



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

Análisis de cobertura de diferentes escenarios para Pruebas de Campo de una
red SFN-ATSC en CDMX.

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

PRESENTA:
YENNY VALDÉS PÉREZ

TUTOR:
DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI
FACULTAD DE INGENIERÍA

CDMX, SEPTIEMBRE 2018



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. CEBALLOS HERRERA DANIEL ENRIQUE

Vocal: DR. MATÍAS MARURI JOSÉ MARÍA

1^{er}. Suplente: DR. MOCTEZUMA FLORES MIGUEL

2^{do}. Suplente: 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

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mi madre Yamila Pérez por haberme apoyado en todo momento, y por la educación que me ha dado en el transcurso de mi vida.

A mi esposo Peter Muñoz por siempre estar para mí y por todo su apoyo y paciencia en estos dos años de la maestría.

A mi amiga Yilena por siempre apoyarme e impulsarme a tomar la decisión de venir a estudiar a México.

A Yoendric, por todo su ayuda desde el primer día.

Le agradezco a mi director de tesis, el Dr. José María Matías Maruri, por la confianza que depositó en mí, por todo su apoyo, paciencia y orientación que me brindó en la realización de esta tesis.

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

También agradezco a mis amigos del Posgrado de Ingeniería, principalmente a Viridiana, Carlos, Mario y Andrea, siempre los recordaré.

Quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México y a los profesores del Posgrado de Ingeniería que me han brindado una excelente educación y por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

De igual forma agradezco a CONACYT por la beca que me otorgó durante mis estudios de maestría (Beca CONACYT No. 780259).

La presente tesis fue desarrollada dentro del proyecto REFUTV, por lo que quiero agradecer a dicho proyecto, el cual tiene una colaboración internacional con España, que está apoyado por el fondo institucional de CONACYT. Gracias a todos los integrantes del proyecto, fue muy grato trabajar con su apoyo.

ÍNDICE

Resumen	10
Capítulo 1. Introducción	11
1.1. Tecnologías de TV Digital y situación de México.....	11
1.2. Proyecto REFUTV	12
1.3. Justificación.	14
1.4. Objetivos de la tesis.	15
1.5. Organización de la tesis.....	15
Bibliografía.....	17
Capítulo 2. Estado del arte.	18
2.1. Estándares de televisión digital terrestre.....	18
2.1.1. DVB-T.	18
2.1.2. ATSC.	20
2.1.3. ISDB-T.....	25
2.1.4. DTMB.....	27
2.1.5. Comparativa entre estándares de TDT.	28
2.2. Redes de Frecuencia Única.....	29
2.2.1. Consideraciones de los receptores.	29
2.2.2. Configuraciones para diseño de redes SFN.....	31
2.3. Pruebas de campo de redes SFN con el estándar ATSC.	32
2.3.1. Transmisores Distribuidos en la ciudad de Nueva York.	34
2.3.2. Repetidores de canal y transmisores distribuidos implementados en Canadá.	35
2.3.3. Mediciones de campo en la red SFN Puebla-Tlaxcala.	37
Bibliografía.....	38
Capítulo 3. Radioenlace para la red de transmisión.	41
3.1. Perfil topográfico.....	42
3.2. Curvatura de la Tierra.....	42
3.3. Azimut y elevación.	43
3.4. Fenómenos de propagación.....	45
3.4.1. Atenuación por el espacio libre.	45

3.4.2.	Atenuación debida a los gases atmosféricos.....	45
3.4.3.	Atenuación por lluvia.	47
3.4.4.	Margen de desvanecimiento.....	49
3.5.	Análisis de viabilidad.....	50
3.5.1.	Presupuesto de potencia a 13 GHz.	53
3.5.2.	Simulación en Radio Mobile para 13 GHz.....	55
3.5.3.	Presupuesto de potencia a 7 GHz.	56
3.5.4.	Simulación en Radio Mobile para 7 GHz.....	58
Conclusiones del capítulo.....		60
Bibliografía.....		61
Capítulo 4. Estimación de cobertura y definición de parámetros de transmisores.		62
4.1.	Software de estimación de campo.	62
4.2.	Simulación de cobertura.	63
4.2.1.	Estimación de cobertura del transmisor principal.	64
4.2.2.	Estimación de cobertura del transmisor secundario.....	65
4.3.	Estimaciones de retardos.	70
4.3.1.	Líneas de retardo.....	71
4.3.2.	Resultados del retardo adicionado al transmisor secundario.	73
4.4.	Obtención de mapas de nivel de Intensidad de campo y retardos.	74
4.5.	Definición de parámetros de transmisores.	78
Bibliografía.....		80
Capítulo 5. Definición de los puntos de medida.....		81
5.1.	Número de sitios.	81
5.2.	Ubicación de los sitios.	82
5.2.1.	Operando solo el transmisor principal.	83
5.2.2.	Entornos característicos.	84
5.2.3.	Interiores.....	86
5.2.4.	Zonas con problemas de recepción esperados.....	87
Bibliografía.....		93
Conclusiones		94
Anexos.....		96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama en bloques de cómo generar una señal ATSC.....	21
Figura 3.1 Ubicación en Google Earth de los sitios de transmisión.	41
Figura 3.2. Representación del radioenlace en el Radio Mobile.....	42
Figura 3.3. Perfil del terreno.	42
Figura 3.4. Curvatura de la Tierra en los 24.4 Km del radioenlace	43
Figura 3.5. Azimut de las estaciones.	44
Figura 3.6. Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas.....	46
Figura 3.7. Índice de pluviosidad (mm/h) sobrepasado durante el 0.01% del año medio	48
Figura 3.8. Resultado del radioenlace a 13GHz.....	56
Figura 3.9. Resultado del radioenlace a 7 GHz.....	59
Figura 4.1. Patrón de radiación de las antenas de transmisión a) Chiquihuite b) TV UNAM.....	64
Figura 4.2. Intensidad de campo eléctrico producido por el transmisor principal.	65
Figura 4.3. Intensidad de campo eléctrico producido por el transmisor secundario con azimut de 0° y potencia de trasmisión de 100 W.....	66
Figura 4.4. Azimut modificado de la antena transmisora de TV UNAM.	67
Figura 4.5. Intensidad de campo eléctrico producido por el transmisor secundario con azimut de 97° y potencia de trasmisión de 100 W.	68
Figura 4.6. Intensidad de campo eléctrico producido por el transmisor secundario con azimut de 97° y potencia de trasmisión de 700 W.	69
Figura 4.7. Zona de sombra en Tláhuac.	69
Figura 4.8. Diferencia de retardos en el receptor sin offset en los transmisores.....	72
Figura 4.9. Valores mínimos de una señal con eco que debe ser capaz de demodular un receptor de ATSC según la Práctica Recomendada A/74 de ATSC.....	73
Figura 4.10. Estimación de retardos con offset de 76 μ s en el transmisor secundario.	74
Figura 4.11. Diferencia de campo recibido (dB) y estimación de retardos (μ s), Escenario I.	75
Figura 4.12. Diferencia de campo recibido (dB) y estimación de retardos (μ s), Escenario II.	76
Figura 4.13. Diferencia de campo recibido (dB) y estimación de retardos (μ s), Escenario III.	77
Figura 4.14. Desempeño de los receptores ante un Eco Estático	78

Figura 5.1. Distribución de puntos de medición para el caso de que opere solo el transmisor principal.....	83
Figura 5.2. Distribución de puntos de medición en zonas urbanas.	85
Figura 5.3. Distribución de puntos de medición en zonas alrededor del aeropuerto.	86
Figura 5.4. Distribución de puntos de medición en interiores.....	87
Figura 5.5. Máscara de recepción de referencia para estimar niveles de problemática.	88
Figura 5.6. Puntos de medida para el Escenario I.	90
Figura 5.7. Puntos de medida para el Escenario II.	91
Figura 5.8. Puntos de medida para el Escenario III.	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características técnicas del estándar DVB-T para canales de 7MHz de ancho de banda. 19	
Tabla 2.2. Características técnicas del estándar ISDB-T.....	26
Tabla 2.3. Características técnicas del estándar DTMB.	27
Tabla 2.4. Resultados de recepción en exteriores.	35
Tabla 3.1. Datos geográficos de ambas estaciones.....	45
Tabla 3.2. Coeficientes para estimar el valor de atenuación específica.	47
Tabla 3.3. Composición y valores del margen de desvanecimiento.	50
Tabla 3.4. Equipos a instalar.....	51
Tabla 3.5. Potencia de transmisión.	52
Tabla 3.6. Ganancia de antena.....	52
Tabla 3.7. Sensibilidad del receptor.	53
Tabla 3.8. Atenuación por lluvia calculada para diferentes valores de R (mm/h) a 13 GHz.....	54
Tabla 3.9. Ganancia del sistema para diferentes valores de R (mm/h) a 13 GHz.....	55
Tabla 3.10. Atenuación por lluvia calculada para diferentes valores de R (mm/h) a 7 GHz.....	57
Tabla 3.11. Ganancia del sistema para diferentes valores de R (mm/h) a 7GHz.....	58
Tabla 3.12. Parámetros de transmisión y recepción del enlace de microondas.	60
Tabla 4.1. Valores de los parámetros empleados en el método Longley-Rice.	63
Tabla 4.2. Parámetros de trabajo de ambos transmisores.	63
Tabla 4.3. Resumen de escenarios para la SFN.....	70
Tabla 4.4. Parámetros de trabajo para la red de transmisión de la SFN-ATSC.	79

LISTA DE TÉRMINOS

ADTB-T	Advanced Digital Television Broadcasting – Terrestrial
ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicaciones
ATSC	Advanced Television System Committe
BCH	Bose Chaudhuri Hocquengham
BER	Bit error radio
CDTI	Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial
C/N	Carrier to Noise Ratio
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CRC	Communications Research Centre
DOCR	Digital On-Channel Repeater
DTxT	Distributed Transmitters
DVB-T	Digital Video Broadcasting - Terrestrial
FEC	Forward Error Correction
FCC	Federal Communication Commission
FPS	Frames per secund
HDTV	High Definition Television
ISDB-T	Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial
LDPC	Low Density Parity Check
MPEG	Moving Picture Experts Group
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
REFUTV	Redes en Frecuencia Única para el desarrollo de la Televisión Digital ATSC
RF	Radiofrecuencia
RQD	Rotated Constellation and Q-Delay
SDTV	Standard Definition Television
SFN	Single Frecuency Network
SPR	Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano).

TDS	Sincronización en el Dominio del Tiempo
TDT	Televisión Digital Terrestre
TELBOR	Telemática e Innovación a Bordo
TS	Transport Stream
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UHF	Ultra High Frequency
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
VHF	Very High Frequency
VSB	Vestigial Side Band

Resumen

En el año 2015 en México se realizó la transición de televisión analógica a digital bajo el estándar ATSC (Advanced Television Systems Committee). Este estándar utiliza modulación 8-VSB (Vestigial Side Band). Esta modulación no hace frente al multitrayecto, ya que no cuenta con intervalo de guarda como OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), por lo que las Redes de Frecuencia Única (SFN) en este estándar se encuentran limitadas y existe escasa información de su despliegue. Además, el funcionamiento de una red SFN depende de la tecnología usada en los receptores y a medida que avanza, se abren más posibilidades para las SFN en ATSC.

En el proyecto REFUTV: Desarrollo de Redes en Frecuencia Única para Televisión Digital ATSC, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se realizarán unas Pruebas de Campo de una SFN en el estándar ATSC en la CDMX. Este es un proyecto de colaboración internacional financiado por el Conacyt en México y el CDTI en España. La SFN estará formada por dos transmisores ubicados al norte de la ciudad el principal y al sur el secundario.

En la presente tesis se definen los parámetros de diseño de la red de transmisión, como son las potencias, retardos, antenas de los transmisores y comunicación mediante radioenlace entre los transmisores. Además, son definidos los puntos donde se realizarán las medidas en las Pruebas de Campo. El trabajo fue realizado a partir de estimaciones de cobertura realizadas con los softwares SPLAT y MATLAB. Para las estimaciones se tuvo en cuenta relaciones de nivel de señal y retardos relativos de ambos transmisores. Se obtuvieron tres escenarios para la red SFN con diferentes parámetros de transmisión, donde se varió en todos los casos los parámetros del transmisor secundario solamente. En el primer escenario el transmisor secundario es de baja potencia y está apuntando a la ciudad. En el segundo se mantiene la potencia, pero se gira la antena transmisora hacia la zona de sombra del transmisor principal. Por último, en el tercer escenario se mantiene el Azimut de la antena transmisora pero la potencia de transmisión es aumentada.

Capítulo 1. Introducción

Este capítulo muestra primeramente la situación de la televisión digital en el mundo y en México. Luego se introduce al tema de las Redes en Frecuencia Única y al proyecto REFUTV, proyecto dentro del cual se ha desarrollado esta tesis. Posteriormente se justifican los motivos que sustentan la tesis y se presentan los objetivos que se desean lograr con su realización. Finalmente, se describe la organización estructural de la tesis.

1.1. Tecnologías de TV Digital y situación de México.

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) estableció en 1997 que los países que desearan introducir las tecnologías de televisión digital terrestre deberían utilizar alguno de los siguientes estándares: ATSC, DVB-T (Digital Video Broadcasting Terrestrial), ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial) o la Norma China. Esta Recomendación quedó registrada en la ITU-R BT.1306-6 [1] y sólo es válida para las bandas VHF (Very High Frequency) y UHF (Ultra High Frequency). En mencionada Recomendación [1] se establece que la elección deberá basarse en condiciones específicas tales como los recursos del espectro, políticas del país, requisitos de cobertura, estructura de la red existente, condiciones de recepción, tipo de servicio requerido y costos para los consumidores y radiodifusores.

En la década de los años noventa se desarrolló el proyecto DVB, esta organización se dio a la tarea de investigar y analizar estándares para todas las áreas de aplicación de la televisión digital terrestre en Europa y dio como origen al estándar DVB-T. El sistema ATSC se desarrolló en Estados Unidos de América y se aprobó en 1996. El tercer sistema es el ISDB-T, fue desarrollado en Japón y es muy parecido al estándar europeo. Por otro lado, el gobierno de China aprobó su propio estándar en 2007: el DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting).

Actualmente, estos sistemas ya fueron adoptados y están activos en varios países. También se les han realizado modificaciones a algunos de ellos y ya están en la segunda generación, como es el caso de DVB-T2. Otros como ATSC aún se encuentran en desarrollo de sus próximas generaciones (ATSC 3.0) para permitir la operación eficiente en nuevas tecnologías.

El 30 de julio de 1999 en México se creó el Comité Consultivo de Tecnologías Digitales para la Radiodifusión [2], tenía como objetivo el estudio, evaluación y desarrollo de tecnologías digitales en materia de radiodifusión. Este Comité estudiaría los estándares de televisión digital que se encontraban disponibles en el mundo, A/53 de ATSC, DVB-T e ISDB-T, con base en información documental y experimental. De acuerdo con los estudios realizados, el 2 de julio de 2004 México dio paso a la entrada de la Televisión Digital Terrestre (TDT) al publicarse en el Diario Oficial de la Federación el: *“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”*; mediante el cual México adoptaría el estándar de televisión digital ATSC [2]. Entre otras razones porque podía tener transmisiones confiables en alta definición (HD) dentro del ancho de banda de 6 MHz que en ese momento era con el que operaba cada canal de televisión analógico. De igual forma, los costos en su implementación resultaban más convenientes que los otros dos sistemas, así como una mejor disponibilidad de aparatos receptores a menores precios para los consumidores, y, la posibilidad de que las señales generadas en México – particularmente en la frontera con Estados Unidos –, pudieran ser captadas en otros países, con las ventajas comerciales que ello involucra.

La suspensión de la transmisión de la señal de televisión analógica fue el 31 de diciembre del 2015 [3].

1.2. Proyecto REFUTV

El proyecto **Desarrollo de Redes en Frecuencia Única para la Televisión Digital ATSC** (REFUTV) es un proyecto de colaboración internacional financiado

por CONACYT y el CDTI (España). Participan cuatro entidades: la Facultad de Ingeniería y TV UNAM en representación de la UNAM, Telemática e Innovación a Bordo S.A. de C.V. (TELBOR), EGATEL S.L (España) y la radiodifusora SPR (Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano).

Entre los objetivos fundamentales del proyecto está determinar los parámetros de funcionamiento de las redes SFN con ATSC en México, con la idea de que esta tecnología pueda ser normativizada por las instituciones reguladoras, como el IFT (Instituto Federal de Telecomunicaciones).

En una Red en Frecuencia Única cierto número de transmisores, emitiendo la misma señal digital, en el mismo canal de frecuencia, pueden dar cobertura a un área determinada. Las contribuciones de cada señal en determinados puntos de recepción no se interfieren y además en ciertas circunstancias mejoran el nivel de señal recibido [4]. Esto hace a este tipo de tecnología tan provechosa, ya que se incrementa la eficiencia del espectro radioeléctrico.

Para los estándares de TDT, ya existen Redes en Frecuencia Única pero sólo para aquellos que utilizan una modulación basada en multiportadora, tal es el caso de DVB-T, DTMB, ISDB-T e ISDB-Tb (ISDB-T Built-in, estándar brasileño basado en el estándar japonés ISDB-T). Para el caso de ATSC, no hay muchos casos documentados sobre el despliegue de estas redes, por el tipo de modulación que lo caracteriza: 8-VSB. Sin embargo, según resultados de pruebas realizadas en los últimos años, se indica que puede ser implementado bajo ciertos esquemas de los sistemas transmisores y al diseño mismo de los receptores, que logran permitir su operación en Redes en Frecuencia Única [4].

Para cumplir con este objetivo, el proyecto REFUTV se planeó realizar dos tipos de pruebas, unas de laboratorio y otras de campo. Las pruebas de laboratorio ya fueron realizadas, las de campo se realizarán utilizando la infraestructura de los socios radiodifusores SPR y TV UNAM, y los prototipos del MIP Inserter y los moduladores SFN para ATSC fabricados en el marco del proyecto por TELBOR y EGATEL respectivamente. Con estas pruebas de campo se espera acreditar la

viabilidad de implementar redes SFN con ATSC y definir parámetros de funcionamiento.

1.3. Justificación.

Dado que ATSC usa una modulación de portadora única, el funcionamiento de una red SFN con la televisión digital ATSC depende fuertemente de la tecnología usada en el receptor, al contrario de otras tecnologías basadas en modulación OFDM. Por ello, las pruebas están enfocadas en el desempeño de receptores comerciales en redes SFN. Con las pruebas de laboratorio se comprobó el desempeño de diferentes receptores en situaciones de recepción diferentes [5]. Con estas pruebas de campo a realizar se desea verificar en condiciones reales los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio. Con los resultados obtenidos en las pruebas de campo, se evaluará el desempeño de receptores comerciales de ATSC en una Red en Frecuencia Única de dos transmisores, mediante la obtención de la máscara de recepción (diferencias de retardo y potencia de las señales principales recibidas de los dos transmisores con los que el receptor es capaz de recibir) de los receptores, en recepción en exteriores e interiores.

Uno de los objetivos de la presente tesis es definir los puntos de medición para las Pruebas de Campo. Además, se definirán ciertos parámetros de diseño de la red de transmisión. Esta tesis es la continuación de la tesis de maestría “Metodología para la evaluación en campo de redes SFN con ATSC en la Ciudad de México” realizada por la M.I. Andrea Zentella León [6], la cual fue avance para la planificación de las pruebas de campo. Las características y ubicación de los transmisores fueron diferentes a los que finalmente se usarán, ya que fueron cambiados por los condicionantes del proyecto, como por ejemplo la localización del transmisor secundario, que estará en TV UNAM, y no en Radio UNAM. Esta tesis complementa el trabajo realizado por la M.I. Zentella.

1.4. Objetivos de la tesis.

General

Definir parámetros de diseño de la red de transmisión, como son las potencias, retardos, antenas de los transmisores y comunicación mediante radioenlace entre los transmisores. Por otra parte, definir los puntos de medidas a partir de estimaciones de cobertura de diferentes escenarios.

Particulares:

- Definición de parámetros de transmisión de la red SFN.
- Definición del radioenlace de comunicación entre los dos transmisores.
- Definir los puntos de medición a partir de variadas condiciones de recepción, como son recepción en interiores o exteriores, retrasos y diferencias de potencia de las señales provenientes de los transmisores grandes o pequeñas, etc.

1.5. Organización de la tesis.

La tesis está dividida en seis capítulos, los cuales son descritos a continuación:

El Capítulo 1 es el actual, Introducción, se refiere a la situación actual de la Televisión Digital Terrestre en el mundo y en México. También explica las redes SFN y el proyecto REFUTV. Plantea la justificación y los objetivos de esta tesis y por último presenta la estructura de la presente Tesis.

En el Capítulo 2 se explican los estándares de Televisión Digital Terrestre, se profundiza en el tema de las redes SFN y por último se hace una recopilación de pruebas de campo con el estándar de ATSC que se han realizado en otras partes del mundo, para tomar experiencia en cuanto a la definición de los parámetros de la red de transmisión y en la ubicación de los puntos de medida para las Pruebas de Campo del proyecto REFUTV.

En el Capítulo 3 se realiza la estimación y análisis de viabilidad de posibles variantes del enlace de microondas punto a punto que se utilizará para la sincronización entre los dos transmisores que conforman la red de transmisión SFN del proyecto REFUTV.

En el Capítulo 4 se describe la estimación de cobertura de la red de transmisión desde la definición del software empleado, el procesamiento en Matlab de los datos obtenidos de la cobertura y la estimación de retardos hasta la definición de parámetros de transmisores.

En el Capítulo 5 se presenta la definición del número de sitios de medida y su ubicación a partir de evaluar diferentes escenarios de potencia y retardos. Es necesario obtener información relevante de posibles zonas con problemas y sitios con entornos característicos.

Por último, en el Capítulo 6 se muestran las conclusiones obtenidas de la realización de dicha tesis.

Bibliografía

1. Unión Internacional de Telecomunicaciones. *“Métodos de corrección de errores, de configuración de trama de datos, de modulación y de emisión para la radiodifusión de televisión digital terrenal”*. Recomendación ITU-R BT.1306-6 (12/11), 2011.
2. Diario Oficial de la Federación. Art. 4 y 5: *“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”*. 2 de julio, 2004.
3. Diario Oficial de la Federación. Art IV: *“Política para la Transición Digital Terrestre. México”*. 11 de septiembre, 2014.
4. Advanced Television Systems Committee. ATSC A/110:2011: *“Standard for Transmitter Synchronization”*. Part 1, Washington, D.C., 8 de abril, 2011.
5. José María Matías Maruri, Mario Albeto Hernández Flores. *“Resultados de las pruebas de laboratorio de ATSC”*. Facultad de Ingeniería, CONACYT. 1 de junio, 2016.
6. Andrea 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.

Capítulo 2. Estado del arte.

2.1. Estándares de televisión digital terrestre.

En los últimos treinta años ha habido notables avances en la radiodifusión televisiva. Se ha evolucionado de la TV analógica a la TV digital. Esta última ofrece varias ventajas como son: capacidad de transmisión de mejor calidad de audio y video; uso eficiente del espectro radioeléctrico al transmitir más de una señal televisiva en el mismo canal de frecuencia y además permiten el uso de las redes SFN.

Como fue mencionado en el capítulo anterior, actualmente existen cuatro estándares de Televisión digital terrestre aprobados y recomendados por la ITU en la recomendación UIT-R BT.1306-6 [1]: DVB-T, ATSC, ISDB-T y DTMB.

A continuación, se exponen las principales características de estos sistemas, dando más peso al sistema ATSC, ya que el trabajo de esta tesis se realiza con dicha tecnología.

2.1.1. DVB-T.

En 1993 se creó la organización europea Digital Video Broadcasting (DVB) con el objetivo de normalizar los trabajos que se habían hecho en la televisión digital. La transmisión de televisión digital a través de redes de distribución terrestres se contempla en el estándar DVB-T creado en 1997 [2]. Este estándar puede tener canales de ancho de banda de 6, 7 u 8 MHz. El estándar DVB-T admite diferentes métodos de modulación los cuales son QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying), 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) y 64-QAM. Transmite audio, video y otros datos a través de un flujo MPEG-2 usando modulación COFDM que trasmite datos en paralelo utilizando un gran número de portadoras ortogonales entre sí, brindándole esto una gran robustez frente a la interferencia debido al multitrayecto; lo que facilita el uso de redes SFN [3].

La señal transmitida se organiza en tramas. Cada trama tiene 68 símbolos OFDM. Cuatro tramas constituyen una supertrama. El símbolo se compone de dos partes: una parte útil T_u y un intervalo de guarda de duración T_g . El intervalo de guarda consiste en una continuación cíclica de la parte útil y se inserta previa a ella. Los intervalos de guarda que utiliza este estándar son 1/32, 1/16, 1/8 y 1/4 del tiempo útil, el cual se coloca entre los símbolos OFDM consecutivos para evitar la interferencia de ecos o de señales de transmisión adyacentes en redes SFN. Este estándar permite dos modos de transmisión: uno de ellos es el modo 2K, pensado para transmisiones simples donde el área de cobertura que se necesita es reducida y proporciona una tolerancia Doppler que permite una recepción de velocidad extremadamente alta; y el modo 8K para SFN pequeñas, medianas y grandes [2]. En la tabla 2.1 se muestran algunos parámetros de operación del estándar DVB-T para 7 MHz de ancho de banda.

Parámetros	Estándar DVB-T	
Modulación	COFDM	
Métodos de modulación	QPSK, 16-QAM y 64-QAM	
Modos de transmisión	2K	8K
Número de portadoras que forman un símbolo OFDM	1705	6817
Espaciamiento entre subportadoras	3,90625 kHz	0,97656 kHz
Duración efectiva del símbolo	256 μ s	1024 μ s
Intervalo de guarda	1/4, 1/8, 1/16 y 1/32	

Tabla 2.1. Características técnicas del estándar DVB-T para canales de 7 MHz de ancho de banda [2,3].

El umbral de recepción para la relación C/N (Carrier to Noise Ratio) depende del tipo de modulación y codificación que se utilice. El rango de este parámetro va desde 3.1 dB a 20.1 dB cuando la proporción de errores antes de la decodificación Reed Solomon es de 2×10^{-4} y la proporción de errores después de la decodificación Reed Solomon es de 10^{-11} [1].

DVB-T2

El estándar DVB-T ya cuenta con una versión mejorada para la radiodifusión terrestre: DVB-T2. Esta segunda generación mejora a la primera en varios aspectos como [4]:

- Mayor número de portadoras (incluyen modos 16K y 32K).
- Modulación hasta 256-QAM.
- Intervalo de guarda de hasta 1/128.
- Código corrector de errores 3/5 LDPC+BCH (Low Density Parity Check + Bose Chaudhuri Hocquengham).
- Añade una nueva técnica basada en constelaciones rotadas llamada RQD (Rotated Constellation and Q-Delay). Esta técnica permite aumentar la robustez del sistema en canales con profundos desvanecimientos frecuenciales [5].

Con esta nueva versión se aumentó la tolerancia al multitrayecto, y además ofrece un buen funcionamiento en presencia de altos niveles de ruido e interferencia, dando como resultado una señal más robusta [5].

2.1.2. ATSC.

En 1996 fue aprobado por la FCC (Federal Communication Commission) el estándar ATSC. Este estándar está diseñado para la implementación de redes MFN (Multiple Frequency Network) [6]. No obstante, en los últimos años se ha investigado sobre su implementación en redes SFN. No utiliza modulación OFDM, sino que usa la técnica de modulación de banda lateral vestigial de 8 niveles: 8-VSB, que entrega un flujo de transporte MPEG-2 (MPEG-2-Transport Stream) a una tasa aproximadamente 19.39 Mbps en un canal de 6 MHz. Para lograr la sincronización necesaria en las SFN entre los símbolos de salida de los transmisores que reciben alimentaciones de datos separadas como entradas, es necesario sincronizar los diversos bloques de procesamiento de datos del sistema 8-VSB [6].

La relación C/N para considerar una buena recepción en transmisiones 8-VSB no debe ser menor a 14,9 dB según la recomendación A/54 [7].

Las señales de video pueden ser SDTV (Standard Definition Television) o en señales de HDTV (High Definition Television). Una vez comprimido el video se mezcla con el audio digital codificado en Dolby AC-3 [7]. En la Figura 2.1 se muestra un diagrama de bloques funcional de cómo generar una señal ATSC.

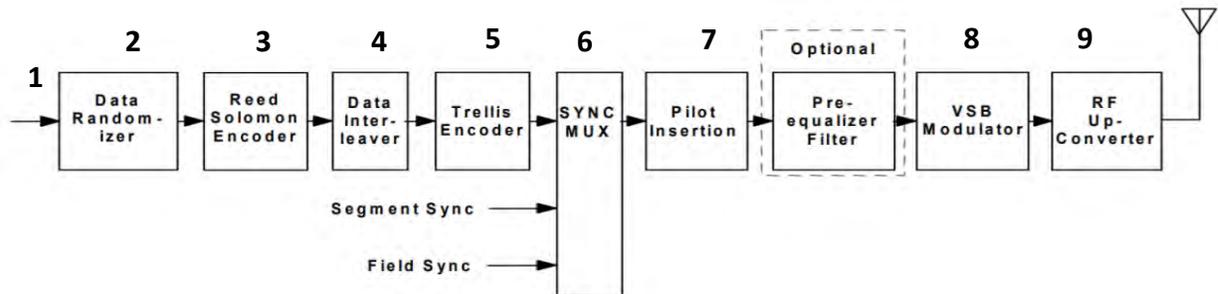


Figura 2.1. Diagrama en bloques de cómo generar una señal ATSC [6].

A continuación, se detallan los bloques principales del diagrama:

1. Primeramente, se organizan los datos para la transmisión antes de entrar al diagrama de la Figura 2.1. Se sincronizan todos los circuitos internos del transmisor de acuerdo a la señal de entrada que es un conjunto de paquetes codificados en el TS (Transport Stream) de MPEG-2. Antes de cualquier procesamiento el sistema necesita identificar correctamente los puntos de comienzo y de fin del paquete de datos MPEG-2. Esto se logra con la ayuda de los bytes de sincronía MPEG-2. Los paquetes MPEG-2 tienen una longitud de 188 bytes, donde el primero es de sincronía. Una vez localizado el byte de sincronía es eliminado (éste será reemplazado más tarde con la sincronía de segmento ATSC en otra etapa del procesamiento). Finalmente, este paquete resultante es la entrada del aleatorizador [6].

2. El aleatorizador modifica cada dato de entrada según un patrón pseudo-aleatorio conocido. Esto permite que el flujo de datos a la entrada del modulador 8-VSB tenga una característica casi completamente aleatoria y parecida al ruido. Esto es debido a que la respuesta en frecuencia de la señal transmitida necesita tener un espectro plano, tal como el ruido, para utilizar el canal RF con la máxima eficiencia. Si el flujo de datos tuviera patrones repetitivos, el ritmo recurrente de

dichos patrones causaría una aglomeración de la energía de RF en ciertos puntos discretos del espectro de RF, dejando así espacios subutilizados en otras frecuencias. Este proceso luego será invertido en el receptor para recuperar los valores originales [6,8].

3. La codificación Reed-Solomon es una técnica de corrección progresiva de errores (FEC o Forward Error Correction) aplicada al flujo de datos entrante. La corrección progresiva de errores es un término general que se le aplica a la variedad de técnicas que son utilizadas para corregir los errores de bit que ocurren durante una transmisión. El ruido atmosférico, la propagación multi-trayectoria, y las no linealidades del transmisor pueden provocar errores en los bits recibidos. La corrección progresiva de errores puede detectar y corregir estos errores, dentro de un límite razonable. El codificador Reed-Solomon en ATSC toma 187 bytes del paquete MPEG-2 entrante (ya sin el byte de sincronía y a la salida del aleatorizador de datos) y los manipula matemáticamente como un bloque para generar 20 bytes adicionales, que el codificador anexa al final del paquete original de 187 bytes. Estos 20 bytes se conocen como los bytes de paridad Reed-Solomon. El esquema de codificación Reed-Solomon utilizado en ATSC puede corregir hasta 10 bytes erróneos por paquete. Si hay demasiados errores en un cierto paquete, el receptor desecha el paquete MPEG-2 completo [6].

4. Luego el Entrelazador de datos dispersa el paquete MPEG-2 en tiempo para minimizar las pérdidas en ráfagas y construye paquetes nuevos uniendo fragmentos de distintos paquetes MPEG-2 previamente entrelazados. Estos paquetes reconstruidos tienen la misma duración que el original, es decir, 207 bytes y serán la entrada al codificador de Trellis.

5. La codificación de Trellis es otra forma más de la corrección progresiva de errores. A diferencia de la codificación Reed-Solomon que es un código de bloques, ya que procesa simultáneamente el paquete completo MPEG-2; la codificación Trellis es un código convolucional que rastrea el flujo de bits a medida que transcurre el tiempo. Para la codificación de Trellis, cada byte de ocho bits se divide para formar un flujo de cuatro palabras de 2 bits cada una. En el codificador Trellis, cada palabra

de 2 bits a la entrada es comparada con la historia de las palabras de 2 bits anteriores, y se genera matemáticamente un código de 3 bits para describir la transición de la última palabra de 2 bits a la actual. Estos códigos de 3 bits remplazan las palabras de 2 bits originales y son transmitidas al aire como símbolos de 8 niveles del formato 8-VSB. Por cada dos bits que entran al codificador Trellis, salen tres. Por esta razón, se dice que el codificador de Trellis del sistema 8-VSB es un codificador de relación 2/3 [6]. El codificador Trellis del sistema ATSC salta adelante doce símbolos a la vez para determinar la próxima transición de símbolo. Por lo tanto, hay 12 codificadores de Trellis operando en paralelo. Esta es otra forma más de entrelazado y ofrece una protección adicional contra los dispositivos de ruido. El poder de la codificación Trellis reside en su capacidad de rastrear la historia de la señal y descartar una información potencialmente errónea basada en el pasado de la señal y su comportamiento futuro. A la salida de este bloque se tienen 828 símbolos por paquete (207 bytes * 4 símbolos/byte) y cada símbolo corresponde a 3 bits [6]. En la parte del receptor, la contraparte del codificador Trellis es el decodificador de Viterbi [9].

6. El multiplexor y sincronizador de datos se encarga de producir a intervalos definidos patrones de sincronización especiales que se transmiten con la información de sincronización para el receptor. Estos patrones se utilizan para la sincronización de campo y de segmento. En el multiplexor se combinan los datos codificados, la sincronización de segmento y la sincronización de campo [6].

7. Luego a esta señal resultante de 8 niveles discretos de amplitud (-7, -5, -3, -1, +1, +3, +5, +7) se le inserta una componente de directa con una amplitud relativa de +1.25 que al modularse, genera una portadora piloto, por lo que todos los valores originales de la señal son modificados [6]. Esta señal piloto ayuda al receptor para la demodulación de la señal de RF.

8. En el Modulador VSB la modulación en amplitud se produce en un mezclador que tiene como entrada la señal de 8 niveles y la piloto. La señal de salida produce un espectro de doble banda lateral con demasiada redundancia de información

ocupando un espectro mayor al permitido en la transmisión de televisión digital (6 MHz). Este problema se soluciona con un filtro de banda lateral vestigial [8].

Luego la señal es convertida a la frecuencia asignada en la banda UHF o VHF y es transmitida por medio de una antena. En la recepción, se demodula la señal de RF, aplicando en forma inversa los mismos procesos que ya se mencionaron anteriormente.

ATSC 3.0

El estándar ATSC también cuenta con una nueva versión: ATSC 3.0 [10]. Este estándar tiene diferencias significativas con respecto a su versión anterior:

- Trabaja con la modulación OFDM.
- Utiliza codificación LDPC que tiene un desempeño cercano al límite descrito por Shannon y son últimamente muy utilizados [11]. Los códigos LDPC se encuentran dentro de un módulo llamado BICM (Bit Interleaved and Coded Modulation) o módulo de entrelazado y codificación modulada, el cual se encarga de la codificación (uso de LDPC), entrelazado y modulación; para el cual existen dos longitudes de código y 12 tasas de codificación (2/15 a 13/15), ofreciendo desde una operación muy robusta hasta una operación de alta capacidad [12].
 - Respecto al código externo, éste tiene como función proveer una detección y/o corrección de errores adicional. Existen tres opciones: la primera opción es utilizar un código de Bose, Ray-Chaudhuri y Hocquenghem (BCH), la segunda opción es utilizar un código de Control de Redundancia Cíclica (CRC), y como tercera opción, se puede no utilizar un código externo. En este último caso no se proporciona ninguna corrección o detección de errores adicional [12].
 - Utiliza tres modos de multiplexación: en tiempo (TDM), en potencia (LDM, Layered Division Multiplexing) y en frecuencia (FDM), para los cuales existen 3 tipos de subtramas: SISO, MISO y MIMO. LDM es una tecnología que resuelve el problema de transmitir de manera eficiente servicios para recepción fija y móvil simultáneamente. Es una multiplexación no ortogonal basada en la superposición

de espectro que a diferencia de FDM o TDM, utiliza el 100% del espectro durante el 100% de tiempo disponible [12].

- Para una amplia recepción de ecos de la señal, existen 12 posibilidades para la longitud del intervalo de guarda. Para la estimación de canal existen 16 patrones de portadoras piloto dispersas y continuas; y para contrarrestar el efecto Doppler existen tres tamaños de FFT: 8k, 16k, 32k [13].

Además de todas las herramientas que ATSC 3.0 ofrece al radiodifusor para adaptar el sistema a sus necesidades, es posible implementar tecnologías nuevas sin afectar las existentes, ya que el sistema tiene señalización extensible con la posibilidad de que sea adaptable a futuras tecnologías. Por último, cabe destacar que el estándar ATSC 3.0 no es compatible con su versión anterior utilizada: ATSC 1.0 [13].

2.1.3. ISDB-T.

En 1999 fue creado en Japón el estándar ISDB-T, este fue creado y es mantenido por el consorcio japonés de 192 empresas: ARIB (de sus siglas en inglés de Asociación de Industrias y Negocios de Radiodifusión) [14].

Es un sistema desarrollado para integrar varios servicios como la televisión en su formato estándar y de alta definición, servicios de internet, móvil y portátil. La técnica de modulación que utiliza es OFDM con transmisión de banda segmentada (OFDM-BST), utilizando diversos esquemas de modulación de portadora. Las portadoras están agrupadas en segmentos, 13 en total [1]. Cada segmento puede tener su propio esquema de protección y tipo de modulación. La codificación de video y el flujo de datos que utiliza este estándar es el MPEG-2. En la tabla 2.2 se muestran las características más importantes de este estándar.

Parámetros	Estándar ISDB-T		
Modulación	OFDM-BST		
Ancho de Banda (BW)	6 MHz, 7 MHz y 8 MHz		
Constelaciones	DQPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM		
Codificación interna de canal	Código convolucional: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 y 7/8		
Codificación externa de canal	Reed Solomon (204, 188)		
Número de segmentos	13		
Modos de transmisión	Modo 1	Modo 2	Modo 3
	2K	4K	8K
Número de portadoras que forman un símbolo OFDM	1405	2809	5617
Espaciamiento entre subportadoras	4 kHz	2 kHz	1 kHz
Duración efectiva (útil) del símbolo	252 μ s	504 μ s	1008 μ s
Intervalo de guarda	1/4, 1/8, 1/16 y 1/32		

Tabla 2.2. Características técnicas del estándar ISDB-T [15,16].

El umbral de recepción de la relación C/N en este estándar oscila entre 5 y 23 dB cuando la proporción de errores antes de la decodificación Reed Solomon es de 2×10^{-4} y la proporción de errores después de la decodificación Reed Solomon es de 10^{-11} [1].

ISDB-Tb

En el 2006, La ANATEL (Agencia Nacional de Telecomunicaciones) en Brasil adopta el estándar japonés, aunque le realiza ciertas modificaciones, llamándose ISDB-Tb, ISDB-T International o SBTVD (Sistema Brasileiro de Televisão Digital). Las principales modificaciones que tiene el ISDB-Tb con respecto al ISDB-T original son el uso del códec MPEG-4 (H.264) para compresión de vídeo estándar y la inclusión de aplicaciones de televisión digital interactiva. Además, permite una velocidad de 30 FPS (Frame per seconds) para las transmisiones a dispositivos móviles, mientras que el ISDB-T está limitado a 15 FPS [17].

2.1.4. DTMB.

En 2006 se creó en China el estándar de difusión de televisión digital terrestre DTMB, el cual surgió de dos tecnologías: ADTB-T (Advanced Digital Television Broadcasting – Terrestrial) y DMB-T (Digital Multimedia Broadcasting – Terrestrial). Ambas tecnologías fueron desarrolladas como competencia directa una de otra con el objetivo de conseguir su reconocimiento como único estándar para TV digital terrestre en China. ADTB-T es un estándar de portadora única que fue desarrollado por la Universidad de Jiaotong. En contraste, DMB-T, desarrollado por la Universidad de Tsinghua, es una técnica multiportadora [18]. Un gran avance de este estándar es el uso de la modulación TDS-OFDM (Sincronización en el Dominio del Tiempo OFDM), basado en un código pseudo-aleatorio de ruido PN (Pseudo-random Noise) como intervalo de guarda que permite una sincronización más rápida del sistema y una estimación de canal más precisa. Otra gran ventaja respecto a los demás estándares es la codificación de canal que emplea, es una concatenación de los códigos BCH y LDPC [18]. La portadora única o las 3780 multiportadoras se pueden modular con 4-QAM, 16-QAM, 32-QAM y 64-QAM [1]. En la tabla 2.3 se describen las principales características del estándar.

Parámetros	Estándar DTMB	
Modulación	TDS-OFDM	
Ancho de Banda	6 MHz, 7 MHz y 8 MHz	
Métodos de modulación	4-QAM, 16-QAM, 32-QAM y 64-QAM	
Codificación interna de canal	LDPC	
Codificación externa de canal	BCH	
Tecnologías	uniportadora	multiportadora
Número de portadoras que forman un símbolo OFDM	1	3780
Espaciamiento entre subportadoras	7.56 MHz	2 KHz
Duración efectiva del símbolo	0.132 μ s	500 μ s
Encabezado de trama [20]	1/6	1/9, 1/4

Tabla 2.3. Características técnicas del estándar DTMB [1].

El umbral de recepción de la relación C/N está en función del tipo de modulación y codificación de canal, por lo tanto el rango va de 0.62 a 21.08 dB con un BER (Razón de error de bit) de 1×10^{-5} y un ancho de banda del sistema de 8 MHz [1].

DTMB-A

El estándar DTMB ya tiene desde el 2013 su nueva versión como los demás estándares, es el DTMB avanzado (DTMB-A). Esta versión trabaja en tres modos de transmisión: 4k (4096 portadoras), 8k (8192 portadoras) y 32k (32678 portadoras). Los métodos de modulación que utiliza son: QPSK, 16-APSK, 64-APSK Y 256-APSK específica para cada canal de servicio [1]. En la modulación APSK (Amplitude Phase-Shift Keying) los símbolos están situados sobre circunferencias concéntricas en el plano IQ en lugar de estar dispuestas en forma rectangular como en QAM, por lo que se logra un mejor rendimiento [19].

2.1.5.Comparativa entre estándares de TDT.

En resumen, cada estándar tiene sus propias ventajas y desventajas. El estándar ATSC está dirigido a la difusión de alta definición y recepción fija [6]. Tiene como ventaja que su implementación es sencilla y por lo tanto barata. Pero su gran desventaja respecto a los demás estándares es que es muy sensible al multitrayecto y solo sirve para recepción fija. Su implementación en SFN dependería de la tecnología de los receptores, tema que se aborda a lo largo de la presente tesis.

Los estándares DVB-T e ISDB-T usan modulación COFDM, esto es una innegable ventaja en cuanto a la robustez frente a la interferencia debido al multitrayecto, lo que facilita el uso de redes SFN y la recepción móvil. Una diferencia entre ambos es que ISDB-T utiliza OFDM con transmisión de banda segmentada, esto le agrega complejidad al sistema, pero proporciona capacidad de transmisión jerárquica por lo que tiene como ventaja que se puede usar el mismo canal para servicio fijo y móvil simultáneamente [15].

El estándar DTMB fue el último en salir al mercado por lo que presenta las grandes ventajas de los demás estándares. Funciona para recepción fija y móvil y se pueden

implementar redes SFN y MFN. La modulación que emplea es TDS-OFDM que permite una sincronización más rápida del sistema y una estimación de canal más precisa. Otra gran ventaja respecto a los demás estándares es la codificación de canal que emplea, es una concatenación de los códigos BCH y LDPC.

2.2. Redes de Frecuencia Única.

Una Red en Frecuencia Única consiste en una red de dos o más transmisores que operan en un mismo canal de radiofrecuencia [21]. En el capítulo anterior se mencionó que en una SFN las contribuciones de cada señal en determinados puntos de recepción no se interfieren y además en ciertas circunstancias mejoran el nivel de señal recibido. Esto hace a este tipo de tecnología tan provechosa, ya que se incrementa la eficiencia del espectro radioeléctrico.

Existen Redes en Frecuencia Única para estándares de TDT que utilizan modulación basada en OFDM, tal es el caso de DVB-T, DTMB, ISDB-T/Tb. Pero como se explicó anteriormente, ATSC utiliza modulación 8-VSB. Esta modulación no hace frente al multitrayecto, ya que no cuenta con intervalo de guarda como OFDM, por lo que las redes SFN en este caso se encuentran limitadas. Según resultados de pruebas realizadas en los últimos años, se indica que esta tecnología puede ser implementada en ciertos escenarios de los sistemas transmisores y dependiendo además del diseño de los receptores [22].

2.2.1. Consideraciones de los receptores.

En redes SFN en ATSC, las señales que llegan en la recepción son similares a un multitrayecto y este no es combatido por la modulación, ya que usa modulación 8-VSB. En este caso es el receptor el encargado de lidiar con canales multitrayecto, y concretamente el ecualizador. Por ello, el hecho de que las redes SFN funcionen depende fuertemente del receptor.

La interferencia debido a la red SFN debe ser manejada de manera que se encuentre dentro del rango de capacidades de los ecualizadores adaptativos de la mayor cantidad posible de receptores de televisión [23,24]. Un ecualizador

adaptativo es un filtro que ajusta automáticamente sus coeficientes de forma periódica para ajustarse a las variaciones del canal en el tiempo, ya que las señales a filtrar son desconocidas al principio o variantes en el tiempo [9].

Según la Recomendación A/111 [25], los receptores fabricados antes del año 2000 tienen una ventana de ecualización de aproximadamente $-2 \mu\text{s}$ a $+20 \mu\text{s}$ para un solo eco de -6 dB . Los receptores fabricados después de 2000 pero antes de 2004 tienen una ventana de ecualización de aproximadamente $-2 \mu\text{s}$ a $+40 \mu\text{s}$, una mejora significativa en el rendimiento para el caso de post-eco, pero no mejora para pre-eco. Según esta Recomendación A/111 [25] los receptores en la actualidad logran recibir señales tan amplias como de $-50 \mu\text{s}$ a $+50 \mu\text{s}$, con una penalización no significativa para las amplitudes pre-eco frente a post-eco.

En las pruebas de laboratorios que se realizaron en el proyecto REFUTV con varios receptores comerciales actuales, se obtuvieron máscaras de recepción de hasta $-40 \mu\text{s}$ a $+70 \mu\text{s}$ en el caso del receptor de mejor desempeño [26].

El retardo o dispersión en tiempo de las señales es la diferencia de tiempo de propagación entre la principal respecto al eco. Se considera pre-eco cuando el eco llega al receptor antes de la señal principal, y post-eco si ocurre lo contrario. La señal principal se define como la que llega con mayor potencia.

Otro elemento a tener en cuenta en las redes SFN es el desplazamiento Doppler. Este es un desplazamiento de frecuencia que puede ser causado por el movimiento del receptor o de objetos cercanos. Puede ser por balanceo de la antena, aleteo de un avión, movimiento de automóviles o la recepción móvil. Los efectos de desplazamiento Doppler dan como resultado una distorsión multitrajecto dinámica que aumenta el umbral de recepción de ATSC o incluso puede provocar la pérdida de recepción. En la red SFN, un desplazamiento de frecuencia entre los transmisores puede actuar como un desplazamiento Doppler desde la perspectiva del receptor. Por lo tanto, es crucial mantener la sincronización de frecuencia entre los transmisores de la red SFN. La Recomendación para la sincronización para la transmisión distribuida A/111 [25] requiere una estabilidad de frecuencia para los

transmisores SFN de +/- 0.5Hz, lo que asegura un impacto Doppler muy limitado en los receptores de ATSC en un entorno de múltiples transmisores.

2.2.2. Configuraciones para diseño de redes SFN.

En una SFN, se espera que su cobertura sea la superposición de las áreas de cobertura de los transmisores de la red. Dichas áreas de cobertura superpuestas pueden planearse intencionalmente o no. Cuando se diseña un red SFN, los parámetros de planificación generalmente se seleccionan para proporcionar condiciones de recepción favorables en las áreas de cobertura superpuestas intencionales. Sin embargo, tales selecciones pueden tener el potencial de crear áreas de señal superpuestas involuntarias en otras ubicaciones. Las irregularidades del terreno pueden ser tomadas en cuenta desde el comienzo del proceso de definición de parámetros de la red SFN. Existen diversas configuraciones para el diseño de redes SFN según explica la Recomendación A/110 de ATSC [21]. Se pueden implementar con Repetidores Digitales de Canal (DOCR, Digital On-Channel Repeater) y los esquemas de transmisión distribuida (DTx), incluidos los Transmisores Distribuidos (DTxT) y los Repetidores Distribuidos (DTxR). Estas configuraciones se explican a continuación [21,25].

- **Repetidores Digital de Canal o DOCRs**

Esta configuración consiste en recibir la señal del transmisor principal a través del aire y se retransmite en el mismo canal RF introduciendo un retardo a la señal. Esta configuración está limitada en potencia y el costo es muy bajo. Es el método más simple para establecer una red SFN.

- **Transmisores Distribuidos o DTxTs**

Esta estructura consiste en que cada transmisor de la red recibe a través de un enlace dedicado la señal de ATSC a transmitir. En cada transmisor se puede variar la potencia y retardo conforme a las necesidades de diseño de la red, pero es necesario que los transmisores estén sincronizados. Este requerimiento hace a esta configuración compleja, pero tiene a su favor la flexibilidad respecto a los

parámetros de diseño. Este es el tipo de red que se plantea diseñar y estudiar en el Proyecto REFUTV.

- **Repetidores Distribuidos o DTxRs**

En este caso, la señal es recibida de un transmisor principal a través del aire (esta señal no es de un enlace dedicado y también puede ser recibida por los receptores de la población). La señal es retransmitida en un canal de RF diferente, por lo que esta configuración no es considerada una SFN. Bajo condiciones adecuadas, los DTxRs son capaces de proveer una señal sin limitación de potencia debido a las diferentes frecuencias de entrada y salida. Si los canales de RF están lo suficientemente separados, se evitan muchos de los problemas de acoplamiento entre la antena receptora y transmisora que se tienen en la configuración DOCRs) y con un retardo producido por el sistema menor, sin embargo, siguen teniendo limitaciones en los lugares donde son utilizados: como se ha podido observar, se debe tener un buen nivel de señal para poder instalar un DTxRs.

2.3. Pruebas de campo de redes SFN con el estándar ATSC.

Las pruebas de campo constituyen una herramienta muy útil para obtener datos de campo de sistemas de televisión digital a fin de poder llegar a conclusiones útiles respecto a datos requeridos como cobertura de la señal digital, receptibilidad del servicio y características del canal.

Para realizar pruebas de campo, la UIT considera la Recomendación UIT-R BT.2035-2 [27]. Este documento explica que el objetivo de las pruebas de televisión digital terrestre es evaluar la calidad de funcionamiento de los sistemas disponibles con diversas configuraciones de transmisión y condiciones de recepción como: condiciones urbanas, suburbanas y rurales; recepción en interiores y en tejados; y recepción mediante receptores portátiles y móviles, en situaciones diversas. Los planes de pruebas de campo según esta Recomendación deben proporcionar los objetivos y metodología general. Se debe incluir las condiciones del entorno, medir el servicio real y compararlo con la cobertura predefinida. Además, realizar un gran número de mediciones a fin de disponer de resultados estadísticamente

significativos y documentar los resultados. Esta Recomendación [27] refiere que si el emplazamiento y la ruta de medición se encuentran en una SFN, a efectos de medición, puede ser necesario utilizar una antena altamente directiva situada en una plataforma orientable cuando se desee poder identificar las contribuciones realizadas por cada uno de los transmisores en dicha SFN [27].

La Recomendación de ATSC referida a pruebas de campo es la ATSC A/75. Este documento presenta los objetivos y la metodología general para realizar pruebas de campo de sistemas de televisión digital terrestre con el estándar ATSC [28]. La recopilación de datos de campo de los sistemas de televisión digital tiene como objetivo obtener conclusiones útiles sobre la cobertura de la señal de ATSC, el área de servicio y la capacidad de recepción. Las implementaciones de los planes de Pruebas de Campo pueden enfocarse en ciertos aspectos de los objetivos dependiendo de los requisitos inmediatos que se desean obtener. Por lo tanto, al igual que la Recomendación UIT-R BT.2035-2 [27], los planes desarrollados utilizando este documento buscan identificar las variables en el entorno y recomendar el conjunto mínimo de variables a evaluar; medir el servicio real y compararlo con la cobertura predefinida y recopilar datos útiles para mejorar el rendimiento del sistema. Este documento no especifica algún procedimiento específico para redes SFN, ya que el estándar ATSC en sus inicios no fue concebido para este tipo de redes y el documento no ha sido actualizado desde el 2001 [28].

En la Recomendación A/326:2017 [29] ya es insertado el tema planeación de Pruebas de Campo para Redes de Frecuencia Única para el estándar ATSC 3.0. Como ya fue explicado, ATSC 3.0 es la nueva versión en desarrollo del estándar. En este documento se explica que la caracterización del canal de propagación de RF (por ejemplo, respuesta al impulso del canal) se logra mediante la medición detallada de condiciones de señal específicas en momentos específicos y en ubicaciones específicas usando antenas móviles.

Con el objetivo de comprobar la viabilidad de Redes de Frecuencia Única en el estándar ATSC se han realizado en el mundo pruebas de campo. El análisis de estas pruebas y la experiencia de las Pruebas de Laboratorio del proyecto REFUTV

[26] pueden servir de base para la definición de los parámetros de la red de transmisión y para la ubicación de los puntos de medida en las Pruebas de Campo del proyecto REFUTV. Algunos de los países donde se han llevado a cabo estas pruebas son Estados Unidos y Canadá. A continuación, se puntualizarán algunos de los aspectos que se tuvieron en cuenta en las mismas.

2.3.1. Transmisores Distribuidos en la ciudad de Nueva York.

En la ciudad de New York en el 2007 se instaló una red SFN de Transmisores Distribuidos por la MTVA (Metropolitan Television Alliance) [22]. Las pruebas de campo realizadas ayudaron a determinar la viabilidad de la utilización de esta tecnología en ambientes urbanos con muchos edificios estimando el área de cobertura y desempeño del servicio. El área de medida se llevó a cabo en Brooklyn. La red consistió en un prototipo de implementación a pequeña escala de un sistema DTxT de cinco transmisores, utilizando el canal 33 de UHF (principal y secundario), el canal 65 de UHF (no tenía transmisor principal) y el canal 12 de VHF (principal y secundario). Se determinó y comparó la cobertura, la calidad del servicio, el margen y la facilidad de recepción (rango de ajuste de antena) de las señales en los canales 12 y 33 con y sin red SFN activa. Además, se determinó la cobertura y el rendimiento del servicio de un sistema DTxT en el canal 65. Los transmisores fueron sincronizados de acuerdo al estándar A/110 [21]. A continuación, se enuncian las principales características de estas pruebas.

- Las antenas transmisoras fueron omnidireccionales excepto la señal del canal 12 que era radiada desde una antena direccional temporal dirigida hacia Brooklyn.
- La PRA (Potencia Radiada Aparente) promedio del canal 12 fue de 1 kW para el principal y 100 W para el secundario. Para el canal 33 fue de 137.8 kW para el principal y 1 kW para el secundario. Para el caso del canal 65 la PRA promedio fue de 1 kW.
- Las mediciones fueron realizadas en 132 sitios, 109 exteriores y 23 en interiores.

- La configuración utilizada para ubicar los sitios de medida fue de rejilla.
- Los receptores usados fueron dos de quinta generación.
- Para la recepción en exteriores se usó antenas log-periódicas calibradas en las bandas VHF y UHF a una altura de 15 y 30 metros sobre el nivel del suelo. Cada medición se realizó con la antena orientada hacia donde se obtuvo el máximo nivel de la señal.
- Para la recepción en interiores se usó una antena dipolo calibrada para la banda VHF y UHF.

Algunos de los resultados más importantes de estas pruebas de la recepción en exteriores se muestran en la Tabla 2.4.

	Canal 12	Canal 33	Canal 65
Intensidad de campo promedio para la antena ubicada a 30 m	70 dB μ V/m	80 dB μ V/m	76 dB μ V/m
C/N	Por encima del umbral de 14.9 dB que se requiere para una buena recepción.	Valores por encima de 47 dB	Valores por encima de 40 dB

Tabla 2.4. Resultados de recepción en exteriores [22].

Las pruebas de recepción en interiores se realizaron en el canal 33. Se tuvo un valor promedio de intensidad de campo de 69 dB μ V/m, ubicándose la antena donde estaba el receptor. El valor de C/N promedio fue de 38 dB [22].

2.3.2. Repetidores de canal y transmisores distribuidos implementados en Canadá.

La CRC (Communications Research Centre) de Canadá estudió en diversas pruebas de campo el rendimiento para diversas configuraciones de DOCRs [30,31] y DTxRs [30].

Las mediciones se realizaron primeramente cuando la red SFN estaba desactivada (operando solo el transmisor principal) obteniendo el área de recepción

del transmisor principal y después se realizaron las mismas mediciones con la red activa (transmisor principal – DOCR). Estas dos mediciones se realizaron para evaluar la cobertura que se tiene con las dos configuraciones. Las principales características de estas pruebas de campo con la configuración DOCRs se enuncian a continuación [30,31].

- El canal que se utilizó fue el 67.
- La distancia entre los transmisores era de 28.8 km, procurando que existiera línea de vista entre ellos.
- La PRA del transmisor principal fue de 30 kW.
- La antena de transmisión del transmisor principal fue omnidireccional y se ubicó 215 metros sobre el nivel del suelo.
- La PRA del transmisor DOCRs fue de 6.85 W.
- La antena de transmisión del DOCRs fue una antena logo-periódica con una ganancia de 7.5 dBi y la antena de recepción fue una Uda-Yagi con una ganancia de 14.5 dBi.
- Las antenas del DOCR (receptora-transmisora) se ubicaron a 15 metros de distancia.
- El número de sitios fueron 9, 6 en exteriores y 3 en interiores.
- La antena para recepción en exteriores es direccional con una ganancia de 7.5 dBi y en interiores se utilizó una antena pasiva comercial para NTSC.

En recepción, se ocuparon receptores del año anterior a la realización de las pruebas de campo, estos receptores presentaron un buen desempeño a las pruebas de laboratorio que recomienda ATSC A/74 [32]. Cuando la red SFN estuvo activa, se comprobó que utilizar una antena direccional tanto en exteriores como en interiores ayuda a discriminar entre las señales que llegan al receptor al apuntar en dirección de mayor potencia. De estas pruebas se llegó a la conclusión, que para evitar interferencia con la señal principal se tenía que agregar un retardo a la señal en el DOCR, esto ayudó a obtener una buena recepción en las zonas de alta interferencia. También se concluyó que cuando la antena transmisora del DOCR está dirigida en dirección del transmisor principal se tienen áreas en donde es

imposible la recepción, sin embargo se espera que la recepción mejore si se diseñan ecualizadores que soporten multitrayecto [31].

2.3.3. Mediciones de campo en la red SFN Puebla-Tlaxcala.

En diciembre del 2015 se llevaron a cabo mediciones de campo con el objetivo de evaluar la calidad de la señal de audio y video de los sitios de transmisión de Tlaxcala y Puebla [33], así como observar el patrón de ecos en distintas zonas de la cobertura de la red SFN. Los sitios de transmisión tanto de Puebla como de Tlaxcala conforman dos redes SFN, una funcionando en el canal 24 (Azteca 13) y la otra en el canal 27 (Azteca 7) [34]. Para poder hacer un análisis completo de la red SFN, se eligieron nueve puntos distribuidos a lo largo de la ruta entre los sitios de transmisión de Tlaxcala y Puebla. Las mediciones tuvieron las siguientes características:

- La distancia entre los transmisores es de 30 km.
- La potencia del transmisor de Puebla, tanto en el canal 24 como en el canal 27, es de 3.6 kW.
- La potencia del transmisor de Tlaxcala es de 2.8 kW en ambos canales.
- Antena de varilla de 13.5 cm de longitud para recepción omnidireccional en interiores o exteriores a 1.7 m del suelo.

El equipo fue transportado a bordo de una camioneta y las mediciones se llevaron a cabo sin que el vehículo estuviera en movimiento.

En los 9 puntos de medida se registró una buena calidad en la señal de audio y video, con lo cual se pudo concluir que la red SFN estaba funcionando correctamente, al menos en la zona geográfica que más interesaba debido al número de pobladores de la misma [33].

Bibliografía

1. Unión Internacional de Telecomunicaciones. “*Métodos de corrección de errores, de configuración de trama de datos, de modulación y de emisión para la radiodifusión de televisión digital terrenal*”. Recomendación ITU-R BT.1307-7. Junio, 2015.
2. Digital Video Broadcasting. “*Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television (DVB-T)*”. Junio, 2015.
3. Digital Video Broadcasting. “*Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects. ETSI TR 101 190 V1.3.2*”. Mayo, 2011.
4. Digital Video Broadcasting. “*Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*”. ETSI TR 102 831 V1.2.1. Agosto, 2012.
5. Darío Alfonso, Pérez-Calderón Rodríguez, José García Doblado, Patricio López García, Ana Cinta Oria Oria, Vicente Baena Lecuyer. “*Análisis del ángulo de rotación en DVB-T2*”. Dpto. de Ingeniería Electrónica. Universidad de Sevilla. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/319276764_Analisis_del_Angulo_de_Rotacion_en_DVB-T2. Fecha de consulta: 2 de mayo, 2018.
6. Advanced Television Systems Committee. “*A/53: ATSC Digital Television Standard, Parte 2: RF/Transmission System Characteristic*”. Washington, D.C. 15 diciembre, 2011.
7. Advanced Television Systems Committee. “*A/54: Recommended Practice: Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard, including Corrigendum No. 1*”. 04 diciembre, 2003.
8. David Sparano, “*What exactly is 8-VSB anyway?*”, The Miller Freeman Guide to Digital Television, 1997.
9. Esperanza Guerra. Tesis de Maestría: “*Ecualizadores de canal para recepción de ATSC en redes SFN*” Facultad de Ingeniería, UNAM. Noviembre, 2017.
10. Advanced Television Systems Committee, “*ATSC Standard: ATSC 3.0 System (A/300)*”. Washington, D.C., EUA: ATSC, 2017.
11. K.-J. Kim, S. Myung, S.-I. Park, J.-Y. Lee, M. Kan, Y. Shinohara, J.-W. Shin, and J. Kim, “*Low-density parity-check codes for atsc 3.0*” IEEE Transactions on broadcasting, vol. 62, no. 1, pp. 189–196, 2016.

12. L. Fay, L. Michael, D. Gómez-Barquero, N. Ammar, and W. Caldwell, “An overview of the ATSC 3.0 physical layer specification”. IEEE Transactions on broadcasting, vol. 62, no. 1, pp. 159–171, 2016.
13. Advanced Television Systems Committee, “ATSC Standard: Physical Layer Protocol(A/322)”. Washington, D.C., EUA: ATSC, 2016.
14. ARIB. Association of Radio Industries and Business. “About ARIB”. Disponible: <http://www.arib.or.jp/english/>. Fecha de consulta: 1 abril, 2018.
15. ARIB STD-B31. “Transmission system for digital terrestrial television broadcasting”. Versión 2.2. 18 March, 2014.
16. ARIB STD-B32. “Video coding, audio coding, and multiplexing specifications for digital broadcasting”. Versión 3.9. 9 diciembre, 2016.
17. ABNT NBR 15601 NORMA BRASILEÑA (traducción al español). “Televisión digital terrestre — Sistema de transmisión”. 7 abril, 2008.
18. Néstor Oscar Ojeda Jiménez, Oscar E. Rodríguez Ramírez. “Comparación entre los estándares de transmisión de segunda generación de televisión digital terrestre: DTMB-A y DVB-T2”. Revista Telemática. Vol. 15 No.3, p.39-55. Revista digital de las tecnologías de la informática y las telecomunicaciones. Septiembre-diciembre, 2016.
19. Qi Wang, Zhaocheng Wang, and Jinguo Quan. “Coded Modulation with APSK for OFDM-Based Visible Light Communications”, 2015.
20. Liu Min. Tesis de Doctorado: “Analysis and Optimization of the Asian Mobile and Terrestrial Digital Television Systems”. l’Institut National des Sciences Appliquées de Renne, Université Européenne de Bretagne. Enero, 2012. Disponible <https://pdfs.semanticscholar.org/09a3/4d518cb2450f271a6cf1aa9618c9df8df614.pdf>. Fecha de consulta 20 mayo, 2018.
21. Advanced Television Systems Committee. “ATSC A/110:2011: Standard for Transmitter Synchronization”. Part 1, Washington, D.C., 8 de abril, 2011.
22. 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, Jun, 2008.

23. Xianbin Wang, Yiyan Wu, G. Gagnon, Bin Tian, Kechu 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. Marzo 2008.
24. Yanjie Peng, A.G. Klein, and Xinming Huang. "*Hybrid DFSF-BP equalization for ATSC DTV receivers*". In Circuits and Systems (ISCAS). IEEE International Symposium on Circuits and System in Australia, pages 1712–1715. Junio 2014.
25. Advanced Television Systems Committee. "*A/111 Recommended Practice: Design of Multiple Transmitter Networks*". Washington, D.C. 18 septiembre, 2009.
26. José María Matías Maruri, Mario Albeto Hernández Flores. "*Resultados de las pruebas de laboratorio de ATSC*". Facultad de Ingeniería, CONACYT. 01 de junio, 2016.
27. 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.
28. Advanced Television Systems Committee. "*A/75: Recommended Practice: Developing DTV Field Test Plans*". Washington, D.C. 26 Julio, 2001.
29. Advanced Television Systems Committee. "*ATSC Recommended Practice: ATSC 3.0 Field Test Plan*" (A/326) Doc. A/326:2017, 22 febrero, 2017.
30. K. Salehian, M. Guillet, B. Caron, and A. Kennedy. "*On-channel repeater for digital television broadcasting service*". Broadcasting, IEEE Transactions on, Vol. 48, No. 2, pages: 97–102, junio, 2002.
31. K. Salehian, B. Caron, and M. Guillet. "*On-channel repeater to improve reception in dtv broadcasting service area. Broadcasting*", IEEE Transactions on, 49(3):309–313, septiembre, 2003.
32. Advanced Television Systems Committee. "*A/74 Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines*". Washington, D.C. 07 abril, 2010.
33. Daniel Esquivel Trujillo. Tesis de Licenciatura: "*Canales de propagación para redes SFN*". Facultad de Ingeniería, UNAM. Marzo, 2016.
34. Unidad de Concesiones y Servicios del Instituto Federal de Telecomunicaciones. "*Constancia de Inscripción en el Registro Público de Concesiones*". XHPUR-T, Folio Electrónico FER040610CO-105174, México, 2015.

Capítulo 3. Radioenlace para la red de transmisión.

Para la sincronización entre los dos transmisores que conforman la Red de Frecuencia Única del proyecto REFUTV se utilizará un enlace de microondas punto a punto direccional. Esta es una buena alternativa en este caso debido a que no se puede instalar cable fácilmente ya que la distancia a cubrir es de 24,4 km. La estación transmisora del radioenlace estará en el Cerro del Chiquihuite donde se encontrará el transmisor principal de la red SFN y la estación receptora será ubicada en TV UNAM, donde estará el transmisor secundario.

La ubicación física de la antena de la estación principal será en las coordenadas Latitud: $19^{\circ}31'59.13''$ y Longitud: $99^{\circ}07'50.58''$ en el Cerro del Chiquihuite al norte de la Ciudad de México, en la delegación Gustavo A. Madero. TV UNAM se encuentra en Latitud: $19^{\circ}19'2.34''$ y Longitud: $99^{\circ}10'32.03''$ al sur de la ciudad, en la delegación de Coyoacán. Se muestran ambos lugares en la Figura 3.1.



Figura 3.1. Ubicación en Google Earth de los sitios de transmisión.

Se utilizará el software Radio Mobile para el presente estudio de viabilidad del enlace de microondas. Se observa en la Figura 3.2 ambas estaciones del radioenlace como lo muestra el software. Las frecuencias propuestas para el enlace de microondas son 7 GHz [1] ó 13 GHz [2]. Ambas bandas son recomendadas para este tipo de propagación.

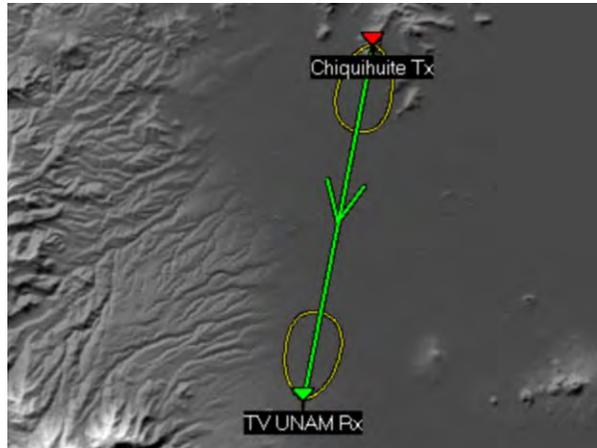


Figura 3.2. Representación del radioenlace en el Radio Mobile.

3.1. Perfil topográfico.

La trayectoria no presenta obstáculos que impidan la propagación por Línea de Vista (L.O.S. Line of Sight) como se muestra en el perfil topográfico de la Figura 3.3. Se realizó ubicando las dos estaciones dentro de sus respectivas instalaciones, considerando una altura de 10 metros para la antena del Chiquihuite y 15 metros para TV UNAM; y trazando una trayectoria recta azul como se muestra en la Figura 3.3, siendo esta la línea de vista.

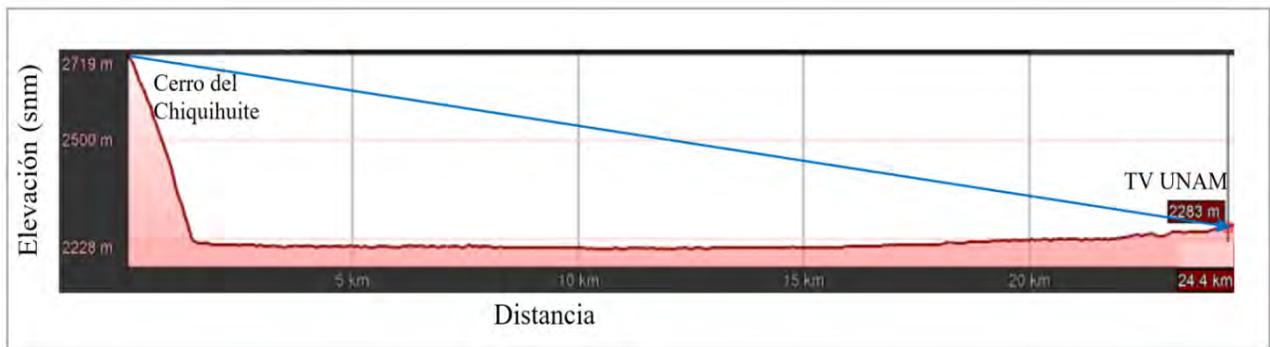


Figura 3.3. Perfil del terreno.

3.2. Curvatura de la Tierra.

Como ya se mencionó, en el enlace en cuestión el modo de propagación a usarse es transmisión por Línea de Vista. Este tipo de propagación está limitado por la curvatura de la Tierra (elevación que la curvatura de la tierra crea entre dos puntos)

provocando que el campo en la antena de recepción dependa de la distancia entre ambas antenas. Se puede calcular la altura de la curvatura terrestre para una determinada distancia mediante el uso de la siguiente ecuación, en cada punto de la trayectoria del enlace.

$$\text{Altura en } i \text{ kilómetros} = \left(\frac{x_i(x_n - x_i)}{2kR} \right) * 1000 \quad (1)$$

Donde,

x_n es la distancia entre ambos puntos (km),

x_i es la distancia donde se desea calcular la curvatura (km),

K es el factor de curvatura de la Tierra (adimensional),

R es el radio de la Tierra, son 6378 km.

En nuestro caso, $x_n = 24.4 \text{ km}$, $k=1.33$ considerando atmósfera estándar [3].

En la Figura 3.4 se muestra la curvatura de la Tierra para este enlace.

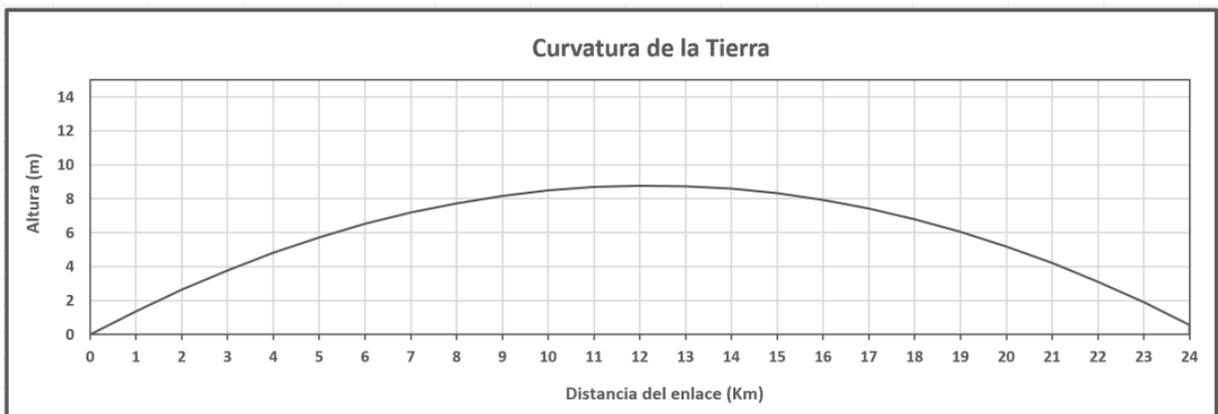


Figura 3.4. Curvatura de la Tierra en los 24.4 km del radioenlace

3.3. Azimut y elevación.

Conociendo las coordenadas y la altura de las antenas se puede conocer el azimut y elevación. El azimut de cada ubicación indicará la dirección exacta en que debemos apuntar la antena en el plano horizontal. Se mide en grados, desde el Norte geográfico hacia el Este, es decir, en sentido horario de 0° a 360°. Con ayuda de Google Earth se puede determinar el azimut que deberá tener cada sitio. En

Chiquihuite deberá contar con un azimut de 191.18° y en TV UNAM el azimut debe ser de 11.17°.



Figura 3.5. Azimut de las estaciones.

La elevación nos indicará la inclinación que le debemos dar a cada antena con respecto al plano vertical, se mide en grados. Empleando las siguientes ecuaciones tenemos lo siguiente:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta \text{altura}}{\text{distancia}} \right) \quad (2)$$

Donde:

$$h_1 = 2719\text{m} + 10\text{m} = 2729\text{m} \quad (\text{Altura de la antena transmisora})$$

$$h_2 = 2283\text{m} + 15\text{m} = 2298\text{m} \quad (\text{Altura de la antena receptora})$$

$$d = 24400 \text{ m}$$

α_1 es el ángulo de elevación que tendrá la torre ubicada en el Cerro del Chiquihuite.

α_2 es el ángulo de elevación que tendrá la torre ubicada en TV UNAM.

Sustituyendo estos valores en la ecuación (2) se obtienen los ángulos de elevación:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta \text{altura}}{d} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{h_2 - h_1}{d} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{2298 - 2729}{24400} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{-431}{24400} \right) = \tan^{-1} (-0.01766) = -1.01^\circ$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta \text{altura}}{d} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{h_1 - h_2}{d} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{2729 - 2298}{24400} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{431}{24400} \right) = \tan^{-1} (0.01766) = +1.01^\circ$$

Los datos obtenidos de los cálculos anteriores, junto con los datos de las estaciones, están resumidos en la Tabla 3.1.

Datos	Cerro del Chiquihuite	TV UNAM
Latitud	19°31'59.13"	19°19'2.34"
Longitud	99°07'50.58"	99°10'32.03"
Altitud	2719 m	2283 m
Altura de antenas	10 m	15 m
Azimut	191.18°	11.17°.
Elevación	-1.01°	1.01°
Distancia	24.4 Km	

Tabla 3.1. Datos geográficos de ambas estaciones.

3.4. Fenómenos de propagación.

La señal puede ser degradada por factores que deben ser tomados en cuenta a la hora de diseñar un enlace de microondas. Algunos de estos serán abordados a continuación.

3.4.1. Atenuación por el espacio libre.

En la propagación de la señal ésta sufre pérdidas a medida que se aleja de la fuente transmisora hasta que llega a la antena receptora. La mayor parte de la potencia de la señal de radio se perderá en el aire aún sin presencia de obstáculos debido a la expansión dentro de una superficie esférica. Según la recomendación UIT-R P.525-2 [4], el procedimiento para calcular la atenuación en el espacio libre (L_{bf}) para un enlace punto a punto es utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{bf} = 32.4 + 20 \log f + 20 \log d \quad (3)$$

Donde f es la frecuencia [MHz] y d la distancia [km].

3.4.2. Atenuación debida a los gases atmosféricos.

Cuando la onda electromagnética se propaga a través de la atmosfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricos provocando

la pérdida de potencia de la onda. Estos materiales pueden absorber energía de las ondas electromagnéticas causando pérdidas por absorción. En la Figura 3.6 se puede observar el comportamiento de la absorción atmosférica en las ondas electromagnéticas.

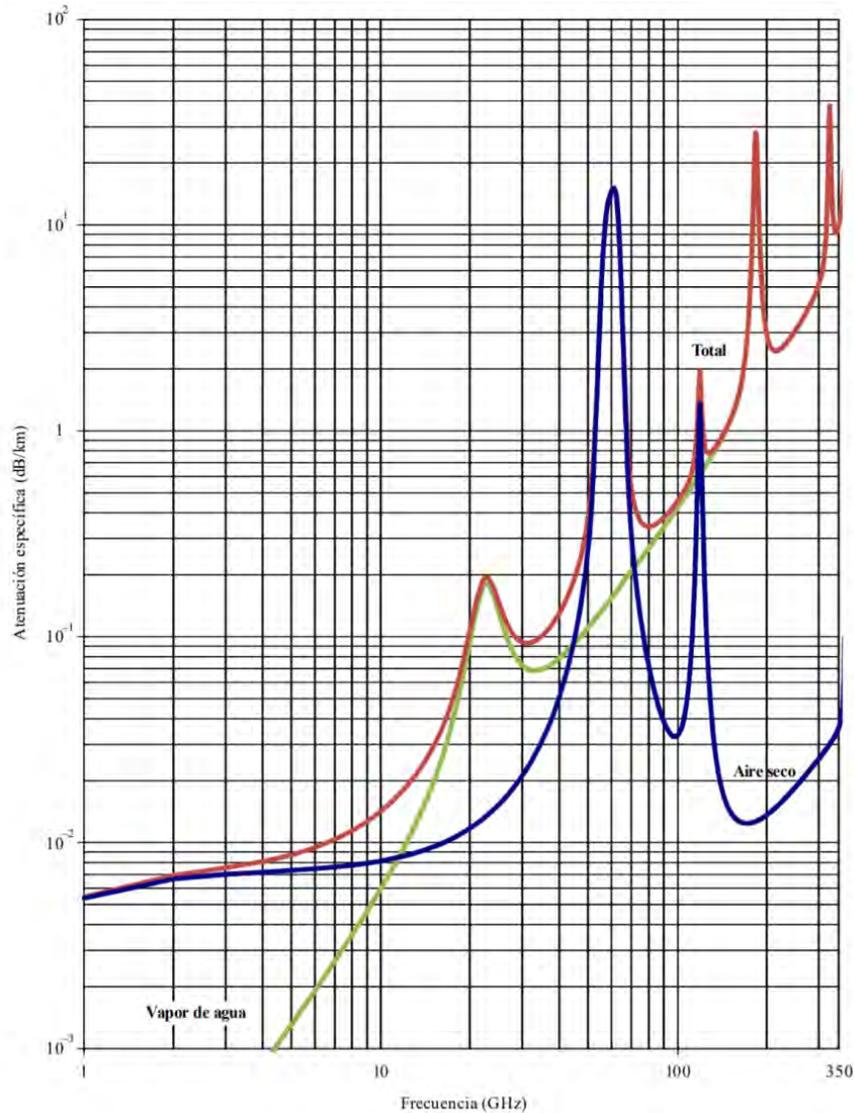


Figura 3.6. Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas [5].

Estas pérdidas dependen de la distancia total que la onda se propaga a través de la atmosfera, es decir, cuando la onda se propaga a través de un medio homogéneo y cuyas propiedades son uniformes, las pérdidas por absorción en el

primer kilómetro de propagación son las mismas que en el último kilómetro y se presentan con mayor fuerza en frecuencias superiores a los 10 GHz.

3.4.3. Atenuación por lluvia.

Al utilizar frecuencias superiores de 5 GHz, también se presenta el problema de atenuación por lluvia, la cual se expresa en función de la intensidad de lluvia. La recomendación UIT-R P.838-3 [6] indica el procedimiento a seguir para estimar este tipo de atenuación, como se ve a continuación.

La atenuación específica γ (dB/km) se obtiene a partir de la intensidad de lluvia R (mm/h) mediante la ley exponencial (ver ecuación 4), donde k y α son constantes que dependen de la frecuencia y de la polarización de la onda electromagnética. Algunos valores de k y α para distintas frecuencias y polarizaciones lineales (horizontal y vertical) se muestran en la Tabla 3.2.

$$\gamma = kR^\alpha \quad (4)$$

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
1	0,0000259	0,9691	0,0000308	0,8592
1,5	0,0000443	1,0185	0,0000574	0,8957
2	0,0000847	1,0664	0,0000998	0,9490
2,5	0,0001321	1,1209	0,0001464	1,0085
3	0,0001390	1,2322	0,0001942	1,0688
3,5	0,0001155	1,4189	0,0002346	1,1387
4	0,0001071	1,6009	0,0002461	1,2476
4,5	0,0001340	1,6948	0,0002347	1,3987
5	0,0002162	1,6969	0,0002428	1,5317
5,5	0,0003909	1,6499	0,0003115	1,5882
6	0,0007056	1,5900	0,0004878	1,5728
7	0,001915	1,4810	0,001425	1,4745
8	0,004115	1,3905	0,003450	1,3797
9	0,007535	1,3155	0,006691	1,2895
10	0,01217	1,2571	0,01129	1,2156
11	0,01772	1,2140	0,01731	1,1617
12	0,02386	1,1825	0,02455	1,1216
13	0,03041	1,1586	0,03266	1,0901

Tabla 3.2. Coeficientes para estimar el valor de atenuación específica [6].

Para la predicción de la atenuación producida por la lluvia se necesita información sobre las estadísticas de la intensidad de precipitación. En la Recomendación UIT-R P.837-6 [7] se proporcionan valores de R (tasa de precipitación) excedidos durante determinados porcentajes de tiempo y para distintas zonas hidrometeorológicas mundiales.

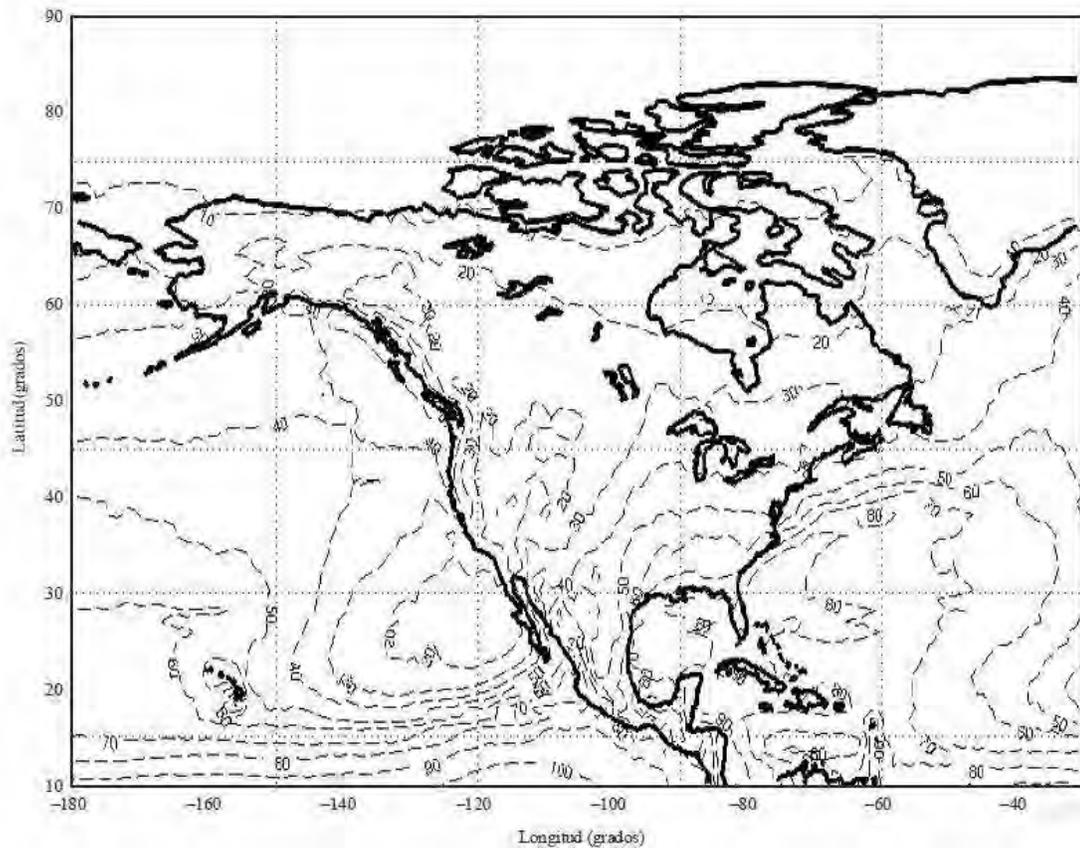


Figura 3.7. Índice de pluviosidad (mm/h) sobrepasado durante el 0.01% del año medio [7].

De la Figura 3.7 se aprecia que para la CDMX la intensidad de lluvia es de 50 [mm/h] durante menos del 0,01% del tiempo. Por lo tanto, si queremos que nuestro sistema presente una disponibilidad del 99,99%, será necesario realizar el diseño del mismo teniendo en cuenta una intensidad de lluvia $R = 50$ mm/h a la hora de calcular las atenuaciones. Aunque según el Sistema Meteorológico Nacional [8] considera esta intensidad de lluvia muy fuerte, en julio del 2017 se registraron

fuertes lluvias en la CDMX, de hecho, las lluvias fueron más frecuentes y con niveles más altos de precipitación, de acuerdo como se muestra en el Sitio Web del Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM. La Intensidad de lluvia sobrepasó los 50 mm/h, como la del 23 de julio que llegó a $R=83.66$ mm/h [9].

3.4.4. Margen de desvanecimiento.

Cualquier sistema de microondas debe incluir un margen de desvanecimiento. Este es la reducción de la intensidad de la señal por debajo de su nivel nominal. Las principales causas del desvanecimiento son factores como el tipo de suelo, el tipo de clima y el entorno que rodea a la trayectoria. También depende de cuánto error se está dispuesto a aceptar en la transmisión. Por lo anterior, el margen de desvanecimiento se incluye como pérdida en la ecuación de ganancia del sistema. Matemáticamente el margen de desvanecimiento se expresa mediante la siguiente ecuación 5 [10].

$$F_m = 30 \log d + 10 \log 6 * A * B * f - 10 \log(1 - R) - 70 \quad (5)$$

Donde,

F_m = Factor de desvanecimiento.

f = Frecuencia en GHz.

d = Distancia en kilómetros.

A = Factor de rugosidad.

B = factor para convertir la peor probabilidad mensual en una probabilidad anual.

R = Confiabilidad (usaremos 99% = 0.99 de confiabilidad).

La constante 70 está relacionada con asegurar una BER no mayor a 10^{-6} .

En la Tabla 3.3 se presenta la composición y los valores del margen de desvanecimiento.

Término	Pondera	Factores	Valores
$30 \log D$	La diversidad modal	D Distancia	La distancia visual entre antenas, en km
$10 \log (6ABF)$	El entorno de propagación	A Factor de rugosidad	4 = espejos de agua, ríos muy anchos, etc.
			3 = Sembrados densos, pastizales, arenales
			2 = bosques (la propagación va por encima)
			1 = terreno normal
		0.25 = terreno rocoso despejado	
B Factor climático	1 = áreas marinas o con condiciones de peor mes, anualizadas		
	0.5 = áreas tropicales y húmedas		
	0.25 = áreas mediterráneas de clima normal		
0.125 = áreas montañosas de clima seco y fresco			
F Frecuencia	La frecuencia en GHz		
$10 \log (1-R)$	El objetivo de confiabilidad	R Confiabilidad	La confiabilidad esperada o convenida, como un decimal

Tabla 3.3. Composición y valores del margen de desvanecimiento [10].

3.5. Análisis de viabilidad.

Como se mencionó anteriormente, el análisis de viabilidad se realizará en las bandas de 7 y 13 GHz. Estas son bandas a usar en México para radioenlaces según regulaciones del IFT [1,2]. En la Tabla 3.4 se muestra una cotización de un equipo de microondas con la capacidad de trabajar en ambas bandas.

Sería más factible que el enlace de microondas opere a 7 GHz ya que la distancia entre las estaciones es considerable y puede que a frecuencias mayores el enlace no cumpla con las expectativas requeridas, pero esta banda está muy saturada por lo que se realizará un presupuesto de potencias para ambas frecuencias.

Partida	Cant	Descripción	Marca	Modelo
ENLACE DE MICROONDAS				
1	2	Transcend ODU RF Bands: 7 or 13 GHz, slip fit mount to antenna or coupler Type: HP, Negative Polarity, channel bandwidth up to 56MHz and modulation up to 256 QAM	Advantech Wireless	5WH13xxxx-00x10
2	2	Transcend 800 IDU with 10MHz reference and GPS option Interfaces 8x E1/T1 + 2x SFP + 4xGigE Switch + 3x GigE Router + 2x ASI (bi-directional) License: ACM, 64 QAM and first ASI, Vac Supply Option	Advantech Wireless	1W0-AEG042-190
3	2	North America NEMA 5-15P (850016-210) (6ft)	Advantech Wireless	670-000380-001
4	2	Transcend T-800 IDU - First ASI Input/Output operation license	Advantech Wireless	1W0-SEG000-915a
5	2	Transcend T-800 IDU - Additional ASI Input/Output operation license	Advantech Wireless	1W0-SEG000-915b
6	2	Advantech High Performance Antenna, single-polarized 0.9m, integrated antenna	Advantech Wireless	WAAT007xx/81
7	2	Transcend 800 Rev 7 User Manual & MIB (USB medium)	Advantech Wireless	19W-AESMU0-001

Tabla 3.4. Equipos a instalar.

A continuación, se muestran las especificaciones técnicas de los equipos [11]. La Tabla 3.5 muestra los valores de potencia de transmisión en dependencia de la frecuencia y el tipo de modulación. La Tabla 3.6 muestra la ganancia de antena, que será la misma para transmisión y para recepción. Por último, en la Tabla 3.7 se observan los valores de sensibilidad de recepción en dependencia de la frecuencia y de la modulación. En todos los casos se destacan los parámetros para las frecuencias a analizar para transmisión en alta potencia (HP) y modulación 64-QAM, como se indica la Tabla 3.4.

Frequency Band (GHz)	QPSK / 8PSK			16QAM / 32QAM			64QAM / 128QAM / 256QAM		
	LP (dBm)	SP (dBm)	HP (dBm)	LP (dBm)	SP (dBm)	HP (dBm)	LP (dBm)	SP (dBm)	HP (dBm)
L4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L6, U6	-	-	30.0	-	-	28.0	-	-	24.0
7, 8	27.0	27.0	30.0	22.0	22.5	28.0	-	16.5	24.0
10	-	24.5	26.5	-	20.5	22.5	-	17.5	20.5
11	25.0	26.0	28.0	21.0	21.5	26.0	-	15.5	21.0
13	25.0	26.0	26.0	21.0	21.5	23.0	-	15.5	18.0
15	23.0	26.0	26.0	21.0	21.5	23.0	-	15.5	18.0
18	23.0	25.5	25.5	21.0	21.5	22.0	-	15.5	17.0
23	23.0	24.0	25.0	20.0	21.0	22.0	-	14.5	17.0
26	22.0	23.5	25.0	19.0	20.5	22.0	-	13.5	17.0
28	-	-	25.0	-	-	22.0	-	-	17.0
32	21.0	22.5	23.0	18.0	18.5	21.0	-	12.5	16.0
38	18.0	22.0	23.0	16.0	17.5	20.0	-	11.5	16.0

Tabla 3.5. Potencia de transmisión.

Antenna Type	WAAT00717/81	WAAT00708/81	WAAT00712/81	WAAT00707/81
Frequency Band (GHz)	5.925~7.125	7.125~8.500	10.00~11.70	12.75~13.25
Interface	Integrated Non-Standard Rectangular R70	C1.025"	R100/R120	R120
Gain (dBi), Low	31.6	34.0	36.9	39.0
Gain (dBi), Mid	32.5	34.8	37.6	39.2
Gain (dBi), High	33.2	35.5	38.2	39.3
3 dB BW (°)	3.6	3.0	2.1	1.8
VSWR	1.30	1.30	1.30	1.30
F/B Ratio (dB)	59	61	64	65
XPD (dB)	30	30	30	30
ETSI Standard	R1, C3	R1, C3	R1, C3	R1, C3
RPE Number	UY09059071	UY09071085	UY09100117	UY09127132

Tabla 3.6. Ganancia de antena

Rx Threshold Specifications

Frequency Band (GHz)	4-6	7-8	11	13	15
Modulation (Coding Rate):					
QPSK (3/4)	-88.6	-88.6	-89.1	-89.1	-89.1
8PSK (3/4)	-84.8	-84.8	-85.3	-85.3	-85.3
16QAM (3/4)	-83.2	-83.2	-83.7	-83.7	-83.7
32QAM (3/4)	-79.7	-79.7	-80.2	-80.2	-80.2
64QAM (5/6)	-76.6	-76.6	-77.1	-77.1	-77.1
128QAM (6/7)	-73.7	-73.7	-74.2	-74.2	-74.2
256QAM (7/8)	-70.5	-70.5	-71.0	-71.0	-71.0

Tabla 3.7. Sensibilidad del receptor.

Además de las pérdidas que se presentan en la propagación pueden existir pérdidas en la línea de transmisión y de los conectores. Aunque en nuestro caso de estudio la antena será ubicada junto al equipo transmisor. Por lo tanto se desprecian las pérdidas de la línea de transmisión.

3.5.1. Presupuesto de potencia a 13 GHz.

Un presupuesto de potencia para un radioenlace punto a punto se define como el cálculo de ganancias y pérdidas desde el radio transmisor o fuente de la señal, que emite la onda electromagnética, hacia el receptor.

Las pérdidas a incluir en el sistema son las explicadas anteriormente, es decir:

- L_{bf} (Pérdidas del espacio libre): según la ecuación (3) tienen un valor de:

$$L_{bf} = 142.43 \text{ dB}$$

- L_{abs} (Pérdidas por absorción): según la Figura 3.6 serían 0.02 dB/km por lo que para 24.4 km son:

$$L_{abs} = 0.488 \text{ dB}$$

- L_{lluvia} (Atenuación por lluvia): para 13 GHz los valores de $a_v = 1.0901$ y $k_v = 0.03266$ según la Tabla 3.2; y como la atenuación específica es $\gamma = k * R^a$ (ecuación 6) por lo tanto, se puede obtener el valor de la atenuación introducida por la lluvia. En la Tabla 3.8 se muestran algunos valores obtenidos para

distintos valores de intensidad de precipitación: 25 (valor promedio mensual en verano), 50 (a partir del cual se considera lluvia fuerte) y 83.66 (mayor valor alcanzado en julio-2017).

R (mm/h)	γ (dB/km)	Atenuación total (dB)
25	1.09	26.6
50	2.32	56.6
83.66	4.07	99.3

Tabla 3.8. Atenuación por lluvia calculada para diferentes valores de R (mm/h) a 13 GHz.

- F_m (Margen de desvanecimiento): según la ecuación 5 tiene un valor de:

$$F_m = 1.55 \text{ dB}$$

- Ganancias de las antenas.

Las antenas que se emplearán para este enlace punto a punto será la antena de alto rendimiento Advantech de 0.9 m de diámetro. Tiene una ganancia para 13 GHz de 39.3 dBi como se indica en la Tabla 3.6.

- Ganancia del sistema.

La ganancia del sistema es la diferencia entre la potencia nominal a la salida del transmisor y la mínima requerida por el receptor para determinado objetivo de calidad.

$$G_{sist} = P_{tx} - P_{Rmín} \quad (7)$$

La potencia de transmisión según la Tabla 3.5 es de 18 dBm. La sensibilidad del receptor es de -77.1 dBm según la Tabla 3.7 (frecuencia de 13 GHz y modulación 64-QAM). Sustituyendo en la ecuación 7 se obtiene la ganancia del sistema:

$$G_{sist} = 18 - (-77.1) = \mathbf{95.1 \text{ dB}}$$

La ganancia del sistema debe ser mayor o igual a la suma de todas las ganancias y pérdidas de la señal en su propagación [8].

$$G_{sist} = 95.1 \text{ dB} \geq \text{Pérdidas} - \text{Ganancias}$$

Por lo tanto, sustituyendo los datos en la ecuación 8 obtenemos la ganancia total que debería tener nuestro sistema. Como tenemos varios valores de intensidad de lluvia se hará la comparación para los tres datos y además para el caso sin presencia de lluvia:

$$G_{sist} = L_{bf} + L_{abs} + L_{lluvia} + Fm - G_{tx} - G_{rx} \quad (8)$$

$$G_{sist} = 142.43 + 0.488 + L_{lluvia} + 1.55 - 39.3 - 39.2 = L_{lluvia} + 65.7 \text{ dB} \leq 95.1 \text{ dB}$$

R (mm/h)	L_{lluvia} (dB)	Ganancia del sistema (dB)	Margen (dB)
0	0	65.7 ✓	+ 29.4
25	26.6	92.34 ✓	+ 2.76
50	56.6	122.3 ✗	- 27.2
83.66	99.3	165 ✗	- 69.9

Tabla 3.9. Ganancia del sistema para diferentes valores de R (mm/h) a 13 GHz.

El resultado del análisis teórico fue desfavorable para el caso de 13 GHz ya que la ganancia del sistema de 95.1 dB que brinda el equipo, es menor que la requerida para los casos de lluvia con intensidad de 50 y 83.66 mm/h. Se realizará el análisis con el software Radio Mobile para corroborar este análisis teórico.

3.5.2. Simulación en Radio Mobile para 13 GHz.

Se introdujeron en el software los mismos datos con los que se hizo el análisis teórico y se procedió a realizar la simulación del radioenlace en la herramienta de Radio-Link.

En la Figura 3.8 se observa que existe Línea de Vista entre ambos puntos y que está despejada la Primera Zona de Fresnel. Se logra sobrepasar el umbral de sensibilidad del receptor (-77.1 dBm) con un margen de 30.4 dB para un nivel recibido de -47.7 dBm. En el análisis teórico el margen obtenido para el caso sin

presencia de lluvia fue de 29.4 dB según la Tabla 3.9. Por lo que se corroboraron los resultados obtenidos en el análisis teórico.

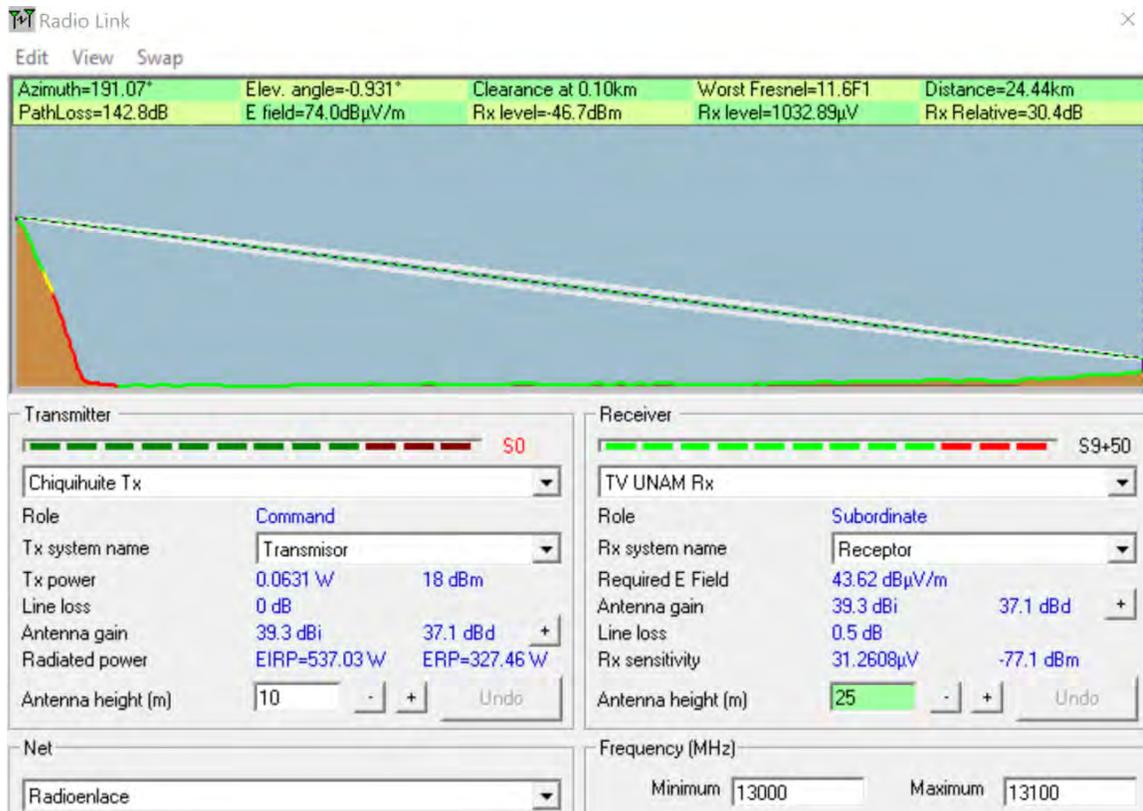


Figura 3.8. Resultado del radioenlace a 13 GHz.

3.5.3. Presupuesto de potencia a 7 GHz.

Se volvieron a realizar los cálculos anteriores, pero para 7 GHz; las pérdidas para este caso son:

- L_{bf} (Pérdidas del espacio libre) según la ecuación (3) tienen un valor de:

$$L_{bf} = 137.53 \text{ dB}$$

- L_{abs} (Pérdidas por absorción) según la figura 3.6 serían 0.01 dB/km por lo que para 24.4 Km.

$$L_{abs} = 0.244 \text{ dB}$$

- L_{lluvia} (Atenuación por lluvia): para 7 GHz los valores de $a_v = 1.4745$ y $k_v = 0.001425$, según la Tabla 3.2. Con la atenuación específica (γ) calculada de la ecuación 6 se puede obtener el valor de la atenuación introducida por la lluvia. En la Tabla 3.10 se muestran los valores obtenidos para las mismas intensidades de precipitación que en el caso de 13 GHz.

R (mm/h)	γ (dB/km)	Atenuación total (dB)
25	0.16	3.9
50	0.46	11
83.66	0.95	22.9

Tabla 3.10. Atenuación por lluvia calculada para diferentes valores de R (mm/h) a 7 GHz.

- F_m (Margen de desvanecimiento) según la ecuación 5 del epígrafe 3.4.4 tienen un valor de:

$$F_m \approx 0 \text{ dB}$$

- Ganancias de las antenas.

La ganancia para frecuencias de 7 GHz según la Tabla 3.6 es de 35.5 dBi.

- Ganancia del sistema.

Para el caso de 7 GHz, la potencia de transmisión es de 24 dBm según la Tabla 3.5. La sensibilidad es de -76.6 dBm según la Tabla 3.7. Sustituyendo en la ecuación 7 de ganancia del sistema, se obtiene:

$$G_{sist} = 24 - (-76.6) = \mathbf{100.6 \text{ dB}}$$

Como se mencionó, la ganancia del sistema debe ser mayor o igual a la suma de todas las ganancias y pérdidas de la señal en su propagación.

$$G_{sist} = 100.6 \text{ dB} \geq \text{Pérdidas} - \text{Ganancias}$$

Por lo tanto, sustituyendo los datos en la ecuación 8 se obtiene la ganancia total que debería tener el sistema de análisis.

$$G_{\text{sist}} = 137.5 + 0.244 + L_{\text{lluvia}} - 35.5 - 35.5 = L_{\text{lluvia}} + 67.64 \text{ dB} \leq 100.6 \text{ dB}$$

Se observa en la Tabla 3.11 que el resultado del análisis teórico fue favorable para el caso de 7 GHz. En todos los casos de lluvia evaluados se obtienen ganancias del sistema requerida por debajo de los 100.6 dB que brinda el equipo.

R (mm/h)	L_{lluvia} (dB)	Ganancia del sistema (dB)	Margen (dB)
0	0	67.64 ✓	+ 32.96
25	3.9	71.54 ✓	+ 29.06
50	11	78.54 ✓	+ 22.06
83.66	22.9	90.44 ✓	+ 10.16

Tabla 3.11. Ganancia del sistema para diferentes valores de R (mm/h) a 7 GHz.

Se realizará el análisis con el software Radio Mobile para corroborar este análisis teórico al igual que se hizo para el caso de 13 GHz.

3.5.4. Simulación en Radio Mobile para 7 GHz.

Al igual que para el estudio de 13 GHz, se introdujeron en el software los mismos datos con los que se hizo el análisis teórico y se procedió a realizar la simulación del radioenlace en la herramienta de Radio-Link. Se observa en la Figura 3.9 que existe Línea de Vista y que está despejada la Primera Zona de Fresnel.

El nivel recibido (-43.3 dBm) es mayor que la Sensibilidad del receptor (-76.6 dBm) con un margen de 33.3 dB. Igual que para el caso de 13 GHz quedó comprobado el análisis teórico, ya que el margen sin presencia de lluvia es de 32.96 dB según la Tabla 3.11.

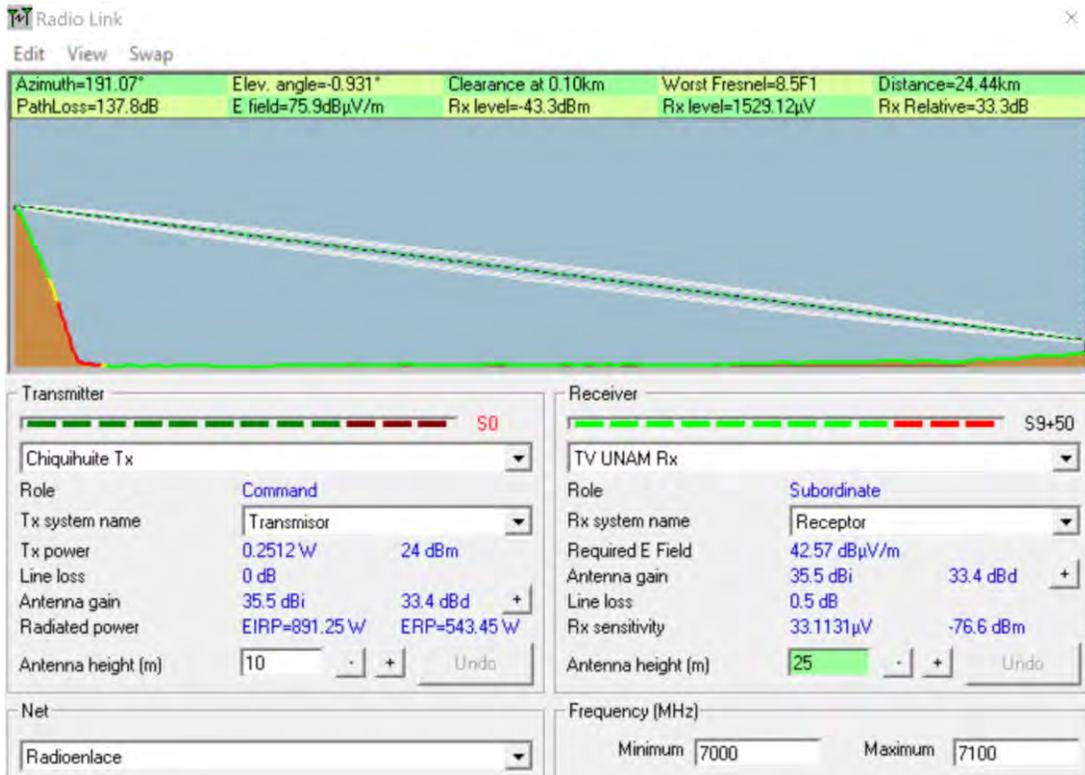


Figura 3.9. Resultado del radioenlace a 7 GHz.

Conclusiones del capítulo

Se comprobó mediante cálculos teóricos la atenuación que sufren los radioenlaces de largas distancias a altas frecuencias. Se pudo apreciar que el factor que más afectó al radioenlace a 13 GHz en comparación con el de 7 GHz fue la atenuación por lluvia. Por lo que fue necesario evaluar varios escenarios de intensidad de lluvia.

En resumen, se utilizaron los siguientes datos de la Tabla 3.14 para el análisis de viabilidad y serían los parámetros de transmisión y recepción del enlace de microondas para la SFN del proyecto REFUTV.

Distancia (km)	24.4	
Frecuencia (GHz)	7	13
Potencia de transmisión (dBm)	24	18
Ganancia de transmisión (dBi)	35.5	39.3
Ganancia de recepción (dBi)	35.5	39.3
Sensibilidad del receptor (dBm)	-76.6	-77.1

Tabla 3.12. Parámetros de transmisión y recepción del enlace de microondas.

Se concluye que el enlace a 7 GHz es viable incluso con lluvia, y que el enlace de 13 GHz es viable sin lluvia, pero puede perderse el enlace en caso de lluvia fuerte.

Bibliografía

1. Diario Oficial de la Federación. “*NORMA Oficial Mexicana NOM-088/2-SCT1-2002, Telecomunicaciones-Radiocomunicación-Equipos de microondas para sistemas del servicio fijo multicanal punto a punto y punto a multipunto-Parte II : Transporte*”. 21 de abril, 2003.
2. Diario Oficial de la Federación. “*ACUERDO mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones modifica el diverso por el que se atribuyen frecuencias del espectro radioeléctrico para prestar servicios auxiliares a la radiodifusión, y se establece el procedimiento para autorizar el uso de las mismas*”. 19 de noviembre, 2015.
3. Recomendación UIT-R p.834-4. “*Efectos de la refracción troposférica sobre la propagación de las ondas radioeléctricas*”. 2003.
4. Recomendación UIT-R P.525-2. “*Cálculo de la atenuación en el espacio libre*”. Agosto, 1994.
5. Recomendación UIT-R P. 676-10. “*Total, dry air and water-vapour zenith attenuation from sea level*”. Figura 6. Pag. 20. Septiembre, 2013.
6. UIT-R P.838-3 Recomendación UIT-R P.838-3. “*Modelo de atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción*”. Junio, 2014.
7. Recomendación UIT-R P. 837-6. “*Índice de pluviosidad (mm/h) sobrepasado durante el 0.01% del año medio*”. Figura 2. Pag. 7. Febrero, 2012.
8. Servicio Meteorológico Nacional. “*Reporte de lluvias registradas*”. Disponible en <http://smn.cna.gob.mx/es/pronosticos/pronosticossubmenu/informe-meteorologico-especial-de-lluvias>. Fecha de consulta: 22 de febrero de 2018.
9. Observatorio de la UNAM. “*Intensidad de precipitación*”. Disponible en: <https://www.oh-iiunam.mx/iiunam2.html>. Fecha de consulta: 22 de febrero de 2018.
10. WAYNE, Tomasi. “*Sistemas de comunicaciones electrónicas*”. Cuarta edición, Editorial Prentice Hall, 2003.
11. <http://www.advantechwireless.com/wp-content/uploads/2014/09/PB-T800-1W0-LEZ007-001-15243.pdf>

Capítulo 4. Estimación de cobertura y definición de parámetros de transmisores.

En este capítulo se realiza la estimación de cobertura de los dos transmisores que componen la red SFN. Se pretende evaluar varios escenarios con el objetivo de definir los parámetros de la red de transmisión. Quedará definida la orientación de la antena del transmisor secundario y la potencia de transmisión del mismo. En el análisis de la cobertura no solo se tendrá en cuenta los niveles de intensidad de campo sino también los retardos relativos de las señales que llegan de ambos transmisores.

4.1. Software de estimación de campo.

El software empleado en las estimaciones de cobertura fue el SPLAT Versión 1.2.0. Es una aplicación manejada por línea de comandos en el sistema operativo Ubuntu y lee los datos de entrada a través de un número de ficheros de datos. Algunos archivos son obligatorios para la apropiada ejecución del programa, mientras que otros son opcionales. Los archivos obligatorios incluyen los modelos topográficos en la forma de archivos de datos de SPLAT (archivos SDF), archivos de localización del sitio (archivos QTH), y archivos de parámetros para el modelo Longley-Rice (archivos LRP). También produce archivos Keyhole Markup Language (kml) para interoperabilidad con Google Earth [1]. Este software utiliza el modelo de predicción Longley-Rice, que es el modelo definido por el IFT en México para la predicción de área de servicio digital para ATSC [2]. Es un modelo matemático que permite realizar cálculos de propagación para enlaces punto a punto y punto a zona, que son los modos de operación del programa. Está diseñado para ser utilizado en análisis de largas distancias en el que el transmisor y receptor se encuentran alejados desde 1 a 2000 km. La frecuencia de trabajo es entre 20 MHz y 20 GHz. En la Tabla 4.1 se indican los datos típicos a emplear en la mayor parte del territorio mexicano para el método Longley-Rice [2].

PARÁMETRO	VALOR	SIGNIFICADO/COMENTARIO
EPS	15.0	Permeabilidad relativa del terreno
SGM	0.005	Conductividad del terreno, Siemens por metro
ENO	301.0	Refractividad de la superficie en unidades-N(partes por millón)
KLIM	5	Código de clima 5 (continental templado)
HG(1)	Valor	Altura del centro de radiación por encima del nivel del terreno
HG(2)	10 m	Altura de la Antena receptora de Tv por encima del nivel del terreno

Tabla 4.1. Valores de los parámetros empleados en el método Longley-Rice [2].

Para determinar si un servicio de televisión se encuentra presente, la Disposición Técnica Mexicana fija la variabilidad de los lugares en 50% y la variabilidad del tiempo en 90%. El porcentaje de confianza se fija en 50%, indicando interés en situaciones promedio [2].

4.2. Simulación de cobertura.

La instalación de los dos transmisores estará a cargo del radiodifusor SPR. El cual cuenta con su transmisor principal en el Cerro del Chiquihuite y el transmisor secundario será ubicado en las instalaciones de TV UNAM. La frecuencia con que opera SPR es la de 569 MHz, teniendo como canal físico el número 30, por lo que las estimaciones de cobertura se realizaron a dicha frecuencia. La predicción fue realizada basada en los datos presentados en la Tabla 4.2.

Datos	Tx. Cerro del Chiquihuite	Tx. TVUNAM
Potencia nominal de transmisión	8 kW	Variable de 100 a 700 W
Ganancia de la antena transmisora	15.8 dBi	13.6 dBi
Potencia Radiada Aparente (PRA)	100 kW	Variable de 1 a 7 kW
Altura de la antena transmisora	120 m	25 m
Pérdidas de la línea	2.5 dB	1.5 dB
Latitud	19° 31' 59.13" N	19° 19' 1.98" N
Longitud	99°07' 50.58" W	99°10' 31.66" W

Tabla 4.2. Parámetros de trabajo de ambos transmisores.

Luego de realizar la simulación de cobertura con antenas omnidireccionales en el software SPLAT se procedió a introducirles los patrones de radiación con ayuda del software Matlab, ya que el SPLAT no permite trabajar con antenas de transmisión direccionales.

El patrón de radiación de las antenas de ambos sitios se muestra en la Figura 4.1, mientras que sus ganancias son las mostradas en la Tabla 4.2.

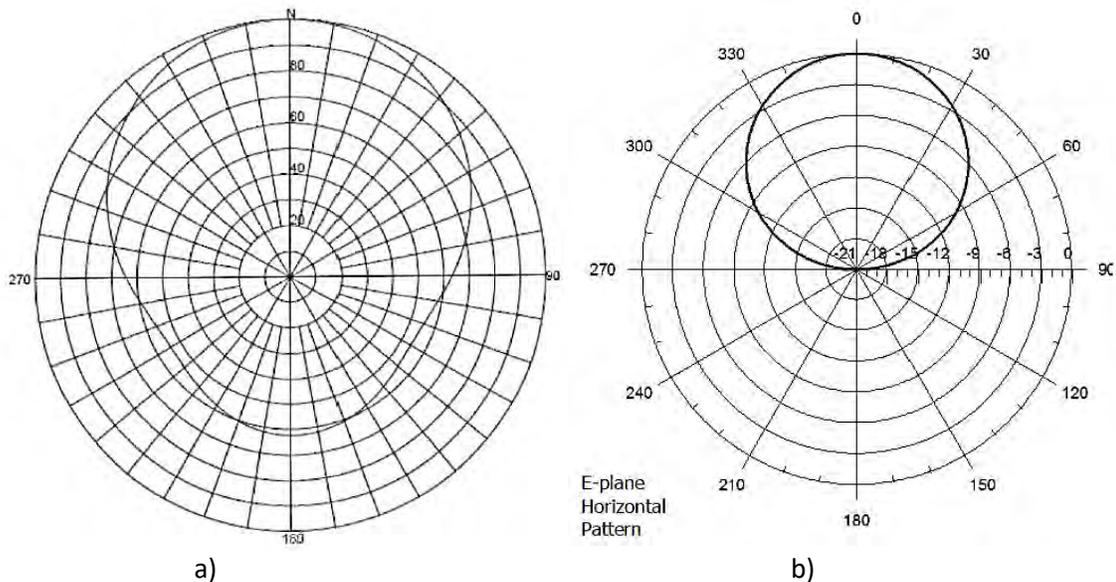


Figura 4.1. Patrón de radiación de las antenas de transmisión a) Chiquihuite b) TV UNAM.

Las condiciones de recepción del SPLAT son: una antena omnidireccional con ganancia de 0 dBi localizada a una altura de 10 metros sobre el nivel del terreno.

4.2.1. Estimación de cobertura del transmisor principal.

El transmisor principal actualmente está operando por SPR, por lo cual, por prudencia, no se le puede modificar sus parámetros de operación (antena o potencia de transmisión), ya que podría afectar a la audiencia de dicho radiodifusor. En la Figura 4.2 se muestra la estimación de intensidad de campo recibido para el transmisor principal (PRA de 100 kW) con antena dirigida hacia el sur apuntando a la ciudad con un azimut de 180°. Según el IFT [2], la intensidad mínima de la señal

para que se considere Área de Servicio son 48 dB μ V/m. Sin embargo, por la experiencia de radiodifusores, se considera que este nivel es insuficiente para una correcta recepción, siendo lo más habitual utilizar valores de hasta 60 dB μ V/m para una buena recepción en exteriores. En el caso común de que las antenas receptoras se encuentran en el interior de la vivienda, el umbral para recepción se sitúa aproximadamente en los 70 dB μ V/m.

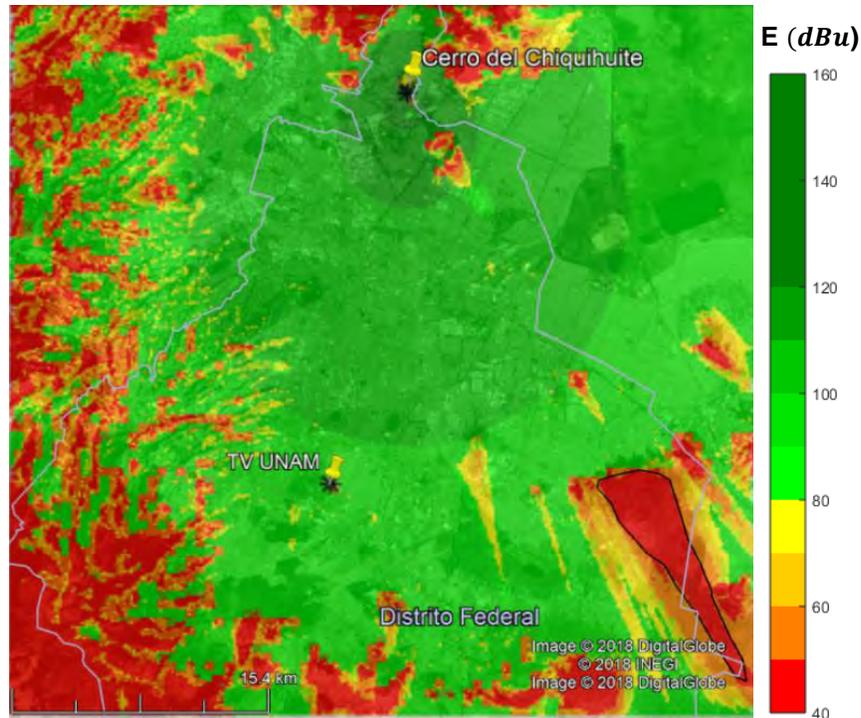


Figura 4.2. Intensidad de campo eléctrico producido por el transmisor principal.

Se observan algunas zonas donde el nivel de campo recibido no llega a los 50 ó 60 dBu. Principalmente, al sureste de la ciudad hay una zona importante con bajo nivel de campo que se resalta con una línea negra en el mapa.

4.2.2. Estimación de cobertura del transmisor secundario.

Para definir los parámetros de transmisión del transmisor secundario ubicado en TV UNAM se trabajará con tres escenarios. El primero de los escenarios sería con la antena transmisora apuntando a la ciudad con un azimut de 0° y una potencia de transmisión baja (100 W) para afectar lo mínimo posible a la audiencia. El segundo

escenario intentaría cubrir la zona de sombra del transmisor principal, por lo que habría que girar la antena hacia dicha zona. Por último, el tercer escenario sería con el mismo objetivo del segundo apuntando hacia la zona de sombra del transmisor principal, pero con mayor potencia de transmisión (700 W). A continuación, se presentan las estimaciones de cobertura de los tres escenarios.

4.2.2.1. Escenario I: baja potencia apuntando a la ciudad.

Para el primer escenario, la potencia de transmisión del transmisor secundario se definió de 100 W y la antena transmisora apuntando hacia la ciudad con un azimut de 0° . A continuación, se muestra en la Figura 4.3 el resultado obtenido.

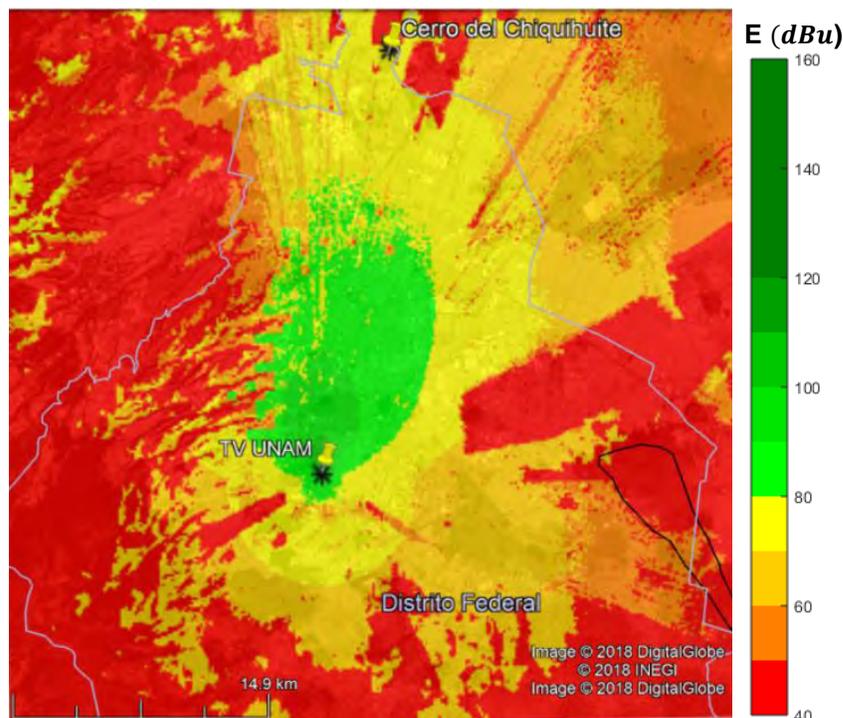


Figura 4.3. Intensidad de campo eléctrico producido por el transmisor secundario con azimut de 0° y potencia de transmisión de 100 W.

El transmisor secundario con azimut de 0° no logra servir el área del sureste de la ciudad a la que el transmisor de Chiquihuite no llega. Por lo tanto, se procede a

cambiar la dirección de la antena de transmisión de TV UNAM hacia esta zona del sureste de la ciudad.

4.2.2.2. Escenario II: baja potencia apuntando a la zona de sombra.

Para el segundo escenario se giró la antena transmisora hacia la zona donde el transmisor principal no llega. En la Figura 4.4, se muestra el azimut con el que se direccionaría la antena de transmisión de TV UNAM.

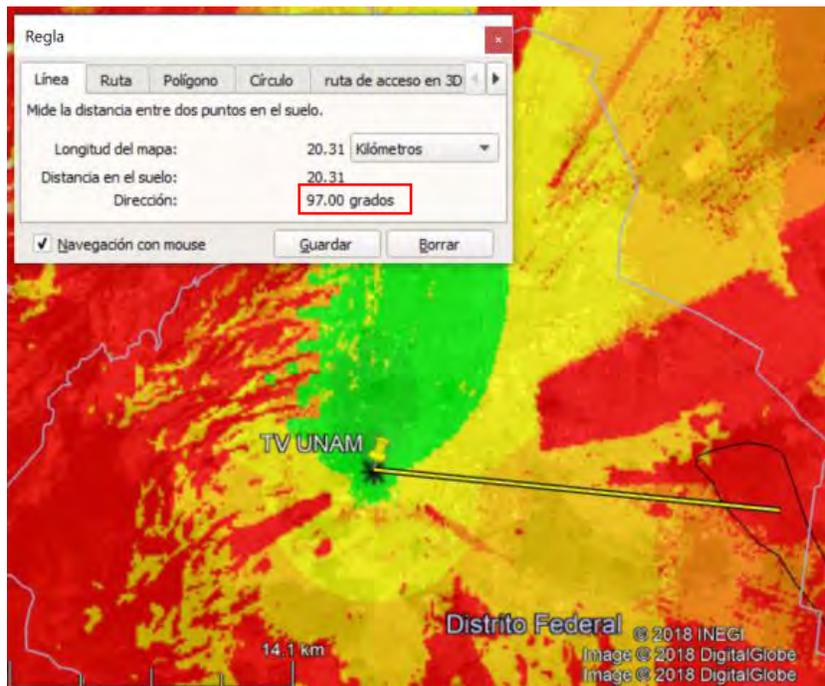


Figura 4.4. Azimut modificado de la antena transmisora de TV UNAM.

La antena debe ser girada 97° de azimut. Se muestra en la Figura 4.5 la cobertura que brinda este transmisor al direccionar su antena transmisora a la zona de sombra.

Se observa que el transmisor de TV UNAM con 97° de azimut y 100 W de potencia de transmisión logra niveles de campo en la zona de sombra por encima de 60 dBu; pero no en la totalidad de esta. Se considera que con estos parámetros

se cumple en la mayoría de la zona los 48 dBu que define el IFT para que se considere área servida [2].

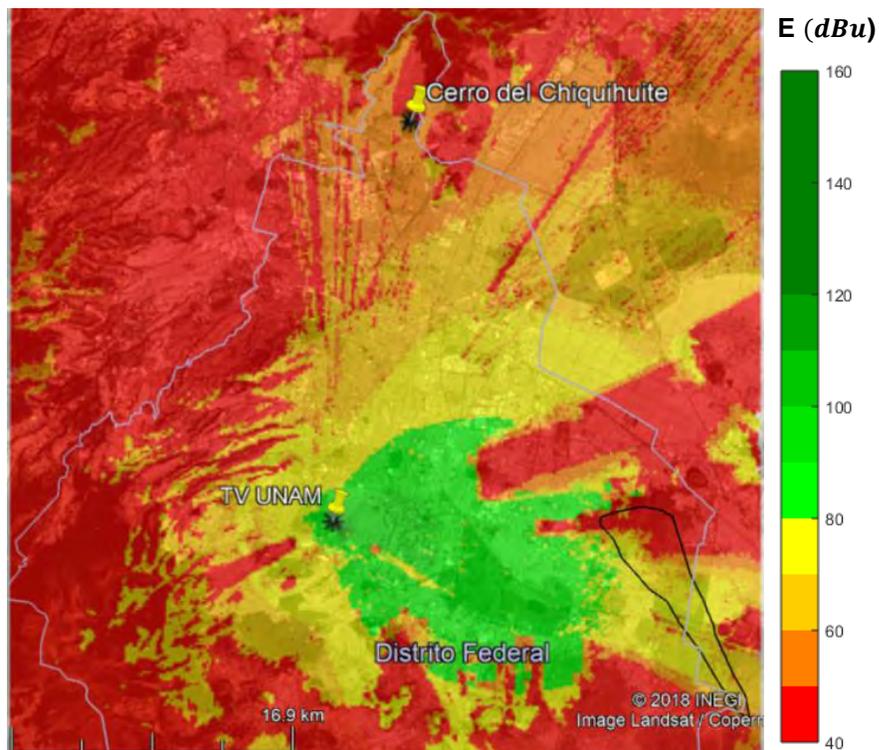


Figura 4.5. Intensidad de campo eléctrico producido por el transmisor secundario con azimut de 97° y potencia de transmisión de 100 W.

4.2.2.3. Escenario III: Alta potencia apuntando a la zona de sombra.

Se considera simular otro escenario en el cual el transmisor secundario mantuviera el azimut de 97° , pero aumentando su potencia de transmisión a 700 W. Con este tercer escenario se intenta obtener mejores niveles de campo en la zona de sombra del transmisor principal; considerando que la mayoría de los usuarios tienen sus antenas en interiores y para esto se requiere un nivel de campo mucho mayor que el establecido por el IFT. El resultado de esta estimación se observa en la Figura 4.6.

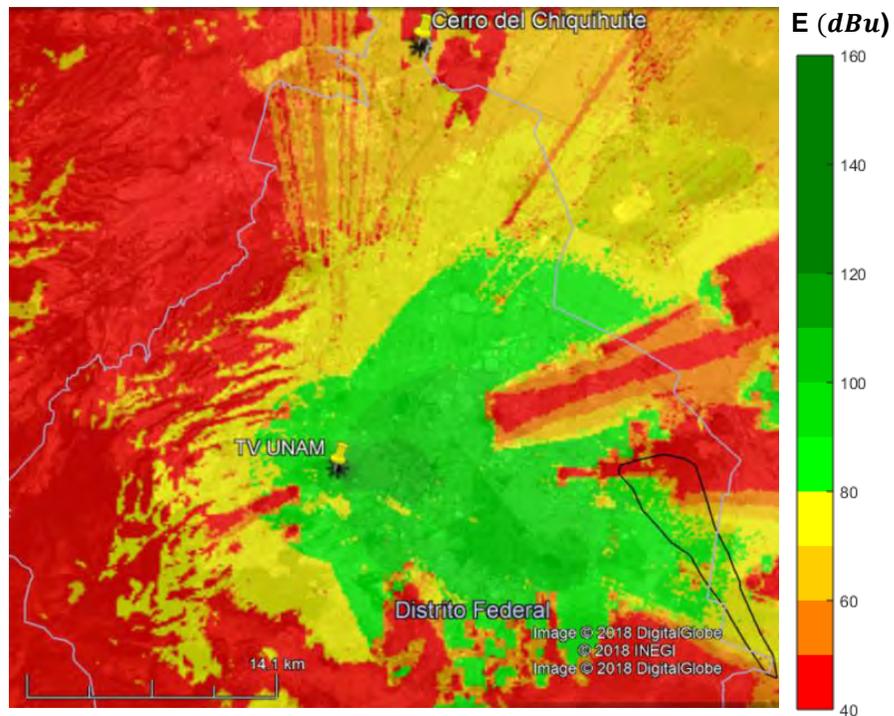


Figura 4.6. Intensidad de campo eléctrico producido por el transmisor secundario con azimut de 97° y potencia de trasmisión de 700 W.

Se reciben niveles de campo de hasta 100 dBu en algunas zonas. Solo queda por cubrir el norte de esta zona de análisis que se resalta con líneas blancas en la Figura 4.7. Se procedió al análisis con la herramienta Google Earth para examinar qué hay ubicado en esta zona que provoca tanta sombra.



Figura 4.7. Zona de sombra en Tláhuac.

Se verificó que la zona de sombra es debido a cerros y volcanes que están ubicados al Este de la Delegación Tláhuac. Además, se comprobó que en esta zona (destacada con línea blanca en la Figura 4.7) no existe población a la que este problema pueda afectar.

En la Tabla 4.3 se muestra un resumen de los parámetros de los tres escenarios que se simularon anteriormente. El transmisor principal en Chiquihuite (Tx1) no cambia sus parámetros como ya fue explicado. La variación será en el transmisor secundario en TV UNAM (Tx2).

Parámetros	Tx1	Tx2 (Escenario I)	Tx2 (Escenario II)	Tx2 (Escenario III)
Potencia nominal de transmisión	8 kW	100 W	100 W	700 W
PRA	100 kW	1 kW	1 kW	7 kW
Azimut	180°	0°	97°	97°

Tabla 4.3. Resumen de escenarios para la SFN.

Una vez definidos los escenarios para la SFN en términos de potencia, es necesario realizar las estimaciones de los retardos; para evaluar si se pierde zonas de cobertura debido a esto. Además, determinar si se le va a agregar offset al transmisor secundario para eliminar o minimizar el problema. En el siguiente epígrafe se explicarán estos términos.

4.3. Estimaciones de retardos.

Con el fin de definir los sitios de medición se van a tener en cuenta varios aspectos. Uno de ellos es el retardo relativo entre la señal principal (la que llegue con mayor potencia) respecto a la señal eco (la que llegue con menor potencia). El retardo relativo en el punto de medida es la diferencia del tiempo de propagación entre las dos señales desde cada transmisor al receptor.

4.3.1. Líneas de retardo.

Los transmisores están espaciados 24.4 km; por lo tanto, el retardo máximo ideal que se puede presentar entre ellos es de 81 μ s.

Existen zonas en las que la señal proveniente de un transmisor con respecto de la del otro se comporta como pre-eco (la señal de menor intensidad precede a la de mayor intensidad) y otras como post-eco (la señal de menor intensidad es posterior a la de mayor intensidad) [3]. Ya que el transmisor principal tiene una potencia de transmisión muy superior al secundario, la potencia recibida desde el transmisor principal será mayor que la recibida desde el secundario incluso en puntos muy próximos al transmisor secundario (TV UNAM), por lo que, si esos puntos están más cercanos al transmisor secundario, sería zona de pre-eco. La potencia recibida del principal va disminuyendo con la distancia hasta que llega a una zona en que se iguala a la del transmisor secundario; y a partir de dicho punto ($\Delta P=0$), comienza a recibirse con mayor intensidad la señal proveniente del transmisor de TV UNAM. En la Figura 4.8 se muestran las diferencias de retardos en toda el área de cobertura para el caso en que los transmisores no tengan offset (las dos señales se emiten en el mismo instante).

Los grandes retardos al norte de la ciudad no son preocupantes, ya que en esa zona la señal recibida del transmisor del Chiquihuite es muy superior a la de TV UNAM. La zona de mayor problemática estaría próxima al transmisor de TV UNAM, donde llegan ecos muy espaciados en tiempo (40, 60 y 80 μ s) y se reciben similares niveles de señal de ambos transmisores. Este problema estaría presente para cualquiera de los tres escenarios presentados anteriormente, debido a que la diferencia de potencia entre ambos transmisores es siempre grande.

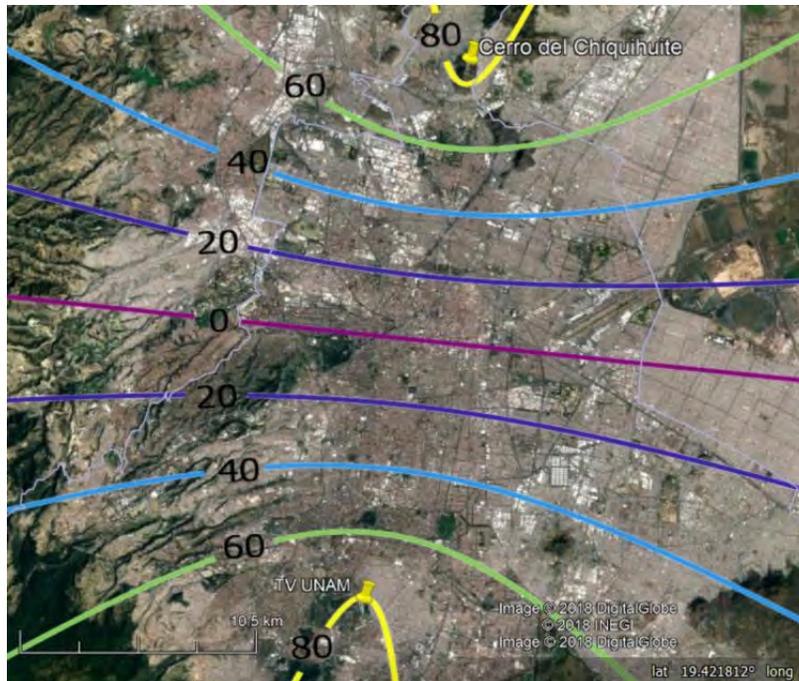


Figura 4.8. Diferencia de retardos (μs) en el receptor sin offset en los transmisores.

Según la Práctica Recomendada A/74 [3] los receptores tienen problemas para demodular señales con pre-ecos mayores a $20 \mu\text{s}$ y post-ecos a partir de $40 \mu\text{s}$. En la Figura 4.9 se muestra la máscara de recepción presentada en dicha Recomendación [3]. En el eje de las ordenadas se ubica la relación D/E (dB), que describe la diferencia de nivel de señal recibido entre la señal que llega de mayor potencia llamada señal directa (D) y otra señal que llega con menor potencia llamada eco (E). El eje de las abscisas corresponde al retardo relativo entre ambas señales (la Directa y el Eco). A la izquierda del retardo '0' se ubican los pre-ecos con valores negativos y a la derecha los post-ecos con valores positivos. El pre-eco es cuando la señal Eco antecede a la señal Directa y post-eco cuando ocurre lo contrario, el Eco es posterior a la señal Directa.

Por lo tanto, según esta máscara de referencia, los receptores que cumplan con las relaciones de D/E y retardos relativos por debajo de la curva podrán demodular la señal sin problema y los que estén por encima de la curva no podrán demodular

la señal recibida. Se observa que a partir de los 5 μ s de pre-eco ya no pueden recibir señales del mismo nivel.

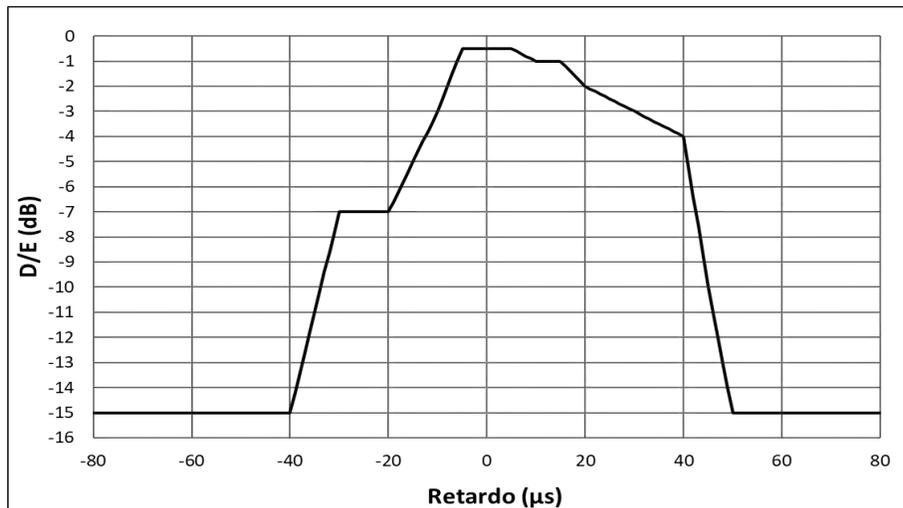


Figura 4.9. Valores mínimos de una señal con eco estático que debe ser capaz de demodular un receptor ATSC según la Práctica Recomendada A/74 de ATSC [3].

Para minimizar el problema de recibir niveles de señal muy semejantes de ambos transmisores en zonas donde hay retardos grandes, es necesario cambiar las líneas de retardo (para evitar situaciones de pre-eco, que, como se observa en la Figura 4.9, son más dañinas). Es conveniente que en las cercanías del transmisor secundario la diferencia de retardo no sea mayor a 5 μ s. Lo anterior se logra adicionado un offset a algún transmisor de la SFN, en este caso al secundario situado en TV UNAM.

4.3.2. Resultados del retardo adicionado al transmisor secundario.

Como se mencionó anteriormente, 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. Por lo tanto, para que en el área próxima a TV UNAM no haya retardos que superen los 5 μ s, el offset a adicionar al transmisor secundario debe ser de 76 μ s.

A continuación, en la Figura 4.10 se muestra la estimación de retardos luego de adicionarle un offset de $76 \mu\text{s}$ al transmisor secundario.

Se obtuvo el resultado que se esperaba al adicionar el offset al transmisor secundario. Fueron eliminados los grandes retardos en las zonas próximas al transmisor de TV UNAM, donde se reciben ecos muy fuertes respecto a la señal principal.

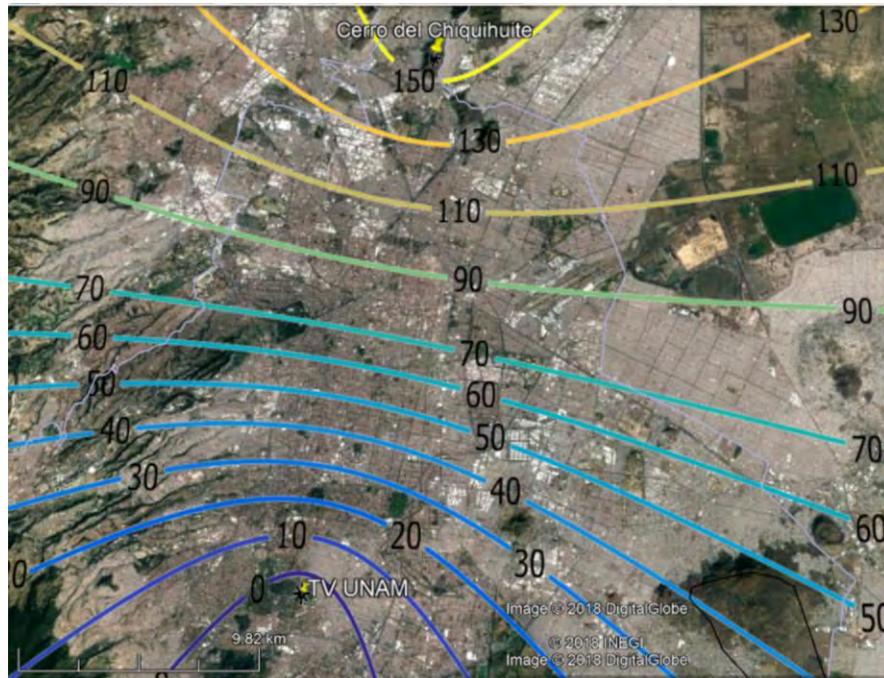


Figura 4.10. Estimación de retardos con offset de $76 \mu\text{s}$ en el transmisor secundario.

4.4. Obtención de mapas de nivel de Intensidad de campo y retardos.

Como ya se ha mencionado, en el receptor influyen tanto las diferencias de nivel de señal recibido entre señal principal deseada y ecos (D/E), como el espaciamiento en tiempo que haya entre ambas señales. Se muestran en las siguientes Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 los mapas de diferencia de nivel de campo recibido (ΔE_{RX}) de los Escenarios 1, 2 y 3 respectivamente. La escala mostrada es la diferencia de Intensidad de campo recibida del transmisor principal menos la del secundario (dB).

Se indicó en color rojo y marrón los peores casos cuando la diferencia de señal es menor a 15 dB (rojo si la señal más fuerte es la procedente del Chiquihuite, marrón si la señal más fuerte es de TV UNAM). Además se indican menores problemas en las zonas amarillas y naranjas zonas donde la D/E es de 15 a 20 dB (amarillo si la señal más fuerte es la procedente del Chiquihuite, naranja si la señal más fuerte es de TV UNAM). Ya para los casos que la D/E sea mayor a 20 dB el receptor no va a tener problemas para demodular la señal aunque el eco esté muy espaciado en tiempo. Se indican también las líneas de retardo ya con el offset adicionado para poder relacionar las diferencias de amplitud de la señales con las diferencias de retardos.

Se observa en la Figura 4.11 que para el caso del primer escenario, a pesar del offset adicionado al transmisor secundario para eliminar los retardos de 60 y 80 μ s en las zonas cercanas a este transmisor, aún quedan algunas zonas en color rojo (D/E < 15 dB) que presentan retardos de hasta 50 μ s.

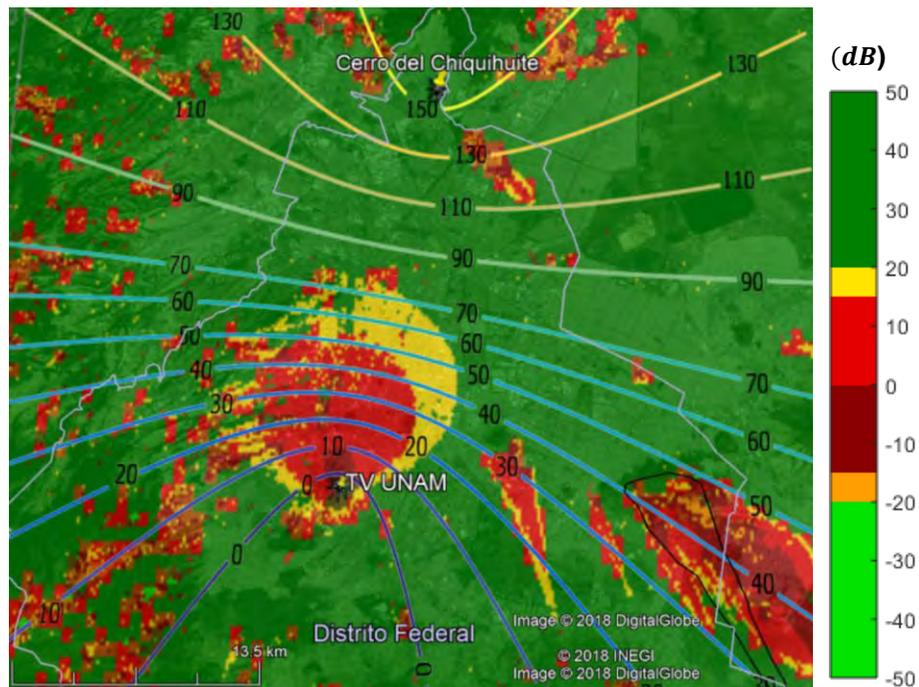


Figura 4.11. Diferencia de campo recibido (dB) y estimación de retardos (μ s), Escenario I.

Se realizó el mismo procedimiento para el segundo escenario. Se observa en la Figura 4.12 que el Escenario II, con azimut de 97° , es mejor que el Escenario I. Ya no existen zonas con relación de amplitud menor a 15 dB (zonas de color rojo y marrón) que presenten retardos relativos de $50 \mu\text{s}$ como en el escenario anterior.

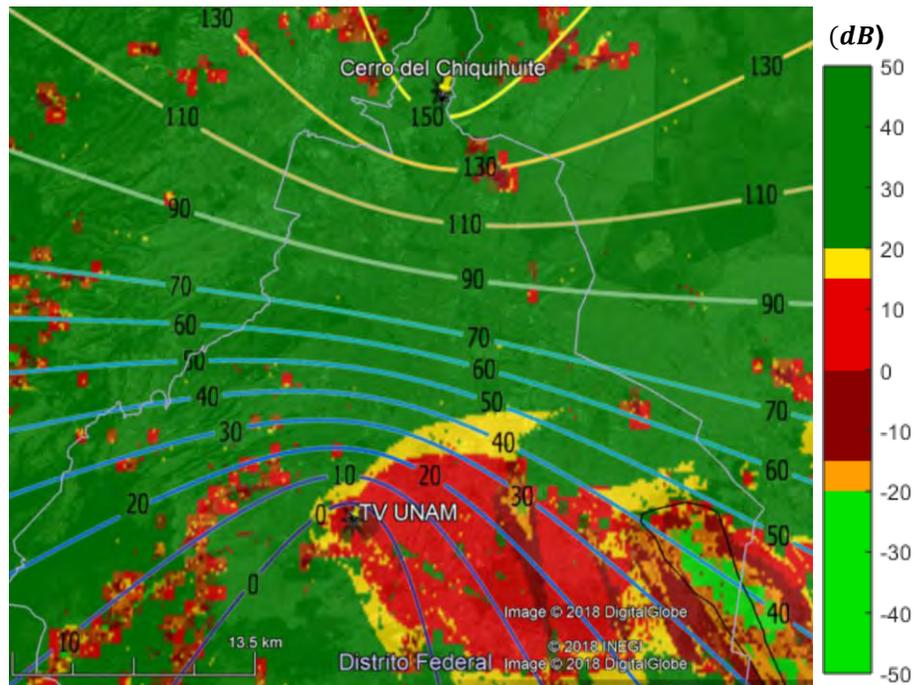


Figura 4.12. Diferencia de campo recibido (dB) y estimación de retardos (μs), Escenario II.

Se realizó el mismo análisis para el Escenario III con el objetivo de analizar cómo influía el aumento de potencia respecto al Escenario II. Se observa en la Figura 4.13 que existen zonas con $D/E < 15 \text{ dB}$ y con retardos relativos hasta de $60 \mu\text{s}$. Esto ocurre debido a que en este escenario la potencia de transmisión de TV UNAM es aumentada a 700 W y aumentan las zonas donde se recibe del transmisor secundario señal muy similar a la del principal. Se considera que el Escenario III es peor que el Escenario II. A pesar de que mejora el nivel de señal en la zona de sombra del transmisor principal, se crean zonas con retardos relativos muy grandes (hasta $60 \mu\text{s}$) y relaciones $D/E < 15 \text{ dB}$.

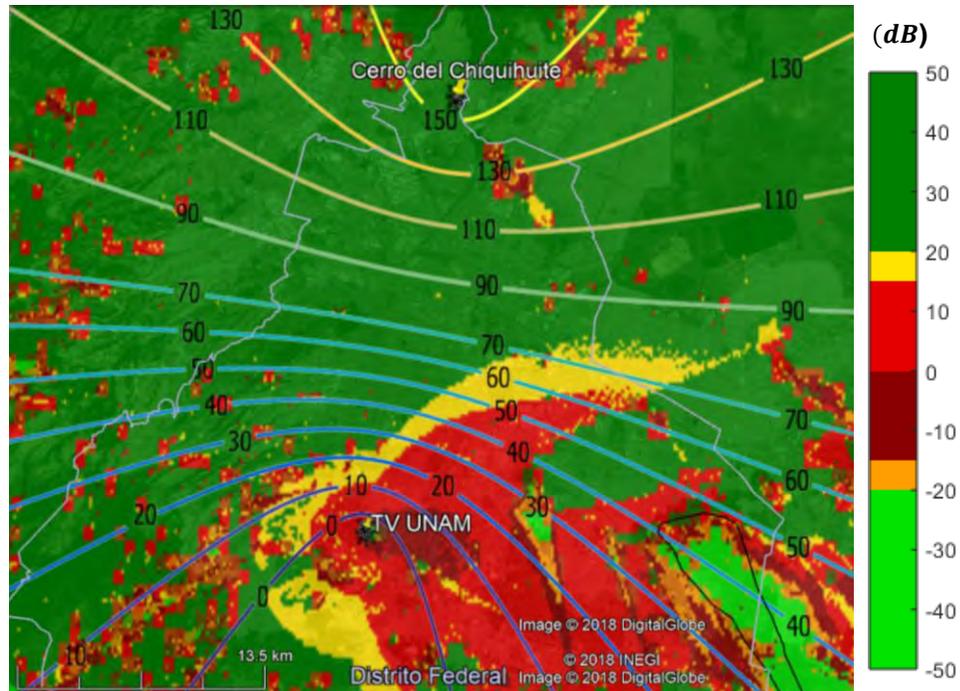


Figura 4.13. Diferencia de campo recibido (dB) y estimación de retardos (μs), Escenario III.

Para los tres escenarios en cuestión, según la Práctica Recomendada A/74 [3], se presentarán problemas en algunas zonas puntuales. Estas ubicaciones pueden servir de valiosos casos de estudio para las Pruebas de Campo a realizar en el Proyecto REFUTV. Para estas pruebas se tomará en cuenta, además de la mencionada Recomendación [3], las Pruebas de Laboratorio ya realizadas en el proyecto [4].

En la Figura 4.14 se muestran los resultados obtenidos de las máscaras de recepción de algunos de los receptores comerciales evaluados en dichas pruebas de laboratorio. Estas pruebas se realizaron con el equipo SFE de R&S y con seis televisores, los cuales eran una muestra significativa de los receptores comerciales en México en el momento en que se hicieron las pruebas. También se comparan con la propuesta de A/74 [3] mostrada en la Figura 4.9 y con el ETL TV Analyzer que será el equipo a utilizar para las medidas. Se demostró en las Pruebas de Laboratorio [4] que todos los receptores comerciales evaluados cumplieron con la

Práctica Recomendada A/74 [3] bajo la presencia de un eco estático. El receptor comercial de peor desempeño soporta post-ecos de hasta $60 \mu\text{s}$ y el de mejor hasta $70 \mu\text{s}$. La ventana de ecualización para el caso de pre-ecos es más reducida, aunque también superaron a la A/74, soportando retardos de hasta $40 \mu\text{s}$.

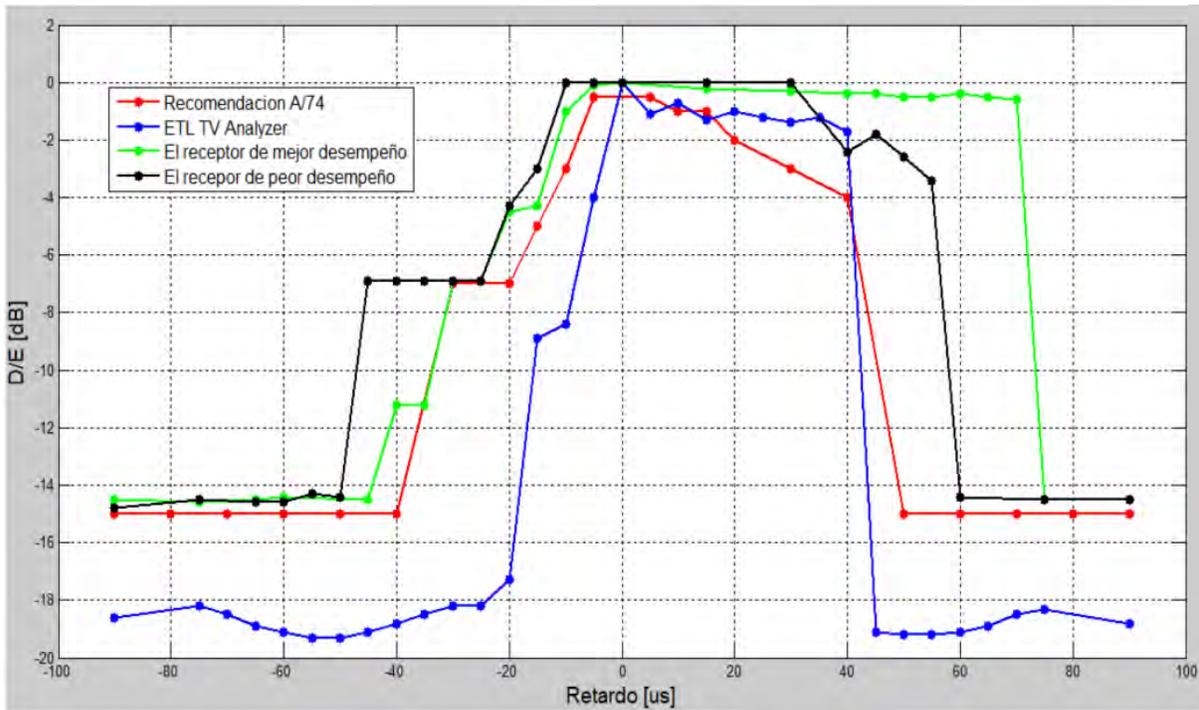


Figura 4.14. Desempeño de los receptores ante un Eco Estático [4].

4.5. Definición de parámetros de transmisores.

Luego del estudio realizado en las secciones anteriores se puede dar cumplimiento a uno de los objetivos principales de la presente tesis: definir los parámetros de diseño de la red de transmisión, como son las antenas, las potencias y los retardos. Los parámetros de la comunicación mediante el enlace de microondas ya fueron definidos en el Capítulo 3. Se resumen en la Tabla 4.4 los parámetros propuestos para la SFN, con los tres escenarios definidos.

Parámetros	Cerro del Chiquihuite	TVUNAM		
		Esc.I	Esc.II	Esc.III
Potencia nominal de transmisión	8 kW	100W	100W	700W
Ganancia de la antena transmisora	15.8 dBi	13.6 dBi		
Azimut de la antena transmisora	180°	0°	97°	97°
Potencia Radiada Aparente (PRA)	100 kW	1kW	1kW	7 kW
Offset	0 μ s	76 μ s		

Tabla 4.4. Parámetros de trabajo para la red de transmisión de la SFN-ATSC.

La SFN para las Pruebas de Campo a realizar trabajará en los tres escenarios descritos anteriormente. Por lo tanto, la definición de los puntos de medidas para las pruebas estará basada en cada escenario. En el siguiente capítulo se determinarán puntos de medidas diferentes para cada uno de los tres escenarios.

Bibliografía

1. John Magliacane, KD2BD. “*Splat, because the word isn’t flat*”. Disponible en: <http://www.qsl.net/kd2bd/splat.html>. Fecha de consulta: 15 de octubre, 2017.
2. Diario Oficial de la Federación. “*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.
3. Advanced Television Systems Committee. “*A/74 Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines*”. Washington, D.C. 07 Abril, 2010.
4. José María Matías Maruri, Mario Alberto Hernández Flores. “*Resultados de las pruebas de laboratorio de ATSC*”. Facultad de Ingeniería, CONACYT. 01 de Junio, 2016.

Capítulo 5. Definición de los puntos de medida.

El estándar ATSC está concebido para recepción fija, por lo que las medidas deben hacerse con la unidad móvil estacionada. Es importante que estén definidos los sitios donde se van a realizar las mediciones en la campaña de Pruebas de Campo y que sean sitios representativos de los cuales se obtenga información valiosa para el posterior análisis de resultados. En este capítulo quedará definida la ubicación de estos sitios. Para su ubicación, serán tomados en cuenta los estudios de estimaciones de campo y retardos realizados en el capítulo anterior en cada escenario. Además, se ubicarán puntos en entornos característicos como zonas urbanas densas y áreas cercanas al aeropuerto. También se definirá el número total de sitios a ubicar, ya sean exteriores o interiores, tomando de referencia Recomendaciones de la ITU y de ATSC y las pruebas de campo abordadas en el Capítulo 2.

5.1. Número de sitios.

Para definir el número de sitios de medición en donde se llevará a cabo la obtención de las muestras de la señal se tuvieron en cuenta varias referencias. La primera de ellas es la Recomendación A/75 de ATSC [1], la cual menciona que para disponer de intervalos de confianza estadísticamente razonables se requiere un número de sitios entre 200 y 400, sin embargo la misma recomendación propone realizar pruebas en un intervalo de 50 a 100 sitios como mínimo. La segunda es la recomendación recogida en el Informe ITU-R BT-2035-2 [2], que indica que para obtener una muestra estadística significativa, los puntos de medición deben ser entre 30 y 100 sitios, aunque recomienda que sea un número mayor. Por último, se tomó en cuenta el número de sitios de medición que se consideró para las pruebas de campo realizadas en la Ciudad de Nueva York para mediciones estáticas sobre redes SFN de ATSC y utilizando la configuración de Transmisores Distribuidos (DTxTs) [3]. Estas pruebas abordadas anteriormente en el Capítulo 2, indican que se realizaron mediciones en 132 sitios, de los cuales 109 sitios fueron para

mediciones estáticas en exteriores y los restantes 23 para mediciones en interiores, este número de sitios cumple con lo que recomienda el Informe ITU-R BT-2035-2 [2], que señala que el número de sitios en interiores debe ser una quinta parte del total de sitios a utilizar en mediciones de exteriores.

Tomando en cuenta referencias mencionadas anteriormente, se definirán entre 100 y 130 sitios en total. De estos, se desea que las mediciones en interiores estén entre 15 y 30 sitios, cumpliendo con la Recomendación del Informe ITU-R BT-2035-2 [2].

5.2. Ubicación de los sitios.

La ubicación de los sitios debe hacerse de manera que obtenga una variedad numerosa de muestras y que a la vez sean zonas representativas.

Con la SFN se busca mejorar la cobertura del transmisor principal; por lo tanto, es importante realizar mediciones cuando solo opera el transmisor del Cerro del Chiquihuite y así poder comparar con los tres escenarios definidos. En las mediciones de campo realizadas en Puebla y Tlaxcala [4] referenciadas en el Capítulo 2, se ubicaron nueve puntos de medida equiespaciados en la línea de 30 km que unía a los transmisores de su SFN. Tomando esta referencia, se propone realizar mediciones en siete puntos equiespaciados 3.5 km aproximadamente en la línea que une al transmisor del Cerro del Chiquihuite con el de TV UNAM. Además, se ubicarán puntos en zonas en las que se esperan problemas de recepción, según las estimaciones de campo realizadas en el capítulo anterior. También serán ubicados puntos en lugares urbanos donde exista alto tráfico vehicular y numerosos edificios de gran altura con el objetivo de analizar el efecto del multirayecto natural y el provocado por la SFN en zonas con estas características. Las medidas en interiores se planificarán en sitios de la UNAM, SPR y en establecimientos donde lo permitan las circunstancias.

5.2.1. Operando solo el transmisor principal.

Se realizarán algunas mediciones cuando solo esté operando el transmisor principal con el objetivo de estudiar el efecto de multitrayecto que se tiene en recepción debido sólo a este transmisor, y además, para comparar con los tres escenarios de la red SFN. La distribución de estos puntos queda según la Figura 5.1. La nomenclatura de los puntos estará formada por un número de manera consecutiva y por la letra "C" para los puntos que son "comunes". Los puntos que incluyan la letra "C" son los de comparación entre el caso de cuando opera solo el transmisor principal, respecto a cuando opera la SFN en cualquiera de los tres escenarios.

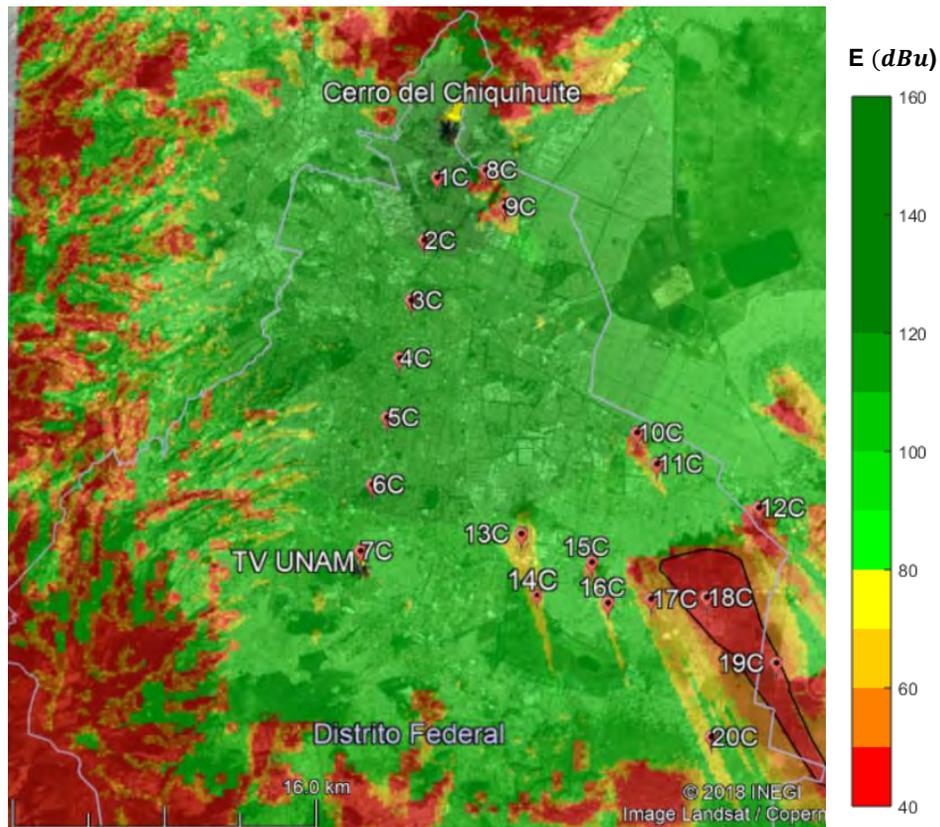


Figura 5.1. Distribución de puntos de medición para el caso de que opere solo el transmisor principal.

Fueron definidos siete puntos equiespaciados 3.5 km aproximadamente en la línea entre ambos transmisores (desde el punto 1C al 7C). Los puntos 8C y 9C fueron ubicados en la zona norte de la ciudad donde a pesar de que están muy cerca del transmisor principal, este no logra cubrir estos puntos debido a los Cerros de Zacatenco y Guerrero que están en esa zona. Los puntos del 10C al 20C también fueron ubicados debido a que el transmisor principal no logra servir estas zonas. Son un total de 20 puntos, y estos puntos serán comunes (C) para los tres escenarios, es decir, se medirá en este punto para cuando opere solo el transmisor principal y además cuando opere la SFN en cada uno de los tres escenarios. De esta manera, se podría comparar el nivel de recepción de un solo transmisor contra la recepción cuando está operando la SFN en cada escenario.

5.2.2. Entornos característicos.

Las condiciones de recepción de la señal están influenciadas directamente por el entorno, por lo que serán seleccionadas algunas zonas de tal manera que se tenga una muestra de todas las características físicas de la señal recibida de la SFN. Los tipos de zona de recepción que se estudiarán se describen a continuación. Se ubicaron puntos en zonas urbanas densas específicamente con alto tráfico vehicular y grandes edificaciones. El resto de puntos se consideran zonas urbanas no densas, donde los edificios son más pequeños y calles más estrechas sin el alto tráfico de vehículos que existe en grandes avenidas. El aeropuerto es otro entorno muy interesante a evaluar; se pueden recibir señales con efecto Doppler y una adición de retardo aparte del que ya presentan debido a su propagación, reflejadas por aviones que despegan y/o aterrizan.

- **Zonas urbanas densas.**

En CDMX, las zonas con mayor tráfico vehicular y grandes edificaciones se encuentran Paseo de la Reforma y Santa Fe, en las delegaciones de Cuauhtémoc y Álvaro Obregón respectivamente. En la Figura 5.2 se muestra la ubicación de estos puntos.

Los puntos 21C y 22C corresponden a Santa Fe, están espaciados 3 km aproximadamente a lo largo de una de las avenidas principales que está rodeada de grandes edificios. Los puntos 23C y 24C están sobre la Avenida Paseo de la Reforma, también están espaciados 3 km aproximadamente. Le fue incluida en la nomenclatura del sitio la letra “C” debido a que estos 4 puntos son comunes (C) para los tres escenarios de la SFN.



Figura 5.2. Distribución de puntos de medición en zonas urbanas densas.

- **Aeropuerto.**

Otro ejemplo de sitio característico es el aeropuerto de la CDMX. Estudiar las condiciones de recepción en zonas cerca de este emplazamiento permitirá evaluar señales en recepción con efecto Doppler y una adición de retardo (aparte del que ya presentan las señales debido a su propagación) producto de obstáculos en un entorno real, ya que se tendrán señales que serán reflejadas por aviones que despegan y/o aterrizan. Se muestra en la Figura 5.3 la distribución.

Se ubicaron 4 puntos en rejilla que abarquen los alrededores del aeropuerto. Fueron nombrados con números consecutivamente e incluyen en la nomenclatura

la letra “C”, especificando que son puntos de evaluación para los tres escenarios de la SFN.

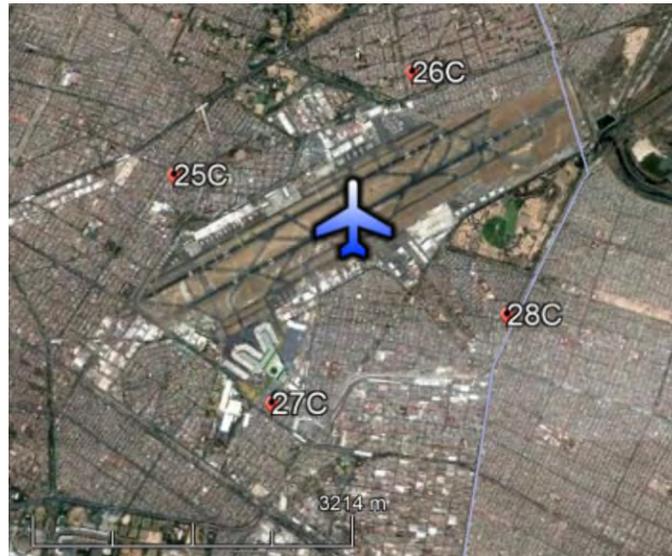


Figura 5.3. Distribución de puntos de medición en zonas alrededor del aeropuerto.

5.2.3. Interiores.

Debido a que se debe solicitar permiso para poder realizar mediciones en interiores, es factible que se realicen dentro de las instalaciones de la UNAM y edificios públicos como por ejemplo edificios oficinas, centros comerciales, etc. Se muestran algunas zonas donde sería factible de realizarlas ya que son instalaciones de la UNAM, SPR y centros comerciales. Se muestra en la Figura 5.4 los 5 puntos propuestos para la medición en interiores para los tres escenarios.

El punto común 29C corresponde a las oficinas de SPR. El 31C y 32C se ubican en la UNAM, corresponden al Posgrado de Ingeniería y TV UNAM respectivamente. Los puntos 30C y 33C fueron situados en centros comerciales que tienen estacionamiento bajo techo y se ubican al sur de la ciudad, zona con posibles problemas de recepción. Estos 5 puntos también fueron nombrados consecutivamente y con la letra “C”, especificando que son puntos comunes para los tres escenarios de SFN. Por lo tanto, serán 15 mediciones en interiores, 5 para cada escenario.

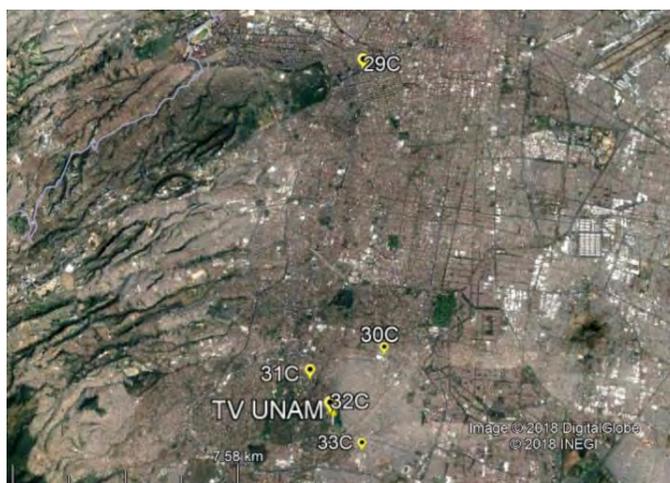


Figura 5.4. Distribución de puntos de medición en interiores

5.2.4. Zonas con problemas de recepción esperados.

En las Pruebas de Laboratorio realizadas como parte del Proyecto REFUTV [5] se obtuvieron los valores límites de recepción de la señal para la relación entre amplitud y retardo del conjunto de señales del primer transmisor con respecto a las del segundo transmisor (Figura 4.14). En estos resultados obtenidos se comprobó que los receptores evaluados cumplían con la máscara de recepción (Figura 4.9) presentada por el estándar ATSC en la Práctica Recomendada A/74 [6]. En esta Práctica Recomendada por ATSC se evalúa a los receptores ante un eco estático. Esta prueba comprende los valores límites (umbrales) que debe demodular un receptor ante un solo eco. La presencia de un eco estático es el comportamiento ideal de una SFN de dos transmisores. Por lo que la Práctica Recomendada A/74 representa los valores mínimos que debe soportar el ecualizador de un receptor ATSC ante una SFN. Debido a lo anterior, se usará de referencia esta máscara para ubicar las zonas, que según las estimaciones de campo y retardo realizadas, puedan ser puntos críticos. En la Figura 5.5 se observa la máscara de recepción recomendada por ATSC [6] (línea de color negro) y le fue incluido los márgenes de interés a evaluar según el riesgo de recepción. En el eje de las ordenadas se ubica

la relación D/E (dB), que describe la diferencia de nivel de señal recibido entre la señal que llega de mayor potencia llamada señal directa (D) y otra señal que llega con menor potencia llamada eco (E). El eje de las abscisas corresponde al retardo relativo entre ambas señales (la Directa y el Eco). A la izquierda del retardo '0' se ubican los pre-ecos con valores negativos y a la derecha los post-ecos con valores positivos. Como ya ha sido explicado, el pre-eco es cuando la señal Eco antecede a la señal Directa y post-eco cuando ocurre lo contrario, el Eco es posterior a la señal Directa.

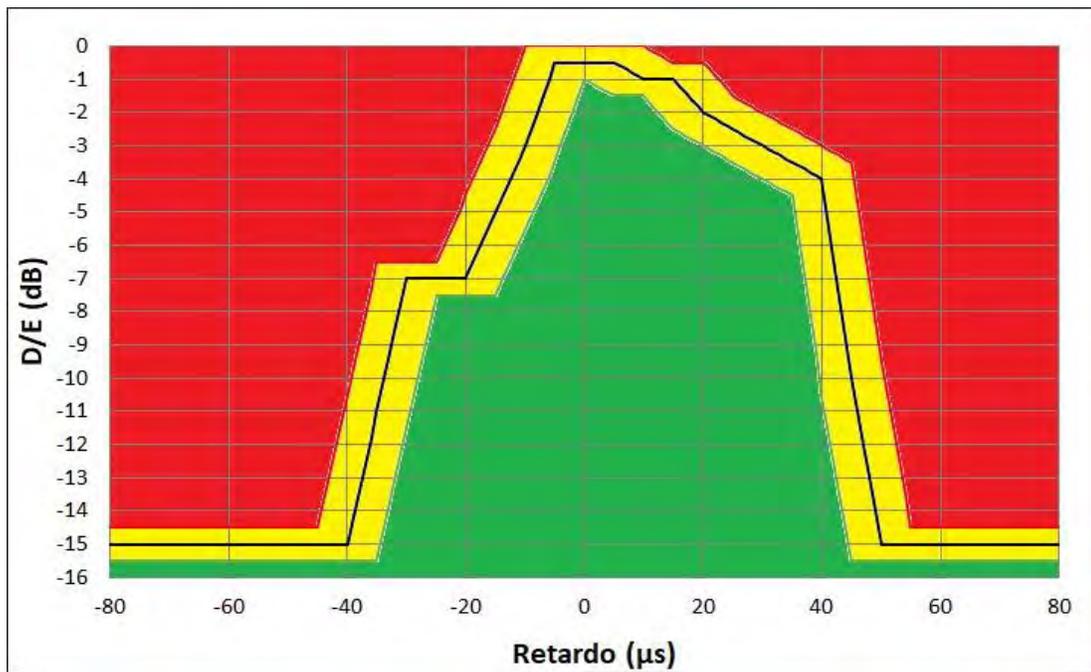


Figura 5.5. Máscara de recepción de referencia para estimar niveles de problemática.

A continuación, se describen los márgenes a evaluar según el riesgo de recepción. Estos márgenes fueron establecidos según los resultados obtenidos en las Pruebas de Laboratorio del proyecto REFUTV [5] que fueron mostrados en la Figura 4.14 del capítulo anterior, incluye la máscara de recepción de la Práctica Recomendada A/74 [6] y la obtenida de los receptores de mejor y peor desempeño. Quedan establecidos tres niveles de riesgo en la recepción.

- Zonas amarillas: posible riesgo, fue ubicada $\pm 0.5 \text{ dB}$ respecto al eje de ordenadas (D/E) y $\pm 5 \mu\text{s}$ al eje de las abscisas (Retardo).
- Zonas rojas: sin recepción, encima de la zona amarilla.
- Zonas verdes: recepción sin problemas, debajo de la zona amarilla.

La máscara presentada en la Figura 5.5 debe ser tomada como referencia de partida, ya que se refiere a un comportamiento ideal de la SFN porque no ha sido contemplado el multitrayecto natural. Además, cada receptor tiene características de recepción diferentes como se observó en la Figura 4.14 del capítulo anterior. Para evaluar los tres escenarios definidos en el capítulo anterior y ubicar las zonas críticas de cada uno, fue necesario extrapolar las curvas de la Figura 5.5 a una tabla para facilitar la programación en Matlab. Dicha tabla se encuentra en el Anexo 1.

Es importante aclarar que los mapas obtenidos y presentados a continuación estuvieron basados en las estimaciones de cobertura realizadas en el software SPLAT. Este software considera antena de recepción exterior omnidireccional con una altura de 10 m sobre el nivel del suelo. Por lo general, las antenas ubicadas en exteriores son directivas, esto aumentaría la diferencia entre las señales recibidas de ambos transmisores y favorecería la recepción.

5.2.4.1. Escenario I.

Para el primer escenario, donde el transmisor secundario trabajará con una potencia de transmisión de 100 W y la antena tendrá un azimut de 0° , se obtuvo el resultado presentado en la Figura 5.6. Se ubicaron los puntos de medida comunes abordados anteriormente (desde el 1C hasta el 33C) y los particulares de este escenario, que podrían presentar problemas según la máscara de recepción de la Figura 5.5. Se comprobó lo analizado en el capítulo anterior, en este escenario se crean zonas con posible riesgo (amarillo) en el centro de la ciudad y otras cercanas al transmisor secundario. Se ubicaron tres puntos de medición en estas zonas de posible riesgo, los puntos 1-I, 2-I y 3-I resaltados en color rojo en la Figura 5.6.

Los tres puntos fueron nombrados consecutivamente y seguidos de la letra “I”, especificando que son puntos del Escenario I. Serían 36 puntos en total para este escenario.

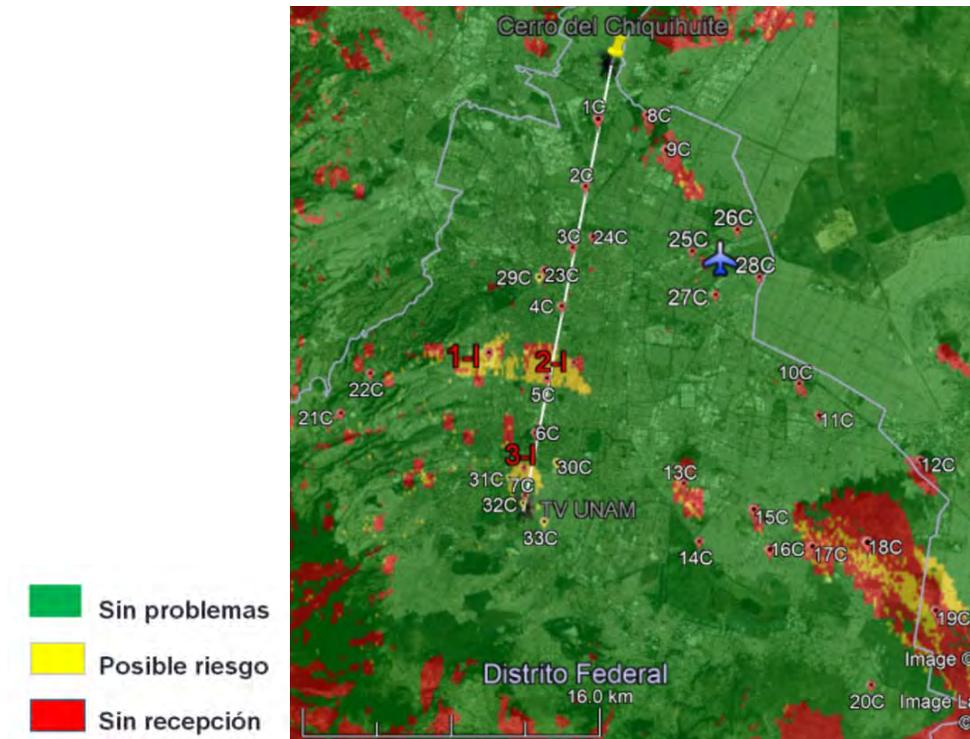


Figura 5.6. Puntos de medida para el Escenario I.

5.2.4.2. Escenario II.

Al girar la antena del transmisor secundario a un azimut de 97° se crean nuevas relaciones de potencia y retardo, como se analizó en el Capítulo 4. Según el análisis hecho a partir de la máscara de recepción obtenida en la Figura 5.5, la zona de problema se traslada al sureste de la ciudad, aunque en menor medida que la zona de sombra que existía para el caso de operar solo el transmisor principal. Se observa en la Figura 5.7 que los puntos comunes 11C, 18C y 19C ya no presentan problemas (zonas verdes) y fueron ubicados en puntos comunes bajo el criterio de que no era zona servida cuando solo opera el transmisor principal, por lo que en este caso supera a la cobertura de cuando solo opera el transmisor del Cerro del Chiquihuite. Además, se observa que a diferencia del primer escenario, no se han

creado nuevas grandes zonas de posible riesgo (amarillas) o sin recepción (rojas). Se comprueba lo concluido en el capítulo anterior: el Escenario II supera al primer escenario.

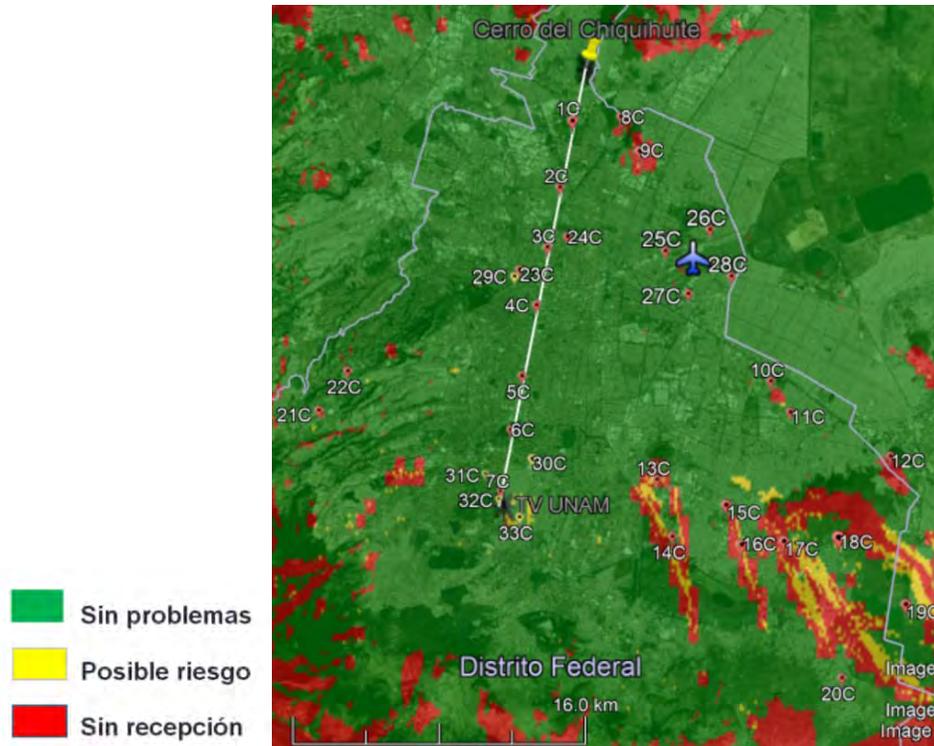


Figura 5.7. Puntos de medida para el Escenario II.

Por lo tanto, no se definen puntos específicos en este caso. Para el Escenario II, los puntos de medición serán los 33 comunes con los demás escenarios.

5.2.4.3. Escenario III.

Al aumentar la potencia de transmisión a 700 W para el tercer escenario, las relaciones de potencia entre las señales de ambos transmisores cambian. Se observa en la Figura 5.8 que la situación empeora, ya que se crean grandes zonas con relaciones de potencias muy pequeñas y retardos relativos muy grandes en toda el área sureste de la ciudad. Fueron ubicados puntos de medición en estas zonas consideradas sin recepción (rojas) y de posible riesgo (amarillas). Serán 7 puntos específicos que fueron resaltados en color azul en la Figura 5.8 y seguidos

de la especificación “III” para aclarar que son particulares del Escenario III. Además, se ubican los 33 comunes de todos los escenarios de la SFN. Por lo tanto, son 40 puntos de medición en este escenario.

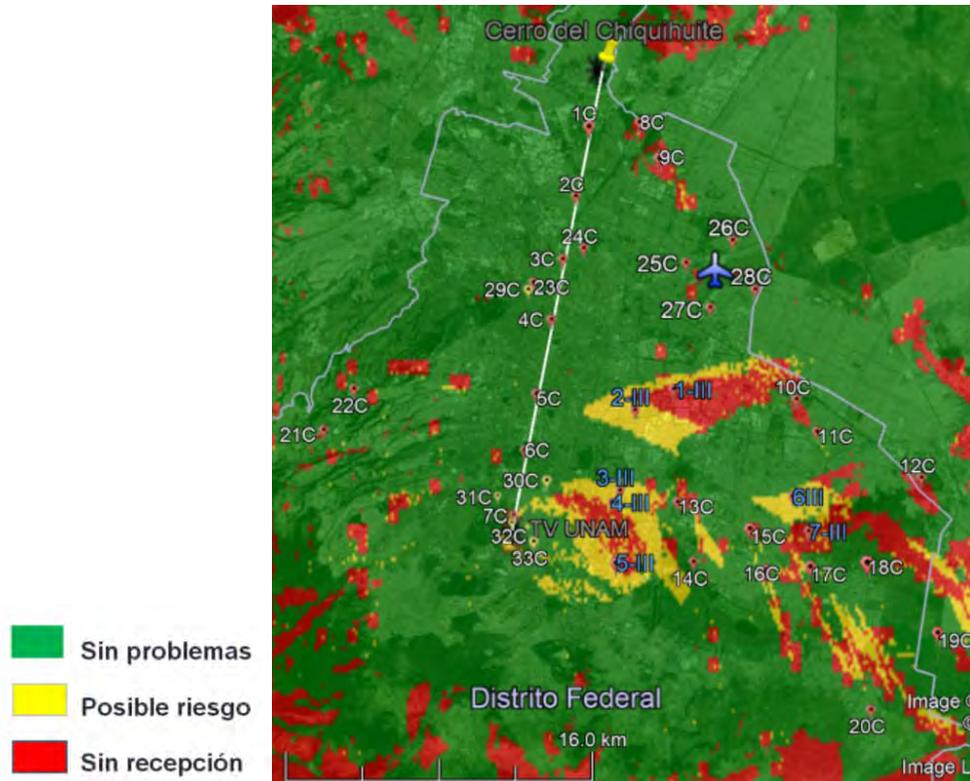


Figura 5.8. Puntos de medida para el Escenario III

En resumen, habrá 129 puntos de medida, 114 mediciones en exteriores y 15 (5 de cada escenario) en interiores (Anexo 2). De estos 129, corresponden 36 puntos para el Escenario I (33 comunes y 3 específicos). Para el Escenario 2 no se consideró necesario ubicar puntos específicos; por lo tanto, son 33 puntos de medidas para este caso. Para el tercer escenario se consideraron 7 puntos específicos para un total de 40 puntos. Por lo tanto, son 109 sitios de medición para los tres escenarios de SFN, sumándole los 20 puntos correspondientes al caso de cuando solo opere el transmisor principal, suman los 129 sitios de medida para la campaña de las Pruebas de Campo a realizar.

Bibliografía

1. Advanced Television Systems Committee. *"A/75: Recommended Practice: Developing DTV Field Test Plans"*. Washington, D.C. 26 de julio, 2001.
2. 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.
3. 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. Junio, 2008.
4. Daniel Esquivel Trujillo. Tesis de Licenciatura: *"Canales de propagación para redes SFN"* .Facultad de Ingeniería, UNAM. Marzo, 2016.
5. José María Matías Maruri, Mario Alberto Hernández Flores. *"Resultados de las pruebas de laboratorio de ATSC"*. Facultad de Ingeniería, CONACYT. 01 de Junio, 2016.
6. Advanced Television Systems Committee. *"A/74 Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines"*. Washington, D.C. 07 Abril, 2010.

Conclusiones

En este último capítulo serán presentadas las conclusiones de la presente Tesis y se describirán los objetivos logrados.

Como ya fue explicado, una Red en Frecuencia Única consiste en una red de dos o más transmisores que operan en un mismo canal de radiofrecuencia. La red SFN de estudio en el proyecto REFUTV al cual pertenece la presente tesis, estará formada por dos transmisores ubicados en CDMX. El principal estará situado en el Cerro del Chiquihuite y el secundario en TV UNAM. El despliegue de esta red estará a cargo del radiodifusor SPR, teniendo como canal físico el número 30, que es en el que transmite en la actualidad.

Como contribución al desarrollo del proyecto y la realización de las Pruebas de Campo, en la presente tesis fueron realizadas estimaciones de cobertura teniendo en cuenta relaciones de nivel de señal y retardos relativos de ambos transmisores, con el objetivo de definir los parámetros de la red de transmisión de la SFN y además ubicar los puntos donde se realizarán las mediciones.

Primeramente, se realizó la estimación del enlace de microondas para la comunicación entre los dos transmisores que conforman la SFN. Se realizó un análisis de viabilidad para las frecuencias de 13 GHz y 7 GHz y se comprobó mediante cálculos teóricos la atenuación que sufren los radioenlaces de largas distancias a altas frecuencias. El factor que más afectó al radioenlace a 13 GHz en comparación con el de 7 GHz fue la atenuación por lluvia, por lo que se concluye que el enlace a 7 GHz es viable incluso con lluvia, y que el enlace de 13 GHz es viable sin lluvia, pero puede perderse el enlace en caso de lluvia fuerte. Se lograron definir los parámetros de transmisión y recepción del enlace de microondas, el cual es parte de la red de transmisión de la SFN. Se trabajará a frecuencias de 7 GHz o 13 GHz con una potencia de transmisión de 24 dBm o 18 dBm respectivamente. Las ganancias de las antenas de transmisión y recepción serán de 35.5 dBi (7 GHz) o 39.3 dBi (13 GHz). La sensibilidad del receptor será de -76.6 dBm para 7 GHz y -77.1 dBm para 13 GHz.

Se realizaron estimaciones de campo y retardo relativos de los dos transmisores que componen la red SFN. Fueron evaluados tres escenarios con el objetivo de definir los parámetros de la red de transmisión. Quedó definida la orientación de la antena del transmisor secundario y la potencia de transmisión del mismo para cada uno de los tres escenarios. En el primer escenario el transmisor secundario trabajará con una potencia de transmisión 100 W y con azimut de 0°. En el segundo, se mantendrá la potencia de transmisión, pero la antena transmisora será girada 97° de azimut hacia la zona de sombra del transmisor principal. Por último, en el tercer escenario se trabajará con el mismo azimut, pero se aumentará la potencia de transmisión a 700 W. Para los tres escenarios se le agregará un offset de 76 μ s al transmisor secundario con el objetivo de evitar grandes retardos en las zonas próximas al transmisor de TV UNAM, donde se reciben ecos muy fuertes respecto a la señal principal.

Fueron definidos los puntos de medida para la campaña de las Pruebas de Campo a realizar. Se tomó en cuenta para la ubicación de los mismos, las estimaciones de cobertura y retardos relativos realizadas de cada escenario y se tomó de referencia la máscara de recepción de la Práctica Recomendada A/74 que representa los valores mínimos que debe soportar el ecualizador de un receptor ATSC ante una SFN. Además de dicha máscara, se tomó en cuenta los resultados obtenidos en la evaluación de receptores ante un eco estático en las Pruebas de Laboratorio realizadas en el proyecto REFUTV. A partir de estos resultados fueron establecidos niveles de riesgo de recepción para la ubicación de los sitios. Además, se ubicaron puntos de medición a partir de variadas condiciones de recepción, como son recepción en interiores o exteriores y entornos característicos como zonas urbanas densas y el aeropuerto. En resumen, habrá 129 puntos de medida, 114 mediciones en exteriores y 15 en interiores, cumpliendo así con el Informe ITU-R BT-2035-2 para la evaluación de la cobertura de televisión digital.

Se espera que esta Tesis y las Pruebas de Campo a realizar sirvan como una guía para el diseño y despliegue de redes SFN en todo México.

Anexo 1

En el presente anexo se muestran las tablas obtenidas a partir de las curvas de la máscara de recepción de referencia de la Figura 5.5. Al definir estos intervalos y asignarle niveles de problemática por colores facilita la programación en Matlab a la hora de obtener los mapas de las Figuras 5.6, 5.7 y 5.8. En la primera columna de la tabla se establecen intervalos de retardos relativos (eje horizontal de la Figura 5.5) según cambios en las curvas de referencias, en la segunda columna se define qué relación debe existir entre la señal deseada y el eco, D/E (eje vertical de la Figura 5.5) para asignarle el nivel de riesgo de recepción (color amarillo, verde y rojo) según la zona donde se encuentre de la Figura 5.5.

Pre-eco

Retardo (μ s)	D/E (dB)	color
0-5	0-2	amarillo
	Mayor que 2	verde
5-10	0-4	amarillo
	Mayor que 4	verde
10-15	0-2	rojo
	2-7	amarillo
	Mayor que 7	verde
15-25	0-4	rojo
	4-7.5	amarillo
	Mayor que 7.5	verde
25-45	0-6.5	rojo
	6.5-15.5	amarillo
	Mayor que 15.5	verde
Mayor a 45	0-14.5	rojo
	14.5-15.5	amarillo
	Mayor que 15.5	verde

Post-eco

Retardo (μ s)	D/E (dB)	color
0-15	0-1	amarillo
	Mayor que 1	verde
15-25	0-0.5	rojo
	0.5-3	amarillo
	Mayor que 3	verde
25-35	0-2	rojo
	2-4	amarillo
	Mayor que 4	verde
35-40	0-3	rojo
	3-5	amarillo
	Mayor que 5	verde
40-50	0-4	rojo
	4-15.5	amarillo
	Mayor que 15.5	verde
Mayor a 50	0-14.5	rojo
	14.5-15.5	amarillo
	Mayor que 15.5	verde

Anexo 2. Ubicación de sitios de medida.

En el presente anexo se describen los puntos de medida ya definidos. Se especifica las coordenadas geográficas y el criterio por el cual fue seleccionado. Primeramente, aparecen los 33 puntos comunes que también serán analizados en los tres escenarios. Luego se especifican los puntos particulares del primer y tercer escenario (no fueron definidos puntos específicos para el Escenario II).

Puntos comunes.

Nomenclatura	Latitud	Longitud	Criterio de selección
1C	19°29'59.27"N	99° 8'14.78"W	Línea entre ambos transmisores
2C	19°28'7.12"N	99° 8'38.03"W	Línea entre ambos transmisores
3C	19°26'21.00"N	99° 9'1.40"W	Línea entre ambos transmisores
4C	19°24'38.99"N	99° 9'21.61"W	Línea entre ambos transmisores
5C	19°22'33.79"N	99° 9'48.72"W	Línea entre ambos transmisores
6C	19°20'58.91"N	99°10'9.57"W	Línea entre ambos transmisores
7C	19°19'14.95"N	99°10'29.14"W	Línea entre ambos transmisores
8C	19°30'11.50"N	99° 6'44.31"W	Zona de sombra del transmisor principal
9C	19°29'5.66"N	99° 6'8.60"W	Zona de sombra del transmisor principal
10C	19°22'24.84"N	99° 2'3.40"W	Zona de sombra del transmisor principal
11C	19°21'30.13"N	99° 1'26.97"W	Zona de sombra del transmisor principal
12C	19°20'12.57"N	98°58'20.18"W	Zona de sombra del transmisor principal
13C	19°19'31.42"N	99° 5'35.87"W	Zona de sombra del transmisor principal

14C	19°17'50.56"N	99° 5'7.18"W	Zona de sombra del transmisor principal
15C	19°18'41.37"N	99° 3'26.71"W	Zona de sombra del transmisor principal
16C	19°17'31.22"N	99° 2'57.39"W	Zona de sombra del transmisor principal
17C	19°17'37.12"N	99° 1'38.76"W	Zona de sombra del transmisor principal
18C	19°17'39.13"N	98°59'57.18"W	Zona de sombra del transmisor principal
19C	19°15'45.79"N	98°57'51.51"O	Zona de sombra del transmisor principal
20C	19°13'41.39"N	98°59'50.66"W	Zona de sombra del transmisor principal
21C	19°21'32.58"N	99°16'9.13"W	Zona urbana densa
22C	19°22'41.96"N	99°15'15.06"W	Zona urbana densa
23C	19°25'41.43"N	99° 9'53.41"W	Zona urbana densa
24C	19°26'39.38"N	99° 8'23.68"W	Zona urbana densa
25C	19°26'14.72"N	99° 5'20.68"W	Aeropuerto
26C	19°26'52.44"N	99° 3'57.29"W	Aeropuerto
27C	19°24'59.22"N	99° 4'37.60"W	Aeropuerto
28C	19°25'29.96"N	99° 3'16.99"W	Aeropuerto
29C	19°25'29.44"N	99°10'2.96"W	Interiores
30C	19°20'7.61"N	99° 9'29.71"W	Interiores
31C	19°19'46.37"N	99°10'57.44"W	Interiores
32C	19°19'1.39"N	99°10'32.38"W	Interiores
33C	19°18'24.52"N	99° 9'53.05"W	Interiores

Puntos específicos del Escenario I.

Nomenclatura	Latitud	Longitud	Criterio de selección
1-I	19°23'18.18"N	99°11'35.83"W	Zona de posible riesgo
2-I	19°23'6.42"N	99° 8'59.32"W	Zona de posible riesgo
3-I	19°20'3.18"N	99°10'30.90"W	Zona de posible riesgo

Puntos específicos del Escenario III.

Nomenclatura	Latitud	Longitud	Criterio de selección
1-III	19°22'41.69"N	99° 5'42.85"W	Zona sin recepción
2-III	19°22'6.54"N	99° 6'51.91"W	Zona de posible riesgo
3-III	19°19'50.97"N	99° 7'18.85"W	Zona de posible riesgo
4-III	19°19'36.08"N	99° 7'34.35"W	Zona sin recepción
5-III	19°17'43.22"N	99° 7'26.31"W	Zona de posible riesgo
6-III	19°19'41.30"N	99° 2'10.34"W	Zona de posible riesgo
7-III	19°18'42.40"N	99° 1'41.75"W	Zona sin recepción

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 2018