.0 Physical Layer Specification,” *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 1, 2016.
- [15] D. Gomez-Barquero, *Next Generation Mobile Broadcasting*. 2015: CRC Press, 2008.
- [16] H. Mazar, “An Analysis of Regulatory Frameworks for Wireless Communications, Societal Concerns and Risk The Case of Radio Frequency (RF) Allocation and Licensing,” Ph.D. dissertation, Middlesex University, London, United Kingdom, 2008.
- [17] DTT adoption map. [Online]. Available: <https://www.dvb.org/news/worldwide>
- [18] *Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*, ETSI Std. TR 102 831, Rev. 0.10.4, 2010.
- [19] Status of the transition to Digital Terrestrial Television Broadcasting. [Online]. Available: <http://www.itu.int/en/ITU-D/Spectrum-Broadcasting/Pages/DSO/Default.aspx>
- [20] “ITU International Symposium on the Digital Switchover - Presentations,” ITU, 2015.
- [21] W. Sami, “How Can Mobile and Broadcasting Networks use Adjacent Bands,” Report, 2012.
- [22] ITU, “Digital Dividend Insights for spectrum decisions,” ITU-R, Report, Aug. 2012.

- [23] “Update on the Use of the 700 MHz Band in Europe,” Newsletter, DigiTAG, Mar 2015.
- [24] P. Lamy, “Results of the Work of the High Level Group on the Future Use of the UHF Band (470-790 MHz),” European Commission, Report, Sep. 2014.
- [25] D. Gómez-Barquero and W. Caldwell, “Broadcast Television Spectrum Incentive Auctions in the U.S.” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 7, pp. 50–56, Jul 2015.
- [26] “Proceso de selección objetiva para asignación de espectro radioeléctrico en las bandas 700 MHz (Dividendo Digital), 900 MHz, 1.900 MHz y 2.500 MHz para servicios móviles terrestres,” MINTIC de Colombia, 2015.
- [27] M. Denkovska, P. Latkoski, and L. Gavrilovska, “DTT performance degradation in presence of coexisting LTE network interference,” in *Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems (VITAE), 2014 4th International Conference on*, May 2014, pp. 1–5.
- [28] M. Fuentes *et al.*, “Coexistence of digital terrestrial television and next generation cellular networks in the 700 MHz band,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 63–69, Dec 2014.
- [29] J. Ribadeneira-Ramirez, D. Gomez-Barquero, G. Martinez, and N. Cardina, “Interference Analysis between Digital Terrestrial Television (DTT) and 4G LTE Mobile Networks in the Digital Dividend Bands,” *to appear in IEEE Transactions on Broadcasting*, 2015.
- [30] “APT/AWF/REP-14. Harmonised Frequency Arrangements for the band 698-806 MHz,” Asia-Pacific Telecommunity, Report, Sept. 2010.
- [31] 700 MHz Public Safety Spectrum. [Online]. Available: <https://www.fcc.gov/encyclopedia/700-mhz-spectrum>
- [32] D. Withers, *Radio Spectrum Management: Management of the spectrum and regulation of radio services*. IET, 1999.
- [33] “GE06 Final Acts of the Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174-230 MHz and 470-862 MHz (RRC-06),” ITU, Agreement, Geneva 2006.

REFERENCIAS

- [34] I. Eizmendi *et al.*, “DVB-T2: The Second Generation of Terrestrial Digital Video Broadcasting System,” *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 2, pp. 258–271, June 2014.
- [35] D. Gomez-Barquero *et al.*, “Frequency and Network Planning and Optimization of the Digital Terrestrial Television DVB-T2 Networks in Colombia,” *Waves*, vol. 6, no. 6, pp. 35–49, 2014.
- [36] “Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2,” White Paper, EBU-TECH 3348, 2008.
- [37] ITU, “Planning Criteria, including Protection Ratios, for Second Generation of Digital Terrestrial Television Broadcasting Systems in the VHF/UHF Bands,” ITU-R, Recommendation BT.2033, Jan. 2013.
- [38] M. Mroué *et al.*, “Performance and Implementation Evaluation of TR PAPR Reduction Methods for DVB-T2,” *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, vol. 2010, no. 6, Aug. 2010.
- [39] B. Krongold and D. Jones, “PAR reduction in OFDM via active constellation extension,” *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 3, pp. 258–268, Sept 2003.
- [40] L. Polak and T. Kratochvil, “Performance of the rotated constellation in DVB-T2,” in *Proceedings of 7th International Conference on Digital Telecommunications (ICDT 2012)*, 2012, pp. 84–87.
- [41] CEPT, “The Identification of Common and Minimal (least restrictive) Technical Conditions for 790 - 862 MHz for the Digital Dividend in the European Union,” CEPT 30, Report, Oct. 2009.
- [42] “Study on Specification and Use of in-line Filters to Reduce Interference in Broadcast Bands from Mobile Base Stations,” White Paper, DVB SB2122, Mar 2014.
- [43] L. Polak *et al.*, “Study of coexistence between indoor LTE femtocell and outdoor-to-indoor DVB-T2-Lite reception in a shared frequency band,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2015, no. 1, p. 114, Apr 2015.
- [44] G. Baruffa *et al.*, “Protection Ratio and Antenna Separation for DVB-T/LTE Coexistence Issues,” *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 8, pp. 1588–1591, Agu 2013.

- [45] C.-P. (13)010, “Lower Edge of Mobile Allocation and Adjacent Band Compatibility,” WRC-15 agenda item 1.2, Jan. 2013.
- [46] D.-H. Kim, S.-J. Oh, and J. Woo, “Coexistence analysis between IMT system and DTV system in the 700MHz band,” in *ICT Convergence (ICTC), 2012 International Conference on*, Oct 2012, pp. 284–288.
- [47] SET, “Pruebas de Interferencia de la Señal LTE en la Recepción de TV Digital en la Banda de UHF,” Feb. 2014.
- [48] ATDI, “Report for GSMA on the Coexistence of ISDB-T and LTE,” Report, Nov. 2015.
- [49] W. Li, J. Chen, H. Long, and B. Wu, “Performance and Analysis on LTE System under Adjacent Channel Interference of Broadcasting System,” in *Computer and Information Technology (CIT), 2012 IEEE 12th International Conference on*, Oct 2012, pp. 290–294.
- [50] EBU, “Protection of DTT from LTE 700,” Fact sheet, Feb. 2015.
- [51] G. Santella, R. De Martino, and M. Ricchiuti, “Single frequency network (SFN) planning for digital terrestrial television and radio broadcast services: the Italian frequency plan for T-DAB,” in *Vehicular Technology Conference, 2004. VTC 2004-Spring. 2004 IEEE 59th*, vol. 4, May 2004, pp. 2307–2311 Vol.4.
- [52] M. Tormos, C. Tanougast, A. Dandache, D. Masse, and P. Kasser, “Evaluation performance analysis of DVB-T2 in a SFN network,” in *I/V Communications and Mobile Network (ISVC), 2010 5th International Symposium on*, Sept 2010, pp. 1–4.
- [53] C. Li, S. Telemi, X. Zhang, R. Brugger, I. Angulo, and P. Angueira, “Planning large single frequency networks for dvb-t2,” *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 3, pp. 376–387, Sept 2015.
- [54] D. Gomez-Barquero, “Cost efficient provisioning of mass mobile multimedia services in hybrid cellular and broadcasting systems,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, 2009.
- [55] J. Giménez-Gandía, “Improved Spectrum Usage with Multi-RF Channel Aggregation Technologies for the Next-Generation Terrestrial Broadcasting,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, 2015.

REFERENCIAS

- [56] J. Lopez-Sanchez, “Transmisión Eficiente de Servicios Fijos/Móviles y Servicios Locales en Redes de Televisión Digital Terrestre de Primera y Segunda Generación,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, 2014.
- [57] J. Morgade, “Methods for improving the digital terrestrial spectrum efficiency in the UHF bands,” Ph.D. dissertation, Universidad del País Vasco, Bizkaia, Spain, 2014.
- [58] D. Plets, “Characterization and optimization of the coverage of digital wireless broadcast and WLAN networks,” Ph.D. dissertation, Ghent University, Ghent, Belgium, 2011.
- [59] A. Ligeti and J. Zander, “Minimal cost coverage planning for single frequency networks,” *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 45, no. 1, pp. 78–87, Mar 1999.
- [60] A. Ligeti, “Coverage probability estimation in single frequency networks in presence of correlated useful and interfering components,” in *Vehicular Technology Conference, 1999. VTC 1999 - Fall. IEEE VTS 50th*, vol. 4, 1999, pp. 2408–2412 vol.4.
- [61] M. Garcia-Lozano *et al.*, “Metaheuristic Procedure to Optimize Transmission Delays in DVB-T Single Frequency Networks,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 57, no. 4, pp. 876–887, 2011.
- [62] M. Garcia-Lozano, S. Ruiz-Boque, and F. Minerva, “Static delays optimization to reduce self-interference in DVB-T networks,” in *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2010 IEEE International Symposium on*, March 2010, pp. 1–6.
- [63] M. García-Lozano *et al.*, “Metaheuristic Proposal to Minimize Self-Interference in Single Frequency Networks,” in *COST*, Jun. 2010, pp. 1–6.
- [64] J. Arenas, I. Eizmendi, U. Gil, P. Angueira, and A. Garcia, “Planning methodology for mobile broadcasting in dense SFN networks,” *Electronics Letters*, vol. 48, no. 15, pp. 955–956, July 2012.
- [65] J. Morgade, P. Angueira, A. Arrinda, R. Pfeffer, V. Steinmann, J. Frank, and R. Brugger, “SFN-SISO and SFN-MISO Gain Performance Analysis for DVB-T2 Network Planning,” *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 2, pp. 272–286, June 2014.

- [66] J. Gimenez, E. Stare, S. Bergsmark, and D. Gomez-Barquero, "Time Frequency Slicing for Future Digital Terrestrial Broadcasting Networks," *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 2, pp. 227–238, June 2014.
- [67] —, "Advanced Network Planning for Time Frequency Slicing (TFS) Toward Enhanced Efficiency of the Next-Generation Terrestrial Broadcast Networks," *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 2, pp. 309–322, June 2015.
- [68] D. Gozalvez, D. Gomez-Barquero, D. Vargas, and N. Cardona, "Time Diversity in Mobile DVB-T2 Systems," *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 3, pp. 617–628, Sept 2011.
- [69] D. Plets, W. Joseph, P. Angueira, J. Arenas, L. Verloock, and L. Martens, "On the methodology for calculating sfn gain in digital broadcast systems," *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 3, pp. 331–339, Sept 2010.
- [70] I. Eizmendi, G. Berjon-Eriz, M. Velez, G. Prieto, and A. Arrinda, "CNR requirements for DVB-T2 fixed reception based on field trial results," *Electronics Letters*, vol. 47, no. 1, pp. 57–59, January 2011.
- [71] C. Regueiro, U. Gil, M. Velez, I. Eizmendi, and P. Angueira, "Field Trials-Based Planning Parameters for DVB-T2 Indoor Reception," *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 2, pp. 251–262, June 2015.
- [72] D. Gomez-Barquero, J. Poikonen, J. Paavola, and N. Cardona, "Development and Applications of a Dynamic DVB-H System-Level Simulator," *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 3, pp. 358–368, Sept 2010.
- [73] D. Gomez-Barquero, P. Unger, T. Kurner, and N. Cardona, "Coverage Estimation for Multiburst FEC Mobile TV Services in DVB-H Systems," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 7, pp. 3491–3500, Sept 2010.
- [74] R. Brugger and D. Hemingway, "OFDM receivers - Impact on Coverage of Inter-Symbol Interference and FFT Window Positioning," EBU, Technical Review, Jul. 2013.
- [75] R. Beutler, *Digital Terrestrial Broadcasting Networks*. Springer, 2008.

REFERENCIAS

- [76] T. Sato, B. Roland, P. Ivan, and A. Pablo, "A comparison between theoretical and practical planning approaches for DVB-T2 single frequency networks," in *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2015 IEEE International Symposium on*, June 2015, pp. 1–6.
- [77] D. Gomez-Barquero, A. Bria, J. Monserrat, and N. Cardona, "Minimal Cost Planning of DVB-H Networks on Existing Wireless Infrastructure," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium on*, Sept 2006, pp. 1–5.
- [78] K. Beeke, "Spectrum Planning - Analysis of Methods for the Summation of Log-normal Distributions," EBU, Technical Review, Oct. 2007.
- [79] R. Beutler, *Frequency Assignment and Network Planning for Digital Terrestrial Broadcasting Systems*. Springer, 2004.
- [80] D. W. Matula and L. Beck, "Smallest-Last Ordering and Clustering and Graph Coloring Algorithms," *J. Association of the Computing Machinery* 30, 1983.
- [81] F. T. Leighton, "A graph coloring algorithm for large scheduling problems," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 84, pp. 489–503, 1979.
- [82] D. De Werra, "Heuristics for graph coloring," in *Computational graph theory*. Springer, 1990, pp. 191–208.
- [83] ITU, *Calculation of free-space attenuation*, ITU-R Recommendation P.525-2, 1994.
- [84] ITU, *Propagation by diffraction*, ITU-R Recommendation P.526-13, 2013.
- [85] *Curves for Radiowave Propagation over the Surface of the Earth*. ITU-R, 1991.
- [86] ITU, "Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz," ITUR-R, Recomendación, 2009.
- [87] A. G. Longley and P. L. Rice, "Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain. A computer method-1968," *Tropospheric Telecommunications Laboratory, Report*, Jul. 1968.
- [88] ITU, *Method for calculating sporadic-E field strength*, ITU-R Recommendation P.534-5, 2012.

- [89] ITU, *Effects of tropospheric refraction on radiowave propagation*, ITU-R Recommendation P.834-5, 2005.
- [90] ITU, *Prediction Procedure for the Evaluation of Interference Between Stations on the Surface of the Earth at Frequencies above about 0.1 GHz*, ITU-R Recommendation P.452-15, 2013.
- [91] J. Gimenez, D. Gozalvez, D. Gomez-Barquero, and N. Cardona, "Statistical model of signal strength imbalance between RF channels in DTT network," *Electronics Letters*, vol. 48, no. 12, pp. 731–732, June 2012.
- [92] J. J. G. Gandia, J. L. Sánchez, D. Gómez-Barquero, and N. C. Marcet, "Radio Propagation Models for Mobile DTT Networks in the UHF Band," *Sistemas y Telemática*, vol. 9, no. 18, pp. 9–27, 2011. [Online]. Available: <http://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/sistemas-telematica/article/view/1077>
- [93] A. Saliato, G. Roig, D. Gomez-Barquero, and N. Cardona, "Radio Propagation Models for DVB-H Networks," in *IEEE European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Barcelona, Spain, 12-16 Apr. 2010.
- [94] —, "Propagation Model Calibration for DVB-SH in Terrestrial Single Frequency Networks," in *IEEE European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Barcelona, Spain, 12-16 Apr. 2010.
- [95] J. Arenas, U. Gil, D. Plets, P. Angueira, W. Joseph, and L. Martens, "Statistical Analysis of Field Strength Location Variability for UHF Multimedia Broadband Services," *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, vol. 11, pp. 34–36, 2012.
- [96] ITU, *A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands*, ITU-R Recommendation P.1812-3, 2013.
- [97] ITU, *VHF and UHF propagation curves for the frequency range from 30 MHz to 1 000 MHz*, ITU-R Recommendation P.370-7, 1995.
- [98] M. Hatay, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 3, pp. 317–325, Aug 1980.
- [99] L. R. Maciel, H. L. Bertoni, and H. H. Xia, "Unified Approach to Prediction of Propagation Over Buildings for All Ranges of Base Station

REFERENCIAS

- Antenna Height,” *IEEE Transactions on Vehicular technology*, vol. 42, no. 1, 1993.
- [100] J. Deygout, “Multiple knife-edge diffraction of microwaves,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 4, pp. 480–489, Jul 1966.
- [101] D. Plets *et al.*, “Analysis of propagation of actual DVB-H signal in a suburban environment,” in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE*, June 2007, pp. 1997–2000.
- [102] I. Pullen, “DTT coverage-predictions and measurement,” in *Digital Television - Where Is It and Where Is It Going? (Ref. No. 1999/072)*, *IEE Colloquium on*, 1999, pp. 8/1–8/6.
- [103] C. Regueiro, U. Gil, M. Velez, I. Eizmendi, and P. Angueira, “Field trials-based planning parameters for dvb-t2 indoor reception,” *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 2, pp. 251–262, June 2015.
- [104] D. W. Matula and L. L. Beck, “Smallest-last Ordering and Clustering and Graph Coloring Algorithms,” *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 30, no. 3, pp. 417–427, Jul. 1983. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2402.322385>
- [105] M. Goodrich and R. Tamassia, *Algorithm Design Foundations, Analysis, and Internet Examples*. New York: John Wiley and Sons Inc.
- [106] J. Schneider and S. Kirkpatrick, *Stochastic Optimization*. New York: Springer.
- [107] ITU, “Measurements of protection ratios and overload thresholds for broadcast TV receivers,” ITU-R, Recomendación BT.2215, Mar. 2013.
- [108] *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the digital television broadcast service, Terrestrial (DVB-T); Part 2: Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive*, ETSI Std. 302 296-2, Rev. 1.2.1, 2012.
- [109] *Digital Terrestrial Television, Transmission system*, ABNT Std. NBR 15 601, Rev. 1, 2007.
- [110] *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception*, 3GPP Std. TS 36.101, Rev. 13.0.0, 2015.

- [111] *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception*, 3GPP Std. TS 36 104, Rev. 11.2.0, 2015.
- [112] “Elaboración de los borradores de los acuerdos fronterizos, incluyendo las propuestas técnicas de distribución de canales en las zonas de frontera de Colombia con Ecuador, Venezuela y Brasil que permitan atender las necesidades de espectro de los servicios de radiodifusión sonora y televisiva, servicios móviles en la banda de 700 MHz y los servicios que compartan bandas con los anteriores en cada uno de los países, la convivencia de los mismos y se eviten interferencias perjudiciales, conforme con las mejores prácticas en la definición de acuerdos internacionales para la utilización de frecuencias.” Estudios previos, TACHYON, 2013.
- [113] “Especificaciones técnicas aplicables a la red y a los receptores del servicio de Televisión Digital Terrestre –TDT- en Colombia,” Resolución, Comisión de Regulación de Comunicaciones, 2012.
- [114] “Standardized DVB-T2 RF Specifications,” White Paper, DIGITALEUROPE, Abr. 2012.
- [115] “Convenio entre el Ministerio de Comunicaciones de la República de Colombia y el Consejo Nacional de Radiodifusión y Televisión de la República de Ecuador – CONARTEL, para la asignación y uso de frecuencias radioeléctricas para la operación de estaciones de radiodifusión sonora y de televisión abierta VHF y UHF en el área de frontera.” Convenio, MINTEL Colombia, CONARTEL Ecuador, Febrero 2007.
- [116] “Cuadro de asignación de frecuencias,” Resolución, ANATEL, Brasil, 2012.
- [117] “Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias,” Resolución, CONATEL, Venezuela, 2010.
- [118] B. S. Krongold and D. L. Jones, “PARP Reduction in OFDM via Active Constellation Extension,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 49, no. 3, pp. 158–168, 2003.
- [119] M. Mroue *et al.*, “Performance and Implementation Evaluation of TR PAPR Reduction Methods for DVB-T2,” *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, vol. 2010, pp. 1–9, 2010.

REFERENCIAS

- [120] *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation*, 3GPP Std. TS 36.211, Rev. 12.6.0, 2012.