



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

“ESTUDIO DEL EFECTO DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE LAS ANTENAS
RECEPTORAS SOBRE LA COBERTURA DE UNA RED SFN-ATSC PARA
PRUEBAS DE CAMPO”

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
PEDRO JAVIER ORBEA GUADA

TUTOR:
DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. LANDEROS AYALA SALVADOR

Secretario: DR. MOCTEZUMA FLORES MIGUEL

1er. Vocal: DR. MATÍAS MARURI JOSÉ MARÍA

2do. Vocal: DR. CEBALLOS HERRERA DANIEL ENRIQUE

3er. Vocal: DR. GARCÍA GARDUÑO VÍCTOR

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI

FIRMA

PENSAMIENTO

“El hombre nunca sabe de lo que es capaz hasta que lo intenta.”

Charles Dickens

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por impulsarme hacia delante cada día.

A mi esposa, por ser tan especial y ofrecerme siempre su apoyo incondicional.

A toda mi familia, en especial a mi hermana, mis abuelos y Pipa.

A mi director de tesis, el Dr. José María Matías, por su ayuda y disposición constante.

A mis amigos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Ingeniería y al Posgrado de Ingeniería Eléctrica por brindarme la oportunidad de efectuar mis estudios de maestría.

Al CONACYT por la beca otorgada para la realización de mis estudios (Beca CONACYT N° 855951).

Al proyecto REFUTV, apoyado por el Fondo Institucional del CONACYT bajo el Proyecto Conjunto CONACYT-CDTI N° 189235; por permitirme desarrollar mi tesis dentro de su marco.

A los miembros de mi jurado de examen por su tiempo, observaciones a la tesis y por formar parte de la evaluación.

A todos aquellos profesores que han influido en mi formación profesional.

A todos, muchas gracias.

ÍNDICE

Resumen	13
Capítulo 1. Introducción	14
1.1. La Televisión Digital Terrestre. Situación general	14
1.2. Proyecto REFUTV.....	16
1.3. Justificación	17
1.4. Objetivos	17
1.4.1. General	17
1.4.2. Específicos	17
1.5. Estructura de la tesis	18
Bibliografía	20
Capítulo 2. Estado del arte	22
2.1. Estándares de Televisión Digital Terrestre.....	22
2.1.1. DVB-T.....	22
2.1.2. ISDB-T	24
2.1.3. DTMB.....	25
2.1.4. ATSC.....	26
2.2. Redes en Frecuencia Única en Televisión Digital Terrestre	30
2.2.1. Desplazamiento de frecuencia	31
2.2.2. Efecto de las antenas receptoras	32
2.2.3. Aplicaciones de las redes SFN	32
2.3. Antecedentes de pruebas de campo bajo el estándar ATSC	33
2.3.1. Mediciones de campo realizadas en México	33
2.3.2. Mediciones de campo realizadas en territorio extranjero.....	34
Bibliografía	38
Capítulo 3. Estudio del efecto del patrón de radiación de las antenas receptoras en la cobertura de la red SFN	41
3.1. Descripción del estudio	41

3.1.1.	Receptor de referencia.....	41
3.1.2.	Red de transmisión.....	43
3.1.3.	Método de predicción de cobertura	44
3.1.4.	Definición de las antenas receptoras	45
3.1.5.	Patrón de radiación de referencia para antenas receptoras directivas.....	46
3.2.	Análisis de resultados.....	47
3.2.1.	Diferencias de nivel de intensidad de campo y cálculo de retardos producidos por la red SFN 50	
3.2.2.	Estudios de cobertura de la red SFN	52
3.2.3.	Discusión final de los resultados	57
3.3.	Conclusiones del capítulo.....	59
	Bibliografía	61
	Capítulo 4. Organización de la campaña de mediciones.....	62
4.1.	Distribución equitativa de los sitios de medida	62
4.2.	Duración de la campaña de medidas y definición de recorridos	66
4.2.1.	Transmisor principal operando en solitario	67
4.2.2.	Escenario I	68
4.2.3.	Escenario II	69
4.2.4.	Escenario III	70
4.2.5.	Resumen de la duración y organización de las recorridos de medidas	71
4.3.	Punto de referencia.....	71
4.3.1.	Mediciones reales en los sitios seleccionados	74
4.4.	Planificación de la reproducción y toma de medidas en laboratorio	75
4.4.1.	Equipamiento necesario para las medidas en laboratorio	77
4.5.	Estimación del personal requerido para la etapa de pruebas	78
4.5.1.	Personal para mediciones en campo	78
4.5.2.	Personal para reproducciones en laboratorio	79
	Bibliografía	80
	Capítulo 5. Preparación del procesado de datos.....	81
5.1.	Parámetros de medida.....	81

5.1.1. Datos adicionales	82
5.2. Organización de los datos recopilados durante pruebas de campo	83
5.3. Estimación de respuesta impulsional a partir de datos almacenados con la herramienta BC Drive	87
5.4. Evaluación subjetiva de la calidad de recepción en los puntos de medida	90
5.5. Cálculo de la diferencia de retardo relativa para cada punto de medida.....	93
5.6. Resultados a lo largo de la línea que une los dos transmisores.....	96
Bibliografía	101
Capítulo 6. Conclusiones	102
Anexo 1	105
Anexo 2	106
Bibliografía	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama de bloques correspondiente a la generación de señal en un sistema ATSC....	27
Figura 3.1. Máscara de recepción de referencia para estimar niveles de problemática.....	42
Figura 3.2. Ubicación de los sitios transmisores de la red SFN.....	44
Figura 3.3. Discriminación recomendada para el uso de antenas receptoras direccionales en radiodifusión.....	47
Figura 3.4. Área de cobertura proporcionada por Tx1.....	48
Figura 3.5. Área de cobertura proporcionada por Tx2.....	48
Figura 3.6. Traslape entre las áreas de cobertura de ambos transmisores.....	49
Figura 3.7. Comparación entre el área de traslape (amarillo) y la cobertura generada solo por Tx2 (azul).....	50
Figura 3.8. Diferencia entre la intensidad de campo eléctrico recibido desde Tx1 y Tx2 ($\Delta E = E_{Tx1} - E_{Tx2}$); y estimación de retardos entre ambas señales (en μs).....	52
Figura 3.9. Cobertura de la red SFN con antenas receptoras omnidireccionales (Configuración I-III).....	53
Figura 3.10. Cobertura de la red SFN con antenas receptoras directivas orientadas a Tx1 (Configuración II-III).....	55
Figura 3.11. Cobertura de la red SFN con antenas receptoras directivas orientadas al transmisor dominante (Configuración III-III).....	57
Figura 4.1. Ubicación de puntos de medida para el caso en que opere solo el transmisor principal.....	67
Figura 4.2. Ubicación de puntos de medida para el Escenario I.....	68
Figura 4.3. Ubicación de puntos de medida para el Escenario II.....	69
Figura 4.4. Puntos de medida para el Escenario III.....	70
Figura 4.5. Ubicación de los 11 sitios visitados durante recorrido para determinar el punto de referencia.....	72
Figura 4.6. Perfil del terreno desde el punto 5 hasta el Cerro del Chiquihuite.....	73
Figura 4.7. Perfil del terreno desde el punto 5 hasta las instalaciones de TV UNAM.....	73
Figura 4.8. Perfil del terreno desde el punto 11 hasta el Cerro del Chiquihuite.....	74
Figura 4.9. Perfil del terreno desde el punto 11 hasta las instalaciones de TV UNAM.....	74
Figura 4.10. Evaluación del desempeño de los receptores ante un eco estático.....	76

Figura 5.1. (a) Despliegue de árbol de directorios correspondiente a un punto de medida. (b) Contenido interno de las carpetas relativas a cada punto de medida.....	83
Figura 5.2. Captura de formato en Microsoft Excel que agrupa parámetros y datos generales para cada punto de medida.....	85
Figura 5.3. Despliegue de árbol de directorios paralelo para recopilación de archivos IQ.....	87
Figura 5.4. Prototipo de gráfica obtenido.....	90
Figura 5.5. Muestra de la evaluación subjetiva de la recepción en varios puntos (dirección Cerro del Chiquihuite).....	92
Figura 5.6. Muestra de la evaluación subjetiva de la recepción en varios puntos (dirección TV UNAM).....	92
Figura 5.7. Niveles de potencia y calidad de recepción en los puntos que forman la línea recta entre ambos transmisores (antena receptora orientada a Cerro del Chiquihuite).....	97
Figura 5.8. Niveles de potencia y calidad de recepción en los puntos que forman la línea recta entre ambos transmisores (antena receptora orientada a TV UNAM).....	98
Figura 5.9. Comparación entre niveles de potencia y calidad de recepción desde ambas direcciones, en los puntos seleccionados.....	98
Figura 5.10. Niveles de potencia y calidad de recepción predominante en los puntos que forman la línea recta entre ambos transmisores (considerando ambas direcciones).....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Parámetros de trabajo de ambos transmisores.....	44
Tabla 3.2. Configuraciones de recepción.....	46
Tabla 3.3. Áreas de interés bajo condiciones iniciales.....	49
Tabla 3.4. Análisis de coberturas bajo operación de la red SFN.....	58
Tabla 4.1. Distribución de puntos por escenarios de red.....	63
Tabla 5.1. Relación de distancias y retardos para cada uno de los puntos de medida planificados.....	94

LISTA DE TÉMINOS

AAC: Advanced Audio Coding

ADTB-T: Advanced Digital Television Broadcasting-Terrestrial

ANATEL: Agencia Nacional de Telecomunicaciones

APSK: *Amplitude and Phase-Shift Keying*

ARIB: Association of Radio Industries and Business

ATSC: Advanced Television Systems Committee

ATSC M/H: Advanced Television Systems Committee Mobile/Handheld

AVC: Advanced Video Coding

BCH: Bose-Chaudhuri-Hocquengham

BER: Bit Error Rate

C/N: Carrier to Noise Ratio

CDTI: Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial

CONACYT: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

COFDM: Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing

CRC: Cyclic Redundancy Check

CU: Ciudad Universitaria

DMB-T: Digital Multimedia Broadcasting-Terrestrial

DOCR: Digital On-Channel Repeater

DQPSK: Differential Quadrature Phase Shift Keying

DTMB: Digital Terrestrial Television Multimedia Broadcasting

DTMB-A: Digital Terrestrial Television Multimedia Broadcasting-Advanced

DTS: Distributed Transmission System

DTV: Digital Television

DTxR: Distributed Translator

DTxT: Distributed Transmitter

DVB: Digital Video Broadcasting

DVB-T: Digital Video Broadcasting - Terrestrial

FDM: Frequency Division Multiplexing

FFT: Fast Fourier Transform

GPS: Global Positioning System

HDTV: High Definition Television

IFT: Instituto Federal de Telecomunicaciones

IP: Internet Protocol

IQ: In-phase and Quadrature

ISDB: Integrated Services Digital Broadcasting

ISDB-T: Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial

ISDB-Tb: Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial Built-in

ISI: Interferencia Inter-Simbólica

MER: Modulation Error Ratio

MFN: Multiple Frequency Network

MIMO: Multiple-Input Multiple-Output

MISO: Multiple-Input Single-Output

MPEG-2: Moving Picture Experts Group 2

MTVA: Metropolitan Television Alliance

NTIA: National Telecommunications and Information Administration

NTSC: National Television System Committee

LDPC: Low Density Parity Check

LDM: Layered Division Multiplexing

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PID: Packet Identifier

PLP: Physical Layer Pipe

PNG: Portable Network Graphics

PN-MC: Multicarrier Pseudorandom Noise

PRA: Potencia Radiada Aparente

PSI: Program Specific Information

QPSK: Quadrature Phase-Shift Keying

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

REFUTV: Desarrollo de Redes en Frecuencia Única para Televisión Digital ATSC

RF: Radiofrecuencia

RQD: Rotated Constellation and Q-Delay

RS: Reed Solomon

R&S: Rohde & Schwarz

SBTVD: Sistema Brasileiro de Televisão Digital

SCCC: Serial Concatenated Convolutional Coder

SDTV: Standard Definition Television

SFN: Single Frequency Network

SISO: Single-Input Single-Output

SPR: Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano

TDM: Time Division Multiplexing

TDS-OFDM: Time-Domain Synchronous - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

TDT: Televisión Digital Terrestre

TELBOR: Telemática e Innovación a Bordo S.A. de C.V.

TOV: Threshold of Visibility

TS: Transport Stream

UDP: User Datagram Protocol

UHF: Ultra High Frequency

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México

USRP: Universal Software Radio Peripheral

VHF: Very High Frequency

VSF: Vestigial Sideband

Resumen

La migración del sistema analógico de televisión NTSC (del inglés National Television System Committee) a un sistema digital comenzó en México en el año 2004, cuando el gobierno del país decide adoptar la estándar americano ATSC (del inglés Advanced Television Systems Committee), como su norma para la radiodifusión terrestre de la televisión digital. ATSC constituye una norma cuyo tipo de modulación es basado en amplitud y una sola portadora, por tanto es afectada significativamente por el multitrayecto. Una Red en Frecuencia Única (SFN, del inglés Single Frequency Network) consiste en una red de dos o más transmisores que operan en un mismo canal de radiofrecuencia. Gracias a las pruebas de laboratorio y de campo realizadas en los últimos años, se evidencia que es posible la puesta en marcha de redes SFN con el estándar ATSC. Esto es posible debido a la implementación de una sincronización en los sistemas de transmisores que conforman la red, y el diseño innovador de los ecualizadores dentro de los receptores.

Una ventaja significativa de las redes SFN es la mejora considerable en la gestión del espectro radioeléctrico, permitiendo así aumentar en número de canales de televisión o liberar ciertas bandas de televisión para ser asignadas a otros servicios de telecomunicaciones.

El uso de diferentes tipos de antenas receptoras por parte del usuario final puede tener un impacto directo en la calidad de recepción de las señales de televisión deseadas. Para el caso de Redes en Frecuencia Única, el patrón de radiación de las antenas receptoras puede influir en el área de servicio brindada por los transmisores que conforman la red. La capacidad para lidiar con señales provenientes de diversas direcciones debe variar dependiendo del tipo de antena, y su orientación.

Este estudio, enmarcado dentro del proyecto REFUTV (Desarrollo de Redes en Frecuencia Única para Televisión Digital ATSC), se enfoca en evaluar la cobertura correspondiente a una red SFN bajo el estándar ATSC; mediante la simulación de diferentes configuraciones basadas en el tipo y orientación de las antenas receptoras. El proyecto REFUTV es un proyecto de cooperación internacional, y tiene previsto la realización de una etapa de pruebas en campo durante la implementación de una red SFN real en la Ciudad de México (CDMX). Dicha red estará conformada por dos transmisores, el transmisor principal ubicado al norte de la ciudad mientras que el emisor secundario estará localizado en la zona sur.

Además parte de este trabajo consiste en la planificación para el desarrollo de la campaña de mediciones en campo durante la operación de la red SFN-ATSC mencionada, así como la elaboración de herramientas que permitan un procesado eficiente de los resultados recopilados durante el período de pruebas.

Capítulo 1. Introducción

1.1. La Televisión Digital Terrestre. Situación general

La televisión digital (DTV, del inglés Digital Television), permite la transmisión de una señal de televisión en formato digital. Existen tres variantes para su puesta en práctica, terrestre, satelital y por cable [1]. Es importante aclarar que este documento se enmarca en estudios de la Televisión Digital Terrestre (TDT).

El incremento de la demanda de servicios interactivos de televisión, incluyendo programación de alta definición, motivó la migración de transmisión analógica a digital. La transmisión digital de televisión ha sido un área de continua investigación e innovación, lo que se evidencia en el desarrollo tecnológico plural y la creación de nuevos estándares en la última década.

La televisión es probablemente la plataforma más económica para informar, educar y entretener a las personas alrededor del mundo. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) estima que el número de hogares con recepción de televisión ha superado los 1,400 millones a nivel mundial [2]. El desarrollo de las transmisiones de TDT ha revolucionado la industria de servicios interactivos multimedia, cambiando la percepción que existe desde hace décadas de lo que es televisión; ahora es posible la transmisión de más canales de programación dentro del mismo ancho de banda, liberando parte del espectro ocupado por canales analógicos para nuevos servicios. Además introduce movilidad y facilita la convergencia de transmisión de datos, difusión de televisión y telefonía.

Varios estándares de televisión digital han sido desarrollados en diferentes partes del mundo. Por ejemplo, en Europa, se formó un consorcio entre distintas empresas para el desarrollo de televisión digital. Esta iniciativa es conocida como DVB (del inglés Digital Video Broadcasting). El estándar de TDT resultado de este proyecto fue denominado DVB-T (del inglés Digital Video Broadcasting - Terrestrial) [3].

En Japón se lanzó un proyecto para diseñar un estándar altamente flexible para la difusión de televisión de alta definición. El resultado fue el estándar llamado ISDB (del inglés Integrated Services Digital Broadcasting). Se trata de un conjunto de normas para transmisión de radio y televisión digital. La familia dedicada a la televisión digital se conoce como ISDB-T (del inglés Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial) [4]. En China se publicó en el 2006 otro estándar para televisión digital conocido como DTMB (del inglés Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting) [5].

Por otro lado, siguiendo el éxito que tuvo el estándar de televisión analógica en los Estados Unidos, se formó el grupo llamado Comité de Sistemas de Televisión Avanzada (Advanced

Television Systems Committee) para el desarrollo de un estándar de televisión digital, el cual fue llamado de la misma manera, ATSC [6]. Este estándar, fue aprobado en 1996.

En julio de 1999, el gobierno mexicano decide evaluar el desarrollo de las tecnologías de radiodifusión digitales existentes hasta ese momento. El Comité Consultivo de Tecnologías Digitales para la Radiodifusión fue la entidad creada con este propósito, analizando los estándares para transmisiones de televisión digital impulsados en el mundo hasta aquel entonces: ATSC, DVB-T e ISDB-T. Finalmente, en 2004, fue oficializada la adopción de la norma ATSC como estándar de televisión digital a implementar para llevar a cabo el apagón analógico en el país [7]. El uso del ancho de banda precedente (6 MHz), las facilidades de este sistema para transmisiones televisivas de alta definición, costos de implementación y su utilización en países cercanos como Estados Unidos de América y Canadá; favorecieron la puesta en práctica definitiva de ATSC en el territorio nacional mexicano [7]. Las transmisiones analógicas de televisión fueron suspendidas de forma definitiva en diciembre de 2015 [8].

En México existen Redes de Frecuencia Múltiple (MFN, del inglés Multiple Frequency Network). Estas redes utilizan transmisores complementarios en canales diferentes para brindar la misma programación, con el fin de ampliar el área de servicio, o cubrir zonas de sombra y evitar interferencias, haciendo uso de gran parte del espectro. La implementación de Redes en Frecuencia Única es común bajo normas de TDT que utilizan modulación basada en multiportadora, como son DVB-T, DTMB, ISDB-T e ISDB-Tb (del inglés ISDB-T Built-in); este último constituye una variante brasileña del estándar japonés ISDB-T [9].

En una red SFN, la cobertura de un área específica puede ser proporcionada por un determinado número de transmisores que se encargan de poner en el aire la misma señal en el mismo canal de frecuencia, sincronizados en tiempo. En cierto punto de recepción las contribuciones de ambas señales no se interfieren, incluso pueden mejorar la recepción de la señal en determinadas condiciones. Esto contribuye, considerablemente, a mejorar la eficiencia del espectro radioeléctrico [10]. Otros beneficios de este tipo de redes es que habilita la posibilidad de brindar servicio en lugares donde no es posible la llegada de la señal cuando solo es utilizado un transmisor de alta potencia. Además permite la reutilización de instalaciones destinadas a servicios de comunicaciones, dígase torres de telefonía celular y radiodifusión. Con las redes SFN es posible reducir el margen de desvanecimiento, ya que es posible trabajar con niveles de potencia más bajos y lograr un buen nivel de señal en determinada área de servicio. Las redes SFN ya son comunes para aquellos estándares que utilizan una modulación basada en múltiples portadoras [11-13]. Para el caso de ATSC, no existe mucha documentación sobre el despliegue de estas redes, aunque últimamente se ha evidenciado su implementación bajo ciertos esquemas de transmisores y diferentes diseños de los dispositivos receptores [14, 15].

En contraste con los beneficios desplegados por el estándar ATSC, existe una dificultad inherente a este sistema, su baja robustez frente al multitrayecto natural y artificial, así como al

desplazamiento Doppler, lo que entorpece la implementación de redes SFN [16]. La propagación multitrayecto puede provocar distorsión y atenuación de las señales recibidas y, por consiguiente, degradar la calidad de funcionamiento de los sistemas radioeléctricos. La marcada vulnerabilidad del sistema ATSC ante este fenómeno, recae en la utilización de un esquema de modulación basado en una sola portadora, llamado modulación 8-VSB (del inglés, 8-Level Vestigial Sideband) [17].

El uso de diferentes tipos de antenas receptoras por parte del usuario final, y por consiguiente distintos patrones de radiación, puede influir directamente en que el usuario reciba correctamente la señal, y por extensión, en el área de servicio brindada por los transmisores que conforman la red SFN. La capacidad para discriminar señales provenientes de diversas direcciones, productos del multitrayecto artificial provocado por una red SFN, debe variar en dependencia de las características del elemento receptor. Patrones de radiación más directivos pueden descartar aquellas señales no deseadas, marcando la calidad de recepción en determinados puntos y generando implicaciones sobre la cobertura de la red.

Por otra parte, los ecualizadores de canal en los receptores tienen como principal finalidad mejorar la recepción en condiciones de multitrayecto, por tanto también abren la posibilidad de que se mejore la recepción en este tipo de redes [18].

1.2. Proyecto REFUTV

El proyecto REFUTV "Desarrollo de Redes en Frecuencia Única para Televisión Digital ATSC" es un proyecto de colaboración internacional financiado por CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) y el CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial, España), los países involucrados son México y España.

Dentro de este propósito participan, desde un inicio, tres entidades: la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Telemática e Innovación a Bordo S.A. de C.V. (TELBOR) y EGATEL S.L. Además, posteriormente, tuvo lugar la importante incorporación de SPR (Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano). Desde un inicio este proyecto enmarcaba la realización de dos etapas de mediciones, una ya desarrollada en laboratorio y otra a realizar en campo. Para llevar a cabo la campaña de mediciones en campo, serán ocupadas instalaciones y equipamiento pertenecientes a SPR y TV UNAM; algunos de ellos facilitados por las empresas TELBOR y EGATEL.

Como parte del proyecto, se pretenden realizar pruebas de campo de las cuales se espera la confirmación de una viabilidad en la implementación de redes SFN con ATSC; logrando conocer los parámetros de operación bajo los cuales puede funcionar una red de este tipo. Los trabajos y estudios realizados en esta tesis se enmarcan dentro de las necesidades de dicho proyecto.

1.3. Justificación

En contraste con otros estándares, basados en la modulación OFDM (del inglés Orthogonal Frequency Division Multiplexing), el correcto funcionamiento de una red SFN dentro de la televisión digital ATSC depende, en gran medida, de la calidad y comportamiento del ecualizador de cada dispositivo receptor.

El uso de distintos tipos de antenas receptoras puede influir en el desempeño de una red SFN, debido a que patrones directivos son capaces de atenuar señales derivadas de direcciones no deseadas, en este caso las señales provenientes de transmisores más alejados o que lleguen con menor intensidad al receptor. Se realizarán simulaciones que permitan estudiar el impacto de los patrones de radiación de las antenas receptoras de los usuarios sobre el área de cobertura generada por la Red en Frecuencia Única, teniendo en cuenta distintas configuraciones. El cálculo de retardos relativos y diferencias de intensidad de campo en cada punto, permitirá la definición de zonas de sombra en cuanto a recepción de la señal, tomando como base la máscara de recepción referenciada en la Práctica Recomendada A/74 [19] de ATSC.

Además se requiere la planificación de una campaña de pruebas en campo durante la operación de la red SFN-ATSC real, que permita validar la implementación de este tipo de redes en México. Adicionalmente es necesario el desarrollo de herramientas destinadas al procesamiento de aquellos datos recopilados en el período de mediciones, para una evaluación futura del desempeño de los receptores.

Todo este trabajo constituye el complemento definitivo a otras tesis ya desarrolladas dentro del proyecto REFUTV [20, 21], donde se manejaban aspectos iniciales relativos a la planificación de la etapa de pruebas de campo.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

El primer objetivo general de esta tesis consiste en analizar el impacto de diferentes tipos de antenas receptoras sobre la cobertura de una red SFN, bajo el estándar ATSC. Además, el segundo objetivo principal es planificar el desarrollo de una campaña de mediciones reales y el procesamiento posterior de los parámetros recopilados durante ese período.

1.4.2. Específicos

A partir de los objetivos generales planteados anteriormente, se derivan los siguientes objetivos específicos:

- Comparar la cobertura desplegada para las diferentes configuraciones de las antenas de recepción propuestas, a partir de los resultados derivados de las simulaciones.
- Identificar la configuración de recepción más eficiente en cuanto al área de servicio proporcionada.
- Planificar logísticamente el período de medidas en campo y captura de datos en laboratorio.
- Desarrollar herramientas que agilicen la posterior etapa de procesamiento de los parámetros obtenidos durante las pruebas.

1.5. Estructura de la tesis

La presente tesis abarca 6 capítulos, a continuación se describe brevemente cada uno de ellos.

El Capítulo 1 enmarca la introducción a este trabajo. Esta introducción ofrece una explicación general de la situación de la TDT a nivel mundial, además de hacer énfasis particular en el caso de México. Se facilita una pequeña panorámica de las Redes en Frecuencia Única y el Proyecto REFUTV, esfuerzo dentro del cual se encuentra enmarcado este estudio. Por último, se definen la justificación, objetivos y estructura de esta tesis.

El Capítulo 2 recoge los antecedentes de este estudio. Se detallan las principales especificaciones de todos los estándares de TDT que existen actualmente, profundizando en la norma ATSC por su relevancia para esta investigación. Se explican los principios de las Redes en Frecuencia Única, describiendo generalidades y aplicaciones derivadas de las mismas. También son resumidas campañas de pruebas de campo desarrolladas previamente, bajo el estándar ATSC, en México y otros países de Norteamérica.

En el Capítulo 3 se brindan los fundamentos teóricos para comprender la influencia del patrón de radiación de diferentes antenas receptoras sobre el desempeño de una red SFN, se puntualizan parámetros de operación de los equipos transmisores y características específicas de la red SFN relativa al proyecto REFUTV. Derivado de lo anterior, se realizan una serie de simulaciones de cobertura para distintas configuraciones basadas en el tipo de elemento receptor empleado por los usuarios, y son comparados los resultados alcanzados. Se analizan las áreas de coberturas obtenidas desde dos variantes complementarias, visualización de mapas y comparación de resultados numéricos.

El Capítulo 4 comprende la organización logística de la etapa de pruebas de campo. Se define una distribución equitativa de los puntos de medida para cada uno de los escenarios de operación de la red. Se ofrece una propuesta de los recorridos a usar por la unidad de medida móvil, para un barrido óptimo del área de análisis. Todo esto permite prever una duración aproximada para el

desarrollo de la campaña de mediciones en campo. Una planificación para la reproducción y toma de medidas en laboratorio es detallada, así como una estimación del personal requerido para cubrir todo el período de pruebas.

El Capítulo 5, por su parte, incluye la preparación de la etapa de procesado de los datos recopilados durante las pruebas. Se define la organización a tener en cuenta al momento de sintetizar los parámetros recogidos durante las medidas, en una forma que facilite su estudio posterior. Además se describen una serie de herramientas de software desarrolladas con el fin de analizar los datos resultantes de las mediciones, para contribuir a la posterior evaluación del desempeño de la red SFN implementada y los receptores empleados durante la etapa de pruebas.

El Capítulo 6, último en este documento, presenta las conclusiones derivadas de la realización de esta tesis.

Bibliografía

- [1]. Sector de Radiocomunicaciones de la UIT. Recomendación UIT-R BT. 1306-7. "Métodos de corrección de errores, de configuración de tramas de datos, de modulación y de emisión para la radiodifusión de televisión digital terrenal". Junio, 2015.
- [2]. "The world in 2011: ICT facts and figures". Tech. rep., International Telecommunication Union (ITU), October, 2011. Fecha de consulta: 02 de diciembre, 2018.
Disponible: <https://www.itu.int/ITU-D/ict/facts/2011/material/ICTFactsFigures2011.pdf>
- [3]. Digital Video Broadcasting. "Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television (DVB-T)". DVB Document A012. June, 2015.
- [4]. Association of Radio Industries and Businesses. "ARIB STD-B31: Transmission system for digital terrestrial television broadcasting". Version 2.2. 18 March, 2014.
- [5]. M. Liu, M. Crussière, J.-F. Hélar, O. Pasquero, "Analysis and Performance Comparison of DVB-T and DTMB Systems for Terrestrial Digital TV", *11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems*. November 19-21, 2008.
- [6]. Advanced Television Systems Committee. "A/53: ATSC Digital Television Standard, Parts 1-6". Washington D.C., August 07, 2013.
- [7]. Diario Oficial de la Federación. "Acuerdo por el que se Adopta el Estándar Tecnológico de Televisión Digital Terrestre y se Establece la Política para la Transición a la Televisión Digital Terrestre en México". Art. 4 y 5, 2 de julio, 2004.
- [8]. Diario Oficial de la Federación. "Política para la Transición Digital Terrestre. México". Art 4. 11 de septiembre, 2014.
- [9]. Asociación Brasileña de Normas Técnicas, NBR 15601 NORMA BRASILEÑA (traducción al español). "Televisión digital terrestre - Sistema de transmisión". 07 Abril, 2008.
- [10]. A. Mattsson, "Single Frequency Networks in DTV", *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 51, No. 4, Dec, 2005.
- [11]. C. Williams, S. McLaughlin, and M. A. Beach, "Robust OFDM timing synchronisation in multipath channels." *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2008, Apr. 21, 2008.
- [12]. K. Yan et al., "Reception quality prediction in a single frequency network for the DTMB standard", *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 58, No. 4, Dec. 2012
- [13]. M. Takada and M. Saito, "Transmission system for ISDB-T", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 94, No. 1, Jan, 2006.

- [14]. X. Wang, Y. Wu, G. Gagnon, B. Tian, K. Yi, and J. Y. Chouinard, "A Hybrid Domain block equalizer for single-carrier modulated systems". IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 54, No.1, Pages: 91-99. March, 2008.
- [15]. Y. Peng, A.G. Klein, and X. Huang. "Hybrid DFSF-BP equalization for ATSC DTV receivers". In Circuits and Systems (ISCAS). IEEE International Symposium on Circuits and System. Melbourne, Australia. June 1-5, 2014.
- [16]. O. Bendov, "Areas of Cochannel Interference and Multipath Created by 8-VSB Modulated Distributed Transmitters in Flat Terrain", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 52, No. 1, March, 2006.
- [17]. E. Guerra. Tesis de Maestría: "Ecuiladores de canal para recepción de ATSC en redes SFN" Facultad de Ingeniería, UNAM. Noviembre, 2017.
- [18]. S. Won Kim et al., "Equalization Digital On-Channel Repeater in the Single Frequency Networks," IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 52, No. 2. June. 2006.
- [19]. Advanced Television Systems Committee, "Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines", Doc. A/74:2010, Apr. 7, 2010.
- [20]. A. Zentella. Tesis de Maestría: "Metodología para la evaluación en campo de redes SFN con ATSC en la Ciudad de México", Facultad de Ingeniería, UNAM. Noviembre, 2017.
- [21]. Y. Valdés. Tesis de Maestría: "Análisis de cobertura de diferentes escenarios para Pruebas de Campo de una red SFN-ATSC en CDMX.", Facultad de Ingeniería, UNAM. Septiembre, 2018.

Capítulo 2. Estado del arte

2.1. Estándares de Televisión Digital Terrestre

La implementación de los servicios de Televisión Digital Terrestre (TDT) permite mejorar sustantivamente la experiencia televisiva en comparación a la televisión analógica. Esto se debe a varios factores, entre ellos el mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico, transmisiones con resoluciones de vídeo de definición estándar (SDTV, del inglés Standard Definition Television) y alta definición (HDTV, del inglés High Definition Television) y audio de elevada calidad. El uso de señales digitales en las transmisiones de televisión también puede ofrecer servicios que involucran cierto grado de interactividad con el telespectador. Algunos sistemas de Televisión Digital permiten, además, la recepción de señales televisivas en condiciones móviles [1-3].

Actualmente existen cuatro estándares de primera generación de transmisión de televisión digital terrestre en el mundo, reconocidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) [4]: DVB-T (del inglés Digital Video Broadcasting-Terrestrial) [5], ISDB-T (del inglés Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial) [6], DTMB (del inglés Digital Terrestrial Television Multimedia Broadcasting) [7], y ATSC (del inglés Advanced Television System Committee) [8]. A partir de estas cuatro normas, también han surgido actualizaciones con nuevas características, encaminadas a mejorar carencias de los estándares mencionados [1-3, 9, 10].

Los principales rasgos de cada uno de los estándares enlistados, se abordan en los subepígrafes siguientes. ATSC es detallado con mayor profundidad, por ser pieza clave en este estudio.

2.1.1. DVB-T

El estándar DVB-T fue desarrollado en Europa [5], con el objetivo de regularizar los trabajos realizados en la radiodifusión de señales de televisión digital. Dicho estándar, definido como norma en 1997, aborda la transmisión terrestre de señales de TV codificadas mediante MPEG-2 (del inglés Moving Picture Experts Group 2). Por tanto, es necesaria una adaptación del flujo de transporte digital codificado a las diferentes características del canal terrestre. Estos requisitos dan como resultado un sistema de transmisión flexible que utiliza una modulación multiportadora, la técnica denominada Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) combinada con una potente codificación de corrección de errores concatenada, con lo que el resultado final se denomina Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Codificada (COFDM, del inglés Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [5].

Para lograr una máxima eficiencia de espectro cuando se utiliza dentro de las bandas UHF (del inglés Ultra High Frequency), se maneja la técnica OFDM con dos opciones en el número de portadoras, tres esquemas de modulación y diferentes intervalos de guarda, permitiendo el

funcionamiento de redes SFN pequeñas y grandes. En cuanto a los requisitos de ancho de banda, la separación de canales preferida es de 8 MHz, aunque también es posible la operación con anchos de bandas de 6 MHz ó 7 MHz [5].

Con el fin de adaptarse diferentes velocidades de transmisión, se pueden seleccionar tres tipos de esquemas de modulación no diferencial: QPSK (del inglés Quadrature Phase-Shift Keying), 16-QAM (del inglés Quadrature Amplitude Modulation) y 64-QAM. Cualquiera de estas variantes de constelaciones de señales se puede combinar con cualquiera de las diferentes cinco tasas de codificación: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8 [11]. El rendimiento de un modo de transmisión específico depende del efecto combinado de la tasa de codificación y el esquema de modulación. No es posible tratar la elección de la constelación de señales por separado de la elección de la tasa de código interno [5].

Para evitar la interferencia de ecos o de señales de transmisores adyacentes en redes SFN, se inserta un intervalo de guarda entre símbolos OFDM contiguos. Dicho intervalo de guarda precede a cada símbolo OFDM. Los ecos relativos a un símbolo precedente deben ser menores que este intervalo de guarda. En caso contrario, los ecos generarán interferencia con el símbolo OFDM posterior y aumentarán la relación de error de bits (BER, del inglés Bit Error Rate). La duración necesaria del intervalo de guarda depende, en gran medida, del entorno de propagación (generador del multitrayecto natural) y la distancia que separa los transmisores que conforman la red SFN (incidencia directa en los retardos entre señales). Para el caso que ocupa este estudio, las redes SFN, la distancia entre sitios transmisores adyacentes establecería la longitud requerida del intervalo de guarda. Los intervalos de guarda ocupados por este estándar son 1/32, 1/16, 1/8 y 1/4 (proporciones respecto a la longitud del intervalo útil) [11].

DVB-T maneja dos modos diferentes en relación con el número de portadoras, 8k y 2k. Teniendo en cuenta canales con ancho de banda igual a 8 MHz, la longitud del intervalo útil es 896 μ s y 224 μ s, para los modos 8k y 2k respectivamente. Debido a la ortogonalidad del sistema, esto corresponde a una distancia de portadora de 1116 Hz (modo 8k) y 4464 Hz (modo 2k). Además, se especifican 6817 portadoras por símbolo OFDM para el modo 8k (6048 útiles, las otras para sincronización y señalización) y 1705 portadoras por símbolo OFDM para el modo 2k (1512 portadoras útiles) [5].

La codificación externa de canal es Reed Solomon (RS) (188/204). El tipo de modulación y codificación utilizada define el umbral de recepción para la relación C/N (del inglés Carrier to Noise Ratio). Este parámetro puede variar desde 3.1 dB a 20.1 dB cuando la razón de errores antes de la decodificación Reed Solomon es 2×10^{-4} , y la razón de errores después del decodificador Reed Solomon es 10^{-11} [4].

2.1.1.1. DVB-T2

En el año 2006 se decide estudiar las opciones para un estándar mejorado de DVB-T, desarrollándose un esquema avanzado de modulación para ser adoptado como un estándar de televisión digital terrestre de segunda generación, denominado DVB-T2 [1].

La primera fase de desarrollo intenta proporcionar una recepción óptima para receptores estacionarios y portátiles mediante el uso de antenas existentes. Por su parte, la segunda y tercera fase se enfoca en el estudio de métodos que permitan la entregar mayores cargas útiles con nuevas antenas, y la versión de la recepción móvil [1].

Este nuevo sistema trae consigo ciertas mejoras, entre ellas se encuentra la pre-corrección de error con código LDPC/BCH (del inglés Low Density Parity Check/Bose-Chaudhuri-Hocquengham), la cual ofrece un excelente funcionamiento ante la presencia de altos niveles de interferencia y ruido, mejorando la robustez de la señal. Soporta un mayor número de portadoras (para modos 16k y 32k), permite modulaciones hasta 256-QAM e intervalos de guarda de hasta 1/128. Además, utiliza una técnica basada en constelaciones rotadas, específicamente RQD (del inglés Rotated Constellation and Q-Delay), fortaleciendo el sistema ante la presencia de canales con desvanecimientos profundos [1].

2.1.2. ISDB-T

Desarrollado por el consorcio ARIB (Association of Radio Industries and Business), ISDB-T constituye el estándar japonés para regular las transmisiones de TDT en ese país [6]. MPEG-2 es utilizado, tanto para el flujo de datos, como para la codificación de video. Con este sistema de transmisión, una o más entradas de flujo de transporte (TS, del inglés Transport Stream), se multiplexan para crear un solo TS. Este TS luego se somete a múltiples pasos de codificación de canales de acuerdo con las intenciones del servicio, y finalmente se envía como una única señal OFDM. ISDB-T también ofrece intercalación de tiempo para proporcionar una potente codificación de canal en recepción móvil, donde las variaciones en la intensidad de campo son inevitables [6].

El espectro de transmisión de ISDB-T consta de 13 bloques (segmentos) OFDM sucesivos, para los servicios de televisión, pero puede ser utilizado un número diferente de segmentos en el caso de otros servicios. Soporta la adopción de tres anchos de banda diferentes, 6 MHz, 7 MHz y 8 MHz. Incluye los siguientes métodos de modulación: DQPSK (del inglés Differential Quadrature Phase Shift Keying), QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Pueden manejarse 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32 como proporciones para determinar los intervalos de guarda correspondientes [12].

Este estándar concierne tres modos de operación, a partir de los cuales varía el número de portadoras, específicamente son 1405 portadoras para modo 1, 2089 portadoras para el modo 2 y 5617 portadoras para el modo 3. El número de portadoras utilizadas varía según el modo, pero la

velocidad de bits de información que puede ser transmitido sigue siendo el mismo en todos los modos. La duración efectiva de símbolo comprende 252 μ s (modo 1), 504 μ s (modo 2) y 1008 μ s (modo 3). Las separaciones disponibles entre las frecuencias portadoras OFDM son aproximadamente 4 kHz, 2 kHz y 1 kHz en los modos 1, 2, y 3, respectivamente. Un código Reed-Solomon abreviado (204,188) se usa para la codificación externa. La codificación interna de canal abarca las razones 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 y 7/8, dependiendo de la variante de modulación empleada. Para este sistema, el umbral de recepción de la relación C/N oscila entre 5 y 23 dB cuando la proporción de errores antes del decodificador Reed Solomon es de 2×10^{-4} y la proporción de errores después del decodificador Reed Solomon es de 10^{-11} [12].

2.1.2.1. ISDB-Tb

La ANATEL (Agencia Nacional de Telecomunicaciones) en Brasil adopta el estándar japonés detallado anteriormente, en el año 2006, modificando algunas de sus especificaciones. Además recibe un nuevo nombre: ISDB-Tb, ISDB-T International o SBTVD (Sistema Brasileiro de Televisão Digital) [2].

Los cambios significativos que tiene el sistema ISDB-Tb, con respecto al estándar japonés original son el uso del códec MPEG-4 (H.264) para la compresión de vídeo estándar, así como la inclusión de aplicaciones para desarrollar la televisión digital interactiva. Conjuntamente, admite una velocidad de 30 cuadros por segundo. Para las transmisiones a dispositivos móviles, ISDB-T está limitado a 15 cuadros por segundo [2].

2.1.3. DTMB

DTMB es un estándar chino para la transmisión de Televisión Digital Terrestre, cuyo desarrollo comenzó en 1994, se publicó en 2006 como GB206002006 y finalmente se convirtió en el estándar nacional chino obligatorio en 2007 [7]. Dos tecnologías, ADTB-T (Advanced Digital Television Broadcasting-Terrestrial) y DMB-T (Digital Multimedia Broadcasting-Terrestrial), sirven como bases para el surgimiento de dicho estándar [7].

Este estándar puede trabajar con tres diferentes anchos de banda, 6 MHz, 7 MHz y 8 MHz; utilizándose principalmente la tercera opción en el territorio chino [9]. Cuba está manejando el proceso de transición de televisión analógica a digital con la adopción de una variación de este estándar, manteniendo el ancho de banda de 6 MHz usado previamente por el sistema análogo NTSC (del inglés National Television System Committee).

DTMB maneja una combinación de modulación de portadora única y modulación multiportadora (3780 portadoras por símbolo OFDM). Admite el manejo de diferentes tipos de constelaciones: 4-QAM, 16-QAM, 32-QAM y 64-QAM. El estándar utiliza la modulación TDS-OFDM (del inglés Time-Domain Synchronous OFDM), contemplando una secuencia pseudoaleatoria como encabezado de

trama de la señal que funciona como intervalo de guarda del bloque OFDM. Esta técnica puede ofrecer una sincronización rápida del sistema, una estimación precisa del canal, una alta eficiencia del espectro y un excelente rendimiento en redes SFN. La codificación de canal empleada representa una ventaja significativa respecto a otros estándares, al utilizar una concatenación de los códigos BCH (externa) y LDPC (interna) [7]. Para la variante de modulación de portadora única, la duración efectiva de símbolo es 0.132 μ s; mientras que cuando se recurre a modulación multiportadora, cada símbolo tiene una duración efectiva de 500 μ s. El umbral de la relación C/N puede variar entre 0.62 y 21.08 dB, dependiendo del tipo de modulación y codificación de canal [4].

2.1.3.1. DTMB-A

DTMB-A (del inglés Digital Terrestrial Television Multimedia Broadcasting-Advanced) ha sido aceptada por la ITU como norma internacional para la transmisión de Televisión Digital Terrestre en julio de 2015, mejorando el estándar DTMB previo. DTMB-A puede proporcionar una sincronización rápida del sistema, una alta sensibilidad de recepción, un mejor rendimiento contra el efecto multitrayecto, una alta eficiencia del espectro y la flexibilidad para la extensión futura [9].

Como su predecesor, emplea TDS-OFDM, como técnica de modulación. Las tramas de datos y control se forman después de ser codificadas y moduladas, donde sus cabeceras se componen de una secuencia PN-MC (del inglés Pseudorandom Noise Multicarrier) en el dominio de la frecuencia. Una vez conformada la supertrama, esta es procesada en banda base y convertida a una señal de RF (Radiofrecuencia) para su transmisión. La codificación ante errores está compuesta, al igual que en DTMB, por la combinación de un código BCH y un LDPC. La longitud del código LDPC puede ser de 61440 bit ó 15360 bit, donde el primer tamaño se utiliza para flujos mayores de bit y el segundo, para bajas tasas binarias [13]. Luego del entrelazado de bit se pueden formar las constelaciones: QPSK, 16-APSK (del inglés Amplitude and Phase-Shift Keying), 64-APSK Y 256-APSK [4].

2.1.4. ATSC

Aunque la radiodifusión terrestre plantea una variedad de problemas debido a los efectos del multitrayecto en la recepción y esto se maneja mejor utilizando modulaciones multiportadora, Estados Unidos de América optó por un método de portadora única bajo el estándar ATSC. Entre los años 1993 a 1995 fue desarrollado un método para la transmisión de señales de Televisión Digital Terrestre [8]. Al igual que en todos los demás métodos de transmisión de televisión digital, la señal de banda base se presenta en un flujo de transporte MPEG-2. La señal de video está codificada en MPEG-2, mientras la señal de audio está codificada en Dolby Digital AC-3 (compresión de audio digital). La señal de entrada a un modulador ATSC, por lo tanto, es un flujo de transporte con video codificado en MPEG-2 e información de audio codificada en Dolby AC-3.

Las señales de video pueden ser señales de SDTV o HDTV. ATSC maneja una tasa neta de transmisión de datos igual a 19.39 Mbps [8, 14].

El modo de modulación utilizado es una banda lateral vestigial codificada con enrejado de ocho niveles (8-VSB, del inglés 8-Level Vestigial Sideband), el cual es un método de una sola portadora basado en la modulación en fase y cuadratura (IQ, del inglés In-phase and Quadrature) usando solo el eje I. Ocho puntos de constelación equidistantes son distribuidos a lo largo del eje I [14]. La señal de banda base de 8VSB tiene ocho niveles de modulación de amplitud discreta [15].

La Figura 2.1 muestra el diagrama de bloques funcional para la generación de señal mediante el estándar ATSC.

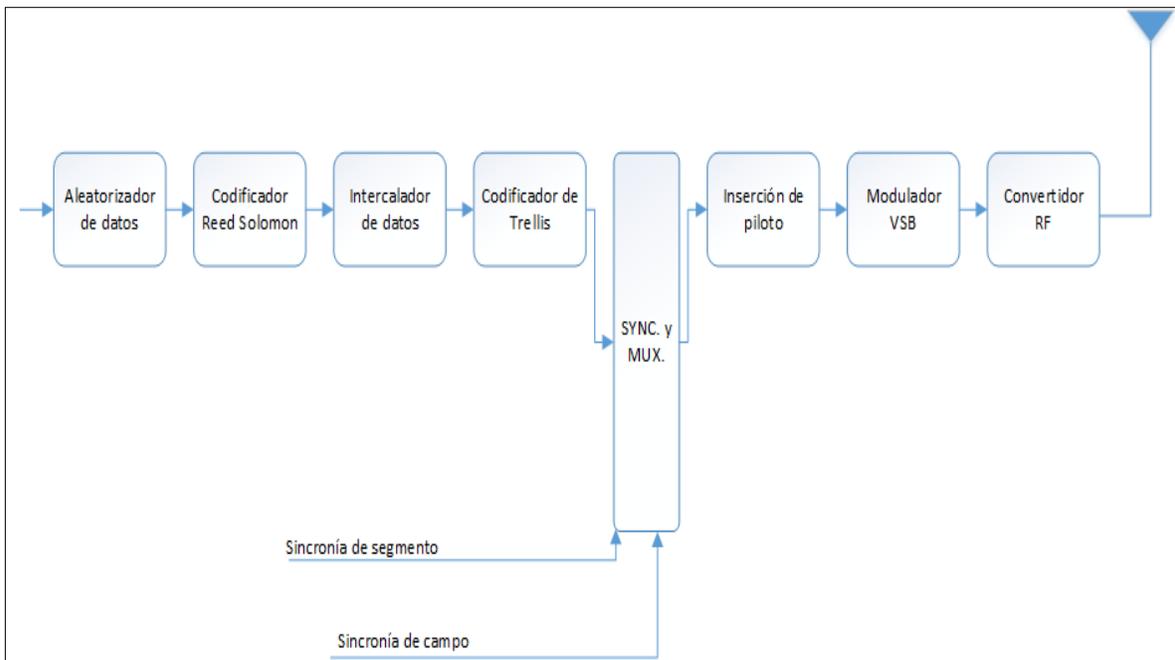


Figura 2.1. Diagrama de bloques correspondiente a la generación de señal en un sistema ATSC [8].

Lo primero a tener en cuenta es la entrada al aleatorizador de datos. Para cada paquete MPEG-2 deben ser identificados su inicio y final, lo cual se logra mediante un byte de sincronía (primer byte de cada paquete de 188 bytes). Finalmente este byte de sincronía es descartado, sustituyéndose luego por el byte de sincronía de segmento [8]. El aleatorizador de datos se encarga de generar una distribución uniforme de la energía correspondiente a la señal en el espectro, además favorece que se tengan las propiedades deseadas por parte del espectro a transmitir (similar al ruido, para emplear la máxima eficiencia del canal de RF). Es posible lograr la aleatorización de los bits que componen un flujo de transporte, con la multiplicación por una secuencia binaria pseudoaleatoria conocida de orden 16 [14, 17]. Una vez obtenido un flujo de datos con estas características, la próxima etapa es el codificador Reed Solomon.

En el codificador Reed Solomon (RS) los bits aleatorizados previamente, son procesados para ofrecer una capacidad de corrección de errores mediante una codificación de bloques Reed Solomon, específicamente el código RS (207, 187, $t = 10$). El decodificador procesa bloques de datos de 187 bytes, agregando 20 bytes de redundancia para producir un bloque de símbolos codificados. Este código tiene la capacidad de corregir hasta 10 bytes con errores por cada grupo de 207, en caso de que un paquete contenga más bytes con errores no podrá ser decodificado por el receptor [8].

El bloque intercalador de datos tiene como objetivo proteger la señal de la ocurrencia de errores en ráfaga. Un error en ráfaga afecta una serie de bits consecutivos, mientras que errores aleatorios solo afectan a bits individuales en distintas posiciones de la secuencia del mensaje. Este intercalador es convolucional de longitud 52 donde solo se entrelazan los bytes de datos, incluyendo los bytes de redundancia insertados por la codificación RS [17]. Estos nuevos paquetes resultantes del proceso de intercalación tienen la misma duración que los paquetes originales (207 bytes), y constituyen la entrada al codificador de Trellis.

La cuarta etapa de este sistema es el codificador de Trellis que contribuye a la corrección progresiva de errores, brindando una segunda etapa de protección. Se usa una codificación Trellis de tasa $2/3$, donde se incluye un bit de redundancia por cada 2 bits de datos. Estos códigos de 3 bits son transmitidos al aire como símbolos de 8 niveles del formato de modulación 8-VSB [15]. Este codificador rastrea el flujo de bits a medida que transcurre el tiempo, adelanta doce símbolos a la vez para establecer la próxima transición de símbolo, por lo cual, en realidad operan 12 codificadores de Trellis de forma paralela. En el extremo receptor, es el decodificador de Viterbi quien se encarga de revertir este proceso [18].

Posteriormente el multiplexor y sincronizador de datos se encarga de la inserción de los símbolos pilotos necesarios para recuperar y mantener la sincronía de los datos en la etapa de recepción. En este bloque se producen intervalos definidos y patrones de sincronización especiales que son transmitidos al receptor, utilizándose para la sincronía de campo y segmento. El multiplexor permite la combinación de los datos proveniente de las etapas previas de corrección de errores, junto con la sincronización de campo y segmento producidas [17].

El sexto bloque, denominado inserción de piloto, agrega a la señal un pequeño piloto en la frecuencia de portadora suprimida (nominalmente 309 kHz desde el borde de la banda inferior) y en fase con la portadora suprimida. Esto equivale a una componente directa con un nivel de +1.25 añadido a cada símbolo de los datos de banda base digital más la señal de sincronización (con niveles de ± 1 , ± 3 , ± 5 , ± 7 antes de la adición del piloto). La potencia resultante del piloto es aproximadamente 11.3 dB por debajo de la potencia de señal de datos promedio [8].

El modulador VSB utiliza la señal de datos compuesta codificada en enrejado de 8 niveles de 10.76 Msymbols/s (piloto y sincronización agregados). Nominalmente, el roll-off en el transmisor tendrá

la respuesta de un filtro de coseno de raíz lineal en fase lineal con α (factor de roll-off) igual a 0.1152 [11]. La señal de salida produce un espectro de doble banda lateral con demasiada redundancia de información, lo cual sobrepasa el ancho de banda (6 MHz) permitido para transmisiones de televisión digital bajo este estándar. Para solucionar este inconveniente se utiliza un filtro de banda lateral vestigial [15].

Por último, antes de efectuar la transmisión, se convierte la señal de frecuencia intermedia de 8-VSB a la correspondiente frecuencia de canal en la banda VHF (del inglés Very High Frequency) o UHF. Esta etapa, nombrada convertidor de RF, puede requerir el uso de filtros, osciladores o mezcladores [17].

Para llevar a cabo la recepción, en el otro extremo del canal, la señal de RF es demodulada aplicando de forma inversa los procedimientos detallados anteriormente.

2.1.4.1. ATSC M/H

Esta norma describe el sistema de televisión digital móvil ATSC, conocido comúnmente como el sistema ATSC M/H (del inglés Mobile/Handheld) [3]. La intención es el desarrollo de una versión portátil de ATSC, facilitando la recepción móvil y portátil al emplear nuevas tecnologías. Lo mejor es la compatibilidad de este nuevo sistema con versiones anteriores, por lo cual no interfiere con el uso de los receptores ATSC ya existentes. En el flujo de datos MPEG-4 suministrado a un modulador ATSC M/H, los servicios móviles se ejecutan en un PID (del inglés Packet Identifier) que no se señala a través de las tablas PSI (del inglés Program Specific Information), es el llamado PID sin referencia. Este PID es conocido por el modulador ATSC M/H que inserta el contenido en la trama ATSC de una forma especial. Los servicios ATSC 1.0 convencionales (primera versión del estándar) y los servicios móviles comparten la misma tasa neta de transmisión de datos (19.39 Mbps), compartiendo el uso de la modulación 8-VSB. El flujo de transporte MPEG-2 es editado mediante un multiplexor ATSC M/H, encargado de la inserción del contenido de televisión digital móvil en el flujo de datos. Estos servicios móviles de televisión digital son codificados con MPEG-4 AVC (del inglés Advanced Video Coding) y MPEG-4 AAC (del inglés Advanced Audio Coding), para video y audio respectivamente. Con el fin de lograr la compatibilidad deseada, los contenidos están integrados en los protocolos UDP (del inglés User Datagram Protocol) e IP (del inglés Internet Protocol). Tareas principales como la protección adicional contra errores, la inserción de secuencias de entrenamiento adicionales, entre otras; también son llevadas a cabo en el multiplexor ATSC M/H. Específicamente, la protección adicional contra errores consiste en un código RS-CRC (del inglés Reed Solomon-Cyclic Redundancy Check) y una codificación convolucional concatenada, denominada SCCC (del inglés Serial Concatenated Convolutional Coder) [3].

2.1.4.2. ATSC 3.0

Con una mayor capacidad para ofrecer servicios de ultra alta definición, recepción robusta en una amplia gama de dispositivos, eficiencia mejorada, transporte IP, alertas avanzadas de emergencia, funciones de personalización y capacidad interactiva, el estándar ATSC 3.0 ofrece mucha más capacidad que las generaciones anteriores de transmisiones terrestres [10].

Esta nueva versión trae consigo diferencias significativas con su predecesora. Es importante mencionar que el estándar ATSC 3.0 no es compatible con la primera versión de ATSC ni con ATSC M/H. La capa física ATSC 3.0 se construye sobre la base de la modulación OFDM, con poderosos mecanismos de corrección de errores que incluyen: LDPC con dos longitudes de código (16200 y 64800 bits) y doce tasas de codificación (desde 2/15 hasta 13/15); compatibles con entornos de recepción fija y móvil [19]. También hay soporte para una amplia gama de tamaños de constelaciones. Este estándar maneja tres modos de multiplexión múltiple: tiempo (TDM, del inglés Time Division Multiplexing), frecuencia (FDM, del inglés Frequency Division Multiplexing) y potencia (LDM, del inglés Layered Division Multiplexing); que se pueden combinar, junto con tres tipos de subtramas: SISO (del inglés Single-Input Single-Output), MISO (del inglés Multiple-Input Single-Output) y MIMO (del inglés Multiple-Input Multiple-Output). La capa física admite longitudes de intervalo de guarda seleccionables (prefijos cíclicos) desde 27 μ s hasta 700 μ s, mientras existen 3 tamaños para la transformada rápida de Fourier, FFT (del inglés Fast Fourier Transform) de 8K, 16K y 32K, que ofrecen una fuerte protección contra ecos y la presencia del efecto Doppler en un canal de 6 MHz [20]. El rendimiento de estimación del canal se puede controlar con 16 patrones piloto dispersos, 5 potencias de refuerzo diferentes y un patrón piloto continuo. ATSC 3.0 permite la decodificación paralela de hasta cuatro PLP (del inglés Physical Layer Pipe) por servicio para permitir que componentes separados, como video, audio y metadatos, se envíen con diferentes configuraciones de robustez. PLP hace referencia a canales lógicos que llevan uno o más servicios, con un esquema de modulación y una robustez particular para cada "tubería" individual. El número máximo de PLP en un canal de RF (6, 7 u 8 MHz) es 64. Esta nueva versión de ATSC se posiciona como una tecnología de transmisión terrestre de referencia en todo el mundo, debido a su rendimiento y flexibilidad sin precedentes [21].

2.2. Redes en Frecuencia Única en Televisión Digital Terrestre

Las Redes en Frecuencia Única o SFN constituyen un método de transmisión de señales de radiofrecuencia, en el cual se emplean dos o más transmisores operando ambos en un solo canal; es decir, haciendo uso de una misma frecuencia [22]. Para garantizar un correcto funcionamiento de este tipo de redes, el envío de contenidos por parte de cada equipo transmisor debe estar sincronizado en tiempo y frecuencia [23].

En los sistemas tradicionales de un solo transmisor, generalmente resulta complicado aumentar la cobertura generada. En los casos en los que ya se ha alcanzado el máximo permitido de Potencia

Radiada Aparente (PRA), a menudo es altamente costoso o totalmente imposible proceder sin usar transmisores complementarios en otros canales. Una SFN puede ofrecer una opción atractiva, extendiendo fácilmente la cobertura con la simple adición de transmisores adicionales en varios sitios a lo largo del área de cobertura deseada. Además, este tipo de redes son más eficientes en el uso del espectro radioeléctrico.

En contraste, los receptores reciben la misma señal proveniente de varios transmisores, lo cual puede provocar efectos no deseados relativos al multitrayecto de la onda. Algunos receptores son más adecuados para un entorno SFN que otros [24].

En diversos lugares del mundo, se ha puesto en práctica esta estrategia con sistemas digitales de radio y televisión, basados en otros estándares diferentes a ATSC, en los cuales la principal peculiaridad es la aplicación de la técnica de modulación OFDM. Este tipo de modulación se caracteriza por emplear un intervalo de guarda, lo cual permite minimizar (y en ocasiones anular) la interferencia entre señales provenientes de diferentes transmisores [5].

La presencia de multitrayecto en sistemas de comunicaciones digitales puede traer consigo Interferencia Inter-Simbólica (ISI), provocando fallos en la recepción de la señal. Si el tiempo de símbolo es mucho mayor al retardo de multitrayecto, se reduce la ISI. Para el caso en que la duración del intervalo de guarda (prefijo cíclico) sea superior a los retardos relativos al multitrayecto, es posible anular completamente la ISI [25].

Por su parte, la técnica de modulación 8-VSB no comprende un intervalo de guarda, de ahí que la posibilidad del correcto funcionamiento de una red SFN recaerá principalmente en las capacidades del ecualizador de canal del receptor, encaminadas a mejorar la tolerancia correspondiente a la relación de tiempo y amplitud entre la señal recibida directamente desde un transmisor, y un eco (réplica de dicha señal original) [26, 27].

2.2.1. Desplazamiento de frecuencia

Cualquier desviación de frecuencia entre transmisores se refleja como un desplazamiento Doppler en la señal recibida. La cantidad de desplazamiento Doppler que se puede manejar varía, dependiendo de los sistemas de transmisores y ecualizadores. Todos los equipos transmisores que conforman una red SFN deben estar sincronizados entre sí.

Este es un requisito difícil y la única solución práctica es mediante el uso de un receptor GPS o alguna otra referencia de frecuencia distribuida. Dado que una referencia de tiempo es altamente deseable e incluso podría ser necesaria, parece que el uso de un receptor GPS para proporcionar tanto referencias de tiempo como de frecuencia es lo ideal. Suponiendo que los transmisores funcionen correctamente sin errores de frecuencia significativos, no debe existir ninguna razón

para sospechar que una arquitectura de red SFN debería presentar mayor desplazamiento Doppler que un sistema tradicional [23].

2.2.2. Efecto de las antenas receptoras

Si las señales retrasadas que recibe un receptor están más allá de las capacidades del ecualizador, una antena de recepción direccional puede ayudar. Si la antena puede atenuar estas señales entre 10 y 15 dB, el problema debería desaparecer [24]. Para que esto funcione, las señales deben provenir de diferentes direcciones, un criterio que no siempre se cumple. También es deseable proporcionar cobertura para los espectadores que tienen una antena esencialmente omnidireccional, sobre todo para recepción en interiores, y recepción móvil y portátil. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en áreas de una red SFN donde la recepción con una antena omnidireccional no es posible, la recepción con una antena direccional a menudo sí lo es. Dispositivos receptores más avanzados que usan arreglos de antenas (2 o más dipolos), intentan poner nulos en la dirección de las interferencias y la ganancia máxima en la dirección de la señal [24]. Tales antenas disminuirían la carga sobre el ecualizador, ayudando a la recepción en general y en los sistemas SFN en particular.

2.2.3. Aplicaciones de las redes SFN

Existen dos técnicas principales para ampliar la cobertura de un sistema de Televisión Digital Terrestre (TDT) con la implementación de redes SFN: los Repetidores Digitales en Canal (DOCR, del inglés Digital On-Channel Repeater) y los Transmisores Distribuidos (DTxT, del inglés Distributed Transmitter). Estos enfoques pretenden ser complementarios entre sí y se pueden utilizar juntos o individualmente como herramientas para el diseñador de sistemas de transmisión de TDT [28].

La aplicación de los Repetidores Digitales en Canal (DOCRs) en TDT se ha demostrado con éxito para dos condiciones de cobertura específicas. Estas condiciones incluyen el llenado de zonas carentes de cobertura debido a la presencia de estructuras o elevaciones del terreno, así como la continuación de la cobertura en el horizonte. Un DOCR recibe y repite la señal en la misma frecuencia de canal, haciendo un bucle de retroalimentación con la posibilidad de inestabilidad y auto-oscilación. Para evitar la inestabilidad, el aislamiento entre las antenas de entrada y salida del DOCR debe ser alto y su ganancia directa debe ser baja [29]. La retransmisión de la señal en el mismo canal de frecuencia introduce cierto retardo. Esta variante constituye el método más sencillo para implementar una SFN, por lo cual está limitado en potencia y su costo es bajo.

Por su parte, la aplicación de Transmisores Distribuidos (DTxTs) es apropiada cuando es deseable mantener niveles de señal más altos y más uniformes en toda el área de cobertura. Esta técnica está diseñada para utilizar varios transmisores con el fin de cubrir un área de servicio determinada, sin que necesariamente se requiera la inclusión de una estación de alta potencia convencional. El uso de DTxTs permite que los niveles de señal en un área de servicio sean más

altos de lo que serían desde un solo transmisor, y también permite un mejor control de la interferencia a las estaciones vecinas. Este tipo de sistemas también facilita la reducción de las alturas de las antenas de transmisión, además de liberar la exigencia de altas potencias radiadas por los sitios transmisores. Si bien un DOCR es particularmente efectivo donde hay un bloqueo total de la señal del transmisor principal, el DTxT puede operar bajo condiciones de bloqueo parcial de la señal [22, 28].

Como consecuencia de la necesidad de evitar la retroalimentación alrededor del amplificador, los DOCRs tienen una potencia limitada de unos pocos cientos o quizás miles de watts de PRA. Los DTxTs no tienen tales limitaciones de potencia y no sufre degradación de la señal debido a retroalimentación [22].

Es importante mencionar la existencia de una tercera técnica que permite extender la cobertura en sistemas de transmisión digitales, conocida como Traductores Distribuidos (DTxR, del inglés Distributed Translator). Los DTxRs reciben señales de TDT provenientes de múltiples estaciones desde el aire y las retransmiten a través de otro canal de frecuencia, con todos los traductores sincronizados. Al utilizar un canal de RF diferente para retransmitir la señal, este tipo de configuración no es considerada una red SFN [30].

2.3. Antecedentes de pruebas de campo bajo el estándar ATSC

Para el desarrollo de pruebas de campo pueden trazarse ciertos planes, en dependencia de las metas concretas y requisitos de determinado organismo. Entre los objetivos perseguidos durante campañas de medidas en campo, se pueden mencionar los siguientes: identificar variables del entorno, evaluar un conjunto de parámetros de medición ya definidos, recopilar datos útiles para mejorar la calidad de funcionamiento de los sistemas de TDT, evaluar la recepción en dichos sistemas, así como realizar comparaciones entre sistemas, entornos y generaciones de componentes [31].

Es recomendable ejecutar una amplia variedad de mediciones, encaminadas a la disposición de resultados justificados estadísticamente, además de documentar los datos recopilados. Durante la realización de pruebas de campo, la calidad de los sistemas radiodifusores en cuestión puede ser evaluada en diversos escenarios de transmisión y ambientes de recepción: condiciones urbanas, suburbanas y rurales. Para la toma de medidas existen otra serie de variantes como: recepción en interiores y tejados, y recepción basada en el uso de receptores portátiles y móviles [32].

2.3.1. Mediciones de campo realizadas en México

2.3.1.1. Pruebas en la región Puebla - Tlaxcala

La realización de una campaña de pruebas, llevada a cabo en 2015, involucra sitios transmisores desplegados por TV Azteca en la zona comprendida por los estados de Puebla y Tlaxcala. Estos sitios transmiten dos programaciones independientes, referidas a los canales Azteca 13 y Azteca 7. Para la conformación de dos redes SFN, fueron otorgados dos canales para la radiodifusión de señales en cada una de las plantas transmisoras: el canal 24 (530 a 536 MHz) para la transmisión de Azteca 13 y el canal 27 (548 a 554 MHz) para transmisiones correspondientes a Azteca 7 [33].

La potencia de salida correspondiente al sitio transmisor ubicado en Puebla es 3.6 kW, tanto para el canal 24, como el canal 27. En el caso de la planta emisora ubicada en Tlaxcala, se maneja una potencia de 2.8 kW para ambos canales. Ambos transmisores se encuentran separados por una distancia de 30 km. Durante la realización de las pruebas, una camioneta fue utilizada para la transportación de los instrumentos de medición. En todos los casos, las mediciones se desarrollaron bajo condiciones de recepción fija, no se efectuaron medidas con el vehículo en movimiento.

Los principales objetivos de esta etapa de pruebas recaen en evaluar la calidad de recepción de las señales de audio y video provenientes de ambos sitios transmisores, en 9 puntos de medida seleccionados dentro del área de cobertura SFN generada; además de estudiar la respuesta al multitrayecto obtenida en cada uno de estas ubicaciones establecidas [33].

Los resultados de estas mediciones demostraron un correcto funcionamiento de esta Red en Frecuencia Única en las zonas más densamente pobladas de la región, obteniéndose buenos registros de calidad en cuanto a las señales de audio y video recibidas.

2.3.2. Mediciones de campo realizadas en territorio extranjero

2.3.2.1. Primeras pruebas en Estados Unidos de América

En 1999, se habían desarrollado las primeras campañas de mediciones de campo para bajo el estándar ATSC en ciudades como Washington, Raleigh, Chicago, Seattle, Nueva York, San Jose, Cincinnati, Charlotte y Dallas. Estas tempranas etapas de pruebas tenían como objetivo elaborar una abundante base de datos que permita refinar los modelos de propagación utilizados para la predicción de intensidad de campo durante transmisiones de TDT, así como estudiar el rendimiento de los sistemas de transmisiones digitales VSB (del inglés Vestigial Side Band) en una variedad de terrenos (entornos urbanos, suburbanos y rurales). Por último, se deseaba analizar la disponibilidad del servicio de TDT y el rendimiento del sistema en las bandas de frecuencia asignadas (VHF bajo, VHF alto y UHF) [34].

La metodología para la realización de esta serie de pruebas se adoptó a partir de antiguas mediciones efectuadas con el pasado estándar analógico NTSC. Se manejó una altura de 30 pies sobre el nivel del suelo para antenas receptoras, mientras que los sitios de prueba fueron

distribuidos siguiendo configuraciones en radiales, arcos y cuadrículas. Con la intención de analizar la recepción y disponibilidad de las señal digitales en cada sitio de prueba, dichas señales fueron medidas y visualizadas durante 10 minutos para evaluar un umbral de visibilidad (TOV, del inglés Threshold of Visibility). Este intervalo de tiempo (10 minutos) fue seleccionado para observar cualquier desvanecimiento de las señales a corto plazo. A lo largo de estas 9 ciudades en Estados Unidos, fueron visitados un total de 2682 sitios en exteriores; además de 242 sitios en interiores en 5 ciudades. La mayoría de estas medidas fueron realizadas para canales de UHF. Los resultados obtenidos permitieron el diseño de receptores de mejor calidad, al proveer información encaminada al desarrollo de los circuitos y sistemas en cuestión. También se concluyó que el uso de antenas transmisoras más altas sería una mejor opción para facilitar la recepción de la señal, comparado con un aumento de la potencia de transmisión [34].

2.3.2.2. Pruebas en la ciudad de Nueva York

El 22 de marzo de 2007, la NTIA (del inglés National Telecommunications and Information Administration) aprueba la solicitud de MTVA (del inglés Metropolitan Television Alliance) encaminada a una subvención para apoyar el diseño y despliegue de un sistema de transmisión de televisión digital temporal para sus estaciones miembros en la ciudad de Nueva York. Dicha solicitud de subvención contemplaba el despliegue de un Sistema de Transmisión Distribuida (DTS, del inglés Distributed Transmission System) en el área de Brooklyn, tratándose de un prototipo a pequeña escala de un DTS, específicamente 5 transmisores, utilizando los canales de UHF números 33 y 65, además del canal de VHF número 12. Para la radiodifusión de señales relativas a los canales 12 y 33, se utilizaron dos transmisores en cada caso (principal y secundario), mientras que el canal 65 no contaba con transmisor principal [35].

Se decide desarrollar un plan para ejecutar una serie de pruebas de campo, cuyo objetivo recae en utilizar este pequeño prototipo de DTS en Brooklyn para determinar la capacidad y la viabilidad de un DTS a gran escala en la ciudad de Nueva York, así como evaluar la cobertura y la calidad del servicio durante la recepción de señales provenientes de los canales 12 y 33, antes y después de poner en práctica la red SFN. También se pretende determinar la cobertura y rendimiento del servicio de un DTS en el canal 65.

El transmisor principal correspondiente al canal 33, irradia con una PRA promedio de 137 kW, mientras que el transmisor secundario maneja una PRA de 1kW. En el caso del canal 12 se irradian 1 kW y 100 W de PRA promedio, en sus transmisores principal y secundario respectivamente. Por último, la señal referente al canal 65 se transmite con PRA promedio de 1 kW. Las antenas transmisoras utilizadas fueron, en su mayoría omnidireccionales, a excepción de la empleada para irradiar el canal 12; donde se recurre a una antena direccional temporal dirigida hacia el área de interés (Brooklyn). El despliegue de puntos de medidas usa una configuración de rejilla que abarca 132 sitios en total, de los cuales 109 son en exteriores y 23 en interiores. Para las mediciones en

exteriores se emplean antenas log-periodicas calibradas (bandas VHF y UHF) a 15 y 30 pies de altura sobre el suelo, orientándose dichos elementos receptores al lugar donde se obtuvo la señal con mayor intensidad. Para las medidas en interiores se empleó un dipolo calibrado para ambas bandas [35].

Esta etapa de pruebas arrojó una serie de resultados. A continuación se exponen algunos valores obtenidos para recepción en exteriores.

- Canal 12: la intensidad de campo promedio recibida con antena ubicada a 30 pies sobre el nivel del suelo se encontró en un rango de 59 dB μ V/m (DTS deshabilitado) a 70 dB μ V/m (DTS habilitado); decayendo estos valores 2.5 dB para antenas con altura de 15 pies.
- Canal 33: el rango de valores para la intensidad de campo varió desde 73 dB μ V/m (DTS deshabilitado) a 80 dB μ V/m (DTS habilitado) para antenas con altura de 30 pies. Para antenas ubicadas a 15 pies, los valores anteriores decrecen en 3 dB.
- Canal 65: se obtuvo una fuerte intensidad de campo promedio de 76 dB μ V/m para antenas de 30 pies de altura con el DTS habilitado, 2 dB por debajo para antenas elevadas a 15 pies.

En todos estos casos se lograron valores de C/N superiores al umbral para buena recepción (14.9 dB).

Los 23 sitios de pruebas tenidos en cuenta durante las medidas en interiores (canal 33), arrojaron una intensidad de campo promedio de 69 dB μ V/m con el DTS deshabilitado, además de un valor de C/N igual a 38 dB. Los canales 12 y 65 no fueron analizados en interiores, con el DTS deshabilitado. Con el DTS habilitado, las medidas mostraron mejoras considerables en los parámetros anteriores [35].

2.3.2.3. Pruebas en la ciudad de Ottawa

Otra campaña de pruebas de campo, empleando una red SFN bajo una configuración de Repetidores Digitales en Canal (DOCRs), fue desarrollada en la ciudad de Ottawa. Canadá es otro de los países que optó por la adopción del estándar ATSC para poner fin a sus transmisiones de televisión analógicas. Se tuvieron en cuenta dos fases para la realización de las mediciones. En primera instancia la red SFN se encontraba deshabilitada, operando solo el transmisor principal. En un segundo momento fueron repetidas las mismas medidas que en la etapa anterior, en este caso bajo la operación del transmisor principal y el DOCR. Dos factores importantes que afectan la calidad de la señal de salida en un DOCR son el grado de acoplamiento entre sus antenas transmisoras y receptoras, y su ganancia directa. Es necesario mantener ambos factores lo más bajos posibles [29].

Para la transmisión del DOCR se utilizó una antena log periódica con una ganancia de 7.5 dBi, irradiando una PRA de 6.85 W; mientras que una antena yagi con ganancia igual a 12 dBd fue empleada para recepción. Ambas antenas se elevaron 15 metros sobre el nivel del suelo. Para implementar este sistema fue designado el canal número 67. LA PRA manejada por el transmisor principal fue de 30 kW, usando una antena emisora omnidireccional ubicada a 215 metros sobre el nivel del suelo. En total se recorrieron 9 puntos de medida, 6 al aire libre y 3 en interiores. La recepción al aire libre fue evaluada con una antena direccional (ganancia de 7.5 dBi), en interiores se usó una antena pasiva de carácter comercial disponible para el sistema NTSC.

El objetivo principal de estas pruebas era evaluar la cobertura generada por estos dos tipos de configuraciones. Una vez concluidas las mediciones, se corroboró que la utilización de antenas receptoras direccionales orientadas a la dirección de mayor intensidad, favorece la discriminación entre las señales recibidas en cada punto. Cuando la dirección de transmisión del DOCR estaba lejos del transmisor principal, el grado de deterioro de la señal fue mínimo. Lo contrario ocurría si el DOCR irradiaba hacia el transmisor, reduciéndose considerablemente la recepción en algunos puntos, y existiendo la posibilidad de generar zonas donde la recepción fuese nula [29].

Bibliografía

- [1]. Digital Video Broadcasting. "Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)". ETSI TR 102 831 V1.2.1. August, 2012
- [2]. Asociación Brasileña de Normas Técnicas, NBR 15601 NORMA BRASILEÑA (traducción al español). "Televisión digital terrestre — Sistema de transmisión". 07 Abril, 2008.
- [3]. Advanced Television Systems Committee. "A/153: ATSC Mobile DTV Standard, Parts 1-10". Washington, D.C. 11 March, 2013.
- [4]. Sector de Radiocomunicaciones de la UIT. Recomendación UIT-R BT. 1306-7. "Métodos de corrección de errores, de configuración de tramas de datos, de modulación y de emisión para la radiodifusión de televisión digital terrenal". Junio, 2015.
- [5]. Digital Video Broadcasting. "Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television (DVB-T)". DVB Document A012. June, 2015.
- [6]. Association of Radio Industries and Businesses. "ARIB STD-B31: Transmission system for digital terrestrial television broadcasting". Version 2.2. 18 March, 2014.
- [7]. M. Liu, M. Crussière, J.-F. Héland, O. Pasquero, "Analysis and Performance Comparison of DVB-T and DTMB Systems for Terrestrial Digital TV", 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems. November 19-21, 2008.
- [8]. Advanced Television Systems Committee. "A/53: ATSC Digital Television Standard, Parts 1-6". Washington, D.C. 07 August, 2013.
- [9]. J. Song and C. Zhang. "Technical Review on DTMB-Advanced (DTMB-A) Standard". 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). IEEE, 2016.
- [10]. Alexandria Va. "ATSC 3.0: Where we stand". Fecha de consulta: 05 de marzo, 2019. Disponible: <http://atsc.org/newsletter/atsc-3-0-where-we-stand/#.WTncvMa1vIU>.
- [11]. Digital Video Broadcasting. "Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects. ETSI TR 101 190 V1.3.2". May, 2011.
- [12]. Association of Radio Industries and Businesses. "ARIB STD-B32: Video coding, audio coding, and multiplexing specifications for digital broadcasting". Versión 2.1. 14 March, 2007.
- [13]. N. O. Ojeda, O. E. Rodríguez. "Comparación entre los estándares de transmisión de segunda generación de televisión digital terrestre: DTMB-A y DVB-T2". Revista Telemática. Vol. 15 No.3. Revista digital de las tecnologías de la informática y las telecomunicaciones. Septiembre-diciembre, 2016.

- [14]. Fisher, W. "Digital Video and Audio Broadcasting Technology: A Practical Engineering Guide", Springer, ISBN 978-3-540-76358-1, Germany, 2008.
- [15]. O. Bendov, "Areas of Cochannel Interference and Multipath Created by 8-VSB Modulated Distributed Transmitters in Flat Terrain", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 52, No. 1, March, 2006.
- [16]. Advanced Television Systems Committee. "A/54: Recommended Practice: Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard, including Corrigendum No. 1". 04 December, 2003.
- [17]. W. Bretl et al., "ATSC RF, Modulation and Transmission". Proceeding of the IEEE, Vol. 94, No. 1. January, 2006.
- [18]. E. Guerra. Tesis de Maestría: "Ecuiladores de canal para recepción de ATSC en redes SFN" Facultad de Ingeniería, UNAM. Noviembre, 2017.
- [19]. K. J. Kim et al, "Low-Density Parity-Check Codes for ATSC 3.0" IEEE Transactions on broadcasting, vol. 62, no. 1, 2016.
- [20]. Advanced Television Systems Committee, "ATSC Standard: ATSC 3.0 System (A/300)". Washington, D.C., EUA: ATSC, 2017.
- [21]. L. Fay et al., "An overview of the ATSC 3.0 physical layer specification". IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 62, No. 1, 2016.
- [22]. Advanced Television Systems Committee, "A/110: ATSC Standard for Transmitter Synchronization". Washington, D.C. April 08, 2011.
- [23]. S. W. Choi and H. J. Hong. "A study on the interference in the digital broadcasting area using same frequency", 8th International Conference on ITS Telecommunications in Phuket, Thailand. October, 2008.
- [24]. A. Mattsson, "Single Frequency Networks in DTV", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 51, No. 4, Dec, 2005.
- [25]. J.H. Stott, "The how and why of COFDM", EBU Technical Review, 1998.
- [26] X. Wang et al., "A Hybrid Domain block equalizer for single-carrier modulated systems". IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 54, No.1, Pages: 91-99. March, 2008.
- [27] Y. Peng, A.G. Klein, and X. Huang. "Hybrid DFSF-BP equalization for ATSC DTV receivers". In Circuits and Systems (ISCAS). IEEE International Symposium on Circuits and System. Australia. June 1-5, 2014.
- [28]. K. Salehian et al., "On-channel repeater for digital television broadcasting service". IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 48, No. 2, pages: 97-102. June, 2002.

- [29]. Advanced Television Systems Committee. ATSC A/111: ATSC Recommended Practice: Design of Multiple Transmitter Networks. Part 1, Washington, D.C., September 18, 2009.
- [30]. Y.W. Suh et al., "A novel data synchronization method for ATSC distributed translator". IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. September, 2009.
- [31]. Advanced Television Systems Committee. "A/75: Recommended Practice: Developing DTV Field Test Plans". Washington, D.C. 26 Julio, 2001.
- [32]. Informe ITU-R BT-2035-2. "Directrices y técnicas para la evaluación de sistemas de radiodifusión de televisión digital terrenal incluida la determinación de sus zonas de cobertura". International Telecommunication Union. Noviembre, 2008.
- [33]. D. Esquivel. Tesis de Licenciatura: "Canales de propagación para redes SFN" .Facultad de Ingeniería, UNAM. Marzo, 2016.
- [34]. G. Sgrignoli, Zenith Electronics Corporation. "Preliminary DTV field test results and their effects on VSB receiver design". IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 45, No. 3, August, 1999.
- [35]. Meintel, Sgrignoli, and LLC Wallace. "A Report to The Metropolitan Television Alliance Regarding Field Test Results for the New York City Prototype Distributed Transmission System. MTVA DTx Field Test Report – Final 06 27 08.doc". MSW (Meintel, Sgrignoli and Wallece). June, 2008.

Capítulo 3. Estudio del efecto del patrón de radiación de las antenas receptoras en la cobertura de la red SFN

Como se menciona en el capítulo anterior, México adoptó el estándar ATSC, el cual utiliza modulación 8-VSB [1]. Esta modulación es sensible frente al multitrayecto, al no contar con un intervalo de guarda, lo cual limita su uso en redes SFN [2].

La aprobación del estándar mencionado, la reducción cada vez mayor de las frecuencias destinadas a servicios de televisión, y la necesidad de contar con comunicaciones que ofrezcan una alta eficiencia espectral, constituyen el incentivo para buscar soluciones en la implementación de redes SFN.

El estudio descrito en este capítulo está encaminado a evaluar como varía la cobertura de una red SFN en la Ciudad de México (CDMX), al utilizar diferentes configuraciones en el patrón de radiación de las antenas receptoras de los usuarios finales. El objetivo de esta tarea recae en analizar el impacto del diagrama de radiación al momento de discriminar señales provenientes de los nodos de la red SFN y su influencia sobre la cobertura generada, identificando de los casos propuestos, aquel más eficiente en cuanto al área de servicio proporcionada. El estudio se realiza para una configuración de red de transmisión real, pero las coberturas obtenidas se estiman con herramientas software basadas en el método de estimación de campo Longley-Rice [3].

3.1. Descripción del estudio

3.1.1. Receptor de referencia

La implementación de una red SFN provoca que los dispositivos receptores reciban dos o más señales iguales en diferentes momentos. Efecto que, desde el punto de vista del receptor, se manifiesta como multitrayecto. Este fenómeno producido por la red SFN se suele denominar multitrayecto artificial. A este multitrayecto artificial se le añade el multitrayecto natural provocado por el entorno de propagación, debido a la presencia de edificios, montañas, etc. [4].

Este fenómeno puede afectar la correcta demodulación de la señal, sobre todo bajo el uso del estándar ATSC y la vulnerabilidad de su modulación 8-VSB ante estas situaciones.

Principalmente, la correcta recepción de la señal ATSC con multitrayecto recae en la resistencia del ecualizador de canal de cada equipo receptor para enfrentar el multitrayecto [5], o lo que es lo mismo, diferentes receptores van a tener diferentes capacidades de recepción.

Al respecto, ATSC publicó la Práctica Recomendada A/74 [6] que establece una curva que marca la referencia mínima recomendada de la capacidad de recepción de los receptores ante un

multitrayecto básico, consistente en la presencia de dos señales estáticas o cuasi-estáticas (cada una de las cuales provendría de un transmisor de una red SFN de dos transmisores). La señal que llega al receptor con mayor potencia, se le denomina señal directa o principal (D), mientras que la otra señal que arriba con menor potencia, y desfasada en tiempo, se le denomina señal eco (E). Se distinguen dos situaciones, se considera que hay un pre-eco cuando el eco llega al receptor antes de la señal principal, y post-eco si llega después. Grandes intervalos de tiempo entre el arribo de ambas las señales pueden deteriorar la calidad de recepción, también pequeñas diferencias de amplitudes entre la señal directa y el eco son perjudiciales [6].

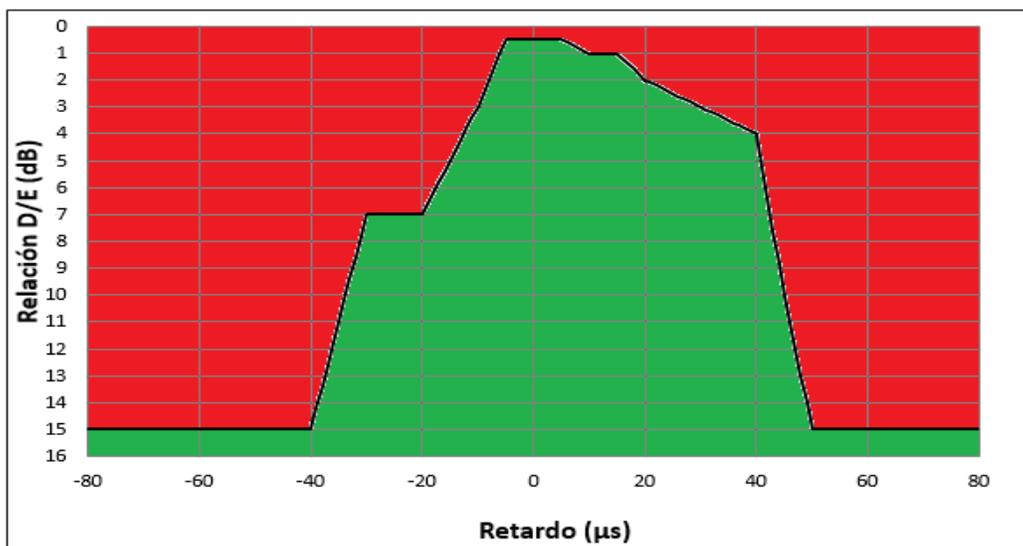


Figura 3.1. Máscara de recepción de referencia para estimar niveles de problemática.

En la Figura 3.1 se muestra la capacidad mínima que un receptor debería tener frente a un multitrayecto simple según la recomendación de ATSC [6]. El eje de las ordenadas muestra la relación D/E (dB), que se calcula como la diferencia de nivel de señal recibido entre la señal directa (D) y el eco (E). El eje de las abscisas corresponde al retardo relativo entre ambas señales (la Directa y el Eco), siendo la referencia el momento de llegada de la señal directa. A la izquierda del instante '0' se ubican los pre-ecos (valores negativos del retardo, o lo que es lo mismo, el eco llega antes que la señal principal) y a la derecha los post-ecos (valores positivos del retardo, es decir, la señal principal llega primero). La línea negra muestra la máscara de recepción que deberían tener los receptores ATSC según la Práctica Recomendada A/74 para ATSC [6]. Es decir, el valor mínimo de relación D/E con el cual los receptores deberán ser capaces de recibir correctamente, para cada valor de retardo entre la señal directa y eco. Los valores recomendados se refieren específicamente a las capacidades del receptor para distinguir entre diferentes señales (directa y eco), no a características propias de la señal en el aire.

A efectos de este trabajo, y con el objeto de definir un receptor de referencia, se definen dos tipos de zonas, reflejadas en la Figura 3.1, y que marcarán la cobertura de la red SFN:

1. **Zona verde:** el receptor recibe sin problemas.
2. **Zona roja:** el receptor no recibe.

Es decir, aquellos receptores capaces de satisfacer los umbrales definidos para las relaciones D/E y diferencias de retardo entre las señales (por debajo de la curva en la Figura 3.1) deberían demodular la señal sin dificultad, mientras los que estén por encima de la curva podrían no demodular la señal recibida.

La máscara presentada solo debe ser tomada como una referencia, ya que se refiere a un comportamiento ideal de los receptores donde no ha sido contemplado el multitrayecto natural. Solo se tiene en cuenta la presencia de un eco estático, lo cual constituye el comportamiento ideal para una red SFN de dos transmisores. Además, es necesario entender que cada receptor tiene características de recepción diferentes. En estudios previamente realizados en laboratorio [7], se pudo determinar la máscara de recepción de un grupo de dispositivos receptores adquiridos en el mercado, obteniéndose resultados superiores al recomendado [6]. En general, la mayoría de los receptores en el mercado deben ofrecer desempeños superiores a la curva mostrada en la Figura 3.1. Se decide utilizar estos valores como receptor de referencia para desarrollar el estudio, pues el objetivo principal de este análisis recae sobre el impacto del tipo de antena receptora en la cobertura de la red SFN, no sobre el dispositivo receptor en sí.

3.1.2. Red de transmisión

La arquitectura de la red SFN en que se basa el estudio cuenta con dos transmisores. El transmisor principal está ubicado en el Cerro del Chiquihuite (al norte de la ciudad), denominado Tx1 para fines de este análisis. Por otra parte, el transmisor secundario, indicado como Tx2, está situado en la sede de TV UNAM (zona sur de la urbe capitalina). Ambas locaciones están separadas por una distancia de 24.4 km.

Las ubicaciones relativas a cada sitio transmisor se aprecian en la Figura 3.2. Este mapa de relieve, generado con la herramienta Radio Mobile, muestra la presencia de elevaciones considerables al sureste de la ciudad. Estos cerros y volcanes señalados, dificultan la correcta propagación de la señal proveniente del Tx1 en áreas aledañas, provocando zonas de sombra. Los dos equipos transmisores operarán en el canal físico 30 (frecuencia de 569 MHz) del Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano (SPR).

Es importante destacar que el diseño de la red SFN propuesto está encaminado a la realización de una campaña de pruebas de campo dentro del proyecto REFUTV. El propósito de esta arquitectura recae en determinar y evaluar zonas de riesgo que permitan profundizar en la comprensión del desempeño de este tipo de redes bajo el estándar ATSC, pero basándose en infraestructura existente para no incrementar los costos de la red. Es decir, el sitio del transmisor secundario no

es la ubicación ideal para aumentar la cobertura de Tx1, sino que la ubicación de Tx2 fue considerada para estudiar el efecto de la red SFN sobre los receptores. Por ello, no se espera un gran aumento de la cobertura al entrar en funcionamiento el Tx2, ubicado en TV UNAM.

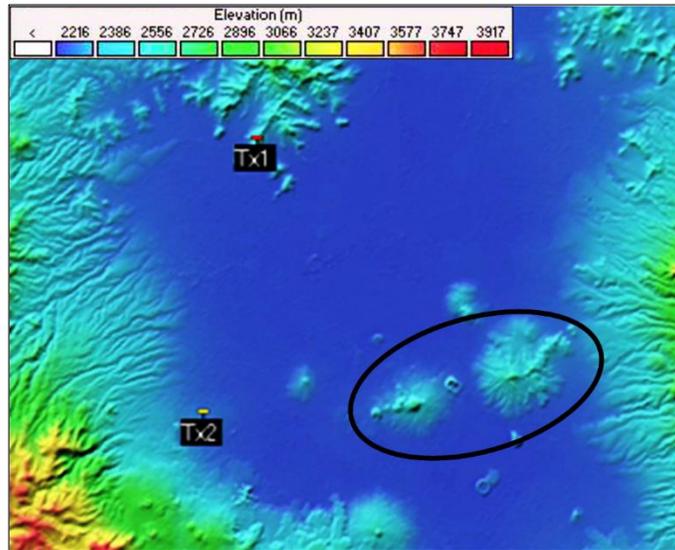


Figura 3.2. Ubicación de los sitios transmisores de la red SFN.

En planificaciones previas, relativas a la campaña de pruebas a desarrollar en campo, se definieron los parámetros de la red de transmisión para tres diferentes escenarios [8]:

Datos	Cerro del Chiquihuite (Tx1)	TV UNAM (Tx2)		
		Escenario I	Escenario II	Escenario III
Potencia nominal	7.5 kW	100 W	100 W	700 W
Ganancia antena transmisora	15.8 dBi	13.6 dBi	13.6 dBi	13.6 dBi
Potencia Radiada Aparente	98 kW	1 kW	1 kW	7 kW
Altura antena transmisora	120 m	25 m	25 m	25 m
Azimut antena transmisora	180°	0°	97°	97°
Latitud	19° 31' 59.13" N	19° 19' 1.98" N		
Longitud	99°07' 50.58" W	99°10' 31.66" W		

Tabla 3.1. Parámetros de trabajo de ambos transmisores [8].

En la Tabla 3.1 se muestran los datos de ambas estaciones transmisoras para los escenarios de transmisión propuestos. Estos parámetros han sido respetados al momento de ejecutar las simulaciones de cobertura.

3.1.3. Método de predicción de cobertura

El software empleado en las estimaciones de campo eléctrico es el SPLAT Versión 1.3.0 [9], el radio de simulación se estableció en 100 km para cada transmisor. SPLAT utiliza el modelo de predicción

Longley-Rice [3], definido por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) en México para la predicción de áreas de servicio digital para ATSC [10].

Una vez logradas las estimaciones de campo eléctrico producidas por cada transmisor, se hace uso de una herramienta matemática para el modelado de diferentes configuraciones que permiten estudiar la cobertura de la red SFN al variar el tipo y orientación de la antena receptora empleada por los usuarios finales. Dicha herramienta, en esencia, permite calcular las diferencias de intensidad de campo y retardo entre las señales provenientes de ambos nodos de la red SFN; a partir de lo cual y basados en la Figura 3.1 se obtienen las coberturas generadas por la red.

La cobertura obtenida cuando solo opera la estación transmisora de mayor potencia (Tx1) establece un punto de referencia para el análisis de las configuraciones de la red bajo estudio. Las coberturas generadas por ambas estaciones transmisoras (funcionando de manera independiente) quedan definidas por los valores de intensidad de campo en cada punto, teniendo como referencia el umbral de $48 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ establecido por el IFT en México [10]. Se asume que las antenas receptoras empleadas, tanto omnidireccionales como directivas, cuentan con ganancia igual a 0 dBi. Esto trae consigo que las áreas cubiertas, cuando operan Tx1 y Tx2 de forma individual, sean independientes de la antena utilizada (se considera que las antenas directivas apuntan hacia el transmisor). La variación del tipo de elemento receptor se enfoca en analizar cómo influye el patrón de radiación al momento de discriminar señales no deseadas, provenientes de otras direcciones ajenas al emisor requerido. Al iniciar la operación sincronizada de ambas estaciones también es necesario considerar el desempeño de los receptores frente al multitrajecto (definido en la Figura 3.1), para obtener las coberturas derivadas del funcionamiento de la red SFN en cada caso.

El uso de antenas receptoras omnidireccionales o directivas por parte del usuario final influye directamente en el área de servicio brindada por los transmisores que conforman la red. Esto es debido a que una antena directiva apuntado hacia un transmisor atenúa la señal proveniente del otro transmisor ya que, en general, la ganancia de la antena en esa dirección será menor. Esto hace que, al atenuar la señal eco, la recepción sea más sencilla.

3.1.4. Definición de las antenas receptoras

Este estudio se enfoca en evaluar el desempeño de la red SFN bajo diferentes configuraciones de las antenas receptoras, basadas en el tipo y orientación de dichas antenas, determinando así los efectos de cada configuración sobre la cobertura generada.

La Tabla 3.2 relaciona las configuraciones de recepción que se analizarán. Este estudio maneja un total de nueve configuraciones de recepción diferentes, ya que cada uno de los escenarios de la red de transmisión, plasmados en la Tabla 3.1, deriva en tres casos de estudio particulares.

	Configuración I	Configuración II	Configuración III
Tipo de antena receptora	Omnidireccional	Directiva	Directiva
Dirección de apuntamiento		Cerro del Chiquihuite (Tx1)	Transmisor recibido con mayor intensidad

Tabla 3.2. Configuraciones de recepción.

En la Configuración I, los usuarios utilizan antenas receptoras omnidireccionales, lo cual es una práctica común para todos aquellos individuos que cuentan con su antena en el interior de la vivienda. Por tanto, esta configuración de recepción es adecuada para evaluar lo que ocurre en recepción en interiores. La Configuración II representa la situación normal para los usuarios cuya antena receptora está ubicada en la azotea de su casa, y la misma se encuentra orientada al Cerro del Chiquihuite. Representa lo que podría llamarse “situación inicial” ya que, antes de instalarse el transmisor complementario en TV UNAM, todas las antenas estarán apuntando al Cerro del Chiquihuite (Tx1), y, aunque se instale el transmisor complementario pasará algún tiempo hasta que los usuarios reorienten su antena. La Configuración III, es el caso hipotético donde la población tiene su antena en la azotea y opta por orientar dicha antena receptora directiva a aquel transmisor de la red SFN del que se recibe con mayor intensidad en su ubicación. Se puede considerar como la “situación final” o “situación ideal”, ya que, pasado un tiempo desde que se pone en funcionamiento el transmisor complementario, es de esperar que los usuarios ya hayan reorientado su antena. En las Configuraciones II y III se usa la misma antena receptora, cuyas características se describen en el siguiente apartado, pero varía la dirección de apuntamiento.

3.1.5. Patrón de radiación de referencia para antenas receptoras directivas

Una parte importante de esta investigación radica en la especificación del patrón de radiación que caracterizará a las antenas directivas dispuestas para recepción en el estudio. En [11] la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) especifica las características de directividad de las antenas receptoras que se deben usar como referencia para planificar servicios de televisión terrestre en las bandas de difusión I, III, IV y V. El estudio de esta tesis se realizó teniendo en cuenta dicha antena. El diagrama de radiación de esta antena se muestra en la Figura 3.3.

Como ya se mencionó, la red SFN objeto del estudio operará en el canal físico número 30 correspondiente a la banda IV de UHF, por lo tanto, se usará el patrón de radiación definido para dicha banda. Para las antenas del estudio se asume una ganancia de 0 dBi. La intención es analizar cómo el patrón de radiación es capaz de discriminar el multitrayecto, no cuantificar los incrementos de cobertura de acuerdo a la ganancia.

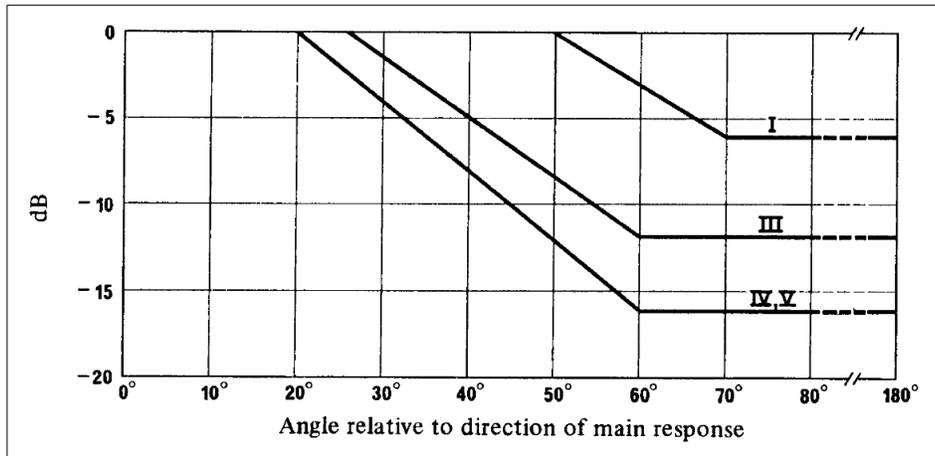


Figura 3.3. Discriminación recomendada para el uso de antenas receptoras direccionales en radiodifusión [11].

3.2. Análisis de resultados

En esta sección se despliegan los resultados obtenidos para las tres configuraciones de recepción derivadas del Escenario III (especificado en la Tabla 3.1). Se decide analizar únicamente estas configuraciones en particular por tratarse del escenario donde el transmisor secundario (Tx2) opera con mayor potencia, por lo que genera casos de estudio más interesantes, debido a que este aumento en la potencia nominal de Tx2 puede traducirse en mayores zonas de riesgo en cuanto a una correcta recepción, una vez implementada la red SFN. Aunque solo se presentan los resultados del Escenario III y sus correspondientes configuraciones de recepción, se realizó el estudio para todos los escenarios, y los datos obtenidos demuestran que el Escenario III es el que ofrece resultados más significativos.

La primera simulación de cobertura es la generada cuando solo opera el transmisor de mayor potencia (Tx1), cuya ubicación se corresponde con el punto superior en el mapa mostrado en la Figura 3.4 (Cerro del Chiquihuite). Se establece esta cobertura como punto de partida, pues son las condiciones existentes en la actualidad, a partir de las cuales se estudia el funcionamiento de la red SFN, y en general, es la situación original antes de crear cualquier red SFN. El color verde indica que existe cobertura, mientras que el color rojo indica que no existe. Este código de colores es aplicable para todas las figuras que muestren coberturas. Recordar que para ello se considera el umbral de recepción de 48 dB μ V/m establecido por la norma mexicana [10], además del desempeño de los receptores frente al multitrayecto (especificado en la Figura 3.1) cuando ambos transmisores operan simultáneamente.

En la Figura 3.4, se visualiza la cobertura generada por el transmisor ubicado en el Cerro del Chiquihuite con los parámetros de transmisión mostrados (Escenario III, Tabla 3.1). Por lo tanto, la antena transmisora orientada al centro de la ciudad (Azimut de 180°). Al utilizar antenas con

ganancia igual a 0 dBi, las coberturas generadas por los transmisores funcionando independientemente solo dependen del valor de intensidad de campo presente en cada punto. Es posible apreciar como sobresalen zonas no servidas por el Tx1 al sureste de la ciudad (dentro de la elipse negra), en las cuales no se alcanzan los 48 dB μ V/m establecidos como umbral para una correcta recepción [10]. En esta área, como se aprecia en la Figura 3.2, existen elevaciones significativas que dificultan la propagación de la señal proveniente del norte provocando zonas de sombra. Con el fin de cubrir esta zona, la antena emisora ubicada en TV UNAM, perteneciente al segundo transmisor que conforma la red SFN (Tx2), es orientada con 97° de Azimut (Escenario III, Tabla 3.1).

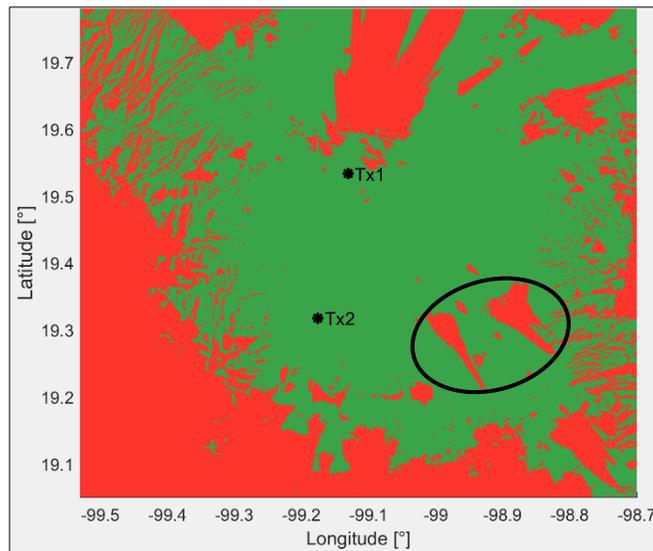


Figura 3.4. Área de cobertura proporcionada por Tx1.

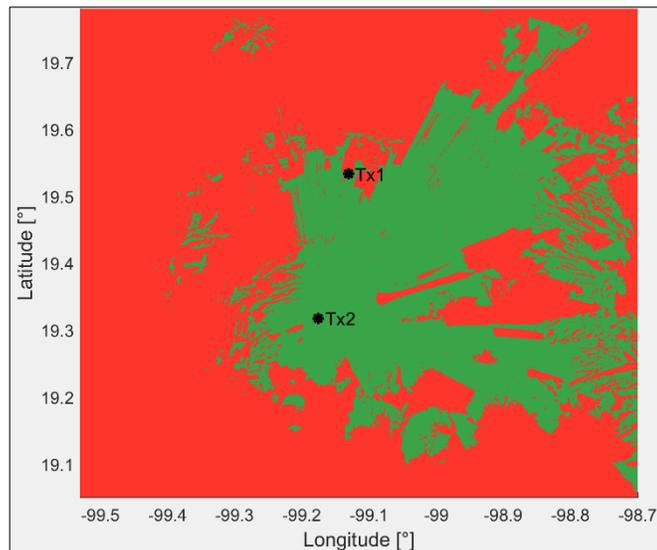


Figura 3.5. Área de cobertura proporcionada por Tx2.

La Figura 3.5 muestra el área de cobertura producida solo por Tx2, que opera con 700 W de potencia nominal, correspondientes a 7 kW de PRA.

El área de cobertura relativa al Tx1 es muy superior a la ofrecida por Tx2, debido a la gran diferencia en cuanto a potencia nominal de operación (ver Tabla 3.1) entre ambos equipos emisores. Al sobreponer ambas simulaciones de cobertura existen zonas que son servidas por ambos transmisores. El conjunto de dichas zonas se define como área de traslape. Dicha área de traslape se mantiene constante sin importar la configuración de recepción en cuestión, pues solo depende de las coberturas de Tx1 y Tx2 al operar de manera independiente. Las coberturas mencionadas son constantes durante este análisis ya que la potencia nominal de las estaciones transmisoras no varía (Escenario III, Tabla 3.1). En la Figura 3.6 se muestra el área de traslape en color amarillo.

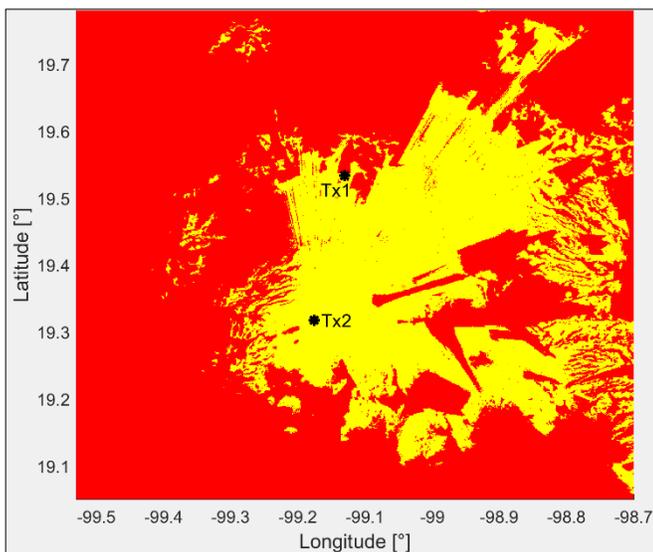


Figura 3.6. Traslape entre las áreas de cobertura de ambos transmisores.

La Tabla 3.3 muestra un resumen de las áreas de coberturas obtenidas, cuando ambos transmisores operan de forma individual. La operación independiente de ambos emisores enmarca las condiciones iniciales de este estudio. La cantidad de terreno servido en cada caso, es referida en kilómetros cuadrados.

Área cubierta por Tx1	4337 km ²
Área cubierta por Tx2	2177 km ²
Área de traslape	2057 km ²

Tabla 3.3. Áreas de interés bajo condiciones iniciales.

Es importante destacar que, a pesar de que Tx2 es menos potente, existen zonas cubiertas por este equipo que no son servidas por Tx1.

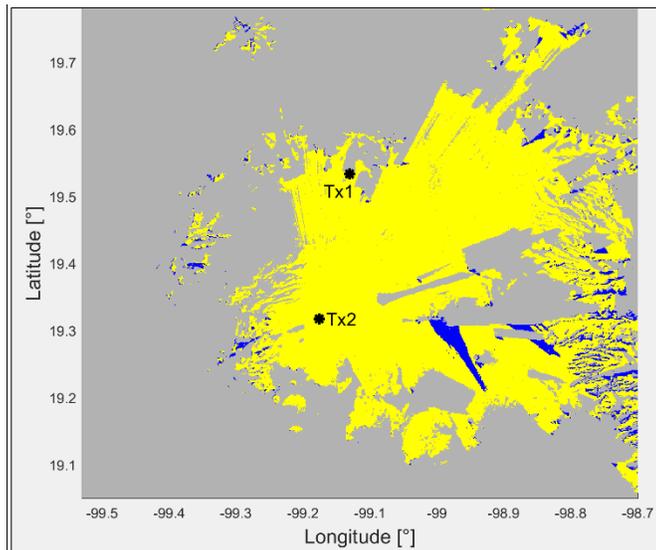


Figura 3.7. Comparación entre el área de traslape (amarillo) y la cobertura generada solo por Tx2 (azul).

La Figura 3.7 permite observar como el área de traslape coincide, casi en su totalidad con la cobertura de Tx2 (también se puede inferir lo mismo de la Tabla 3.3), sin embargo, se aprecian ciertas zonas (color azul) donde es posible recibir la señal proveniente de TV UNAM, y que no son servidas por el emisor ubicado en el Cerro del Chiquihuite. Como era de esperar desde la definición de la red, esta área es pequeña debido a que esta red se implementa para el estudio de condiciones de recepción en redes SFN, y no está pensada como una red SFN operativa que amplíe la cobertura. En los casos comerciales más habituales el área de traslape suele ser más pequeña y el área cubierta por el transmisor complementario más grande.

Estos resultados en primera instancia son satisfactorios, pero hay que tener en cuenta que el análisis previo se refiere a la operación de los transmisores de forma independiente. A continuación se estudia el funcionamiento de Tx1 y Tx2 simultáneamente, conformando la red SFN, donde las áreas de cobertura pueden no coincidir con las áreas de cobertura iniciales ni con el área de traslape. Esto debido a que la cobertura de la red SFN no solo está definida por los niveles de señal recibidos, sino que también hay que tener en cuenta el multitrayecto provocado por la operación conjunta de ambos transmisores.

3.2.1. Diferencias de nivel de intensidad de campo y cálculo de retardos producidos por la red SFN

La capacidad de recepción, y por tanto, la cobertura dentro de una red SFN depende dos aspectos, el umbral de campo eléctrico y el multitrayecto. Al estudiar el multitrayecto dentro de una red SFN, es muy importante analizar dos aspectos fundamentales, las diferencias de niveles recibidos entre las señales provenientes de ambos transmisores en un punto determinado, así como el

retardo con el cual arriba una señal respecto a la proveniente del otro emisor. Recordar que, pequeñas diferencias de nivel recibido (D/E), así como grandes retardos, pueden dificultar en gran medida una recepción satisfactoria [6].

Según la curva mostrada en la Figura 3.1 [6], los receptores tienen problemas para demodular señales con pre-ecos mayores a 5 μ s y post-ecos a partir de 40 μ s. En el caso de la red SFN estudiada, la mayor diferencia de retardo que se puede presentar entre ambos transmisores es de 81 μ s, que sería en las ubicaciones respectivas de cada transmisor. Dado que los receptores son más sensibles al pre-eco que al post-eco, es conveniente sincronizar los transmisores de forma que siempre llegue primero la señal más fuerte. Dado que el Tx1 transmite con mayor potencia, el punto en que ambas señales se reciban con el mismo nivel estará más cercano al Tx2. Por ello, y para que ambas señales lleguen al mismo tiempo a ese punto, es necesario añadir un retardo a la señal emitida por Tx2. Haciendo los cálculos de propagación para tierra plana, lo anterior se logra adicionando un offset de 76 μ s al transmisor situado en TV UNAM [8]. Los grandes retardos al norte de la ciudad no son preocupantes, debido a que en esas zonas el nivel de señal recibida proveniente de Tx1 es muy superior al recibido desde el Tx2, y como se observa en la Figura 3.1, si el eco es 15 dB inferior a la señal principal, no genera problemas, independientemente del retardo que presente.

En la Figura 3.8 se muestra un mapa que refleja la diferencia entre el nivel de intensidad de campo eléctrico proveniente del transmisor principal (en Cerro del Chiquihuite) y el correspondiente al transmisor complementario (en TV UNAM). También se presentan las curvas referidas a los cálculos de retardos a lo largo del área de estudio, una vez retardada la señal del Tx2 en 76 μ s.

La correcta demodulación de la señal por parte de los receptores, en cuanto al desempeño frente al multitrayecto se refiere, depende de dos factores fundamentales, la relación D/E y el retardo entre señales. La escala mostrada en la Figura 3.8 relaciona la diferencia de intensidad de campo recibida del transmisor principal menos la del secundario (Δ E). Se indicó en color rojo y marrón los peores casos cuando esta diferencia, equivalente a la relación D/E, es menor a 15 dB (rojo si la señal más fuerte es la procedente del Chiquihuite, marrón si la señal más fuerte se origina en TV UNAM). Además se indican en las zonas amarillas y naranjas los lugares en donde la relación D/E está entre 15 y 20 dB (amarillo si la señal más fuerte es la procedente del Cerro del Chiquihuite, naranja si la señal más fuerte se origina en TV UNAM). El color verde indica que la diferencia es mayor a 20 dB (verde claro si predomina la señal proveniente de TV UNAM y verde oscuro si predomina la señal proveniente del Chiquihuite). Las líneas negras son líneas de puntos donde se recibe con el mismo retardo las señales provenientes de los dos transmisores. Los retardos están dados en microsegundos (μ s). La Figura 3.8 ofrece una referencia de aquellas áreas donde podría verse afectada una correcta recepción de la señal. Es importante aclarar que las zonas críticas señaladas (color rojo y marrón) no representan necesariamente una recepción nula, pues también depende de la diferencia de retardo con que arriban las señales a determinado punto. Es importante aclarar que incluso en las zonas verdes, aunque la diferencia de intensidad de campo

recibido sea alta, esta debe ser mayor al umbral de recepción establecido por el IFT para una correcta recepción [10]. De ahí que sea fundamental comprender que ambos factores (relación D/E y diferencia de retardos) deben analizarse de forma conjunta para comprender este fenómeno.

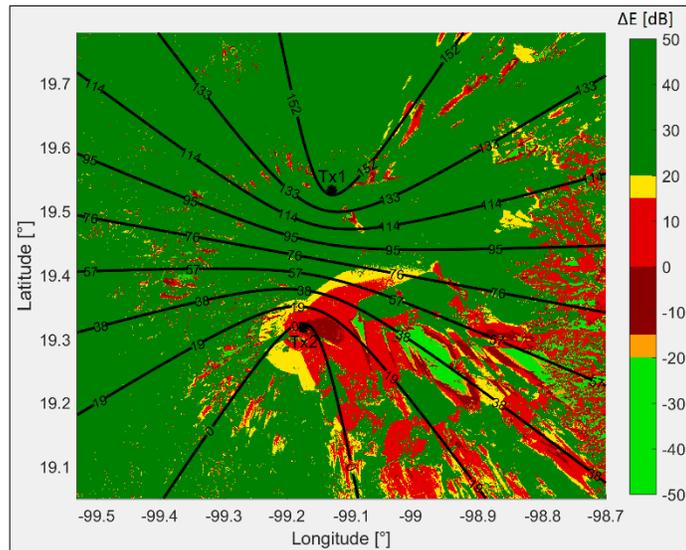


Figura 3.8. Diferencia entre la intensidad de campo eléctrico recibido desde Tx1 y Tx2 ($\Delta E = E_{Tx1} - E_{Tx2}$); y estimación de retardos entre ambas señales (en μs).

Al este, en zonas cercanas a Tx2, se destacan áreas de color rojo y marrón donde la recepción se puede dificultar. Esta situación se debe a que en estos lugares, al estar tan cercanos a Tx2 y la alta potencia de Tx1, la relación D/E es pequeña. Además, hay partes donde el retardo alcanza valores considerables. En los siguientes análisis se estudia donde realmente hay problemas de recepción.

3.2.2. Estudios de cobertura de la red SFN

La correcta recepción de la señal en una red SFN depende de la relación D/E y el retardo concerniente a ambas señales en un determinado punto, además del umbral de recepción. Al analizar la Figura 3.1, se definieron dos tipos de zonas (de color verde y rojo) que delimitarán la demodulación satisfactoria de la señal por un receptor estándar, y por tanto, el área de cobertura proporcionada por la red SFN para cada configuración propuesta. Se presentan dos tipos de datos al momento de evaluar los resultados obtenidos, es decir, en términos de áreas y porcentajes que representan dichas áreas. Estos porcentajes son calculados tomando como base la cobertura generada solo por el Tx1, así como el área de traslape entre las coberturas de ambos transmisores cuando operan de forma independiente (Figura 3.6).

A continuación se presentan las coberturas obtenidas para las tres configuraciones de recepción derivadas del Escenario III. Estas configuraciones dependen de las antenas receptoras: antena

omnidireccional, antena direccional apuntando al transmisor principal y antena direccional apuntando al transmisor del que recibe mayor potencia (ver Tabla 3.2).

3.2.2.1. Configuración I-III

La Configuración I-III (Configuración I, derivada del Escenario III) se refiere a la primera de las configuraciones de las antenas receptoras a analizar. En este caso, se supone que todos los usuarios finales utilizan antenas receptoras con patrón omnidireccional y ganancia 0 dBi, lo cual simula la recepción en el interior de sus viviendas (no se tienen en cuenta las pérdidas por atenuación en los muros porque se desea comparar el efecto del diagrama de radiación de la antena receptora).

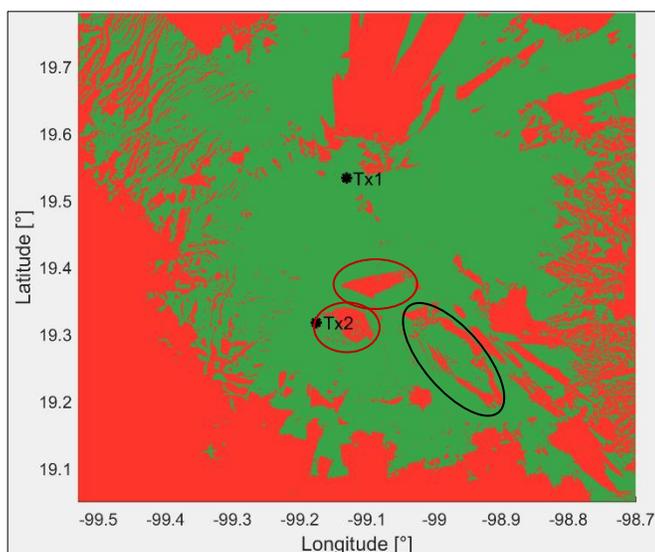


Figura 3.9. Cobertura de la red SFN con antenas receptoras omnidireccionales (Configuración I-III).

El uso de este tipo de antenas puede resultar perjudicial para la red SFN en ciertas zonas. Esto se debe a que un patrón de radiación omnidireccional es poco selectivo, direccionalmente hablando, lo cual puede traducirse en la recepción de las señales provenientes de ambos transmisores con niveles de intensidad similar en algunos puntos, degradando la relación D/E.

La Figura 3.9 muestra en verde el área de cobertura de la red cuando los receptores tienen antenas omnidireccionales, es decir, para la Configuración I-III. Al analizar el mapa de la Figura 3.9, resaltan ciertos cambios respecto a la cobertura del transmisor principal (Figura 3.4). Las dos áreas señaladas con óvalos en color rojo en la Figura 3.9 resaltan zonas donde no existe recepción bajo la operación de ambos transmisores, mientras que ésta área sí era servida cuando solamente se transmitía desde Tx1.

El óvalo rojo inferior enmarca una zona donde la diferencia de intensidad de campos es inferior a 15 dB. Con la operación conjunta de ambos transmisores, en esta área las señales provenientes de TV UNAM alcanzan altos niveles lo cual degrada la relación D/E. Debido a la cercanía con la estación transmisora complementaria, las señales recibidas del transmisor secundario son más intensas que las provenientes de Tx1. Para el caso del óvalo rojo superior, la diferencia de intensidad de campos también se comporta inferior a los 15 dB. En esta zona las señales provenientes de Tx2 aún son recibidas con niveles que, aunque son inferiores a los niveles recibidos desde el Cerro del Chiquihuite, disminuyen la relación D/E (haciéndola inferior al nivel requerido). A esto hay que atribuirle valores de retardo considerables, de los 38 μ s a los 57 μ s aproximadamente, en condiciones de post-eco. Todo lo anterior deriva en condiciones de recepción desfavorables. El área resaltada con óvalo negro enmarca una zona favorecida al entrar en funcionamiento la red SFN, pues cubre en gran medida un área que era de sombra cuando solo se transmitía desde Tx1. En esta porción se recibe con mayor fuerza la señal proveniente de TV UNAM, y la diferencia de intensidad de campos sobrepasa los 20 dB, lo cual beneficia significativamente la recepción.

Para esta primera configuración (antenas de recepción omnidireccionales), la red SFN cubre una superficie de 4033 km², por lo tanto, menor a la cobertura del transmisor principal que era de 4337 km². A su vez, la cobertura de la red SFN abarca 3927 km² del área servida sólo por Tx1 (Tabla 3.3), lo cual únicamente representa un 90.5 % de la misma. Es decir, existe un 9.5 % del área que originalmente estaba cubierta, que deja de tener cobertura al operar la red SFN. Con el funcionamiento de la red SFN, es posible demodular correctamente la señal en 106 km² que no eran cubiertos cuando solo se utilizaba Tx1, lo cual se traduce en un 2.4 % de cobertura adicional; pero por otra parte, la red SFN no cubre una superficie de 304 km² que antes sí era servida por el transmisor principal. Es decir, se confirma que la red SFN con antenas omnidireccionales tiene peor cobertura que el transmisor principal operando en solitario. Como ya se comentó, este resultado no es inesperado por cuanto la red no se diseñó para dar amplia cobertura, sino para estudiar los efectos de la red SFN sobre receptores comerciales. Estos resultados también muestran lo importante que es una buena planificación de la red SFN, porque en caso de no hacerlo así, la red SFN puede empeorar la cobertura ya existente. Por otra parte, con la operación combinada de ambos transmisores se recibe correctamente en 1668 km², de los 2057 km² que abarca el área de traslape (Figura 3.6). Esto se traduce en un 81.1 % de dicha área de traslape, resultado también decepcionante, pero esperado.

Todos estos resultados se muestran en la Tabla 3.4, comparados con los resultados derivados de las demás configuraciones.

3.2.2.2. Configuración II-III

Esta segunda configuración (Configuración II, derivada del Escenario III) se refiere a la situación común para aquellos usuarios que usan antenas en exteriores, usualmente en los tejados o azoteas de las casas, las cuales son directivas y están orientadas al Cerro del Chiquihuite, principal sitio de radiodifusión de señales de TV en la CDMX, donde está ubicado el transmisor Tx1. Esta configuración es la que tendrán los usuarios al momento de comenzar a operar el transmisor complementario, ya que la gran mayoría de usuarios con antena direccional solamente reorientarán la antena una vez que puedan comprobar que orientar la antena hacia el transmisor secundario les reporta beneficios.

Al entrar en detalles con la Figura 3.10, que muestra los resultados de cobertura para esta configuración, se puede observar como las zonas señaladas con óvalos rojos se mantienen similares con respecto a la Figura 3.8 (correspondiente a la Configuración I-III), notándose una reducción de la zona afectada en el óvalo superior. El área destacada con color negro también ofrece mejoras con respecto a las zonas de sombra resaltadas durante la operación de Tx1 solamente, aunque estas mejoras son menores que en la Configuración I-III. Esto debido a que, al orientar las antenas al Tx1, zonas antes favorecidas por Tx2 quedan fuera de esta cobertura de la red SFN. El uso de un patrón de radiación direccional apuntando al Cerro del Chiquihuite limita la recepción de señales provenientes del transmisor Tx2 en parte de esta área, degradando así la recepción en algunos puntos que eran servidos satisfactoriamente al usar antenas receptoras omnidireccionales.

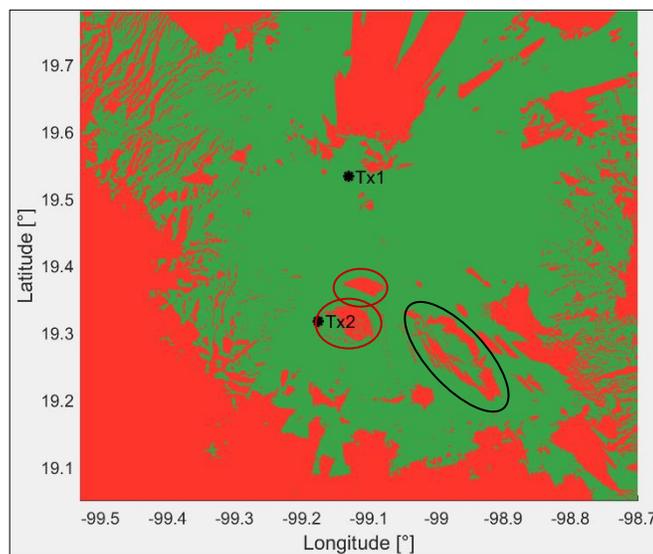


Figura 3.10. Cobertura de la red SFN con antenas receptoras directivas orientadas a Tx1 (Configuración II-III).

Con esta configuración se mejora el área cubierta por la red SFN, la cual abarca 4220 km² en este caso. De la totalidad de la superficie servida por la red SFN, 4148 km² coinciden con el área ofrecida solo por el transmisor principal (Tabla 3.3), constituyendo el 95.6% de la cobertura de Tx1.

Se logra facilitar la recepción en 75 km² fuera de la cobertura brindada por el transmisor del Cerro del Chiquihuite. Esto se refleja como un 1.7 % del área de cobertura de Tx1. Respecto al área de traslape (Tabla 3.3), la cobertura de la SFN abarca 1868 km², es decir, un 90.8% del área de traslape.

Los resultados de la Configuración II-III son mejores que los obtenidos con la Configuración I-III. Sin embargo, esto no significa que la red SFN funcione mejor, aunque se pase del 81.1% al 90.8% del área de traslape cubierta. Lo que ocurre es que, debido a la gran diferencia de potencias transmitidas desde ambas estaciones, orientar las antenas hacia el transmisor de mayor potencia favorece, en general, la recepción. Obviamente, el uso de antenas directivas facilita la recepción al discriminar espacialmente la señal que se desea recibir. Pero hay que tener en cuenta que muchos usuarios en la Ciudad de México, y en todo el país en general, usan antenas de recepción en el interior de sus viviendas. De hecho, para esta Configuración II-III se debe tener en cuenta que Tx2 actúa, en la zona de traslape, como una señal interferente, ya que las antenas están orientadas para recibir únicamente del transmisor Tx1.

3.2.2.3. Configuración III-III

Esta última configuración (Configuración III, derivada del Escenario III) representa el caso de estudio final. Es decir, los usuarios utilizan antenas receptoras directivas situadas en el exterior de sus edificaciones, esta vez orientadas a aquel sitio transmisor del que reciban mayor intensidad de campo (transmisor dominante). Se considera que es el caso de estudio final porque sería la configuración de las antenas directivas que quedaría de forma permanente, una vez que los usuarios modifiquen la orientación de sus antenas para obtener la mejor recepción.

La Figura 3.11, permite observar claras mejoras en cuanto al área de cobertura generada por la red SFN. Las zonas sin cobertura enmarcadas en óvalos rojos en las cercanías a TV UNAM se mantienen debido a los altos niveles de intensidad de campo recibidos desde el transmisor Tx2 en estas lugares continúan degradando la relación D/E, al contrastar con las señales provenientes del transmisor Tx1. En las zonas mencionadas anteriormente la relación D/E se mantiene inferior a 15 dB, anulando la recepción. Por otra parte, el área resaltada con el óvalo negro se encuentra casi cubierta en su totalidad, lo cual satisface en gran medida la zona de sombra existente al transmitir únicamente con Tx1. La señal proveniente de TV UNAM (Tx2) resulta dominante en la mayoría de la zona opacada, en primera instancia, por la presencia de cerros y volcanes al sureste de la ciudad (Figura 3.2). La orientación de las antenas directivas hacia el transmisor Tx2 favorece considerablemente la recepción en estos lugares, combatiendo el multitrayecto generado por la presencia de señales derivadas del transmisor principal.

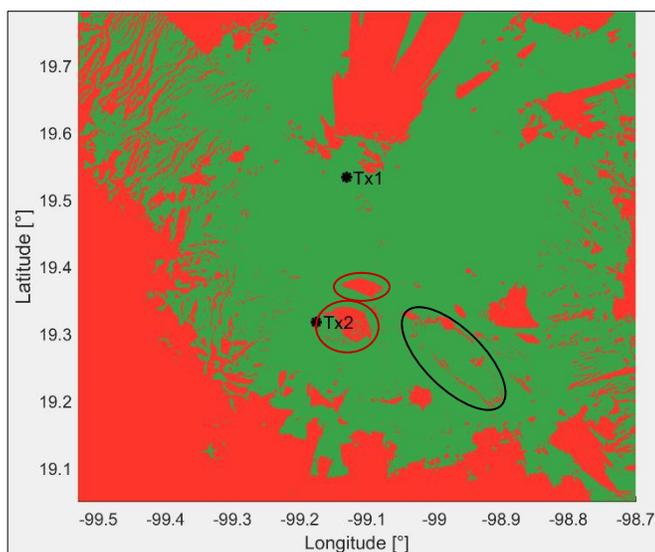


Figura 3.11. Cobertura de la red SFN con antenas receptoras directivas orientadas al transmisor dominante (Configuración III-III).

Esta configuración proporciona un área de cobertura para la red SFN de 4401 km², lo cual supera los 4337 km² ofrecidos solo por Tx1. De toda la cobertura generada por la red SFN, 4281 km² concuerdan con el área de servicio ofrecida al operar solo el transmisor principal, representando un 98.7 % de dicha área.

En este caso, el funcionamiento de la red SFN adicionó 119 km² a la cobertura brindada solo por Tx1, lo cual constituye el 2.8 % del área favorecida por solo Tx1. Además, la cobertura de la red SFN abarca el 97.3 % del área de traslape, es decir, 2002 km² de dicha área de traslape.

3.2.3. Discusión final de los resultados

Una vez analizadas estas tres configuraciones, los datos recopilados son organizados en la Tabla 3.4 para facilitar su comparación. Conviene recordar, como referencias, que el área de cobertura proporcionada por el transmisor Tx1 es de 4337 km², y el área de traslape es de 2057 km².

El área total cubierta por la red SFN está definida por aquellas zonas donde las diferencias de intensidad de campo y retardos relativos entre señales mantienen niveles que favorecen la recepción, luego de entrar en operación conjunta ambas estaciones transmisoras.

Hay que recordar que la red SFN en cuestión está diseñada para realizar pruebas de campo y estudiar el desempeño de los receptores comerciales en una red SFN. Por ello, la ubicación del transmisor secundario no es la óptima para una red SFN operacional. Esto impacta en los resultados, ya que la zona de solape entre las coberturas de ambas estaciones es demasiado grande y produce problemas de recepción en algunos puntos de dicha área. Por otra parte, la

cobertura adicional del transmisor complementario es mucho más pequeña de lo que sería en una red SFN comercial.

	Configuración I-III	Configuración II-III	Configuración III-III
Área total cubierta por la red SFN¹	4033 km ²	4220 km ²	4401 km ²
	93 %	97.3 %	101.4 %
Área cubierta por la red SFN respecto a cobertura de Tx1¹	3927 km ²	4148 km ²	4281 km ²
	90.5 %	95.6 %	98.7 %
Área cubierta por la red SFN que no era cubierta por Tx1¹	106 km ²	72 km ²	119 km ²
	2.4 %	1.7 %	2.8 %
Área cubierta por la red SFN en el área de traslape²	1668 km ²	1868 km ²	2002 km ²
	81.1 %	90.8 %	97.3 %

Tabla 3.4. Análisis de coberturas bajo operación de la red SFN.

El peor de los casos lo refleja la Configuración I-III (la cual simula recepción en interiores), donde los patrones de recepción omnidireccionales captan señales provenientes de todas las direcciones. Esto favorece en gran medida el multitrayecto, provocando problemas en recepción. Comparando con la cobertura del transmisor principal, el área de cobertura ofrecida se reduce al 93%. Es decir, hay menos cobertura que cuando opera solo un transmisor.

Es posible apreciar que la Configuración II-III (simula la recepción en exteriores con una antena directiva en la azotea apuntando al transmisor principal) tiene mayor cobertura que la Configuración I-III. Todas las antenas receptoras están orientadas hacia el emplazamiento del transmisor principal (Tx1), atenuando la señal proveniente del transmisor Tx2. Obviamente, y dado que Tx1 transmite con mucha mayor potencia que Tx2, se obtiene una cobertura mayor que en la Configuración I-III, alcanzando el 97.3 % de la cobertura del transmisor Tx1; pero aún inferior a cuando solamente opera el transmisor principal. Esto debido a que el transmisor complementario actúa como interferente en gran parte del área.

La mayor zona cubierta por la red SFN se obtiene con la Configuración III-III (esta simula la recepción en exteriores con una antena directiva en la azotea apuntando al transmisor del que se recibe mayor nivel de señal), esto debido a la influencia del patrón directivo al orientar la antena receptora al transmisor recibido con mayor intensidad. El patrón de radiación directivo de las antenas permite contar con mayor selectividad para discriminar la señal eco. Esto evita la recepción de señales no deseadas provenientes de otras direcciones, favoreciendo la relación D/E y el desempeño de la red SFN. La cobertura lograda es de 101.4 %, la cual es mayor que la cobertura inicial de Tx1. Este incremento es muy limitado y no justificaría en sí mismo la instalación de esta red SFN.

¹ Porcentaje calculado tomando como referencia la cobertura generada por la operación única de Tx1.

² Porcentaje calculado tomando como referencia el área de traslape.

Sin embargo, es más importante evaluar el efecto que tiene la antena receptora en el área de traslape que sobre el área total cubierta. El área de traslape es el área donde hay cobertura de ambas estaciones al operar por separado, y donde la recepción simultánea de ambas estaciones puede provocar problemas. Con las antenas omnidireccionales (Configuración I-III), el receptor no puede reducir la potencia de la señal eco, y la cobertura del área de traslape llega únicamente al 81.1 %. Lo que significa que se producen problemas en recepción. En la Configuración II-III, con antenas directivas orientadas al transmisor principal, la cobertura del área de traslape sube al 90.8 %. Esto se debe principalmente a la diferencia de potencia de transmisión entre ambas estaciones, sin embargo, el efecto “interferente” del segundo transmisor sigue siendo importante. Cuando se usan antenas directivas con la red SFN operativa, es decir, que cada usuario orienta su antena hacia el transmisor del que recibe más potencia (Configuración III-III), la cobertura del área de traslape sube al 97.3 %, indicando que se han reducido sustancialmente los problemas que la red SFN introduce al provocar un multitrayecto artificial.

3.3. Conclusiones del capítulo

Este estudio comprueba que el uso de diferentes tipos de antenas receptoras tiene un impacto directo en el desempeño de una red SFN con ATSC.

La utilización de antenas receptoras omnidireccionales por parte de los usuarios finales no favorece la operación de una red SFN. Esta es la situación común para usuarios con antenas en interiores y es reflejada en la Configuración I-III. Este tipo de antenas es poco selectivo al momento de evitar la recepción de ecos no deseados, fortaleciendo la presencia del multitrayecto (inherente a una red SFN) en los receptores.

El manejo de antenas receptoras directivas reduce los efectos negativos que trae el multitrayecto para la correcta recepción de la señal, atenuando señales provenientes de direcciones diferentes a la deseada. Los patrones de radiación más angostos juegan un papel fundamental en este sentido. La Configuración II-III establece un escenario donde los usuarios mantienen su antena directiva orientada al transmisor en Cerro del Chiquihuite, a pesar de entrar en operación el transmisor secundario. El resultado es una disminución en la cobertura que debería ser temporal, hasta cambiar la orientación de las antenas.

Tiempo después, se espera que los usuarios finales orienten su antena al transmisor desde el cual reciben una mayor intensidad de señal. Este caso es denominado Configuración III-III. La Configuración III-III representa la mejor cobertura de red SFN lograda con antenas de recepción direccionales.

Pero el resultado más importante recae en el efecto del patrón de radiación de la antena receptora sobre el área de cobertura de la red SFN, en relación con el área de traslape obtenida (área cubierta por ambos transmisores individualmente). En la Configuración I-III se cubre el 81.1 % de esta área, en la Configuración II-III el 90.8 %, mejorando considerablemente en la Configuración II-III con el 97.3 %, y demostrando la efectividad de la red SFN.

Bibliografía

- [1]. Advanced Television Systems Committee. "A/53: ATSC Digital Television Standard, Parte 1: Digital Television System". Washington, D.C. 7 August, 2013.
- [2]. O. Bendov, "Areas of Cochannel Interference and Multipath Created by 8-VSB Modulated Distributed Transmitters in Flat Terrain", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 52, No. 1, March, 2006.
- [3]. O. Bendov, "On the validity of the Longley-Rice (50,90/10) model for HDTV coverage and interference analysis". Proceeding of NAB Broadcast Engineering Conference, Las Vegas, Nov. 1999.
- [4]. J. Song, Z. Yang, and J. Wang, "Digital Terrestrial Television Broadcasting Technology and System", ISBN 9781118130537, Wiley-IEEE Press, 2015.
- [5]. E. Guerra. Tesis de Maestría: "Ecuilibradores de canal para recepción de ATSC en redes SFN" Facultad de Ingeniería, UNAM. Noviembre, 2017.
- [6]. Advanced Television Systems Committee, "Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines", Doc. A/74:2010, Apr. 7, 2010.
- [7]. J. M. Matías et al., "Resultados de las pruebas de laboratorio de ATSC". Facultad de Ingeniería, UNAM. 01 de Junio, 2016.
- [8]. Y. Valdés. Tesis de Maestría: "Análisis de cobertura de diferentes escenarios para Pruebas de Campo de una red SFN-ATSC en CDMX.", Facultad de Ingeniería, UNAM. Septiembre, 2018.
- [9]. J. Magliacane, KD2BD. "Splat, because the word isn't flat". Fecha de consulta: 12 de noviembre, 2018. Disponible: <http://www.gsl.net/kd2bd/splat.html>.
- [10]. Instituto Federal de Telecomunicaciones. Disposición Técnica IFT-013-2016: "Especificaciones y requerimientos mínimos para la instalación y operación de estaciones de televisión, equipos auxiliares y equipos complementarios". Diciembre, 2016.
- [11]. International Telecommunication Union "Directivity and polarization discrimination of antennas in the reception of television broadcasting". Recommendation ITU-R BT.419-3, ITU-R Recommendations BT Series (ITU, Geneva, 1997).

Capítulo 4. Organización de la campaña de mediciones

El desarrollo satisfactorio de una campaña de pruebas en campo requiere la planificación de muchos aspectos. La especificación de los sitios de medición, duración estimada de la etapa de pruebas y personal requerido para llevar a cabo todas las tareas; son algunos de los principales temas a tener en cuenta. La organización para la reproducción y toma de medidas en laboratorio de forma paralela a las medidas en campo también juega un papel fundamental para la obtención de resultados.

4.1. Distribución equitativa de los sitios de medida

En trabajos previos [1] se definieron una serie de sitios en la Ciudad de México y zonas aledañas en los cuales, debido a los niveles de intensidad de campo recibidos y las diferencias de retardos entre señales, era conveniente realizar la captura de parámetros y grabación de señales para su posterior estudio. Una parte de estos puntos se encuentran en las llamadas zonas de riesgo, donde la correcta recepción de la señal puede ser deficiente. Otros se ubicaron de forma intencional en zonas de interés al momento de analizar el comportamiento de una red SFN, dígame la línea recta que une los emplazamientos de ambos transmisores y zonas de sobra derivadas de la operación única del transmisor principal. También fueron colocados ciertos puntos en zonas urbanas densas, interiores de edificaciones y alrededores del aeropuerto, para examinar el comportamiento del multitrayecto artificial y el Efecto Doppler; fenómenos que pueden verse fortalecidos en lugares de estas características. En primera instancia [1], se planificó la visita a 129 sitios para efectuar mediciones, de ellos 114 para medidas en exteriores y 15 para medir en interiores; todos ellos derivados de los distintos escenarios de operación de la red SFN.

La planificación anterior mostraba una distribución no uniforme de las cantidades de puntos de medición en los diferentes escenarios (36 sitios para el Escenario I, 33 sitios para el Escenario II, y 40 sitios para el Escenario III) [1]. Esto pudiera ocasionar retrasos durante el desarrollo de las mediciones en campo debido a los recorridos adicionales, así como un gasto de combustible en exceso por parte de la unidad móvil. Para agilizar el desarrollo de la etapa de pruebas, y como parte de este trabajo, se decide realizar una distribución equitativa de los sitios a visitar por cada escenario. Esta nueva distribución es muy importante al momento de analizar los parámetros obtenidos, pues permite una mejor comparación de los resultados si la cantidad de sitios de interés coincide para todos los escenarios de estudio. También fue necesario reubicar geográficamente ciertos puntos derivados de la pasada planificación [1], para proporcionar el fácil acceso de la unidad móvil durante las mediciones reales. Muchos de los sitios ya establecidos se encontraban en áreas de difícil acceso (imposible en algunos casos) para el vehículo de medida. Al momento de esta reubicación, se tuvo en cuenta mantenerse dentro de la zona de interés que fundamentó la ubicación del punto en primer lugar. Otros puntos de medida, representativos de condiciones redundantes, fueron eliminados.

En total los puntos fueron distribuidos en cuatro diferentes escenarios. La nueva distribución de los sitios queda recogida en la Tabla 4.1, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Operación en solitario del transmisor principal (ubicado en el Cerro del Chiquihuite): A esta serie de puntos se le asignó la nomenclatura **C-P**, para identificarlos como aquellos puntos a estudiar bajo el funcionamiento único del transmisor principal. Además, estos puntos son comunes con los demás escenarios.
- Escenario I: Transmisor principal con potencia nominal de 7.5 kW y azimut de 180 grados, transmisor secundario con potencia nominal de 100 W y azimut de 0 grados. La mayoría de estos puntos fueron marcados con los identificadores **C-I**, definiendo puntos de este escenario comunes con los demás. Otros, en menor cuantía, fueron identificados solo con un **I**, pues son casos de estudio particulares de este escenario.
- Escenario II: Transmisor principal con potencia nominal de 7.5 kW y azimut de 180 grados, transmisor secundario con potencia nominal de 100 W y azimut de 97 grados. En este caso, todos los sitios fueron registrados con el marcador **C-II**, ya que son puntos correspondientes a este segundo escenario, pero comunes con las otras configuraciones.
- Escenario III: Transmisor principal con potencia nominal de 7.5 kW y azimut de 180 grados, transmisor secundario con potencia nominal de 700 W y azimut de 97 grados. Los puntos son asentados con el marcador **C-III**, dígame puntos comunes del tercer escenario. En este caso, también existen varios sitios identificados solo con un **III**, pues son sitios de estudio únicos para esta configuración.

Coordenadas geográficas del punto	Criterio de selección	Nomenclatura para puntos según escenarios			
		Solo operación transmisor principal	Escenario I	Escenario II	Escenario III
19°29'59.27"N 99° 8'14.78"W	Línea entre ambos transmisores	1C-P	1C-I	1C-II	1C-III
19°28'6.95"N 99° 8'38.23"W	Línea entre ambos transmisores	2C-P	2C-I	2C-II	2C-III
19°26'21.58"N 99° 9'0.23"W	Línea entre ambos transmisores	3C-P	3C-I	3C-II	3C-III
19°24'38.63"N 99° 9'21.72"W	Línea entre ambos transmisores	4C-P	4C-I	4C-II	4C-III
19°22'37.65"N 99° 9'46.96"W	Línea entre ambos transmisores	5C-P	5C-I	5C-II	5C-III
19°20'57.86"N 99°10'7.77"W	Línea entre ambos transmisores	6C-P	6C-I	6C-II	6C-III

19°19'14.96"N 99°10'29.23"W	Línea entre ambos transmisores	7C-P	7C-I	7C-II	7C-III
19°30'12.81"N 99° 6'44.18"W	Zona de sombra del transmisor principal	8C-P	8C-I	8C-II	8C-III
19°29'5.66"N 99° 6'8.60"W	Zona de sombra del transmisor principal	9C-P	9C-I	9C-II	9C-III
19°22'25.98"N 99° 2'4.25"W	Zona de sombra del transmisor principal	10C-P	10C-I	10C-II	10C-III
19°21'30.13"N 99° 1'26.97"W	Zona de sombra del transmisor principal	11C-P	11C-I	11C-II	11C-III
19°20'20.41"N 98°58'31.41"W	Zona de sombra del transmisor principal	12C-P		12C-II	
19°19'31.42"N 99° 5'35.87"W	Zona de sombra del transmisor principal	13C-P	12C-I	13C-II	12C-III
19°17'55.83"N 99° 5'7.86"W	Zona de sombra del transmisor principal	14C-P	13C-I	14C-II	13C-III
19°18'41.84"N 99° 3'27.68"W	Zona de sombra del transmisor principal	15C-P	14C-I	15C-II	14C-III
19°17'30.89"N 99° 2'57.57"W	Zona de sombra del transmisor principal	16C-P	15C-I	16C-II	15C-III
19°17'37.21"N 99° 1'41.64"W	Zona de sombra del transmisor principal	17C-P	16C-I	17C-II	16C-III
19°17'39.13"N 98°59'57.18"W	Zona de sombra del transmisor principal	18C-P	17C-I	18C-II	17C-III
19°15'45.76"N 98°57'50.92"W	Zona de sombra del transmisor principal	19C-P		19C-II	
19°13'41.37"N 98°59'50.47"W	Zona de sombra del transmisor principal	20C-P	18C-I	20C-II	
19°22'41.96"N 99°15'15.06"W	Zona urbana densa	21C-P	19C-I	21C-II	18C-III
19°25'41.43"N 99° 9'53.41"W	Zona urbana densa	22C-P	20C-I	22C-II	19C-III
19°26'39.38"N 99° 8'23.68"W	Zona urbana densa	23C-P		23C-II	
19°26'14.72"N 99° 5'20.68"W	Aeropuerto	24C-P	21C-I	24C-II	20C-III
19°26'52.50"N 99° 3'56.90"W	Aeropuerto	25C-P	22C-I	25C-II	
19°24'59.74"N 99° 4'37.32"W	Aeropuerto	26C-P	23C-I	26C-II	21C-III
19°25'29.44"N 99°10'2.96"W	Interiores	27C-P	24C-I	27C-II	22C-III

19°20'7.61"N 99° 9'29.71"W	Interiores	28C-P	25C-I	28C-II	23C-III
19°19'46.37"N 99°10'57.44"W	Interiores	29C-P	26C-I	29C-II	24C-III
19°18'24.52"N 99° 9'53.05"W	Interiores	30C-P	27C-I	30C-II	25C-III
19°23'18.50"N 99°11'35.80"W	Zona de posible riesgo		1-I		
19°23'6.42"N 99° 8'59.32"W	Zona de posible riesgo		2-I		
19°20'3.28"N 99°10'31.20"W	Zona de posible riesgo		3-I		
19°22'42.13"N 99° 5'45.20"W	Zona de posible riesgo				1-III
19°22'6.54"N 99° 6'51.91"W	Zona de posible riesgo				2-III
19°19'51.96"N 99° 7'18.85"W	Zona de posible riesgo				3-III
19°19'36.11"N 99° 7'34.83"W	Zona de posible riesgo				4-III
19°17'43.22"N 99° 7'26.31"W	Zona de posible riesgo				5-III
19°19'41.42"N 99° 2'10.31"W	Zona de posible riesgo				6-III
19°18'28.75"N 99° 1'51.37"W	Zona de posible riesgo				7-III
Total de puntos por escenario		30	30	30	32
Total de puntos		122			

Tabla 4.1. Distribución de puntos por escenarios de red.

Luego de disponer de esta redistribución de puntos de medida, en total serían recorridos 122 sitios, realizando 106 mediciones en exteriores y 16 en interiores. De esta manera se logra que cada escenario tenga una cantidad equitativa de puntos, en la mayoría de los casos serían visitados 30 sitios por configuración. Únicamente el Escenario III cuenta con 32 puntos (2 puntos adicionales) debido a que en esta configuración las zonas de riesgo de recepción son mayores, a consecuencia del aumento de potencia en el transmisor secundario. Esta nueva distribución eliminó 17 sitios de medición en comparación con la pasada planificación [1], mientras que fueron agregados 10 puntos de medida (comunes con los demás escenarios) al caso donde solo opera el transmisor principal. Esto para lograr la distribución equitativa de sitios entre todos los escenarios.

Además, por cuestiones de difícil acceso, fueron reubicados geográficamente 24 puntos de medida.

4.2. Duración de la campaña de medidas y definición de recorridos

A continuación se realiza una estimación de cuánto tiempo puede abarcar la campaña de mediciones en campo, a partir de la planificación de los sitios de medida definidos para los distintos escenarios en los cuales debe operar la Red en Frecuencia Única en cuestión. Además se orienta el orden de los puntos de medición a transitar cada día, facilitando los recorridos de la unidad móvil y logrando un barrido óptimo del área de análisis. Dicho vehículo fue facilitado por TV UNAM, socio del Proyecto REFUTV, y será utilizado para transportar el personal indicado, los instrumentos de medición y otros implementos durante el período de pruebas.

Se pretende estimar el tiempo en el cual se deben llevar a cabo la totalidad de las mediciones en campo. Para esto es necesario tener en cuenta ciertos intervalos de tiempo [2]:

- Duración de la medición en cada sitio: **15 minutos** (1 minuto de grabación de la señal para cada una de las direcciones de la antena + 8 minutos tomando capturas con el ETL, fotos del entorno y otros datos relevantes del sitio).
- Tiempo de traslado de un lugar a otro: **25 minutos** aproximadamente (teniendo en cuenta el tráfico habitual en la CDMX).
- **20 minutos** adicionales para, una vez arribado un punto de medida, encontrar un lugar adecuado para estacionar la unidad móvil, montar la antena en el mástil y posicionarla hacia la primera dirección de medición.

Analizando todo lo anterior se considera un tiempo total de 1 hora por cada sitio, y planificando 5 horas netas de medición en campo cada día (9:00 a 14:00), se deben recorrer 5 puntos de medida diariamente. En este sentido, se quiere evaluar el tiempo aproximado en el cual se recorrerán todos los sitios de medida planificados. Además, se establece un reparto de los sitios a cumplir cada día teniendo en cuenta la cercanía de los mismos, lo cual debe facilitar los recorridos de la unidad móvil.

La cantidad de días de pruebas planificados y los puntos a recorrer cada jornada son definidos seguidamente; considerando cada uno de los escenarios propuestos. Los cuatro sitios subrayados en cada caso, corresponden a lugares tenidos en cuenta para mediciones en interiores.

La escala mostrada en la Figura 4.1 refleja la intensidad de campo eléctrico estimada en la Ciudad de México, emitida cuando solo opera el transmisor del Cerro del Chiquihuite. Las zonas verdes (recepción sin problemas), amarillas (posible riesgo de recepción) y rojas (sin recepción),

plasmadas en las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se basan en criterios ya establecidos durante trabajos previos a la planificación del período de pruebas de campo (ver Anexo 1).

4.2.1. Transmisor principal operando en solitario

El primero de los casos, donde el transmisor principal opera en solitario, incluye un total de 30 sitios de medida. A continuación se refleja un desglose de los puntos a recorrer cada jornada para esta configuración así como el total de días estimado para cubrir dichos sitios.

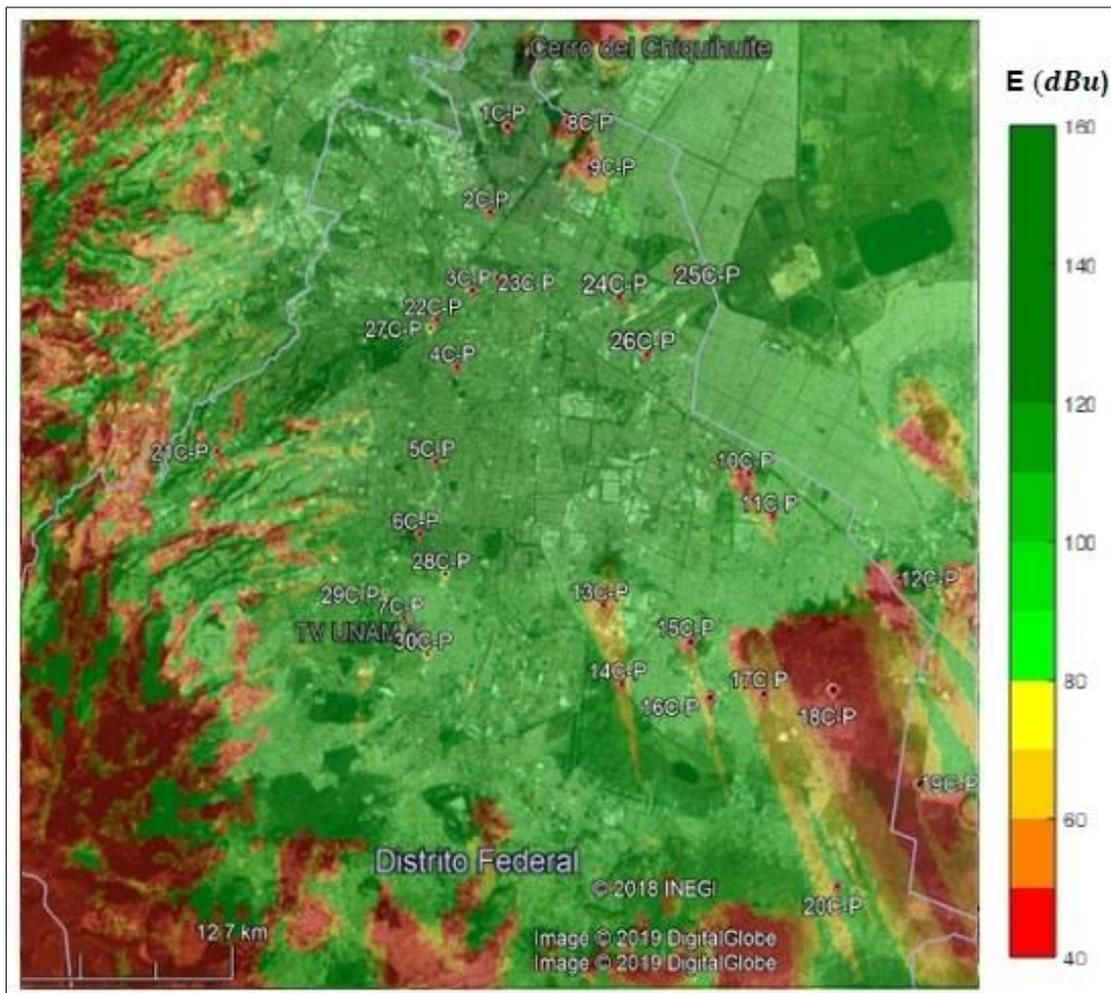


Figura 4.1. Ubicación de puntos de medida para el caso en que opere solo el transmisor principal.

30 puntos planificados: se estiman 6 días de mediciones.

Día 1: puntos 7C-P, 30C-P, 29C-P, 28C-P, 6C-P.

Día 2: puntos 16C-P, 17C-P, 18C-P, 19C-P, 20C-P.

Día 3: puntos 13C-P, 14C-P, 15C-P, 11C-P, 12C-P.

Día 4: puntos 10C-P, 26C-P, 24C-P, 25C-P, 23C-P.

Día 5: puntos 9C-P, 8C-P, 1C-P, 2C-P, 3C-P.

Día 6: puntos 5C-P, 4C-P, 22C-P, 27C-P, 21C-P.

La Figura 4.1 muestra la intensidad de campo eléctrico estimada a partir de la operación del transmisor principal. El umbral de recepción queda definido por los 48 dB μ V/m, establecido por el IFT en México [3].

4.2.2. Escenario I

Al igual que el caso anterior, el Escenario I tiene en cuenta un total de 30 sitios de medición. Los recorridos propuestos para la unidad móvil y la estimación de días para completar este escenario son descritos seguidamente.

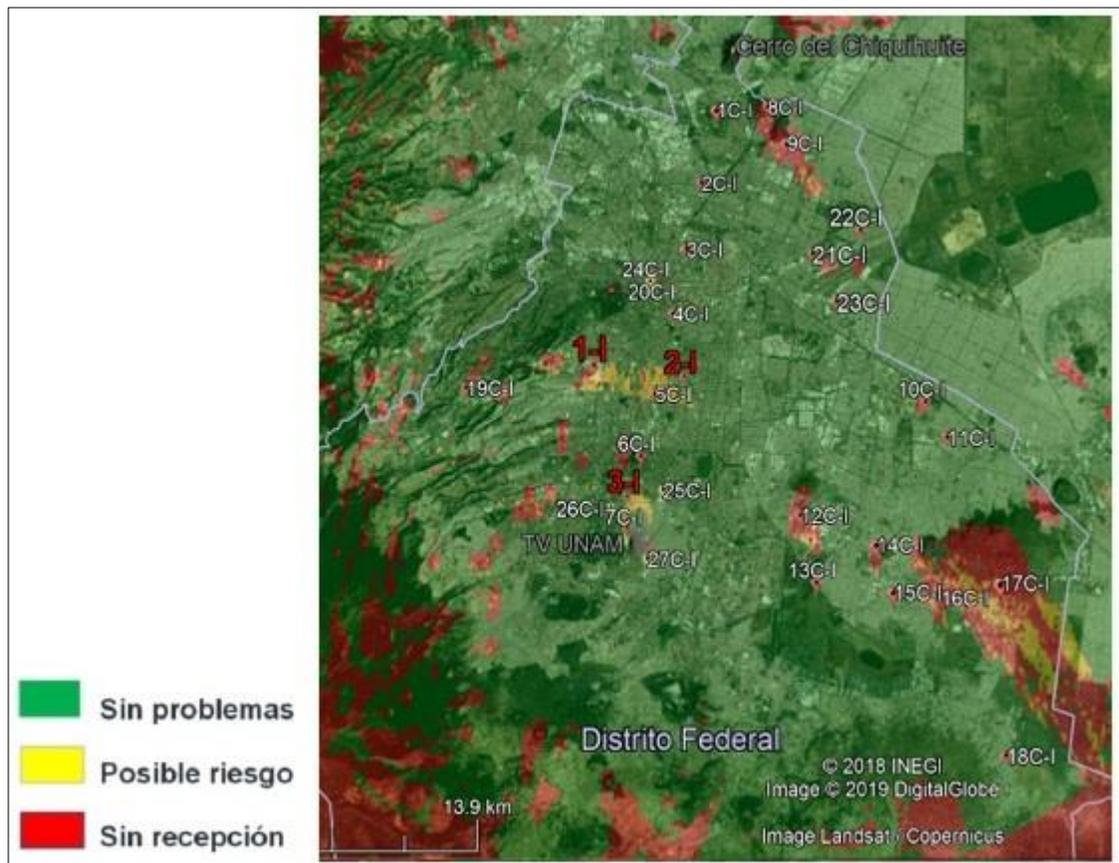


Figura 4.2. Ubicación de puntos de medida para el Escenario I.

30 puntos planificados: se estiman 6 días de mediciones.

Día 7: puntos 7C-I, 26C-I, 25C-I, 3-I, 6C-I.

Día 8: puntos 27C-I, 13C-I, 12C-I, 11C-I, 10C-I.

Día 9: puntos 14C-I, 15C-I, 16C-I, 17C-I, 18C-I.

Día 10: puntos 23C-I, 21C-I, 22C-I, 9C-I, 8C-I.

Día 11: puntos 5C-I, 2-I, 4C-I, 1-I, 19C-I.

Día 12: puntos 20C-I, 24C-I, 3C-I, 2C-I, 1C-I.

La Figura 4.2 refleja zonas donde la recepción puede verse degradada luego de la operación conjunta de ambos transmisores, ubicados en Cerro del Chiquihuite y TV UNAM; teniendo en cuenta las características definidas a la red para este escenario.

4.2.3. Escenario II

El Escenario II también comprende un total de 30 puntos de medida, manteniendo la distribución equitativa con el resto de las configuraciones. Debajo son establecidos la cantidad de días estimados y los recorridos a desarrollar en este caso.

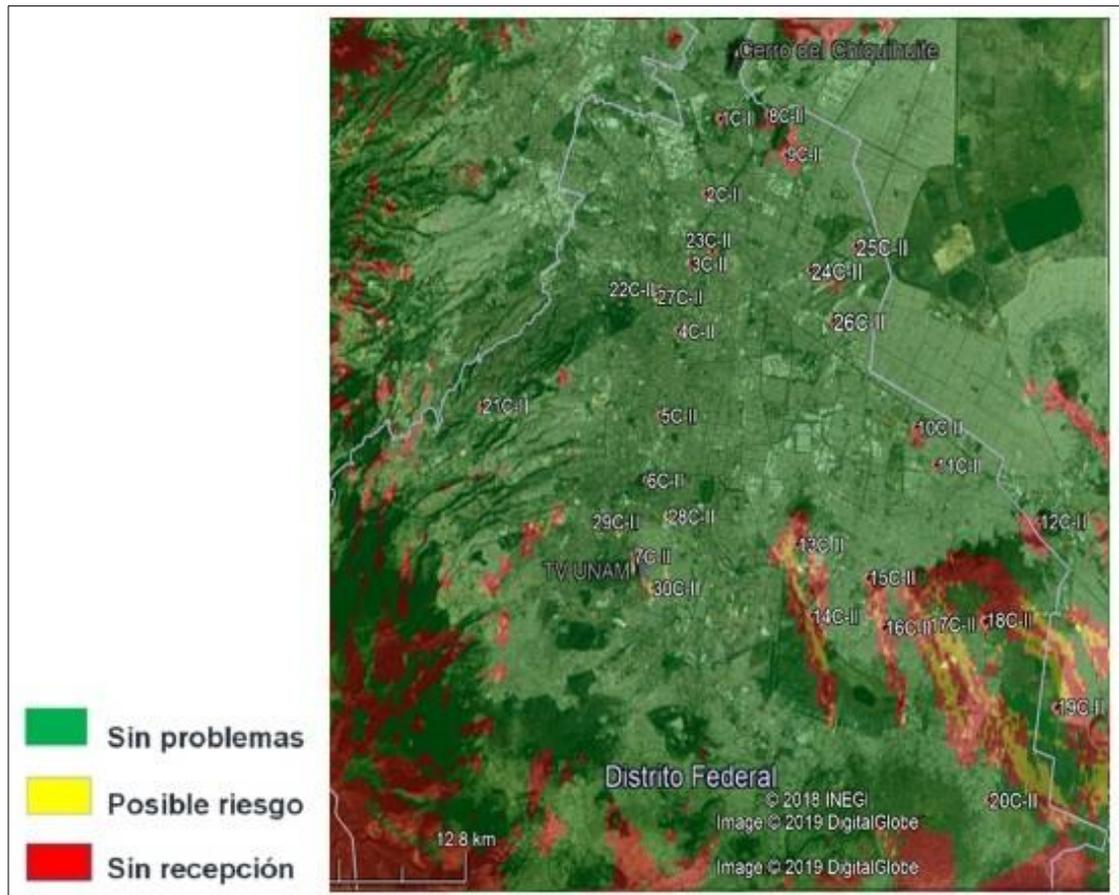


Figura 4.3. Ubicación de puntos de medida para el Escenario II.

30 puntos planificados: se estiman 6 días de mediciones.

Día 13: puntos 7C-II, 30C-II, 29C-II, 28C-II, 6C-II.

Día 14: puntos 16C-II, 17C-II, 18C-II, 19C-II, 20C-II.

Día 15: puntos 13C-II, 14C-II, 15C-II, 11C-II, 12C-II.

Día 16: puntos 5C-II, 10C-II, 26C-II, 24C-II, 25C-II.

Día 17: puntos 21C-II, 22C-II, 27C-II, 3C-II, 4C-II.

Día 18: puntos 23C-II, 2C-II, 1C-II, 8C-II, 9C-II.

Los problemas de recepción generados por la operación de la red SFN, bajo los parámetros establecidos para el Escenario II, son mostrados en la Figura 4.3.

4.2.4. Escenario III

El Escenario III presenta un total de 32 puntos de medida planificados. La cantidad de sitios propuestos es ligeramente superior en comparación con los casos anteriores.

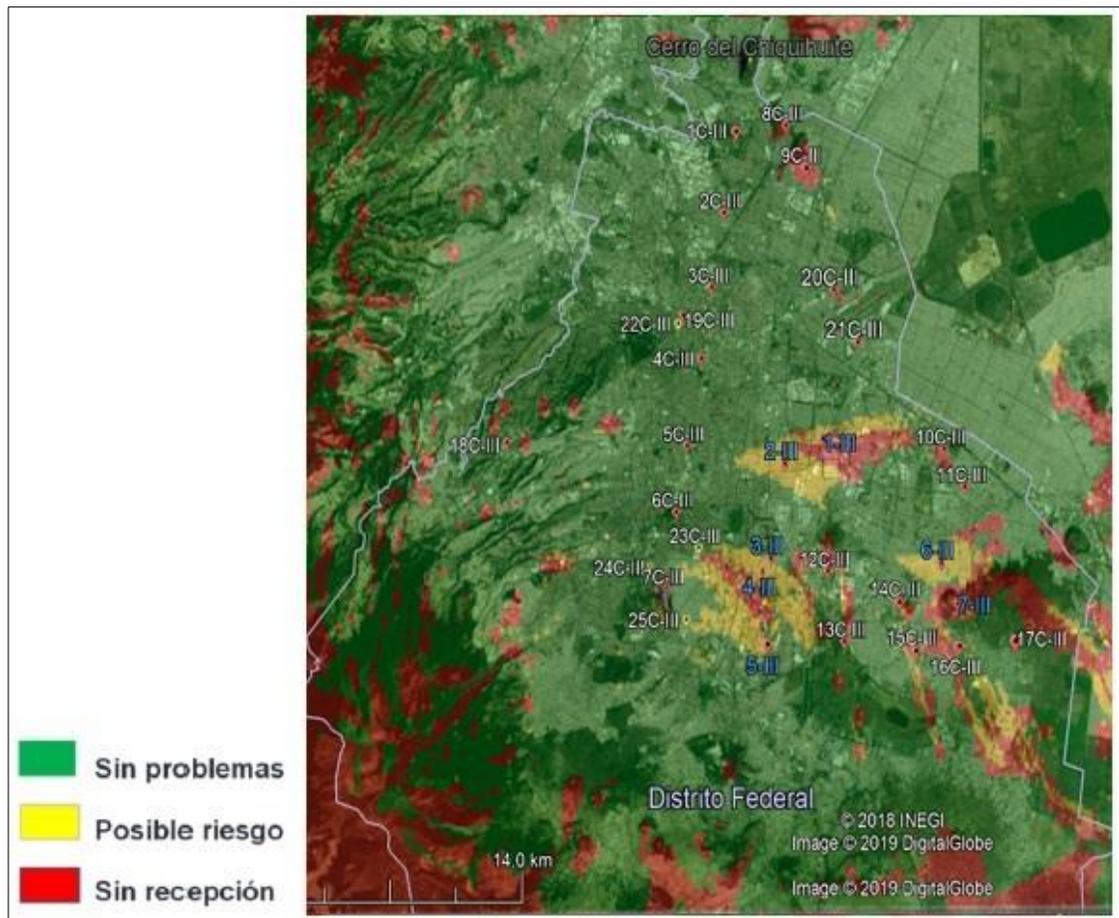


Figura 4.4. Ubicación de puntos de medida para el Escenario III.

Esto debido al aumento de potencia en el transmisor secundario para esta configuración, generando mayores zonas de riesgo de recepción; las cuales son relevantes para el estudio. A

continuación es posible apreciar la estimación de días totales y recorridos propuestos para el Escenario III.

32 puntos planificados: se estiman 7 días de mediciones.

Día 19: puntos 7C-III, 25C-III, 24C-III, 23C-III, 6C-III.

Día 20: puntos 1-III, 2-III, 3-III, 4-III, 5-III.

Día 21: puntos 12C-III, 14C-III, 6-III, 11C-III, 10C-III.

Día 22: puntos 13C-III, 15C-III, 7-III, 17C-III, 16C-III.

Día 23: puntos 21C-III, 20C-III, 9C-III, 8C-III, 1C-III.

Día 24: puntos 5C-III, 4C-III, 19C-III, 3C-III, 2C-III.

Día 25: puntos 18C-III, 22C-III.

Para este escenario, debido al aumento de potencia del transmisor complementario ubicado en TV UNAM, las zonas con problemas de recepción aumentan. La Figura 4.4 refleja este comportamiento.

4.2.5. Resumen de la duración y organización de las recorridos de medidas

Considerando todo lo expuesto, y previendo que la unidad móvil asignada para las mediciones solo puede operar de martes a viernes, se calcula que la campaña de pruebas de campo puede extenderse durante 6 semanas y un día (25 días de medidas). Recordar que serían un total de 122 puntos de medición.

Debido a que toda campaña de pruebas está sujeta a la existencia de dificultades que puedan dilatar su culminación, es conveniente considerar una duración de 7 semanas para el período de pruebas en campo.

4.3. Punto de referencia

De acuerdo a la metodología elaborada para el desarrollo de la campaña de pruebas de campo [2], cada día, antes de comenzar las medidas reales, es necesario verificar el funcionamiento correcto de todo el sistema, incluidos transmisores y equipos de medición. En este sentido se debe ubicar un punto específico en el cual se grabe una señal de referencia, que contribuirá a esta tarea. Una vez comenzado el período de pruebas, en este punto se deben realizar las primeras medidas cada jornada. La señal grabada en esta locación antes del inicio de las pruebas marcará la referencia para los días de medición restantes, con el fin de verificar que todos los equipos operen adecuadamente.

Este punto de referencia debe estar cerca del lugar donde inician los recorridos de la unidad móvil cada día (instalaciones de TV UNAM), así como del Posgrado de Ingeniería. En caso de que se detecte algún inconveniente o mal funcionamiento, sería más sencillo regresar y dar solución al mismo (reemplazando algún cable o conector averiado, sustituyendo la fuente alternativa de energía, etc.).

Con la intención de encontrar la ubicación adecuada para este punto, se llevó a cabo un recorrido por todo el campus universitario. Se priorizaron aquellas zonas con características de terreno elevado, donde no existiera abundante tráfico vehicular, debido que éste puede producir variaciones en el nivel de la señal recibida.

Al momento de determinar este sitio de referencia, lo más importante es que sea posible tener una línea de vista clara hacia las dos estaciones transmisoras de la red SFN. Al haber visión directa la señal recibida es de mayor amplitud, y lo más importante, es más estable y por tanto, más fiable. Debido a esto, es trascendental evaluar posibles obstrucciones en este sentido, tanto desde el punto de vista natural (perfil del terreno) como artificial (edificaciones).



Figura 4.5. Ubicación de los 11 sitios visitados durante recorrido para determinar el punto de referencia.

Resulta necesario aclarar que, durante las mediciones en campo, la antena receptora a utilizar estará ubicada sobre un mástil alcanzando una altura que supera fácilmente los 2 metros sobre el nivel del suelo. Además, el elemento radiador colocado en TV UNAM se eleva 18 metros sobre el nivel del suelo, según datos facilitados por los ingenieros encargados de la instalación. El Cerro del Chiquihuite, emplazamiento del transmisor principal, cuenta con una altura de 2719 metros sobre el nivel del mar. Estos últimos datos se tuvieron en cuenta al momento de valorar las líneas de vistas mencionadas.

Se definieron un total de 11 puntos dentro de Ciudad Universitaria (CU). Se eligió CU por tener menor tráfico que las calles aledañas. Desde cada uno de ellos, fueron trazadas líneas a ambos transmisores de la red, definiendo sus perfiles orográficos, y evaluando así qué tan clara es la vista hacia los sitios emisores. La Figura 4.5 muestra la ubicación de dichos 11 puntos y sus líneas de vista hacia los transmisores, desplegadas en la herramienta Google Earth Pro.

Este grupo de 11 puntos, luego de realizar una evaluación de los mismos, fue reducido a solo dos puntos (el 5 y el 11). Estos dos sitios mostraron las mejores condiciones en cuanto a líneas de vistas claras tanto al Cerro del Chiquihuite, como a TV UNAM. Las características del relieve son favorables en ambas direcciones, tampoco existen edificios altos que puedan dificultar la correcta propagación de la señal.

A continuación se muestran los perfiles del terreno facilitados por la herramienta Google Earth Pro desde los puntos 5 (Latitud: 19°19'21.08"N, Longitud: 99°11'41.32"O) y 11 (Latitud: 19°19'2.81"N, Longitud: 99°11'0.30"O), hasta las ubicaciones relativas a cada transmisor de la red SFN.

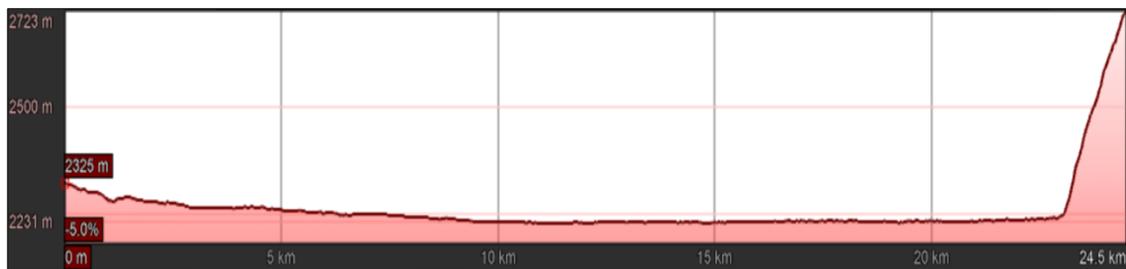


Figura 4.6. Perfil del terreno desde el punto 5 hasta el Cerro del Chiquihuite.



Figura 4.7. Perfil del terreno desde el punto 5 hasta TV UNAM.



Figura 4.8. Perfil del terreno desde el punto 11 hasta el Cerro del Chiquihuite.

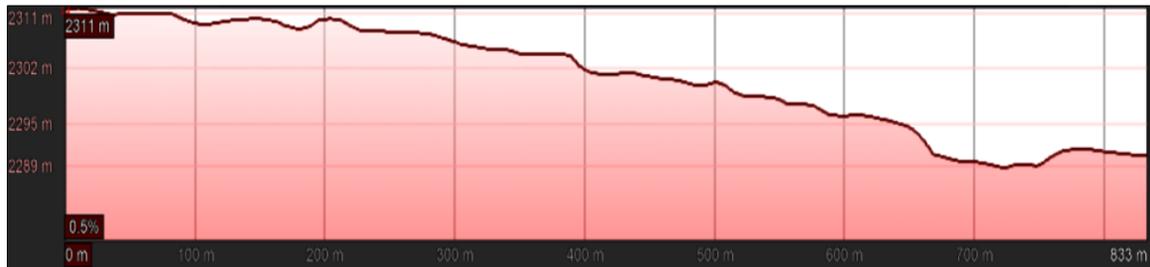


Figura 4.9. Perfil del terreno desde el punto 11 hasta TV UNAM.

4.3.1. Mediciones reales en los sitios seleccionados

Una vez reducido el número de posibles puntos de referencia, se procedió a visitar los sitios seleccionados con la unidad móvil y todo el equipamiento de medida a utilizar durante el período de pruebas.

En cada sitio se midió, entre otros parámetros, el nivel de señal recibido desde las dos direcciones principales a orientar la antena receptora (Cerro del Chiquihuite y TV UNAM). Hubo que tener en cuenta que al momento de realizar estas medidas, todavía el transmisor secundario en TV UNAM no estaba operando, mientras que el transmisor principal ubicado en las instalaciones de SPR sí estaba en operación. Los valores recopilados se muestran a continuación. El Anexo 2 expone capturas de pantallas obtenidas durante las mediciones realizadas.

- **Punto de referencia 5:**

Nivel recibido desde Cerro del Chiquihuite: Nivel_CHI = -50.5 dBm.

Nivel recibido desde TV UNAM: Nivel_TVU = -61.5 dBm.

- **Punto de referencia 11:**

Nivel recibido desde Cerro del Chiquihuite: Nivel_CHI = -37.9 dBm.

Nivel recibido desde TV UNAM: Nivel_TVU = -54.3 dBm.

Analizando estos datos recopilados, es posible apreciar que los niveles de señal obtenidos al orientar la antena receptora hacia los dos sitios transmisores de la red SFN son superiores en el

punto 11. A pesar de que el transmisor complementario aun no operaba en TV UNAM, los valores de potencia obtenidos desde esa dirección sobresalen también en este lugar.

Dado que ambos puntos de antemano cumplían el requisito de línea de vista despejada y luego de revisar los valores de nivel de señal recopilados, se decidió que el punto 11 será ocupado como sitio de referencia para verificación de parámetros y equipamiento de medida durante la etapa real de pruebas en campo.

4.4. Planificación de la reproducción y toma de medidas en laboratorio

Una parte trascendental del período de mediciones recae en la reproducción de señales y evaluación de receptores comerciales en laboratorio. En etapas precedentes del Proyecto REFUTV, fueron realizadas una serie de pruebas de laboratorio que permitieron analizar el desempeño de un grupo de receptores comerciales bajo la presencia de un eco estático [4]. Uno de los objetivos de la campaña de pruebas en campo es comparar los resultados obtenidos en los experimentos de laboratorio, con el desempeño de estos receptores bajo condiciones de una red SFN real.

En laboratorio fueron evaluados un total de 6 receptores de distintos fabricantes, distribuidos entre la gama alta, media y baja. Estos receptores representan una muestra significativa de las principales pantallas comercializadas en el país al momento de realizarse estos experimentos.

A continuación se muestran características (marca y modelo) del grupo de pantallas evaluadas durante las pruebas en laboratorio.

- Receptor ATSC **LG SMART TV 42LA620S**.
- Receptor ATSC **TCL L19T3540**.
- Receptor ATSC **SAMSUNG UN40FH6203F**.
- Receptor ATSC **ATVIO ATV0714LCD**.
- Receptor ATSC **PANASONIC TC-L32BL6X**.
- Receptor ATSC **SONY KDL-32R430B**.

Para estas pruebas, las señales en laboratorio fueron generadas con el equipo SFE Broadcast Tester de Rohde & Schwarz (R&S). El equipo SFE es ideal para la evaluación de estos dispositivos bajo condiciones simuladas de una red SFN, pues tiene la capacidad de gestionar hasta doce trayectos independientes de la señal.

El desempeño de estos receptores fue comparado con la Práctica Recomendada A/74 [5] y el comportamiento del ETL TV Analyzer de Rohde & Schwarz (R&S), equipo de medición a utilizar durante las medidas. Todos los receptores comerciales evaluados cumplen con la mencionada Práctica Recomendada bajo la presencia de un eco estático [4]. La Figura 4.10 permite observar lo

mencionado anteriormente, mostrando las ventanas de ecualización de los receptores de mejor y peor desempeño, marcas PANASONIC y ATVIO respectivamente.

Durante las pruebas en campo, la unidad móvil contará con uno de estos receptores comerciales para visualizar las señales recibidas en cada punto, y evaluar su desempeño, específicamente la pantalla marca PANASONIC. Esto debido a que mostró el mejor desempeño durante los experimentos antes indicados. En las mediciones en campo solo será evaluado este receptor con la intención de reducir el tiempo que se esté en campo, ya que este tipo de medidas son muy costosas. En una campaña de mediciones de este tipo, es necesaria la inversión de muchos recursos desde el punto de vista humano y material, por lo cual es fundamental optimizar el tiempo de duración.

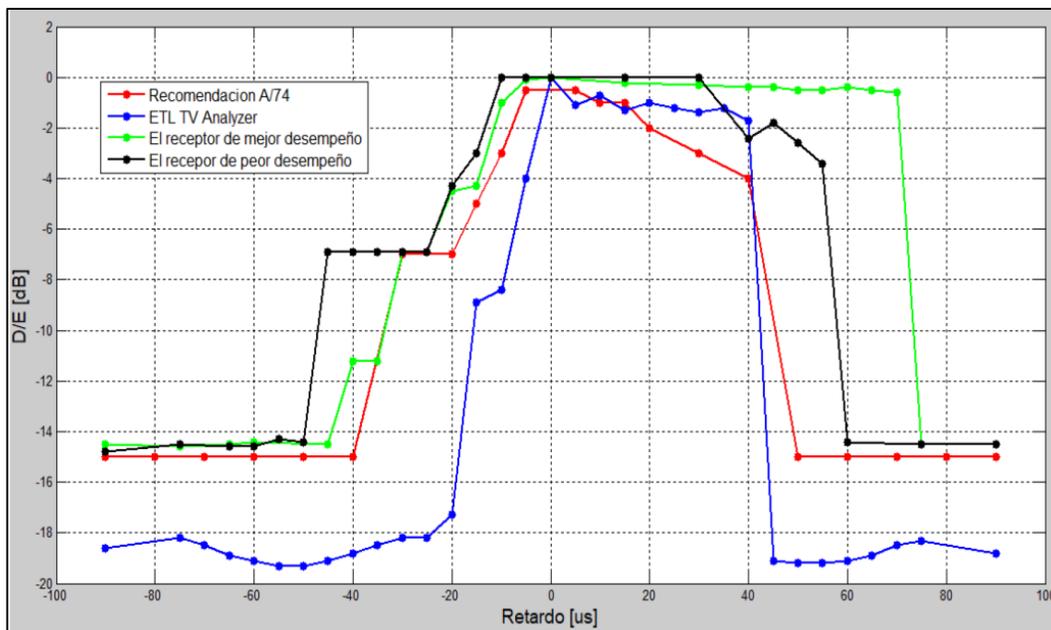


Figura 4.10. Evaluación del desempeño de los receptores ante un eco estático [4].

Igualmente, por límites de tiempo, se decidió excluir el receptor de peor desempeño (pantalla marca ATVIO) de la etapa de reproducción sucesiva de las señales reales, dejando las cuatro pantallas restantes para su evaluación en laboratorio.

En cada punto, durante las mediciones en campo, la señal recibida es grabada por un minuto con la ayuda del equipo USRP (del inglés, Universal Software Radio Peripheral) modelo X300 y un software denominado Sistema de Captura, realizado en el software libre GNU Radio. El USRP modelo X300 es un equipo que permite implementar radios definidos por software [6].

Las señales grabadas (muestras IQ) en campo son repetidas posteriormente en laboratorio mediante el mismo equipo y un software nombrado Sistema de Reproducción (también sobre la

base de GNU Radio). Esto permite evaluar el desempeño del resto de las pantallas, bajo condiciones idénticas a las obtenidas en campo. El funcionamiento de los softwares (Sistema de Captura y Sistema de Reproducción) fue caracterizado en trabajos previos durante la planificación de estas pruebas [2].

Para estudiar el comportamiento de cada receptor, se usa el parámetro Umbral de Visibilidad (TOV, del inglés Threshold Of Visibility). Dado que los receptores no proporcionan datos objetivos de la calidad de recepción, este parámetro permite evaluar, de forma subjetiva, las fallas producidas en audio y video durante un período de tiempo determinado. En las pruebas de laboratorio ya realizadas [4], se definió el TOV como la ocurrencia de al menos dos errores perceptibles durante un minuto de señal recibida, a partir del cual se considera mala recepción.

La pantalla marca PANASONIC será evaluada, de manera sistemática, en cada sitio de medida visitado. El resto de los receptores (otros cuatro) serán analizados mediante las sucesivas reproducciones en laboratorio.

4.4.1. Equipamiento necesario para las medidas en laboratorio

La reproducción en laboratorio de las señales grabadas, permitirá evaluar la calidad de recepción de las pantallas restantes (no presentes en la unidad móvil) con las mismas características obtenidas durante las pruebas en campo.

Para agilizar la evaluación de los restantes receptores y recortar la duración de esta parte de pruebas, se ha planeado la reproducción de las señales en dos locales diferentes. En cada local serán evaluados, simultáneamente, dos pantallas.

Para lograr esto, además de las cuatro pantallas a evaluar, se cuenta con los siguientes equipos y accesorios:

- USRP modelo X300 (cantidad: 2).
- Antena GPS activa de 5 V (cantidad: 2).
- Laptop con Sistema Operativo Ubuntu y software Sistema de Reproducción (cantidad: 2).
- Disco duro que almacene las señales grabadas previamente en campo (cantidad: 2).
- Divisor de potencia (cantidad: 2). Para distribuir la señal de RF entregada por el USRP, hacia los dos receptores comerciales en cada local.
- Cables coaxiales y cables Ethernet para las interconexiones necesarias entre el equipamiento de medida.

Para el desarrollo de estas pruebas se decide utilizar el USRP modelo X300 con módulo OCXO incorporado internamente. Este módulo tiene la función de mejorar la estabilidad de la frecuencia del oscilador local que tiene el USRP, mediante la utilización de GPS [7].

Este GPS cuenta con una antena externa, la cual debe colocarse en un lugar que facilite la sincronización del mismo. En ocasiones el GPS tarda en sincronizarse, por lo que se recomienda que la ubicación de la antena en un sitio adecuado y su conexión al USRP sea el primer paso a realizar al inicio de cada jornada de medidas.

Tanto el USRP a usar durante las mediciones en campo como los necesarios para las reproducciones en laboratorio, cuentan con un módulo OCXO incorporado y necesitan de sincronización GPS para proporcionar alta precisión de frecuencia.

4.5. Estimación del personal requerido para la etapa de pruebas

Para el período de mediciones en campo, así como para las sucesivas reproducciones en laboratorio, será requerida cierta cantidad de personal. La mayor parte de estas personas derivarán de los involucrados directamente en el proyecto REFUTV en la Facultad de Ingeniería, aunque también TV UNAM debe facilitar apoyo con algunos de sus trabajadores.

4.5.1. Personal para mediciones en campo

Las pruebas en campo constituyen el eslabón más importante de esta campaña de medidas. En la unidad móvil, durante los recorridos por la ciudad, será necesario contar con un grupo de personas que facilite una captura rápida de datos y grabación de señales.

En el interior de la unidad móvil serán requeridas dos personas:

- Una primera persona estará a cargo de maniobrar los instrumentos de medición, dígame ETL TV Analyzer y USRP, y las laptops correspondientes durante la toma de parámetros y grabación de archivos IQ.
En una laptop con Sistema Operativo Windows y conectada vía Ethernet al ETL TV Analyzer, se ejecutará el programa BC Drive de Rohde & Schwarz (R&S). Este permite capturar una serie de parámetros relevantes durante el minuto de medición, los cuales serán estudiados posteriormente durante la etapa de procesado de datos.
Una segunda laptop con Sistema Operativo Ubuntu y conectada vía Ethernet al USRP, ejecutará el software Sistema de Captura, grabando la señal recibida a lo largo del intervalo especificado.
- Una segunda persona deberá tomar los datos relativos al punto de medición (coordenadas geográficas, dirección, fecha, hora y otros apuntes relevantes). Además, durante el minuto en el cual será grabada la señal, este individuo se encargará de prestar total atención a la pantalla y el contenido reproducido en ella. De esta forma podrá tomar anotaciones de la ocurrencia de fallas en audio y video, determinando así el TOV y la calidad de recepción en cada caso.

Paralelamente a estas tareas, otro sujeto será requerido en el exterior del vehículo, la mayor parte del tiempo en el techo de la unidad móvil. Esta persona debe colocar la antena receptora sobre el mástil para ejecutar las medidas, así como girar este elemento receptor en cada una de las direcciones (azimut) definidas. Igualmente deberá tomar una serie de fotos del entorno y vistas de las orientaciones de la antena, lo cual puede facilitar la comprensión de fenómenos anómalos surgidos durante el análisis posterior de los datos obtenidos.

Resumiendo, durante cada jornada de medidas en campo, será necesaria la presencia de tres personas. Esto con el fin de agilizar las mediciones y reducir al máximo el tiempo empleado en cada punto del recorrido.

4.5.2. Personal para reproducciones en laboratorio

Las reproducciones sucesivas de las señales grabadas en laboratorio, permitirá evaluar la desempeño de aquellas pantallas no presentes en la unidad móvil, bajo las mismas características obtenidas durante las pruebas en campo.

Como ya se mencionó, se pretenden realizar reproducciones simultáneas de dichas señales en dos locales diferentes, conectando dos receptores comerciales a la vez en cada sitio. Esto permitirá recortar la duración de la etapa de pruebas en laboratorio, contando ya con todo lo necesario para llevar estas reproducciones paralelas.

En cada uno de estos dos locales, serán requeridas dos personas. Una vez puesta en marcha las reproducciones mediante el USRP y la laptop con el software Sistema de Reproducción, cada una de estas personas deberá prestar singular atención a uno de los receptores comerciales conectados al sistema. De esta manera será más eficiente la visualización de fallas, apuntes de las mismas y la evaluación de calidad de recepción de las pantallas en cuestión.

Partiendo de lo anterior, cada día de medidas en laboratorio ocupará un total de cuatro individuos. Para completar estos experimentos en laboratorio, jugarán un papel transcendental los estudiantes vinculados al Proyecto REFUTV como parte de su Servicio Social.

Bibliografía

- [1]. Y. Valdés. Tesis de Maestría: “Análisis de cobertura de diferentes escenarios para Pruebas de Campo de una red SFN-ATSC en CDMX.”, Facultad de Ingeniería, UNAM. Septiembre, 2018.
- [2]. A. Zentella. Tesis de Maestría: “Metodología para la evaluación en campo de redes SFN con ATSC en la Ciudad de México”, Facultad de Ingeniería, UNAM. Noviembre, 2017.
- [3]. Instituto Federal de Telecomunicaciones. Disposición Técnica IFT-013-2016: “Especificaciones y requerimientos mínimos para la instalación y operación de estaciones de televisión, equipos auxiliares y equipos complementarios”. Diciembre, 2016.
- [4]. J. M. Matías et al., “Resultados de las pruebas de laboratorio de ATSC”. Facultad de Ingeniería, UNAM. 01 de Junio, 2016.
- [5]. Advanced Television Systems Committee, “Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines”, Doc. A/74:2010, Apr. 7, 2010.
- [6] Ettus Research. “USRP™ X300 and X310 X Series Datasheet”. Fecha de consulta: 07 de diciembre, 2018. Disponible: https://www.ettus.com/content/files/X300_X310_Spec_Sheet.pdf
- [7]. Ettus Research. “GPSDO Selection Guide”. Fecha de consulta: 15 de febrero, 2019. Disponible: <https://www.ettus.com/kb/detail/gpsdo-selection-guide.pdf>

Capítulo 5. Preparación del procesado de datos

5.1. Parámetros de medida

Los parámetros de medida recopilados durante la etapa de pruebas juegan un papel fundamental dentro de este estudio. La información derivada de estos parámetros proporciona datos acerca de la calidad de la señal y permite evaluar las condiciones de recepción dentro de la red SFN.

En trabajos anteriores encaminados a la planificación de las pruebas de campo [1], fueron definidos los parámetros de interés durante cada medición.

Sobresalen un grupo de parámetros que son indicadores de la calidad con que la señal de ATSC es recibida, ofreciendo características propias de las señales ante diferentes niveles de potencia. Estos parámetros son los siguientes [1]:

- **Razón de Error de Modulación (MER):** es un vector que define el desplazamiento entre los puntos ideales de una constelación digital, y los reales. Este factor es un reflejo de la calidad de la señal recibida, reflejando diferentes tipos de deterioro de la señal como errores de fase, errores de cuadratura, ruido, etc. [1].
- **Razón de Error de Bit (BER) después del Reed Solomon:** se debe medir el BER después del codificador Reed Solomon debido a que se tiene un valor cuantitativo que permite evaluar, de forma objetiva, la calidad de la señal demodulada. Este valor cuantifica el número de errores de bit en una trama, independientemente del origen del error. Para lograr una correcta decodificación en los receptores comerciales, el BER debe ser inferior a 3×10^{-6} [2].
- **Relación C/N:** es la relación existente entre la potencia de la portadora de señal y la potencia de ruido. Según la Recomendación A/54 de ATSC, para una buena recepción, la relación C/N debe ser mayor o igual a 14.9 dB [3].
- **Umbral de Visibilidad (TOV):** permite determinar, de forma subjetiva, el desempeño de cada receptor; evaluando las fallas ocurridas en audio y video durante la medición de la señal de ATSC [1]. En las pruebas de laboratorio desarrolladas dentro del Proyecto REFUTV [4], se definió que deben ocurrir al menos dos errores al visualizar la señal durante un minuto para considerar una mala recepción.

Existe otro parámetro que ofrece una medida de las condiciones de recepción dentro de la red SFN, delimitando el comportamiento de los receptores. Dicho parámetro es la **respuesta impulsional del canal**, el cual entrega una medida de la dispersión temporal de la señal debido a la presencia de ecos. Estos ecos pueden ser derivados de la red de transmisión u originados de manera natural. Los retardos provocados por las multitrayectorias delimitan el desempeño de los

receptores. Las relaciones de amplitud entre las señales y los retardos, permiten generar una máscara de recepción que brinda información sobre las capacidades de cada receptor para recibir de forma correcta [1].

5.1.1. Datos adicionales

Existen ciertos factores que pueden tener una influencia considerable en las condiciones de recepción de la señal, por lo cual se deben tener en cuenta para la realización del análisis de resultados posterior al período de medidas. A continuación se detallan los factores a considerar [1]:

- **Ubicación del punto de medición:** las coordenadas geográficas del punto de medición permitirá comparar los resultados logrados en las simulaciones previas con los obtenidos durante las medidas en campo, teniendo un control de los parámetros para su posterior análisis. Estas coordenadas (latitud y longitud) pueden obtenerse mediante el equipo ETL TV Analyzer, que cuenta con un módulo GPS [1]. Además esta ubicación permitirá visitar en repetidas ocasiones el mismo punto, en caso de ser necesario.
- **Características del sitio de medición:** es importante conocer aquellas características del sitio que pueda tener influencia significativa sobre los resultados en la recepción, facilitando la comprensión de resultados incongruentes durante pruebas de campo y reproducciones en laboratorio. Los principales datos que deberán tomarse son: el tráfico vehicular y peatonal existente al momento de realizar las medidas, edificaciones o antenas cercanas a la ubicación del sitio, si existe abundante vegetación. Una descripción del clima (soleado, nublado, lluvioso o ventoso) en el punto de medición también debe ser considerada. Las características del clima pueden atenuar la señal al momento de las medidas, obteniéndose valores diferentes a los estimados [1].
- **Fotografías del sitio de medición:** se tomarán fotografías del sitio de medición en general, así como desde las distintas orientaciones de la antena receptora. Estas fotografías pueden ser observadas durante el análisis de los resultados, retomando características del sitio que pueden haber sido ignoradas en el momento de la medición [1]. Es importante que estas capturas representen (en lo posible) aquellos fenómenos que puedan presentarse (abundante tráfico, tendido de cables, otras antenas cercanas, etc.), los cuales podrían tener influencia sobre la recepción de la señal en cada punto.

Debido a la inmensa cantidad de datos a recopilar durante el período de pruebas, resulta conveniente crear una estructura de carpetas que facilite el almacenamiento de todos estos parámetros y datos adicionales, así como el desarrollo de herramientas informáticas que agilicen el posterior análisis de los valores obtenidos. En los siguientes epígrafes se define la organización de los datos recopilados y se presentan varios softwares desarrollados para el procesado de parámetros.

5.2. Organización de los datos recopilados durante pruebas de campo

Es necesario documentar los resultados de las mediciones en campo de tal manera que los datos puedan ser procesados y analizados posteriormente de manera eficaz. Los datos de las mediciones deben introducirse en una base de datos cuya estructura esté diseñada para un intercambio y análisis eficientes.

A continuación se describe la organización de datos que se diseñó.

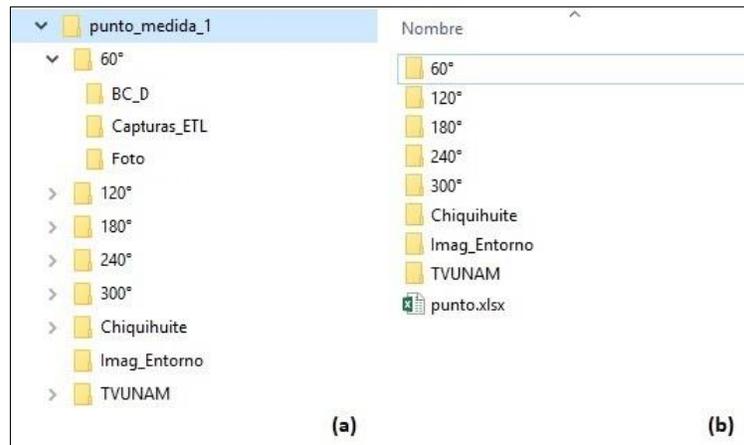


Figura 5.1. (a) Despliegue de árbol de directorios correspondiente a un punto de medida. (b) Contenido interno de las carpetas relativas a cada punto de medida.

Los datos se almacenan en una estructura basada en directorios. A cada punto de medida corresponde un directorio con todos los datos medidos en ese lugar, dentro del cual existe una sucesión de subdirectorios destinados a archivar los resultados recogidos en cada uno de los ángulos hacia los cuales se oriente la antena receptora en los distintos puntos de medida.

La orientación de la antena de recepción variará en 7 direcciones en cada locación:

- Apuntando directamente al Cerro del Chiquihuite (emplazamiento del equipo transmisor de mayor potencia).
- 60 grados con respecto a la primera orientación.
- 120 grados con respecto a la primera orientación.
- 180 grados con respecto a la primera orientación.
- 240 grados con respecto a la primera orientación.
- 300 grados con respecto a la primera orientación.
- Apuntando directamente a las instalaciones de TV UNAM (emplazamiento del equipo transmisor secundario).

Dentro de cada una de estas subcarpetas se encuentran otras destinadas a almacenar los datos específicos en cada dirección dentro de un punto de medida:

La primera de ellas está encaminada, como su nombre lo indica (**BC_D**), a recopilar los archivos arrojados por el software BC Drive de R&S; importantes para gran parte del posterior procesado por la cantidad de datos que brindan. Aquí deben quedar recogidos tres documentos de Microsoft Excel y un archivo con extensión *.kmz, la cual se usa para ficheros de marca de posición a visualizar con Google Earth.

La segunda carpeta denominada **Foto**, tiene como objetivo guardar una instantánea desde detrás de la antena receptora, en la cual se pueda visualizar claramente hacia donde apunta la misma.

En una tercera carpeta, nombrada **Capturas_ETL**, se planea guardar capturas referidas a las principales pantallas de medida mostradas por el equipo de medición ETL, las cuales se especifican a continuación:

- Tabla parámetros generales de la señal recibida, con nombre **TAB**.
- Espectro de la señal, con nombre **ESP**.
- Respuesta impulsional del canal, con nombre **ECOS**.
- Diagrama de constelación, con nombre **CONST**.
- Diagrama de ojos, con nombre **OJOS**.

Es importante tener claridad a la hora de colocar el nombre a cada captura de pantalla, para que sea fácilmente identificable su contenido, y así ahorrar tiempo al revisar los resultados. Por ello se decidió dotarles de un código compuesto por un identificador que hace referencia al contenido de cada imagen. Es importante cerciorarse de que las capturas queden almacenadas en la carpeta relativa a la correcta orientación de la antena en cada caso.

Además dentro de la carpeta principal respectiva a cada punto de medida, se creó una carpeta denominada **Imag_Entorno**, en la cual se almacenarán registros fotográficos del emplazamiento de medición en general, útiles para explicar con detalle las condiciones relativas a cada punto de medida. Se recomienda realizar 6 tomas fotográficas claras, estimándose que sea una cantidad suficiente para visualizar detalles característicos a cada locación.

Conjuntamente se debe completar un archivo de Microsoft Excel (Figura 5.2) que agrupa, de manera tabular, parámetros de medida (nivel de potencia, MER, BER, C/N) recopilados con el equipo ETL TV Analyzer para cada una de las orientaciones de la antena descritas anteriormente. Con el fin de agilizar la toma de datos durante las medidas reales en campo, este formato será impreso y los parámetros introducidos de forma manual. Al final de cada día, dichos datos serán reflejados digitalmente para su procesado posterior.

El parámetro Umbral de Visibilidad (TOV) permite evaluar el comportamiento de los receptores durante el período de pruebas. El personal que realiza las medidas también debe anotar en esta tabla los fallos (errores) visualizados en el receptor comercial (pantalla) durante el minuto de prueba en cada punto, junto con el momento en que ocurrieron. Los fallos recopilados durante la etapa en laboratorio serán agregados en el resto de las pantallas señaladas, pues solo un receptor estará presente en la unidad móvil durante las medidas en campo.

Para cada orientación de la antena, se colocará un “0” si existe uno o ningún error durante el minuto de medida, de lo contrario se debe insertar un “1” si tienen lugar al menos dos errores durante el período de tiempo en cuestión. Es importante especificar el segundo preciso en el cual ocurrió el error para comparar con las sucesivas reproducciones en laboratorio.

En total se pretenden evaluar cinco receptores comerciales. Específicamente uno (marca PANASONIC) estará presente durante los recorridos con la unidad móvil por los diferentes sitios de medidas, el comportamiento de las cuatro pantallas restantes se estudiará en laboratorio.

Se señalan en color amarillo (Figura 5.2), las direcciones cuando la antena receptora se orienta específicamente a los equipos transmisores que conforman la red SFN, pues el comportamiento de los receptores en dichas direcciones es el más importante para analizar el funcionamiento de esta red en concreto.

No menos importante es la introducción de características relativas al punto de medida (coordenadas geográficas, dirección del punto, fecha y hora, clima, tráfico, si existen edificios o antenas cercanos, si atraviesa algún avión la zona, entre otras observaciones generales). Estas características pueden cobrar vital relevancia durante la posterior etapa de procesamiento de los datos, contribuyendo a la comprensión de resultados anómalos.

Para el caso de mediciones llevadas a cabo en interiores se deben tener en cuenta, entre las observaciones generales, detalles como: número de pisos de la construcción y ubicación del piso en el cual se realiza la medición (1er piso, 2do piso, etc.), ubicación específica en la habitación ocupada dentro del edificio (esquina, medio, ventana, etc.), material de construcción (ladrillo, revestimiento, metal, etc.), tipo de construcción (oficina, centro comercial, casa particular, etc.).

En una base de datos paralela (Figura 5.3), aunque con la misma distribución de subdirectorios interiores correspondientes a las orientaciones de la antena, se precisa archivar los archivos IQ grabados con el equipo USRP para su posterior reproducción. Esto con el fin de analizar el comportamiento de los demás receptores en el laboratorio.

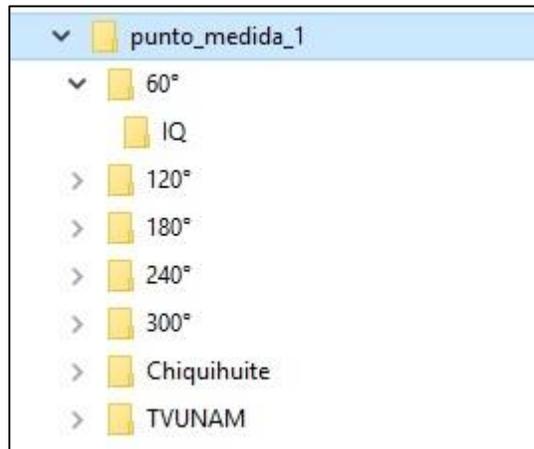


Figura 5.3. Despliegue de árbol de directorios paralelo para recopilación de archivos IQ.

La causa de almacenar los archivos IQ de manera independiente al resto de los datos, se debe al elevado tamaño de los mismos, lo cual crearía dificultades al momento de realizar copias de respaldo de la primera parte de los datos.

5.3. Estimación de respuesta impulsional a partir de datos almacenados con la herramienta BC Drive

Una de los principales factores, al estudiar el comportamiento de una red SFN, es la respuesta impulsional obtenida en determinado punto. La respuesta impulsional o patrón de ecos, representa la dispersión temporal de la señal, mostrando las amplitudes de los ecos que pueden tener dicha señal y sus retardos relativos. Estos ecos pueden ser producidos por la misma red de transmisión o de manera natural por el entorno de propagación.

El ETL TV Analyzer de Rohde & Schwarz (R&S) es un instrumento para analizar señales de TV, TV móvil y señales de radiodifusión. Este equipo cuenta con la opción de realizar medidas para el estándar ATSC/ATSC Mobile DTV y es el principal instrumento de medición a emplear durante el período de pruebas de campo.

El rango de frecuencias de operación está enmarcado entre 500 kHz y 3 GHz, generando los siguientes esquemas: espectro de la señal, constelación, diagrama de ojo, respuesta impulsional, gráfica de amplitud y fase, así como gráfica de amplitud y retardo de grupo [5].

El ETL TV Analyzer, entre sus funciones, permite obtener la respuesta impulsional para cada medición realizada. Dicha respuesta impulsional tiene un inconveniente, pues muestra hasta 9 ecos más la señal principal. En muchas ocasiones, la mayoría de estos ecos no son significativos debido a que la relación D/E es muy grande, haciéndolos despreciables.

Según la Práctica Recomendada A/74 de ATSC [2], los receptores no deben presentar problemas para demodular aquellas señales cuya relación D/E sea mayor a 15 dB. Este criterio permite simplificar en gran medida la respuesta impulsional entregada por el ETL TV Analyzer al tener en cuenta solo aquellos ecos que no cumplan esta condición, facilitando el estudio de los datos que revisten un interés especial para este trabajo.

La base para este propósito, son los archivos creados por el software BC Drive de R&S; específicamente del archivo cuya descripción es Patrón de Ecos (*Echo Pattern*). En este archivo se encuentran almacenados, en forma de arreglo matricial, datos recopilados durante cada una de las mediciones. Cada fila de la tabla corresponde a una muestra tomada durante el proceso de medición, reflejando las diferencias de potencia entre la señal directa y los ecos para cada instante de tiempo. Por su parte, las columnas a analizar modelan el comportamiento de la señal cada 1 microsegundo (μs). La interpretación de los datos presentes en este archivo no es sencilla, por la excesiva cantidad de relaciones entre muestras de señales e instantes de tiempo que él mismo maneja. Se pretende desarrollar una herramienta que permita, a partir de estos datos recopilados durante las medidas en campo, obtener una respuesta impulsional simplificada para cada punto durante el funcionamiento de la red SFN; recuperando solo las relaciones D/E y retardos relativos que sean significativos para el análisis.

El software BC Drive, propiedad de Rohde & Schwarz, permite guardar datos de una señal de televisión digital terrestre obtenidos por el ETL, de diferentes estándares como son: DVB-T2, ISDB-T, ATSC, ATSC Mobile y DTMB. En este caso se utiliza el estándar ATSC, ocupado actualmente en México para transmisiones de Televisión Digital Terrestre. Esta herramienta controla al equipo ETL TV Analyzer de R&S y un módulo GPS, para identificar la posición geográfica de cada una de las medidas obtenidas en campo.

El BC Drive se puede instalar en una computadora con Sistema Operativo Windows o directamente en el equipo ETL TV Analyzer. En este caso se opta por la primera opción, por lo cual es preciso utilizar un cable Ethernet para el control remoto del equipo.

Los pasos correspondientes al inicio del procesado de datos para obtener la respuesta impulsional se enumeran a continuación:

- 1) Extraer los valores requeridos desde el archivo de Microsoft Excel que enmarca la descripción Patrón de Ecos en su nombre (obtenido con el software BC Drive). Aunque este archivo integra otros datos relativos al punto de medición (fecha, hora y coordenadas geográficas) solo se tendrán en cuenta las columnas que muestran valores relevantes para esta parte del procesamiento, dígame diferencias de potencias y retardos.
- 2) Procesar los valores obtenidos para las 20 columnas anteriores y 40 columnas posteriores al valor de referencia (columna correspondiente a 0 micro segundos teóricos, columna 251 o JB

en la tabla de Microsoft Excel). El rango de columnas a procesar deriva del desempeño obtenido con el ETL TV Analyzer ante la presencia de un eco estático, durante las pruebas de laboratorio realizadas en el proyecto REFUTV. Este instrumento solo es capaz de demodular señales, dentro de una red SFN, con ecos que estén entre los $-20 \mu\text{s}$ (pre-ecos) y $40 \mu\text{s}$ (post-ecos) [4].

- De manera adicional, se lleva a cabo un barrido de las 100 columnas anteriores y 100 columnas posteriores al mencionado valor de referencia, con el fin de tener en cuenta valores significativos de diferencia de potencia (menores o iguales a -15 dB) que pudieran contribuir a una mejor comprensión del trabajo realizado. Estos valores se recogen en un archivo de texto denominado **Alertas**, el cual estará disponible para su revisión en caso de ser necesario. No se hace uso de estos valores al momento de evaluar la respuesta impulsional del canal en cada punto de medida.
- 3) Tomar cada una de las columnas en cuestión (especificadas al inicio del paso número 2) y encontrar la mediana en cuanto a la cantidad de filas, correspondientes con la cantidad de muestras realizadas. La mediana es, dentro de un conjunto de números agrupados crecientemente, aquel número colocado en el centro del arreglo (una mitad de las muestras estaría por encima y la otra por debajo de dicho valor). Si la cantidad de muestras es par, la mediana coincide con la media de los dos valores situados en el centro del arreglo [6]. Debido a que durante el minuto de grabación de la señal se obtienen unas 60 muestras (una muestra por segundo), este concepto estadístico se aplica para encontrar la tendencia de los valores de diferencia de potencia en cada instante de tiempo, reduciendo esa cantidad de datos a solo uno por cada columna. Una de las ventajas de utilizar la mediana es debido a que ésta no se ve afectada con facilidad por los valores extremos (muy bajos o muy altos) [6], ofreciendo un resultado más cercano al comportamiento real.
- Descartar aquellas columnas cuyas medianas sean igual a -200 y 0 , por corresponder estos valores al piso de ruido establecido por el software BC Drive y la posición de la señal principal, respectivamente.
 - Solo considerar aquellos casos en que los valores de diferencia de potencia sean menores o iguales a -15 dB , pues solo estos van a suponer problemas a la hora de una correcta demodulación.
 - Además, sustraer el valor 251 (posición de la columna de referencia, $0 \mu\text{s}$) del número correspondiente a la posición de la columna donde se encuentra la diferencia de potencia a analizar. Con esto se obtienen los valores de retardo de cada eco con respecto a la señal principal.
 - Si la sustracción comentada arroja un valor positivo, se considera una situación de post-eco (el eco tiene lugar luego de la señal principal con respecto al tiempo). Si la sustracción comentada arroja un valor negativo, se considera una situación de pre-eco (el eco tiene lugar antes de la señal principal con respecto al tiempo).

- 4) Proceder al guardado de los resultados obtenidos (diferencias de potencias y valores de retardos) en un nuevo archivo de Microsoft Excel definido para cada punto de medición, nombrado **Ecos**.
- 5) Obtener gráfica ilustrativa de la respuesta impulsional del canal a partir de los datos recopilados. Guardar imagen en formato PNG (Portable Network Graphics), debido a que este formato utiliza compresión sin pérdidas y muestra imágenes de muy buena calidad, ideal para dibujos lineales.

La Figura 5.4 permite observar un ejemplo de respuesta impulsional obtenido en un punto determinado. El pico más alto representa la señal directa o principal, ubicada en 0 μs . El pico mediano simboliza un eco cuya amplitud es 10 dB menor respecto a la señal principal, recibido 12 μs antes de esta señal principal (pre-eco). El pico más pequeño, recibido 10 μs después de la señal directa (pos-eco) mantiene una diferencia de potencia con la misma igual a 12 dB.

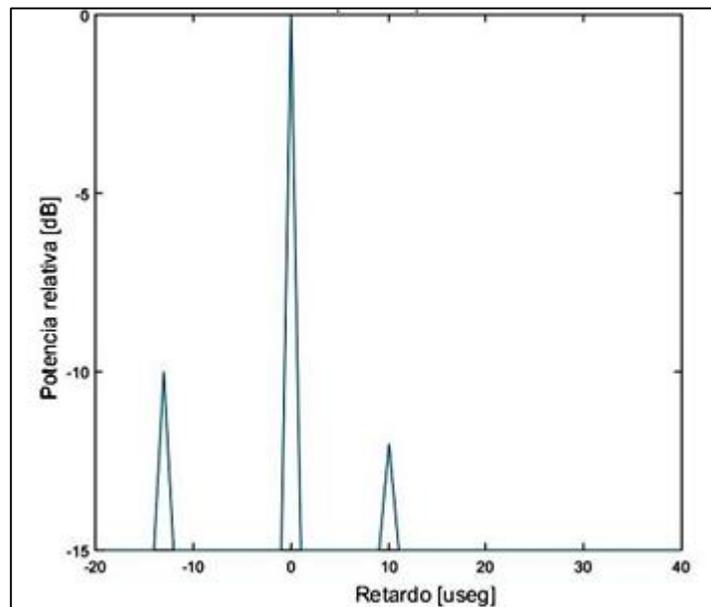


Figura 5.4. Prototipo de gráfica obtenido.

5.4. Evaluación subjetiva de la calidad de recepción en los puntos de medida

La evaluación del comportamiento de los receptores comerciales durante la etapa de pruebas constituye pieza fundamental de este estudio. Debido a que los receptores no muestran datos objetivos para evaluar la calidad de recepción, este comportamiento es estudiado de manera subjetiva a partir de la cantidad de fallas producidas en audio y video durante el minuto de señal

analizado. La ocurrencia de dos o más errores durante estos 60 segundos, es considerado mala calidad. El objetivo de este análisis consiste en determinar la calidad de recepción en los diferentes sitios de medición. Para esto se contabiliza la cantidad de receptores que mostraron una demodulación correcta de la señal en cada punto durante la etapa de pruebas (tanto en campo como en laboratorio). Recordar que serán estudiados cinco receptores comerciales en total.

Para la elaboración de un software de análisis ciertos criterios son establecidos, contemplando el desempeño de los receptores en los diferentes emplazamientos. Partiendo de la recopilación de datos relativos a los puntos de medida, guardados en el formato de Microsoft Excel capturado en la Figura 5.2, se otorga una leyenda de colores que permite una estimación visual del comportamiento de la recepción en las distintas locaciones.

Recordar que se enmarca con un “0” aquella dirección donde el receptor recibe correctamente (máximo de un error visualizado en un minuto de señal), de lo contrario, se utiliza un “1” para indicar recepción deficiente (visualización de dos o más errores en un minuto de señal). De momento solo se tendrán en cuenta las dos direcciones principales (apuntando directamente al Cerro del Chiquihuite y TV UNAM respectivamente), emplazamientos de los equipos transmisores de la red SFN. Los datos recogidos en estas dos direcciones se manejan de forma separada, aunque los criterios empleados son los mismos. Se establece una escala de colores, que será aplicada al desempeño de los receptores comerciales en cada una de estas orientaciones de la antena, para todos los puntos de medición analizados.

- **Color verde:** recepción de buena calidad (5 pantallas con recepción correcta de la señal).
- **Color amarillo:** recepción de calidad regular (3 o 4 pantallas con recepción correcta de la señal).
- **Color rojo:** recepción de mala calidad (2 o menos pantallas con recepción correcta de la señal).

El software desarrollado se encarga de extraer los datos necesarios del archivo correspondiente y otorgar los colores definidos anteriormente de forma automática y para toda la base de datos, luego cada punto de medida es ubicado en sus coordenadas y mostrado con la herramienta Google Earth Pro. Se elaboraron íconos específicos para los puntos, dependiendo de la orientación de la antena receptora en cuestión.

Las Figuras 5.5 y 5.6 muestran el resultado a obtener luego de ejecutar esta herramienta. Los puntos expuestos en estas imágenes son solo ejemplos para entender el funcionamiento del software en cuestión. No constituyen puntos de medida reales.

Apoyándose en la ventana **Sitios** de la herramienta Google Earth Pro, a la izquierda en las Figuras 5.5 y 5.6, es posible elegir aquellos puntos de interés para observar. Puede elegirse entre los sitios relativos a una de las direcciones en cuestión, o ambas, si así se desea. También puede optarse por

los puntos en función de la calidad de recepción, si se quiere observar solo aquellos marcados con un color específico.

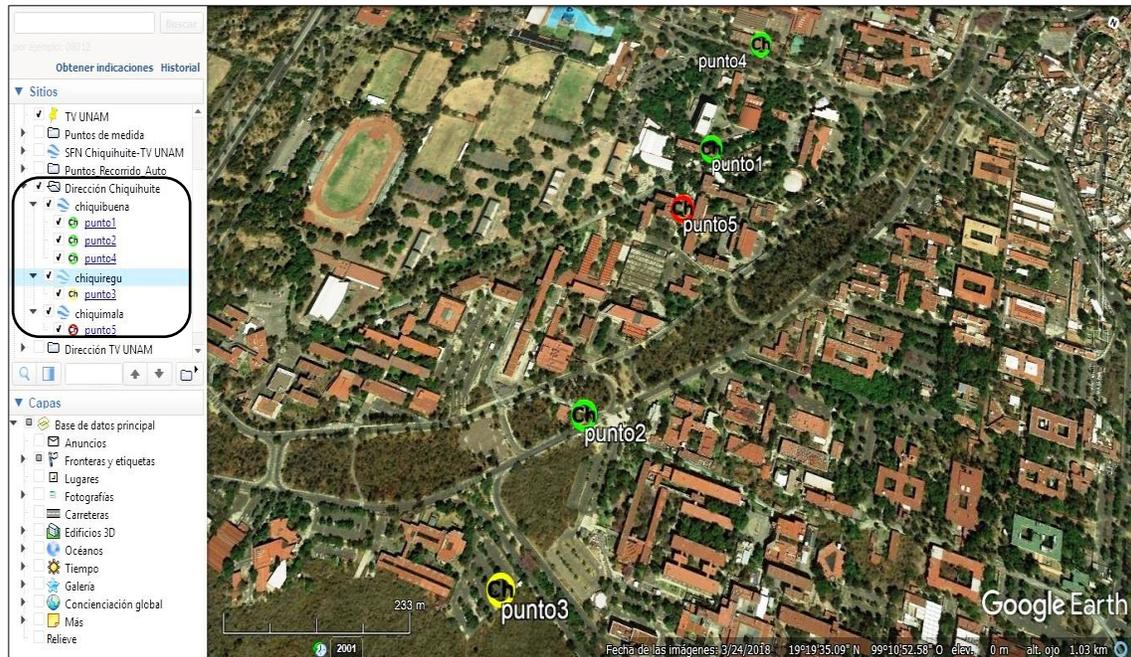


Figura 5.5. Muestra de la evaluación subjetiva de la recepción en varios puntos (dirección Cerro del Chiquihuite).

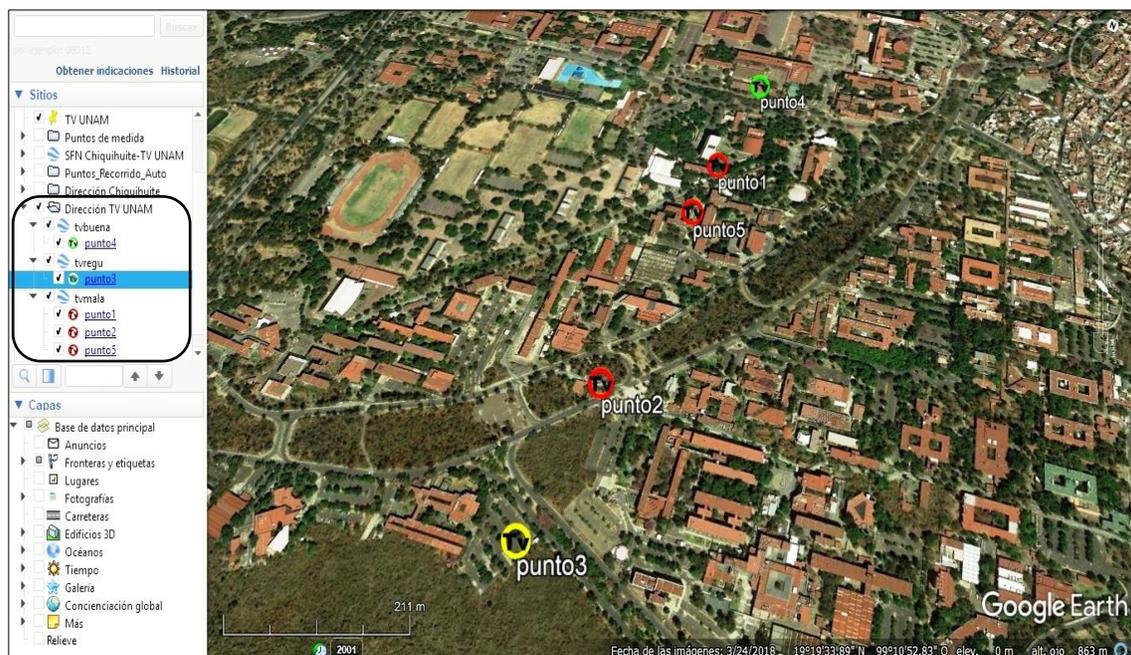


Figura 5.6. Muestra de la evaluación subjetiva de la recepción en varios puntos (dirección TV UNAM).

Este software ofrece una panorámica subjetiva de la calidad de recepción en cada punto, basado en el comportamiento de las pantallas evaluadas. Recordar que en la unidad móvil solo estará presente una pantalla, pero las demás serán puestas a prueba bajo las mismas condiciones en el laboratorio. Con solo observar la vista de Google Earth Pro, una vez desplegados todos los sitios de medida, podrá definirse aquellas zonas de la ciudad donde prevalece una mejor o peor recepción. Esto para cada una de las direcciones principales, donde se ubican los transmisores de la red.

5.5. Cálculo de la diferencia de retardo relativa para cada punto de medida

En las Redes en Frecuencia Única, el retardo relativo entre el arribo de señales a determinado punto constituye uno de los factores más influyentes para lograr una recepción satisfactoria de la señal. Se distinguen dos situaciones, se considera que hay un pre-eco cuando el eco llega al receptor antes de la señal principal, y post-eco si llega después. Grandes intervalos de tiempo entre el arribo de ambas señales puede deteriorar la calidad de recepción.

Por esta razón, en este tipo de redes, resulta imprescindible conocer el retardo con el cual las señales arriban a determinado punto. Aún más importante es conocer el retardo relativo en ese punto, obtenido como resultado de la diferencia de los tiempos que tardan en arribar a dicho sitio, las señales provenientes de ambos transmisores de la red. Solo es posible calcular con antelación los retardos derivados de las señales producidas por los equipos emisores, no así para los ecos derivados del multitrayecto natural.

Para agilizar el cálculo de retardos referentes a la red de transmisión, y evitar errores derivados de operaciones matemáticas manuales; se desarrolló un software que facilita el cómputo de estos datos. Dicho software basa su funcionamiento en calcular la distancia desde cada punto de medida planificado hacia las instalaciones en Cerro del Chiquihuite y TV UNAM (emplazamientos de los emisores de la red en cuestión), a partir de las coordenadas geográficas de cada sitio. Posteriormente, teniendo en cuenta el valor de la velocidad de la luz en el vacío (299,792,458 m/s), es posible calcular con precisión cuánto tardan las señales provenientes de ambos transmisores en arribar a cada punto de medición y la diferencia relativa entre estas demoras. Para el caso del transmisor secundario ubicado en TV UNAM, se decidió agregar un offset de 76 μ s [7], valor que es tenido en cuenta durante el desarrollo de esta herramienta.

La Tabla 5.1 agrupa la relación entre cada punto de medida y las distancias y retardos relativos a los sitios transmisores. En esta tabla se muestra la totalidad de los puntos planificados, independientemente si los mismos son comunes o únicos de cada escenario. Es necesario aclarar que los valores expuestos son calculados a partir de las coordenadas establecidas para cada punto durante la planificación. Al momento de realizar las mediciones reales, por diversos factores, estas coordenadas pueden variar ligeramente. Por esta razón, con la asistencia del software en cuestión,

las distancias y retardos mostrados serán recalculados en cada caso; luego de introducir manualmente las coordenadas definitivas para cada sitio de medición en la tabla capturada en la Figura 5.2.

Coordenadas del punto	Distancia a TX principal [km]	Retardo respecto TX principal [μs]	Distancia a TX secundario [km]	Retardo respecto TX secundario [μs] con offset adicional	Diferencia retardo relativa [μs]
19°29'59.27"N 99° 8'14.78"W	3,7	12,6	20,6	145,0	132,4
19°28'6.95"N 99° 8'38.23"W	7,2	24,3	17,1	133,2	108,9
19°26'21.58"N 99° 9'0.23"W	10,6	35,5	13,8	122,1	86,6
19°24'38.63"N 99° 9'21.72"W	13,8	46,2	10,6	111,4	65,2
19°22'37.65"N 99° 9'46.96"W	17,7	59,3	6,6	98,2	38,9
19°20'57.86"N 99°10'7.77"W	20,7	69,3	3,6	88,2	18,9
19°19'14.96"N 99°10'29.23"W	24,0	80,3	0,4	77,4	-2,9
19°30'12.81"N 99° 6'44.18"W	3,8	12,7	21,6	148,0	135,3
19°29'5.66"N 99° 6'8.60"W	6,1	20,3	20,1	143,0	122,7
19°22'25.98"N 99° 2'4.25"W	20,3	67,7	16,1	129,7	62,0
19°21'30.13"N 99° 1'26.97"W	22,3	74,3	16,5	131,0	56,7
19°20'20.41"N 98°58'31.41"W	27,3	91,0	21,4	147,3	56,3
19°19'31.42"N 99° 5'35.87"W	23,3	77,7	8,7	105,0	27,3
19°17'55.83"N 99° 5'7.86"W	26,5	88,3	9,7	108,3	20,0
19°18'41.84"N 99° 3'27.68"W	25,7	85,7	12,4	117,3	31,7
19°17'30.89"N 99° 2'57.57"W	28,0	93,3	13,5	121,0	27,7

19°17'37.21"N 99° 1'41.64"W	28,6	95,3	15,7	128,3	33,0
19°17'39.13"N 98°59'57.18"W	29,8	99,3	18,7	138,3	39,0
19°15'45.76"N 98°57'50.92"W	34,6	115,3	23,2	153,3	38,0
19°13'41.37"N 98°59'50.47"W	36,5	121,7	21,2	146,7	25,0
19°22'41.96"N 99°15'15.06"W	21,5	71,7	10,7	111,7	40,0
19°25'41.43"N 99° 9'53.41"W	12,1	40,3	12,3	117,0	76,7
19°26'39.38"N 99° 8'23.68"W	9,9	33,0	14,6	124,7	91,7
19°26'14.72"N 99° 5'20.68"W	11,4	38,0	16,1	129,7	91,7
19°26'52.50"N 99° 3'56.90"W	11,6	38,7	18,5	137,7	99,0
19°24'59.74"N 99° 4'37.32"W	14,0	46,7	15,1	126,3	79,7
19°25'29.44"N 99°10'2.96"W	12,6	42,0	11,9	115,7	73,7
19°20'7.61"N 99° 9'29.71"W	22,0	73,3	2,7	85,0	11,7
19°19'46.37"N 99°10'57.44"W	23,2	77,3	1,5	81,0	3,7
19°18'24.52"N 99° 9'53.05"W	25,3	84,3	1,6	81,3	-3,0
19°23'18.50"N 99°11'35.80"W	17,3	57,7	8,1	103,0	45,3
19°23'6.42"N 99° 8'59.32"W	16,5	55,0	8,0	102,7	47,7
19°20'3.28"N 99°10'31.20"W	22,5	75,0	1,9	82,3	7,3
19°22'42.13"N 99° 5'45.20"W	17,5	58,3	10,8	112,0	53,7
19°22'6.54"N 99° 6'51.91"W	18,3	61,0	8,6	104,7	43,7
19°19'51.96"N 99° 7'18.85"W	22,4	74,7	5,8	95,3	20,7
19°19'36.11"N 99° 7'34.83"W	22,8	76,0	5,3	93,7	17,7

19°17'43.22"N 99° 7'26.31"W	26,3	87,7	5,9	95,7	8,0
19°19'41.42"N 99° 2'10.31"W	24,7	82,3	14,7	125,0	42,7
19°18'28.75"N 99° 1'51.37"W	26,8	89,3	15,5	127,7	38,3

Tabla 5.1. Relación de distancias y retardos para cada uno de los puntos de medida planificados.

La columna exterior derecha, en la Tabla 5.1, muestra la diferencia de retardo relativa entre el arribo de las señales provenientes de ambos emisores para cada punto planificado. Se puede apreciar que, en la gran mayoría de los casos, la señal proveniente del Cerro del Chiquihuite arriba primero al punto de medida. El offset de 76 μ s adicionado al transmisor secundario, influye significativamente en este comportamiento.

Solo en dos puntos (filas 7 y 30 de la Tabla 5.1), la señal proveniente del transmisor secundario arriba primero. Esto se debe a que estos sitios se encuentran muy cerca de las instalaciones de TV UNAM. Esto es normal, ya que, debido a que desde el Cerro del Chiquihuite se radía con mucha mayor potencia, su señal debe llegar antes a la mayoría de la zona de cobertura (Figura 3.8).

5.6. Resultados a lo largo de la línea que une los dos transmisores

Una forma básica para evaluar el desempeño de una red SFN consiste en analizar el nivel de potencia recibido en los puntos que componen una línea recta entre los sitios transmisores. En redes MFN, la potencia recibida decrece a medida que el receptor se aleja del emisor. En zonas cubiertas por una red SFN no ocurre lo anterior, debido a que es posible mantener niveles de potencia adecuados para que los receptores puedan demodular correctamente la señal. Esto se logra como resultado de la superposición de las señales provenientes de los equipos transmisores que componen la arquitectura de la red SFN. Dicha razón constituye una de las principales ventajas de una Red en Frecuencia Única, varios transmisores de baja potencia distribuidos adecuadamente pueden cubrir las zonas deseadas con mejores niveles de potencia, al ser comparados con la operación de un único transmisor de alta potencia.

Se desarrolló un software que permite estudiar el comportamiento descrito anteriormente. Este software se encarga de extraer (desde el archivo indicado) los valores de nivel de potencia recibido en cada uno de los puntos que conforman una línea recta entre las instalaciones de Cerro del Chiquihuite y TV UNAM. Esta línea recta está compuesta por los siete primeros puntos definidos para cada escenario. Dichos puntos son comunes para todos los contextos de medidas.

El software desarrollado analiza los niveles en cada uno de los puntos seleccionados dependiendo de la orientación de la antena receptora al momento de efectuar la medida en campo. De

momento solo se estudian las dos direcciones principales a las que debe orientarse la antena receptora, dígase los emplazamientos de los dos transmisores que conforman la red. Además es posible interpretar como se ha comportado la calidad de recepción subjetiva en cada uno de estos puntos a partir del desempeño de los receptores. Este desempeño está estrechamente relacionado con el nivel de potencia recibido en cada sitio. Recordar que dicha calidad quedó enmarcada por un código de colores ya descrito en el epígrafe 5.3. Cada punto es representado por uno de estos colores en las gráficas obtenidas.

Se suponen ciertos valores de niveles de potencia y C/N (de acuerdo al comportamiento esperado) para los puntos seleccionados, con el fin de probar el funcionamiento del software mencionado y mostrar posibles resultados. Las distancias que separan los puntos y las diferencias de retardos son reales, pues dependen de las coordenadas geográficas de los sitios (datos conocidos).

La Figura 5.7 es obtenida con este software. El eje de las ordenadas maneja niveles de potencia recibidos, mientras que el eje de las abscisas muestra la distancia que separa ambos transmisores de la red (24.4 km). Es fácil apreciar como los niveles de potencia disminuyen a medida que los puntos de medida se alejan del emplazamiento del emisor principal, por consiguiente la calidad de recepción también se deteriora mientras aumenta la distancia. La Figura 5.7 solo tiene en cuenta valores de potencia recibida desde el Cerro del Chiquihuite, pues solo se grafican los datos a obtener cuando se orienta la antena receptora en dicha dirección. De manera adicional, se muestra la relación C/N y la diferencia de retardo relativa para cada punto de medida.

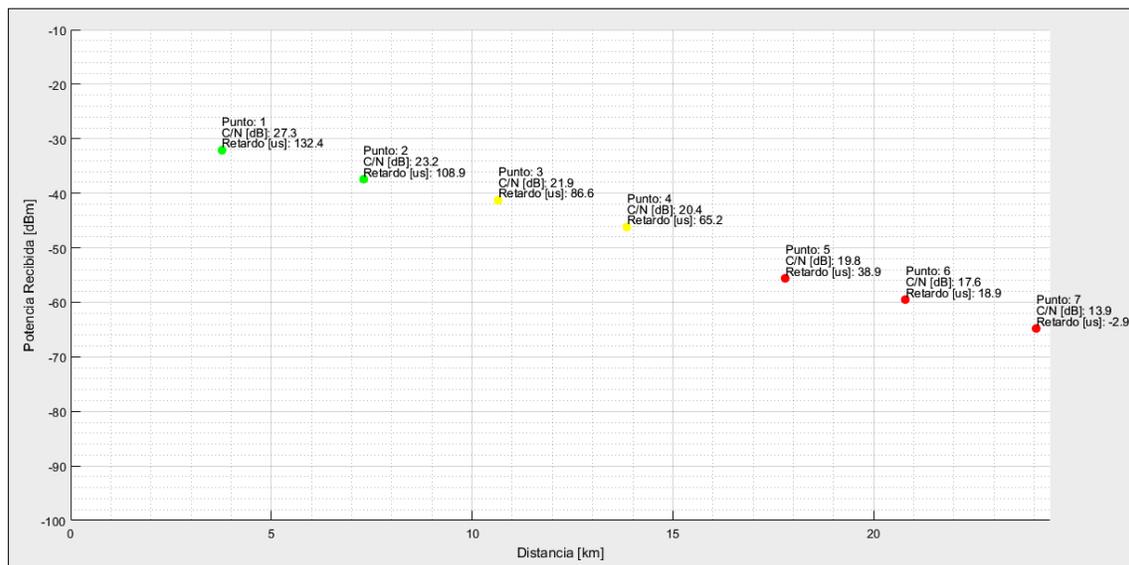


Figura 5.7. Niveles de potencia y calidad de recepción en los puntos que forman la línea recta entre ambos transmisores (antena receptora orientada a Cerro del Chiquihuite).

De forma similar, la Figura 5.8 muestra el comportamiento de los niveles de potencia en estos puntos, al orientar la antena al emplazamiento del transmisor secundario. En este caso los niveles

de potencia aumentan mientras la distancia al transmisor secundario disminuye. Recordar que solo se manejan niveles recibidos desde la dirección correspondiente a TV UNAM. Estas mejoras en la potencia recibida favorecen la calidad de recepción. Se observa como en los primeros cuatro puntos, al analizar la señal proveniente del emisor complementario, la calidad de recepción es mala. Dicha recepción va mejorando gradualmente, hasta lograrse una buena calidad en el punto 7, debido a que el nivel de potencia recibido en este punto es satisfactorio. Igualmente es posible observar los valores de C/N y diferencia de retardo para los sitios planificados.

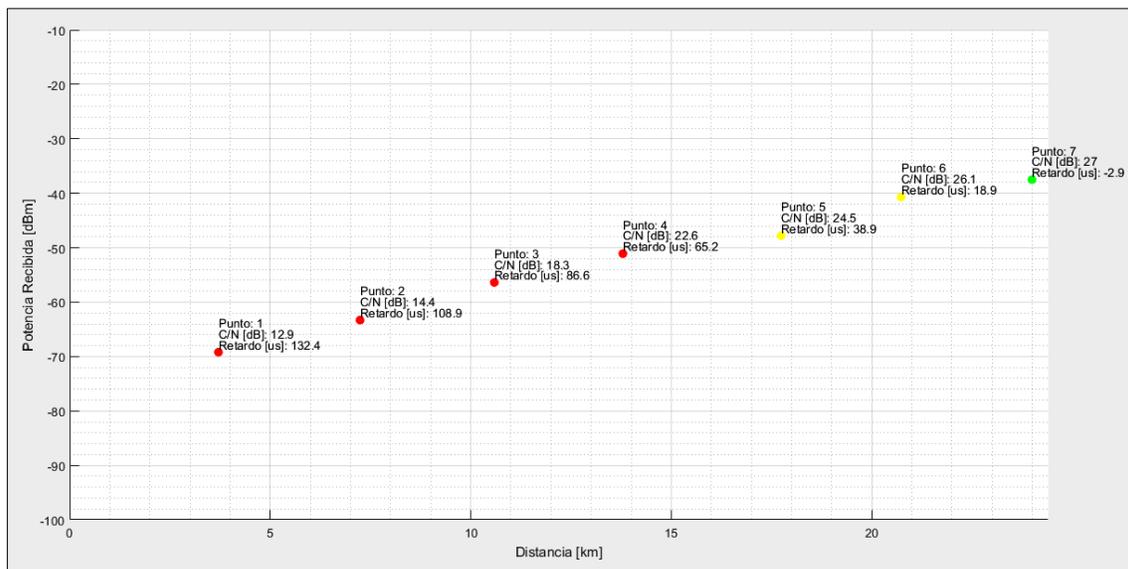


Figura 5.8. Niveles de potencia y calidad de recepción en los puntos que forman la línea recta entre ambos transmisores (antena receptora orientada a TV UNAM).

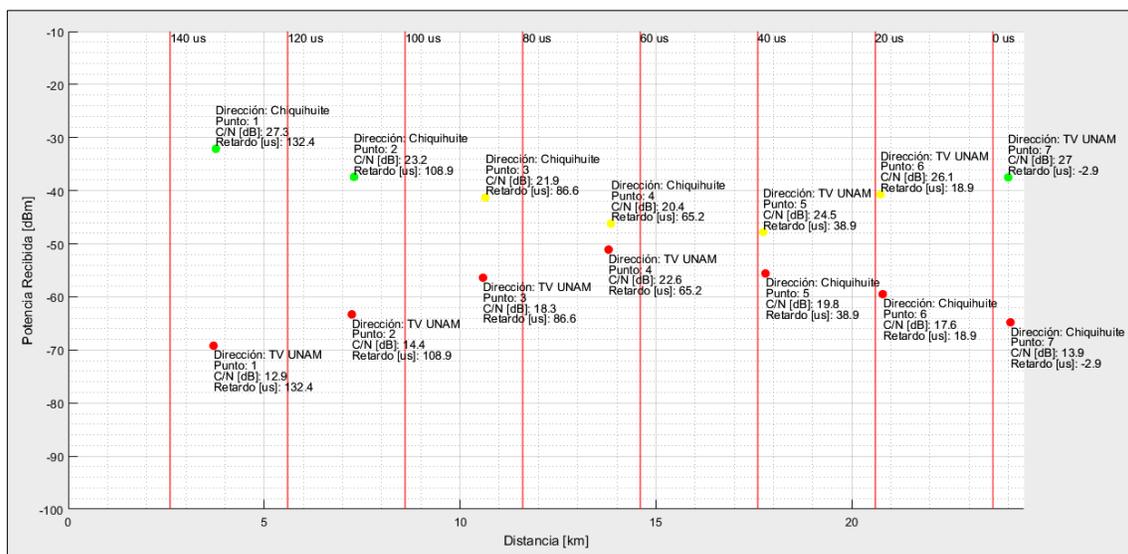


Figura 5.9. Comparación entre niveles de potencia y calidad de recepción desde ambas direcciones, en los puntos seleccionados.

La Figura 5.9 básicamente es una comparación de los comportamientos anteriores. Se puede observar el contraste derivado de variar la orientación de la antena receptora hacia las ubicaciones de los sitios transmisores. Al orientar la antena receptora al Cerro del Chiquihuite, el nivel de potencia a recibir y la calidad de recepción decrecen mientras aumenta la distancia a la estación principal. Ocurre lo contrario al orientar la antena a TV UNAM, la potencia y el desempeño de los receptores es favorecido al acercarse al emisor secundario. Las líneas rojas marcan una referencia de los valores de diferencia de retardos a lo largo de la separación de las estaciones transmisoras, teniendo en cuenta el offset de 76 μs adicionado al emisor de menor potencia [7]. Este offset genera que la referencia de 0 μs se encuentre en las cercanías a TV UNAM, disminuyendo considerablemente las posibles zonas de pre-eco. En caso de no haber añadido offset alguno, la referencia de 0 μs debería situarse en la mitad de la distancia entre ambos transmisores.

La Figura 5.10 refleja el comportamiento deseado en una Red en Frecuencia Única. Se puede apreciar como los niveles de potencia y la calidad de recepción se mantienen aceptables, una vez que los receptores sean capaces de demodular la señal recibida con mayor intensidad en cada punto. Al alejarse demasiado del transmisor principal, el receptor se ve favorecido por los niveles de señal provenientes del transmisor secundario; lo que permite mantener un rango aceptable de calidad de recepción. Algo similar ocurre cuando el receptor se aleja del transmisor complementario, acercándose al emisor principal.

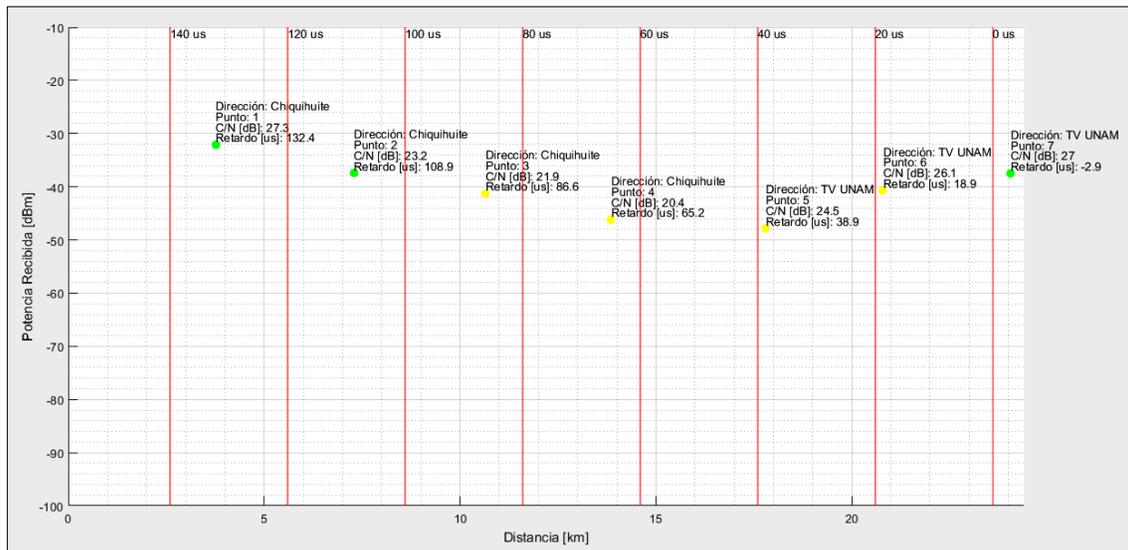


Figura 5.10. Niveles de potencia y calidad de recepción predominante en los puntos que forman la línea recta entre ambos transmisores (considerando ambas direcciones).

Con los resultados obtenidos en la Figura 5.10 sería posible comprobar el correcto funcionamiento de la red SFN en cuestión. La calidad de recepción en la muestra de puntos seleccionados mejora

considerablemente, al ser comparada con la operación de un solo transmisor. Una vez más acotar que los resultados mostrados derivan de valores asumidos de acuerdo al desempeño esperado de la red SFN. Los comportamientos obtenidos pueden variar durante las mediciones en campo.

Bibliografía

- [1]. A. Zentella. Tesis de Maestría: “Metodología para la evaluación en campo de redes SFN con ATSC en la Ciudad de México”, Facultad de Ingeniería, UNAM. Noviembre, 2017.
- [2]. Advanced Television Systems Committee, “Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines”, Doc. A/74:2010, Apr. 7, 2010.
- [3] Advanced Television Systems Committee. “A/54: Recommended Practice: Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard, including Corrigendum No. 1”. 04 December, 2003.
- [4]. J. M. Matías et al., “Resultados de las pruebas de laboratorio de ATSC”. Facultad de Ingeniería, UNAM. 01 de Junio, 2016.
- [5] Rohde & Schwarz. “ETL TV Analyzer Specifications”. Fecha de consulta: 22 de Enero, 2019. Disponible: http://analitika.info/public/files/rs_etl_specifications.pdf
- [6]. S. M. Ross, “Introducción a la estadística”. Editorial Reverté, Barcelona, España, 2007.
- [7]. Y. Valdés. Tesis de Maestría: “Análisis de cobertura de diferentes escenarios para Pruebas de Campo de una red SFN-ATSC en CDMX”, Facultad de Ingeniería, UNAM. Septiembre, 2018.

Capítulo 6. Conclusiones

En este último capítulo se muestran las conclusiones de la presente tesis, describiendo los objetivos logrados.

Este trabajo está enmarcado dentro de las necesidades del Proyecto REFUTV, en el cual se pretende realizar una campaña de pruebas en campo para evaluar si es viable la implementación de Redes en Frecuencia Única bajo el estándar ATSC en México. La red SFN a implementar dentro del proyecto contará con dos transmisores. El transmisor de mayor potencia (principal) estará ubicado en el Cerro del Chiquihuite, mientras que un segundo emisor de menor potencia (transmisor complementario) será emplazado en las instalaciones de TV UNAM. Ambos equipos estarán separados a una distancia de 24.4 km y las transmisiones tendrán lugar en el canal físico número 30 (frecuencia de 569 MHz). La presente tesis apoyó en varios aspectos al proyecto, aspectos que serán explicados a continuación.

Contribuyendo a este propósito, esta tesis ha estudiado el efecto derivado del uso de diferentes antenas receptoras en la cobertura de la red SFN a desplegar. Se analizaron tres configuraciones de recepción derivadas del escenario donde el transmisor complementario opera con mayor potencia de transmisión, 700 W. En la primera de estas configuraciones de recepción, los usuarios utilizan antenas receptoras omnidireccionales, situación común entre individuos que cuentan con antenas al interior de la vivienda. En la segunda configuración de recepción usan antenas directivas y las orientan hacia el Cerro del Chiquihuite. Representa una práctica normal donde los usuarios disponen antenas exteriores en la azotea de sus viviendas, y las orientan hacia el Cerro del Chiquihuite pues desde allí se transmite actualmente la señal del canal 30 de SPR. Una tercera y última configuración hace referencia al caso hipotético donde la población orienta sus antenas exteriores directivas (mismo tipo de antena empleado en la segunda configuración) al transmisor de la red SFN del que se reciba señal con mayor intensidad. Partiendo de lo anterior se realizaron estimaciones de cobertura, obteniendo los niveles de intensidad de campo eléctrico en cada punto. Al analizar los resultados recopilados, se demuestra que el uso de antenas receptoras omnidireccionales no favorece la recepción en un entorno de red SFN, debido a la poca selectividad de este tipo de antenas (entendiendo la selectividad desde un punto de vista espacial, es decir en cuanto a la discriminación de señales provenientes de diferentes direcciones) ante la presencia de ecos no deseados y favoreciendo la presencia del multitrayecto en el receptor. Al utilizar antenas receptoras directivas los efectos negativos derivados del multitrayecto se reducen. El lóbulo principal de radiación de las antenas directivas es más angosto y capaz de atenuar señales provenientes de direcciones no deseadas. La segunda configuración mejora la cobertura generada por la red SFN, respecto al uso de antenas omnidireccionales, incluso manteniendo la orientación de todas las antenas al Cerro del Chiquihuite una vez que entra en operación el transmisor de TV UNAM. La mejor cobertura de la red SFN es obtenida como resultado de la tercera configuración. Se espera que pasado un tiempo de la implementación de la Red en

Frecuencia Única, los usuarios orienten sus antenas receptoras directivas al transmisor del que reciban con mayor intensidad. Los datos logrados demuestran que la correcta orientación de la antena favorece considerablemente la recepción, disminuyendo la probabilidad de recepción de señales no deseadas.

Este análisis derivó en un artículo científico llamado *Effect of Receiving Antennas Radiation Pattern on an SFN Network Coverage*, el cual fue aceptado y presentado en el 24th IEEE Symposium on Computers and Communications (evento celebrado entre el 30 de junio y el 3 de julio de 2019, en la ciudad de Barcelona, España).

Además se desarrolló una planificación de la campaña de mediciones, distribuyendo de forma equitativa los sitios de medida para cada escenario de red propuesto. En total serán recorridos 122 puntos de medidas. Se estimó que en cada jornada sería posible visitar 5 sitios, por lo que las pruebas en campo pueden extenderse durante siete semanas. En consecuencia fueron definidos una serie de recorridos, con base en la distancia entre los puntos, que deben ser utilizados por la unidad móvil para garantizar un barrido óptimo del área de análisis.

Las pruebas de campo requieren de un punto de medida de referencia para comprobación de equipos y parámetros durante las pruebas de campo. Este punto aún debía ser establecido. Después de un recorrido por el campus universitario, se decidió dónde estaría ubicado el punto de referencia. En este sitio se reciben buenos niveles de potencia desde las direcciones de ambos transmisores y cuenta con línea de vista clara hacia las instalaciones en Cerro del Chiquihuite y TV UNAM, a lo cual se adiciona su cercanía a la ubicación del transmisor complementario y la Facultad de Ingeniería, lo cual facilita las pruebas.

Cinco receptores serán evaluados, uno de ellos en la unidad móvil durante las pruebas de campo. Los cuatro restantes serán valorados, bajo las mismas condiciones que en campo, durante la reproducción de señales en experimentos de laboratorio. Para agilizar este período, dichas reproducciones serán realizadas de forma simultánea en dos locales, quedando detallado todo el equipamiento y personal requerido para cumplir con esta actividad. En esta tesis fueron planificadas las reproducciones durante la etapa en laboratorio. La cantidad de personas necesarias para desarrollar la toma de mediciones en campo también quedó definida.

La última etapa de esta investigación estuvo encaminada a la preparación del procesado de aquellos datos recopilados durante la campaña de medidas. Se definió la forma en que dichos datos serían compilados, estableciendo una organización de carpetas, nombres de archivos y formatos de tablas que faciliten un posterior estudio de los parámetros obtenidos.

De igual manera se desarrollaron una serie de herramientas de software con el objetivo de agilizar el procesado de los parámetros requeridos. Una de estas herramientas es capaz de simplificar y graficar la respuesta impulsional generada por el ETL TV Analyzer para cada orientación de la

antena receptora en los puntos de medida, a partir de datos recopilados con el software BC Drive de R&S.

Se definió un código de colores que funciona como base para la elaboración de otro software, con el fin de evaluar subjetivamente la calidad de recepción en cada sitio de medida. Los sitios evaluados se muestran posteriormente con la herramienta Google Earth Pro.

Otros dos programas fueron desarrollados. El primero para el cómputo de los retardos que pueden sufrir las señales entre los puntos planificados y los sitios transmisores, software que facilita la comprensión y el análisis de los resultados. El segundo se desarrolló con el objeto de evaluar el desempeño de la red SFN a lo largo de la línea recta que une las ubicaciones de los emisores, en dependencia de los niveles de potencia recibidos. Esta línea es de especial importancia en el análisis de los resultados.

Los softwares mencionados constituyen la base para el procesado de datos. Dependiendo de las necesidades establecidas durante la evaluación real de la red SFN, estos pueden ser modificados para lograr lo requerido en ese momento.

Se espera que el trabajo realizado contribuya a la realización de la campaña de pruebas de campo mencionada en la CDMX, y facilite el diseño y evaluación de arquitecturas similares en un futuro.

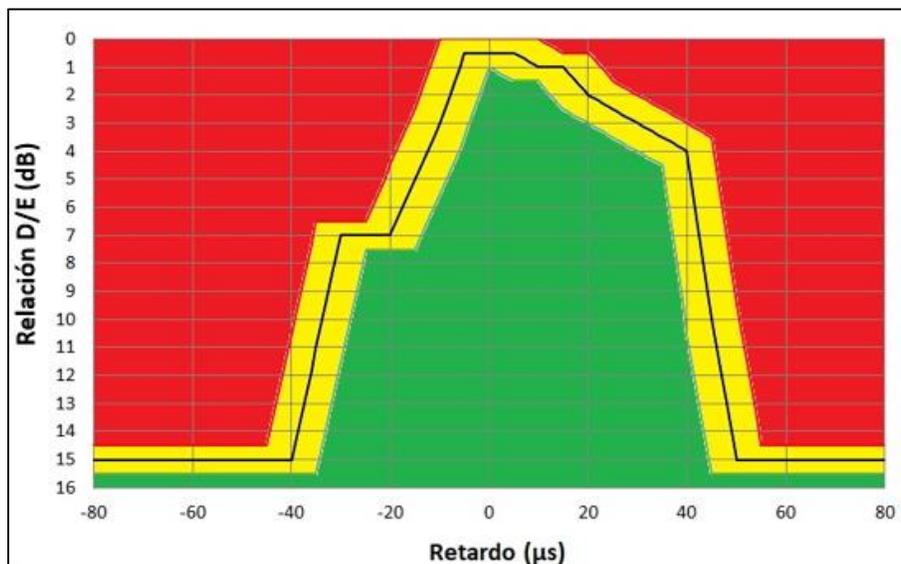
Anexo 1

Recordar que, pequeñas diferencias de nivel recibido (relación D/E) entre las señales provenientes de ambos transmisores en un punto determinado, así como grandes retardos entre el arribo de dichas señales, pueden dificultar en gran medida una recepción satisfactoria dentro de una red SFN [1].

Durante una planificación previa [2], para el desarrollo de la campaña de pruebas de campo, fueron definidos ciertos márgenes a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio del proyecto REFUTV [3] y la Práctica Recomendada A/74 [1]. Los tres niveles de riesgo en la recepción quedan determinados por la máscara de recepción recomendada por ATSC [1] y la obtenida para los receptores de mejor y peor desempeño durante las pruebas de laboratorio mencionadas (Figura 4.10).

Los niveles de riesgo definidos son los siguientes [2]:

1. **Zona amarilla:** posible riesgo, ubicada ± 0.5 dB respecto al eje de ordenadas y ± 5 μ s al eje de las abscisas.
2. **Zona roja:** sin recepción, por encima de la zona amarilla.
3. **Zona verde:** recepción sin problemas, por debajo de la zona amarilla.



Máscara de recepción de referencia para estimar niveles de problemática [2].

Anexo 2

El presente anexo muestra capturas de pantallas, obtenidas con el equipo ETL TV Analyzer, durante las mediciones realizadas en el proceso de selección del punto de referencia. Después de un largo recorrido por el campus universitario, dos puntos destacaron como posibles ubicaciones para comprobar instrumentos de medición y parámetros de operación de la red. Estos dos sitios (números 5 y 11), fueron visitados y se realizaron mediciones con la unidad móvil.

Para punto de referencia 5:

Pass		Limit	<	Results	<	Limit	Unit
Level		-60.0		-50.5		10.0	dBm
Constellation				8VSB / Normal			
MER (rms)		24.0		34.1		-----	dB
MER (peak)		10.0		13.3		-----	dB
EVM (rms)		-----		1.30		4.40	%
EVM (peak)		-----		14.17		22.00	%
OLim	BER before RS			0.0e-8(22%/1e9)		2.0e-4	
	BER after RS			0.0e-7(13%/1e6)		1.0e-10	
	Packet Error Ratio			0.0e-5(13%/1e6)		1.0e-8	
	Packet Errors			0		1	/s
PSPA	Carrier Freq Offset	-30000.0		707.4		30000.0	Hz
	Symbol Rate Offset	-10000.0		13.3		10000.0	Symb/s
	MPEG Ts Bitrate			19.392682			MBit/s
Lvl -50.5dBm BER 0.0e-8 MER 34.1dB DEMOD MPEG							

Captura de parámetros en punto de referencia 5 (antena receptora orientada al Cerro del Chiquihuite).

Fail		Limit	<	Results	<	Limit	Unit
Level		-60.0	*	-61.5		10.0	dBm
Constellation				8VSB / Normal			
MER (rms)		24.0		-----		-----	dB
MER (peak)		10.0		-----		-----	dB
EVM (rms)		-----		-----		4.40	%
EVM (peak)		-----		-----		22.00	%
OLim	BER before RS			-----		2.0e-4	
	BER after RS			-----		1.0e-10	
	Packet Error Ratio			-----		1.0e-8	
	Packet Errors			-----		1	/s
PSPA	Carrier Freq Offset	-30000.0		-----		30000.0	Hz
	Symbol Rate Offset	-10000.0		-----		10000.0	Symb/s
	MPEG Ts Bitrate			-----			MBit/s
Lvl -61.5dBm --- --- DEMOD MPEG							

Captura de parámetros en punto de referencia 5 (antena receptora orientada a TV UNAM).

En este caso, al orientar la antena receptora a TV UNAM, el nivel de potencia recibido no es suficiente para que el equipo de medición sea capaz de demodular la señal. Esto causa la ausencia de muchos parámetros en la captura anterior. Es un resultado esperado ya que el transmisor complementario aún no se encontraba operando durante estas medidas.

Para punto de referencia 11:

Pass		Limit	<	Results	<	Limit	Unit
Level		-60.0		-37.9		10.0	dBm
Constellation				8VSB / Normal			
MER (rms)		24.0		24.6		-----	dB
MER (peak)		10.0		13.3		-----	dB
EVM (rms)		-----		3.85		4.40	%
EVM (peak)		-----		14.17		22.00	%
OLim	BER before RS			1.0e-9(89%/1e10)		2.0e-4	
	BER after RS			0.0e-8(53%/1e7)		1.0e-10	
	Packet Error Ratio			0.0e-6(53%/1e7)		1.0e-8	
	Packet Errors			0		1	/s
PS	Carrier Freq Offset	-30000.0		580.6		30000.0	Hz
	Symbol Rate Offset	-10000.0		10.9		10000.0	Symb/s
	MPEG Ts Bitrate			19.392678			MBit/s

Lvl -37.9dBm | BER 1.0e-9 | MER 24.6dB DEMOD MPEG

Captura de parámetros en punto de referencia 11 (antena receptora orientada al Cerro del Chiquihuite).

Pass		Limit	<	Results	<	Limit	Unit
Level		-60.0		-54.3		10.0	dBm
Constellation				8VSB / Normal			
MER (rms)		24.0		28.0		-----	dB
MER (peak)		10.0		13.3		-----	dB
EVM (rms)		-----		2.60		4.40	%
EVM (peak)		-----		14.17		22.00	%
OLim	BER before RS			2.0e-9(14%/1e10)		2.0e-4	
	BER after RS			0.0e-7(85%/1e6)		1.0e-10	
	Packet Error Ratio			0.0e-5(85%/1e6)		1.0e-8	
	Packet Errors			0		1	/s
PSPA	Carrier Freq Offset	-30000.0		618.6		30000.0	Hz
	Symbol Rate Offset	-10000.0		11.6		10000.0	Symb/s
	MPEG Ts Bitrate			19.392679			MBit/s

Lvl -54.3dBm | BER 2.0e-9 | MER 28.0dB DEMOD MPEG

Captura de parámetros en punto de referencia 11 (antena receptora orientada a TV UNAM).

Los valores mostrados demuestran que en el punto 11 se recibe con mayor potencia desde el Cerro del Chiquihuite (emplazamiento del transmisor principal de la red), validando la elección de dicho punto como sitio de referencia a visitar al inicio de cada jornada de pruebas en campo.

Bibliografía

- [1]. Advanced Television Systems Committee, "Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines", Doc. A/74:2010, Apr. 7, 2010.
- [2]. Y. Valdés. Tesis de Maestría: "Análisis de cobertura de diferentes escenarios para Pruebas de Campo de una red SFN-ATSC en CDMX.", Facultad de Ingeniería, UNAM. Septiembre, 2018.
- [3]. J. M. Matías et al., "Resultados de las pruebas de laboratorio de ATSC". Facultad de Ingeniería, UNAM. 01 de Junio, 2016.

DECLARACIÓN

La información presentada en este trabajo se obtuvo de diversas fuentes que se consideran fidedignas y se consignan puntualmente en las referencias. El uso dado a la información es de naturaleza estrictamente de investigación académica y de divulgación, sin fines de lucro o de otra índole. Se ha hecho también el mayor esfuerzo por acreditar debidamente datos, opiniones y contenidos presentados, por lo que cualquier error u omisión en ello, es del todo involuntario.

Ciudad de México, Septiembre de 2019

Pedro Javier Orbea Guada