

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Red de comunicación inalámbrica terrestre y satelital
como apoyo a servicios de protección civil en el caso de
huracanes**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:
Christian Arcángel Méndez Chacón

Ensenada, Baja California, México
2016

Tesis defendida por

Christian Arcángel Méndez Chacón

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Roberto Conte Galván
Codirector de tesis

M.C Jorge Enrique Preciado Velazco
Codirector de tesis

Dr. Salvador Villarreal Reyes

Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo

Dr. José Antonio García Macías



Dr. Miguel Ángel Alonso Arévalo
Coordinador del Posgrado

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Christian Arcángel Méndez Chacón**, como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación a Telecomunicaciones.

Red de comunicación inalámbrica terrestre y satelital como apoyo a servicios de protección civil en el caso de huracanes

Resumen aprobado por:

Dr. Roberto Conte Galván
Codirector de tesis

M.C Jorge Enrique Preciado Velazco
Codirector de tesis

La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres sitúa a México dentro de los primeros diez puestos con mayor número de desastres, en la mayoría de los casos, originados por fenómenos hidrometeorológicos y climáticos. Al encontrarse dentro de una zona donde generalmente se forman huracanes, la población queda vulnerable ante el embate de estos fenómenos, por lo que resulta necesario la coordinación para brindar una respuesta rápida y efectiva a la población en riesgo, ya que la infraestructura de las telecomunicaciones puede encontrarse comprometida de manera parcial o total.

El presente trabajo propone una red de contingencia para las telecomunicaciones inalámbricas en tierra que utiliza los protocolos IEEE 802.16/IEEE 802.22 en conjunto con comunicaciones satelitales en Banda-L. En este trabajo se presenta un estudio sobre las prestaciones que brinda un segmento de las radiofrecuencias y su utilización en la tecnología de espacios blancos. Se plantea la organización de las unidades, se describen los elementos presentes y su distribución en el escenario de estudio y su interconexión para conformar la arquitectura de la red de contingencia. También se evalúa el radio de alcance que cada tecnología proporciona en el escenario de estudio y se determina el área de acción donde es posible garantizar las telecomunicaciones a los elementos de auxilio y rescate. Así mismo se determina el rendimiento que proporciona la red de contingencia propuesta a diferentes distancias. Se plantean la tecnología mínima necesaria en los segmentos terrestres y satelitales para la red de contingencia.

Palabras clave: IEEE802.16, IEEE 802.22, WiMAX, WRAN, espacios blancos, MEXSAT 2, satélite, VHF, UHF, ITU, UNISDR, protección civil, huracanes, Yucatán, Campeche, Quintana Roo.

Abstract of the thesis presented by **Christian Arcángel Méndez Chacón**, as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in telecommunications.

Wireless terrestrial and satellite communications network to provide civil protection services in case of hurricanes

Abstract approved by:

Dr. Roberto Conte Galván
Codirector of thesis

M.C Jorge Enrique Preciado Velazco
Codirector of thesis

The United Nations Office for Disaster Risk Reduction places Mexico within the firsts in the top ten countries with most disaster, caused by climatic phenomena in most cases. Since Mexico is inside where usually hurricanes form, the population stands vulnerable to the onslaught of this phenomenon. Therefore, coordinations is necessary to provide a quick and effective response to the population at risk, because telecommunication infrastructure could be compromised partially or completely.

This work proposes a contingency network for wireless telecommunications utilizing protocols IEEE 802.16e/IEEE 802.22 and satellite communications in L-Band. This thesis presents a study on the benefits provided by segments of radio frequencies and its application to white spaces broadcast technology. We pose organized units; describe the elements present and their distribution in the study scenario including its interconnection to form the architecture for the contingency network. The operating range provided by each technology in the study scenario is also evaluated. Based on this, we define the area for action where it is possible to guarantee telecommunications among elements of relief and rescue. In addition, the performance provided by the network contingency given at different distances is determined. Finally, the minimum required technology for terrestrial and satellite segments is determined for the contingency network.

Key words: IEEE802.16, IEEE 802.22, WiMAX, WRAN, White Spaces, MEXSAT 2, satellite, VHF, UHF, ITU, UNISDR, civil protection, hurricanes, Yucatán, Campeche, Quintana Roo.

Dedicatoria

A todos aquellos que me quieren.

Agradecimientos

A mis seres queridos y amigos, a los que están, y en especial a aquellos que partieron antes de poder compartir este momento con ellos.

Sin olvidar:

Al CONACyT y al CICESE por el apoyo económico para realizar mis estudios.

Tabla de contenido

Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de tablas	ix
Lista de figuras	xii
Lista de abreviaturas	xvi
Capítulo 1 - Introducción	1
1.1 Introducción general	1
1.2 Motivación del trabajo.....	2
1.3 Planteamiento del problema.....	4
1.4 Objetivo de la tesis	5
1.5 Alcances y limitaciones	5
1.6 Metodología de la investigación	5
1.7 Organización del trabajo.....	5
Capítulo 2 – Estado del arte en redes híbridas de comunicación.	7
2.1 Introducción	7
2.2 Redes híbridas: estado del arte.....	8
2.3 Redes híbridas: análisis de la tecnología.	11
2.3.1 Red de comunicaciones espaciales.....	11
2.3.1.1 Posición orbital.....	11
2.3.1.2 Área de cobertura	12
2.3.1.3 Tipo de servicio.....	14
2.3.1.4 Frecuencias de operación.....	14
2.3.1.5 Topología.....	15
2.3.1.6 Técnicas de acceso al servicio satelital	16
2.3.1.7 Modulación y codificación	17
2.3.1.8 Tasa de transferencia	18
2.3.1.8.1 Ancho de banda ocupado	18
2.3.1.8.2 Back-off.....	18
2.3.1.9 Flota satelital mexicana	19
2.3.1.10 Terminales de comunicación vía satélite	20
2.3.2 Segmento Terrestre	21
2.3.2.1 Estándares inalámbricos terrestres IEEE 802.....	21
2.3.2.2 Estándares IEEE 802.11.....	22
2.3.2.3 Estándares IEEE 802.15.....	25
2.3.2.4 Estándares IEEE 802.16.....	26
2.3.2.5 Estándar IEEE 802.22	29
2.4 Conclusiones del capítulo.....	32
Capítulo 3 - Metodología	35
3.1 Introducción	35
3.2 Diseño de red	36
3.2.1 Escenario de propagación	38

3.2.2	Tecnologías: satelital y terrestre.....	41
3.2.3	Arquitectura del sistema.....	43
3.2.4	Parámetros del sistema.....	47
3.2.4.1	Antenas.....	47
3.2.4.2	Radiofrecuencias de operación en ambos segmentos	48
3.2.4.3	Equipos de radiocomunicación terrestre.....	52
3.2.4.4	Equipos de radiocomunicación satelital.....	53
3.2.4.4.1	Relación portadora a ruido total.....	54
3.2.4.4.2	Características del enlace satelital.....	55
3.2.4.5	Parametrización de la red.....	57
3.2.4.5.1	Radio Mobile.....	57
3.2.4.5.2	Configuración de las redes inalámbricas terrestres en Radio Mobile.....	58
3.3	Simulaciones.....	65
3.4	Tráfico y número de usuarios.....	69
3.5	Conclusiones del capítulo.....	71
Capítulo 4 – Resultados y análisis		72
4.1	Introducción.....	72
4.2	Caracterización de la Red de Contingencia.....	72
4.2.1	Equipos IEEE 802.16e (WiMAX móvil).....	74
4.2.2	Radiofrecuencias para IEEE 802.22 (WRAN).....	76
4.3	Mapa de cobertura.....	78
4.4	Red de contingencia.....	89
4.4.1	Área de cobertura de la red de contingencia.....	90
4.4.2	Datos del mapa de cobertura.....	97
4.5	Rendimiento del segmento terrestre en la red de contingencia.....	101
4.5.1	Relación señal a ruido de los equipos terrestre inalámbricos....	101
4.5.2	Distancia de alcance promedio y tasa de transferencia.....	103
4.5.3	Número de usuarios de la red de contingencia.....	110
4.6	Enlace satelitales.....	111
4.7	Conclusiones del capítulo.....	119
Capítulo 5 – Conclusiones y recomendaciones		122
5.1	Introducción.....	122
5.1.1	Sobre lo presentado.....	122
5.1.2	Sobre los resultados.....	123
5.2	Conclusiones.....	124
5.3	Recomendaciones.....	127
Lista de referencias bibliográficas		128
Anexo 1 Servicios satelitales: definiciones.		135
Anexo 2 Vocabulario		137
Anexo 3 Equipos para las estaciones base y estaciones remotas		138
Anexo 4 Terminales BGAN comerciales		139
Anexo 5 Ubicación de estaciones terrenas en el escenario de estudio		141

Anexo 6 Ubicaciones de estaciones terrenas en el escenario de estudio (extendido)	142
Anexo 7 Áreas de cobertura de las estaciones base en el escenario de estudio	143
Anexo 8 Alcance de las estaciones base para el enlace Tx-Rx	145
Anexo 9 Huella satelital del MEXSAT	146

Lista de tablas

Tabla 1. Banda de frecuencias.....	15
Tabla 2. Flota satelital MEXSAT del Gobierno Federal (COFETEL, 2013)	19
Tabla 3. Adjudicación MEX00000 en 113° Oeste (COFETEL, 2013).....	20
Tabla 4. Principales estándares IEEE 802 de sistemas de comunicación inalámbricos (IEEE, 2015).	23
Tabla 5. Versiones y características del estándar IEEE 802.11	24
Tabla 6. Estándar 802.11g velocidad de transmisión a diferentes distancias	25
Tabla 7. IEEE 802.16e: SNR mínimo requerido ($P_b=10^{-6}$ en Canal AWGN) y tasa de bits para un canal de 5 MHz (Yang, 2010), (Abate, 2009).....	28
Tabla 8. Características técnicas de los principales estándares IEEE 802.16	28
Tabla 9. IEEE 802.22 SNR, modulación y tasas de datos (Stevenson, et al., 2009)	30
Tabla 10. Información por Entidad Federativa.....	39
Tabla 11 Especificaciones del satélite MEXSAT 2 (Vázquez, 2011).....	42
Tabla 12. Comparación IEEE 802.16e e IEEE 802.22	42
Tabla 13. Comparación WiMAX y WRAN a utilizar en este estudio	42
Tabla 14. Asignación de frecuencias de los canales de TV	49
Tabla 15. Bandas de frecuencia utilizadas en la Recomendación ITU-R M.2033. 51	
Tabla 16. Especificaciones técnicas de la estación base (transmisión/receptor) (Hasegawa, Masayuki, y Keat-Beng, 2013).....	53
Tabla 17. Características del equipo remoto (Wang y Sun Song, 2009)	53
Tabla 18. Distribución de frecuencias utilizadas en Radio Mobile.....	60
Tabla 19. Características del terreno (IFT, 2015).....	60
Tabla 20. Rangos de sensibilidad para IEEE802.16 e IEEE 802.22	62
Tabla 21. Parámetro de tráfico utilizado en la red de contingencia.	69
Tabla 22. Márgenes calculados para el nodo Mérida para la tecnología IEEE 802.16e a diferentes distancias.	75

Tabla 23. Tecnología IEEE 802.22 (WRAN)	76
Tabla 24. Valores del Margen calculados para el nodo Cozumel para la tecnología WRAN.....	77
Tabla 25. Descripción de la dirección del enlace de comunicación.....	78
Tabla 26. Características de las Estaciones Base y Estaciones Remotas usadas en las simulaciones	80
Tabla 27. Área de cobertura alcanzada por una Estación Base usando las características de las estaciones base y estaciones remotas descritas en la tabla 26	80
Tabla 28. Área de cobertura obtenida para los nodos en el estado de Yucatán en el enlace “peor de los casos”	84
Tabla 29. Modificación de la potencia. Nuevos parámetros en los equipos base con tecnología WRAN que serán utilizados en simulaciones posteriores	89
Tabla 30. Especificaciones de equipos utilizados en la red de contingencia	90
Tabla 31. Resultados para las simulaciones de red de contingencia en la Península de Yucatán con los parámetros de la tabla 30 para el enlace el “peor de los casos”	93
Tabla 32. Resultados para las simulaciones de red de contingencia en la Península de Yucatán con los parámetros de la tabla 30 para el enlace: Tx-Rx.....	94
Tabla 33. Valores de SNR requeridos en las tecnologías inalámbricas y su relación con la potencia de recepción para un ancho de canal de 5 y 6 MHz....	103
Tabla 34. Rango de valores para la potencia de recepción a emplear en las simulaciones y su correspondencia con la tasa de transferencia de datos	104
Tabla 35. Rango de valores para la potencia de recepción a emplear en las simulaciones 802.22 y su correspondencia con la tasa de transferencia de datos.....	105
Tabla 36. Valores obtenidos para el nodo CentralM con IEEE 802.16e, en el peor de los casos.....	106
Tabla 37. Valores obtenidos para el nodo CentralM con IEEE802.22, en el peor de los casos.....	107
Tabla 38. Alcance promedio para la red de contingencia al utilizar IEEE 802.16e	108

Tabla 39. Alcance promedio para la red de contingencia al utilizar IEEE 802.22	109
Tabla 40. Parámetros para el cálculo del enlace satelital	112
Tabla 41. Relación portadora a ruido total y BER (1×10^{-6}) calculado, con 30 dB de intermodulación por reuso de frecuencias para el enlace entre las estaciones remotas y la estación terrena maestra a 60kbps con un ancho de banda de 532 KHz.....	116
Tabla 42. Relación portadora a ruido total y BER (1×10^{-6}) calculado, con 30 dB de intermodulación por reuso de frecuencias para el enlace entre las estaciones remotas y la estación terrena maestra a 640 kbps con un ancho de banda de 12.22 MHz.....	117
Tabla 43. Relación portadora a ruido total y BER (1×10^{-6}) calculado, con 30 dB de intermodulación por reuso de frecuencias para el enlace entre las estaciones remotas y la estación terrena maestra con una ETM de $G_{TX} = 5$ dBi, $P_{TX} = 15$ dBW a 60 kbps con un ancho de banda de 12.22 MHz.	118
Tabla 44. Definiciones y conceptos utilizados en esta tesis tomados del inglés .	137
Tabla 45. Definiciones y conceptos utilizados (Traducción al español).....	137
Tabla 46. Equipos WiMAX móvil (Estaciones Base)	138
Tabla 47. Equipos WiMAX móvil (Estaciones Remotas)	138
Tabla 48. Equipos WRAN	138
Tabla 49. Terminales BGAN Comerciales (Ground Control, 2015).....	139
Tabla 50. Ubicación de las estaciones base en la península Red 1.0.....	141
Tabla 51. Distribución de las estaciones base en la península en la reubicación.	142
Tabla 52. Área de cobertura obtenida para los nodos en el estado de Campeche en el enlace “peor de los casos”.....	143
Tabla 53. Área de cobertura obtenida para los nodos en el estado de Quintana Roo en el enlace “peor de los casos”	144
Tabla 54. Valores del alcance obtenidos con IEEE 802.16e, en el enlace Tx-Rx	145
Tabla 55. Valores del alcance obtenidos con IEEE 802.22, en el enlace Tx-Rx .	145

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de grado de riesgo por ciclones tropicales (CENAPRED, 2015)	3
Figura 2. Fases de la gestión de la desastre.....	4
Figura 3. Área de cobertura, sin spotbeams (superior) con spotbeams (inferior) (Wood, 1998).....	13
Figura 4. Topologías de red satelitales (Maral, 2011)	16
Figura 5. Versiones del estándar 802.11	24
Figura 6. Esquema utilizado para el diseño de red una red híbrida de contingencia	37
Figura 7. Grado de riesgo en la península de Yucatán (Atlas Nacional de Riesgos, 2015)	39
Figura 8. Número de huracanes en diferentes niveles de daño durante el período de estudio (1851-2000) (Boose, Foster, Plotkin, y Hall, 2003).	40
Figura 9. Intervalos promedio de impacto y los diferentes niveles de daño durante el período de estudio (1851-2000) (Boose, Foster, Plotkin, y Hall, 2003).	41
Figura 10. Red multinivel.....	43
Figura 11. Nivel 1: elementos locales.....	44
Figura 12. Nodo Base: Terminal Satelital y Estación Base	44
Figura 13. Nivel 3: topología tipo malla	45
Figura 14. Células WRAN/WiMAX	46
Figura 15. Red de contingencia con topología estrella en cada estado de la península.....	46
Figura 16. Asignación de frecuencias Banda L (SCT, 2012).....	50
Figura 17. Esquema de enlace Satelital.....	54
Figura 18. Ganancia de recepción del satélite (41.7 dBi). Tomado de MEXSAT116.8 L-CEXT-X.....	56
Figura 19. Ganancia de transmisión del satélite (41.1 dBi). Tomado de MEXSAT116.8 L-CEXT-X.....	57
Figura 20. Mapa SRTM de la Península de Yucatán con EBi distribuidas.	59

Figura 21. . Ventana de la sección #Parámetros por defecto” en Radio Mobile....	59
Figura 22. Ventana de la sección “Topología” en Radio Mobile.....	61
Figura 23. Ventana de la sección “Miembros” en Radio Mobile.	61
Figura 24. Ventana de la sección “Sistemas” en Radio Mobile: se ingresan los parámetros de los equipos utilizados (ejemplo).....	62
Figura 25. Ventana de la sección “Enlace radio” en Radio Mobile: muestra las características de un enlace en particular.	63
Figura 26. Mapa de cobertura generado por RadioMobile	64
Figura 27. Cobertura de radio polar	65
Figura 28. Equipos Miembro de la red creada.....	66
Figura 29. Lista de unidades asignadas a cada red creada	67
Figura 30. Descripción de unidades en el sistema	67
Figura 31. Distribución de los nodos en la península de Yucatán en el segmento terrestre.	73
Figura 32. Enlace de radio muestra el valor de Rx relativo cuyo es valor negativo. Para la Estación Base Mérida enlazada con una Estación remota a 8Km de distancia.	75
Figura 33. Opciones de la ventana: Cobertura de Radio polar	79
Figura 34. Área de cobertura en el nodo Escárcega en la red IEEE 802.22 VHF: 1043 km ²	82
Figura 35. Área de cobertura en el nodo Escárcega en la red ITU-R M.2033 VIII-XI: 138 km ²	82
Figura 36. Datos obtenidos en la simulación para el nodo Escárcega en el enlace “peor de los casos” para la red ITU-R M.2033 VIII-XI.....	83
Figura 37. Mapa de cobertura de las Estaciones Base en el estado de Yucatán que utiliza la tecnología WiMAX. Área de cobertura 12080 Km ²	85
Figura 38. Mapa de cobertura de las Estaciones Base en el estado de Yucatán que utiliza la tecnología WRAN. Área de cobertura 6634 Km ²	85
Figura 39. Mapa de Cobertura de la Península de Yucatán (Campeche, Quintana Roo y Yucatán) para el enlace “peor de los casos” con IEEE 802.16e. Área de 22936 Km ²	87

Figura 40. Mapa de Cobertura de la Península de Yucatán (Campeche, Quintana Roo y Yucatán) para el enlace “peor de los casos” con IEEE 802.22 VHF. Área de 13432 Km ²	87
Figura 41. Distribución de radio bases de la red de contingencia	91
Figura 42. Mapa de cobertura generado por la distribución de los estaciones base en la Península de Yucatán en el enlace “peor de los casos” para la tecnología IEEE 802.16e.	95
Figura 43. Mapa de cobertura generado por la distribución de los estaciones base en la Península de Yucatán en el enlace “peor de los casos” para la tecnología IEEE 802.22.	95
Figura 44. Zona marítima en el nodo Progreso para la tecnología IEEE 802.16e: a) sin limitar, b) limitada	96
Figura 45. Variación de la potencia respecto a la distancia del nodo denominado “Candelaria” en el enlace “peor de los casos” para IEEE 802.16e e IEEE 802.22 hasta una distancia de 35 Km de la estación base	97
Figura 46. Potencia de recepción en la simulación del nodo base denominado “Candelaria” para las tecnologías IEEE 802.16e e IEEE 802.22 en el “Peor de los casos”	98
Figura 47. Potencia de recepción en la simulación del nodo base denominado “Candelaria” para las tecnologías IEEE 802.16e e IEEE 802.22 en el “Peor de los casos” donde los valores por debajo del umbral de sensibilidad fueron eliminados	98
Figura 48. Mapa de cobertura generado para IEEE 802.16e para el nodo candelaria en el enlace “peor de los casos”. Las circunferencias en la figura que aumentan en 5 Km de radio.	99
Figura 49. Mapa de cobertura generado para IEEE 802.22 para el nodo candelaria en el enlace “peor de los casis”. Las circunferencias en la figura que aumentan en 5 Km de radio.	99
Figura 50. Nodo: Tekax. Tecnología: IEEE 802.22. Enlace: Tx-Rx.....	100
Figura 51. Gráfica de la variación del SNR respecto a la distancia para el nodo Tekax en el enlace “peor de los casos” para IEEE 802.16e e IEEE 802.22	102
Figura 52. Gráfica de la variación del SNR respecto a la distancia para el nodo Tekax en el enlace “peor de los casos” para IEEE 802.16e e IEEE 802.22 con valores de SNR >0 dB.	102
Figura 53. Valores de SNR y tasa de transferencia correspondiente para IEEE 802.16e. Resultados obtenidos para el nodo Tekax.....	104

Figura 54. Valores de SNR y tasa de transferencia correspondiente para IEEE 802.22. Resultados obtenidos para el nodo Tekax.....	105
Figura 55. CentralM. Potencia de recepción con IEEE 802.16e en el rango $-98.29 \leq P_{RX} < -94.89$	106
Figura 56. CentralM. Potencia de recepción con IEEE 802.22 en el rango $-97.89 \leq P_{RX} < -96.09$	107
Figura 57. Distancia de alcance promedio IEEE 802.16e	108
Figura 58. Distancia de alcance promedio IEEE 802.22	109
Figura 59. Antena transmisora/receptora para banda L	140
Figura 60. Ubicación de las estaciones base en la península Red 1.0	141
Figura 61. Patrón para reúso de frecuencias en el satélite MEXSAT (SCT, 2011)	146

Lista de abreviaturas

ABC (*Always Best Connected*): Siempre Mejor Conectado.

AEM: Agencia Espacial Mexicana.

ARTES (*Advanced Research in Telecommunications Systems*): Investigación Avanzada en Sistemas de Telecomunicación.

BER (*Bit Error Rate*): tasa de error binario.

BGAN (*Global Area Network*): Red de área Global de Banda Ancha.

BS (*Base Station*): estaciones base.

BW (*bandwidth*): ancho de banda.

CBR (*Constant bit rate*): tasa de bit constante.

CCR: Centro de Control de Red.

CDMA (*Code Division Multiple Access*): Acceso Múltiple por División de Código.

CENAPRED: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

CISEN: Centro de Investigación y Seguridad Nacional.

CNAF: Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias.

CPE (*Customer Premises Equipment*): equipos cliente.

DOF: Diario Oficial de la Federación.

DS-CDMA (*Direct Sequence Spread Spectrum*): acceso múltiple por división de código en secuencia directa.

DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*): espectro ensanchado por secuencia directa.

DTED (*Digital Terrain Elevation Data*): Datos digitales de elevación de terreno.

DTV (*digital TV*): Televisión digital.

DVB – RCS (*Digital Video Broadcasting – Return Channel Satellite*): Difusión de Video Digital - canal de retorno por satélite.

EB: estación base.

ECM-G (*Earthquake Crisis Management For Greece*): Gestión de Crisis por terremoto para Grecia.

ESA (*European Space Agency*): Agencia Espacial Europea.

FCP: Felipe Carrillo Puerto.

FDMA (*Frequency Division Multiple Access*): Acceso Múltiple por División de Frecuencias.

FFT (*Fast Fourier Transform*): Transformada rápida de Fourier.

FHSS (*Frequency-hopping spread spectrum*): Espectro ensanchado por salto de frecuencia.

GBBF (*Ground Based Beam Forming*): Conformación de Haces en Tierra

GEO: órbita geoestacionaria.

GSM (*Global System for Mobile*): sistema global para las comunicaciones móviles.

GTOPO30 (*Global Topographic Data 30 Arc-Second Elevation*): modelo de elevación digital con una resolución de 30 segundos de arco.

HUT: Dispositivo Terminal del usuario.

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*): Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

IFT: Instituto Federal de Telecomunicaciones.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

ISMT: Terminal Móvil en Sitio de Incidente.

ISN: Instancias de Seguridad Nacional.

ITM (*Irregular Terrain Model*): Modelo de terreno irregular.

ITU (*International Telecommunication Union*): Unión Internacional de Telecomunicaciones.

LAN (*Local Area Network*): redes de área local.

LEO (*Low Earth Orbit*): órbita terrestre baja.

LLC (*Logical Link Control*): control de enlace lógico.

LOS (*line of sight*): Línea de vista

MAC (*Media Access Control*): control de acceso al medio.

MAN (*Metropolitan Area Network*): redes de área metropolitana.

Mbps: megabits por segundo.

MEO: órbita media terrestre *Medium Earth Orbit*

MITOC (*Man-Portable Interoperable Tactical Operations*): Man-portable interoperable del Centro de Operaciones Tácticas.

NB: nodos base.

NGN (*Next Generation Networking*): Red de Próxima Generación.

NOM: Norma Oficial Mexicana.

OCT: Terminal del Centro Operacional

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*): Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.

OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*): Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.

OSSO: Observatorio Sismológico del Suroccidente

PAN (*Personal Area Network*): Redes de Área Personal.

PGR: Procuraduría General de la República

PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Equivalente.

PMP (Point-to-multipoint): punto a multipunto.

PND: Plan Nacional de Desarrollo.

POG: Posición Orbital Geoestacionaria.

PPDR (*Public Protection and Disaster Relief*): protección pública y las operaciones de Socorro.

PSDR (*Public Safety and Disaster Recovery*): Seguridad Pública y Atención de Desastres.

PTP (Point to Point): punto a punto.

PTU: Terminal del Centro Operativo.

QoS (*Quality of Service*): Calidad del Servicio.

RTP (*real time protocol*): protocolo en tiempo real.

SEDENA: Secretaría de la Defensa Nacional.

SEGOB: Secretaría de Gobernación.

SEMAR: Secretaría de Marina

snm: sobre el nivel del mar.

SNR (*Signal to Noise Ratio*): Relación señal a ruido

SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*): Misión Topográfica Shuttle Radar.

SSP: Secretaría de Seguridad Pública

STICK (*Satellite-Terrestrial Integrated Communications Kit*): Kit Integrado de Comunicaciones Terrestre-Satelital.

TCP/IP (*Transmission Control Protocol e Internet Protocol*): Protocolo de Control de Transmisión y Protocolo de Internet.

TDD (*Time Division Duplex*): duplexado por domino del tiempo.

TDMA (*Time Division Multiple Access*): Acceso Múltiple por División de Tiempo.

TETRA (*Trans European Trunked RAdio*): sistema móvil digital de radio

TIA (*Telecommunications and Integrated Applications*): Telecomunicaciones y Aplicaciones Integradas.

TR: Terminales Remotas.

T-SAT: Terminal satelital.

UGS (*Unsolicited Grant Service*): Servicio garantizado no solicitado.

UHF (*Ultra High Frequency*): frecuencia ultra alta.

UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*): Sistema universal de telecomunicaciones móviles.

UNISDR (*United Nations Office for Disaster Risk Reduction*): Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres.

VBR (*Variable Bit Rate*): tasa de bit variable.

VHF: (Very High Frequency): frecuencia muy alta

VoIP (*Voice over IP*): voz sobre IP.

VSAT (*Very Small Aperture Terminal*): Terminal de Apertura Muy Pequeña

WBAN (*Wireless Body Area Network*): Redes inalámbricas de area corporal

WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*): interoperabilidad mundial para acceso por microondas

WISECOM: *Wireless Infrastructure over Satellite for Emergency Communications Coordinator*.

WLAN (*Wireless Local Area Network*): Redes inalámbricas de area local.

WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*): Redes Inalámbricas de Área Metropolitana.

WMN (*Wireless Mesh Network*): Redes inalámbricas malladas.

WPAN (*Wireless Personal Area Network*): Redes Inalámbricas de Área Personal.

WRAN (*Wireless Regional Area Network*): Redes Inalámbricas de Área Regional.

WSA: *White Space Alliance*.

Capítulo 1 - Introducción

1.1 Introducción general

La interrupción de las telecomunicaciones, ya sea de manera parcial o total, representa un desafío durante las situaciones de emergencia y desastre. Las redes de telecomunicaciones durante una emergencia para los sistemas oficiales de seguridad pública son esenciales, ya que proporcionan los servicios cualificados con capacidad para de coordinar las actividades de evaluación y salvamento de víctimas, así como de realizar la evaluación de daños y de contención en el mayor grado posible durante las primeras horas y días posteriores del evento.

El propósito de contar con una infraestructura de comunicación para el personal de emergencia corresponde a la necesidad de establecer vínculos para el intercambio de información diversa y vital a partir de ubicaciones remotas para indicar el tipo de ayuda requerida y dirigirla a donde se necesite (Townsend y Moss, 2005).

Entre las primeras acciones que se llevan a cabo durante la respuesta a una situación de emergencia, es típicamente el despliegue de comunicaciones inalámbricas (teléfonos celulares o radios móviles), sin embargo, la destrucción o la disponibilidad extremadamente limitada, de la infraestructura tradicional de comunicaciones de la región impide que los equipos se puedan conectar a la red troncal de comunicaciones locales y globales; es casi imposible compartir y utilizar los recursos de ayuda a través de las tecnologías de información. Esta realidad hace que sea crítico para el gobierno y las unidades de emergencia locales tener acceso a una red de comunicaciones inalámbrica que no dependa de la infraestructura terrestre local. Se requiere un nuevo conjunto de herramientas de comunicación para mejorar significativamente la respuesta y la eficacia de las operaciones de auxilio, rescate y recuperación, por ello la propuesta de una red de contingencia representa la forma de apoyar las telecomunicaciones en situaciones de emergencia.

En una red de contingencia, las comunicaciones utilizando satélite proporcionan una solución viable, rápida y de manera fiable al proporcionar acceso conectividad local, regional e internacional desde cualquier lugar a los usuarios; al desplegarse rápidamente en cualquier ubicación incluyendo áreas remotas e islas aisladas, lo

que implica una gran ventaja en la recolección de información de emergencia sobre desastres y la notificación inmediata a cada terminal.

Así mismo, un sistema de comunicaciones dedicado incluyendo su propia capacidad satelital, puede proporcionar servicios de calidad y una red segura para la protección, integridad y autenticación de los datos y el tráfico de voz. Ofrece, a la vez, la plena movilidad en el lugar del desastre para los equipos de rescate y la conectividad de banda ancha dentro de un área de cobertura (Lee, Ku, y Ahn, 2010) (Iapichino, G.; Bonnet, C.; del Rio Herrero, O.; Baudoin, C.; Buret, I., 2008).

1.2 Motivación del trabajo

México es un país diverso en aspectos geográficos y de clima. Está ubicado en la parte meridional de América del Norte y se encuentra rodeado por el océano Pacífico al oeste y al este por el golfo de México y el Mar Caribe. Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en su último censo de 2010 indica que, la población mexicana es de 112 336 538 de habitantes; un aproximado de 57 habitantes por km². Dicha población se encuentra expuesta a todo tipo de peligros de tipo natural, en este trabajo se enfoca de manera particular en los huracanes.

La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, por sus siglas en inglés) en un informe presentado sobre el impacto de los desastres en América Latina y el Caribe (1990-2011) (UNISDR y OSSO, 2013) indica que la mayoría de las personas fallecidas en los desastres naturales son a causa de los sismos, sin embargo, se registra un mayor número población afectada por fenómenos hidrometeorológicos. La experiencia en todo el mundo muestra que es durante la respuesta inmediata a la crisis cuando se presentan los principales problemas y donde la comunicación y la coordinación de carácter logístico son los principales desafíos experimentados (HIID e INCAE, 1998) (Jones, Karagiannis, y Heemstra de Groot, 2005).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es el organismo en México encargado de crear, gestionar, promover y evaluar políticas públicas para la reducción de riesgos, coordinar sistemas de información de riesgos y sistemas de alerta, bajo las atribuciones que le confiere la Ley General de Protección Civil. Para ello conforma el Atlas Nacional de Riesgos; un sistema que integra información

sobre fenómenos perturbadores a los que está expuesta una comunidad y su entorno (Valdés González, 2014).

En 2001 el CENAPRED realizó un diagnóstico de peligro e identificación de riesgos de desastre en México, en este estudio se indica que un 60% del territorio nacional es afectado por ciclones, de los cuales, el grado de riesgo es muy alto en algunos estados; de manera especial en el sureste de la república mexicana (CENAPRED, 2001). El Atlas Nacional de Riesgos en su base de datos tiene identificadas ya dichas zonas (figura 1).

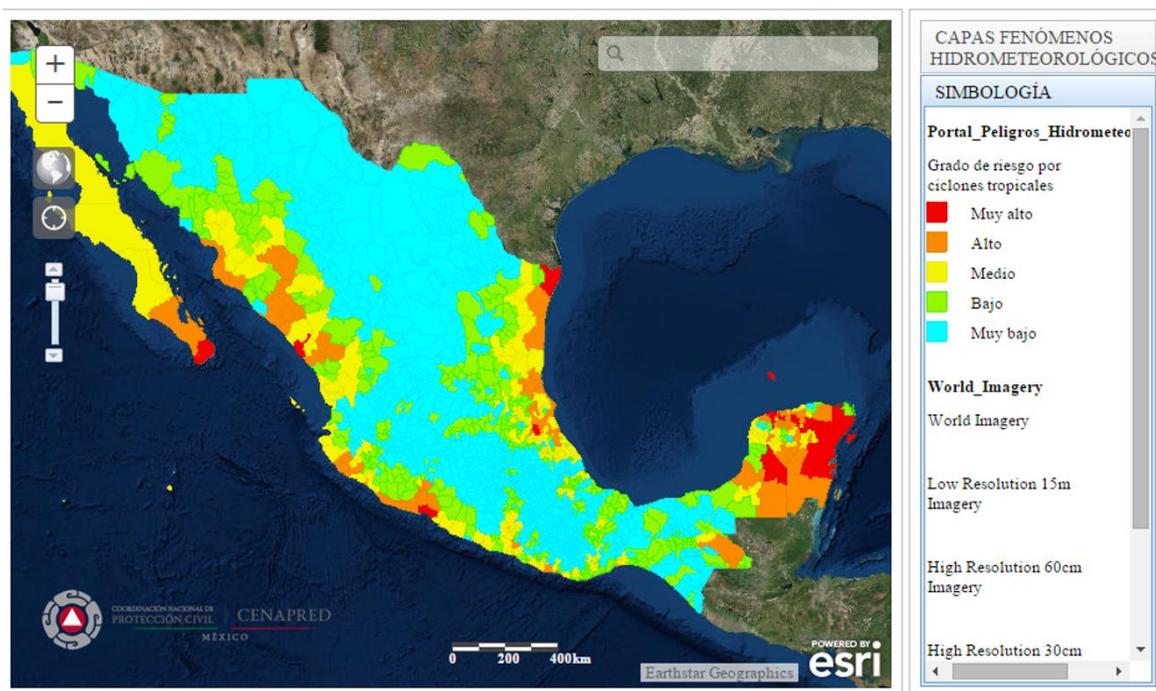


Figura 1. Mapa de grado de riesgo por ciclones tropicales (CENAPRED, 2015)

La gestión del riesgo de desastres incluye la suma total de todas las actividades, programas y medidas que se pueden tomar antes, durante y después de un desastre con el fin de evitarlo, reducir su impacto o recuperarse de sus pérdidas. A través de los sistemas de alerta temprana se puede conocer las trayectorias de estos fenómenos meteorológicos y preparar a la población ante el riesgo latente, para que durante el evento se tenga el menor número de víctimas mortales, esto es comúnmente conocido como fase de alerta (ver figura 2).

Ante el embate inminente de un huracán y su paso a través del territorio nacional se compromete toda la infraestructura de la región afectada, entre los que se

encuentra el sistema de telecomunicaciones, ya sea parcial o totalmente, incluso puede quedar intactas pero no estar disponibles para su pronta operación. Son estos servicios los que se vuelven esenciales durante la fase de respuesta ante el desastre. Se requiere la comunicación, coordinación y flujo de información entre protección civil, policías, equipos de rescate, gobierno, entre otros para la gestión de la crisis.

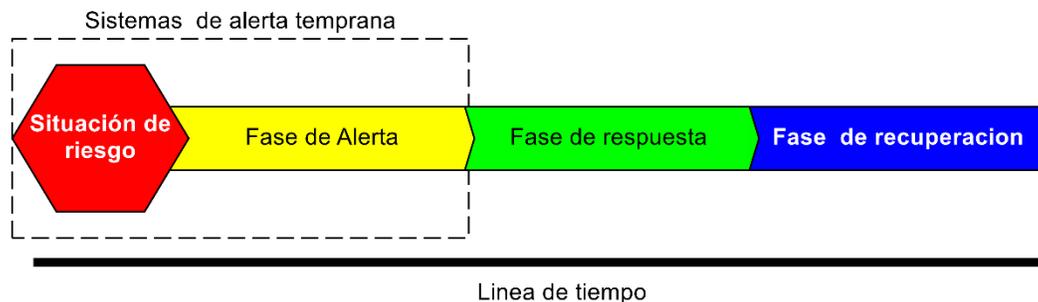


Figura 2. Fases de la gestión de la desastre.

En la fase de recuperación, se sigue la evaluación de los daños (infraestructura y económica) pero lo principal es el auxilio a la población vulnerable.

El gobierno ha realizado extensas acciones enfocadas a la atención y recuperación ante los desastres, a través de la actuación del Sistema Nacional de Protección Civil por ello dentro de los objetivos de “México en Paz” en el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2013-2018, se indica que es importante “salvaguardar a la población, a sus bienes y a su entorno ante desastre de origen natural o humano” con gestión de emergencias y atención eficaz a desastres (Objetivo 1.6 del PND) con una línea de acción para coordinar los esfuerzos de los gobiernos federales, estatal y municipal en caso de emergencias y desastres naturales” (SEGOB, 2012).

1.3 Planteamiento del problema

Ante el problema de la dependencia de la infraestructura terrestre local en una situación de emergencia, mediante el uso e integración de radio bases portátiles y estaciones terrenas transportables se puede habilitar una red de contingencia que permita la comunicación multimedia entre diferentes estancias de gobierno para enviar y recibir información urgente entre los dispositivos móviles en el campo y la

sede y así brindar una respuesta efectiva e inmediata en situaciones de desastre ocasionado por huracanes.

1.4 Objetivo de la tesis

Proponer una arquitectura de red de comunicaciones inalámbricas híbrida (terrestre-satelital) de contingencia con estaciones que utilicen radio bases portátiles (estaciones base) y estaciones terrenas transportables (estaciones remotas) para situaciones de desastre por huracanes y definir una tecnología mínima necesaria de comunicaciones para las estaciones base y estaciones terrenas a fin de contar con los elementos necesarios de comunicación inalámbrica básica.

1.5 Alcances y limitaciones

El presente trabajo aborda la arquitectura de una red de contingencia en situaciones de huracán para la Península de Yucatán, conformada de los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán.

En este trabajo se abordan las comunicaciones inalámbricas especificadas por los estándares del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés) en conjunto con enlaces especificaciones para satelitales. La red de contingencia propuesta debe ser híbrida, conjuntar tecnología terrestre y satelital, por lo que resulta necesario conocer el estado del arte de las tecnologías disponibles.

1.6 Metodología de la investigación

Este trabajo está basado en estudio del estado del arte de las redes híbridas terrestres y satelitales. Para proponer la red de contingencia se analizan e indican los parámetros del escenario propuesto, la estructura de la red de contingencia, el área de cobertura alcanzada y el rendimiento que puede proporcionar el sistema.

1.7 Organización del trabajo

A través de cinco capítulos se aborda todo el desarrollo del presente trabajo, en el actual se trató el motivo por el cual se propone la red de contingencia. En el siguiente

capítulo se hará una revisión del estado del arte de las redes híbridas y su uso en situaciones de desastres, las tecnologías de comunicación inalámbrica terrestre y satelitales disponibles. En el capítulo tres se aborda la metodología empleada para proponer nuestra red de contingencia, los parámetros del escenario propuesto, características y especificaciones de los elementos presentes en la estructura para así construir la red de contingencia.

En el cuarto capítulo se presentan la simulación, los resultados y el análisis de nuestro modelo de red de contingencia, de cuyo análisis se presentan las conclusiones para la red de contingencia propuesta que se indican en el capítulo cinco así como algunas reflexiones para un trabajo futuro en el tema. Como último capítulo se presentan las conclusiones, aportaciones y trabajo futuro en el tema.

Capítulo 2 – Estado del arte en redes híbridas de comunicación.

2.1 Introducción

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés) define una Red de Próxima Generación (NGN, por sus siglas en inglés) como una red basada en la transmisión de paquetes, capaz de proveer servicios de telecomunicaciones y de explotar al máximo el ancho de banda del canal, al usar las tecnologías de Calidad del Servicio (QoS) de modo que el transporte sea totalmente independiente de la infraestructura de red utilizada (ITU, 2004). Además, ofrece acceso sin restricciones a diferentes proveedores de servicio como apoyo a la movilidad, lo que permite la prestación coherente y ubicua de los servicios a los usuarios, manteniendo el concepto de separación entre transporte, servicios y aplicaciones (ITU, 2005). La ITU define en el marco de las NGN a las Redes Híbridas, donde el principal interés, es explorar la cooperación de diferentes sistemas de comunicación que integran los aspectos tecnológicos más poderosos de comunicaciones por satélite y terrestres inalámbricos, de acuerdo con el paradigma *Siempre Mejor Conectado* (ABC¹), (Kota, Giambenel, y Sooyung, 2011). En el estudio del estado del arte de las tecnologías para redes de emergencia, las redes híbridas, se erigen como una forma de construir redes de telecomunicaciones para cuando la infraestructura utilizada de manera tradicional no está disponible total o parcialmente. Estas redes híbridas están interconectadas y forman arquitecturas cuyo periodo de funcionamiento suele ser temporal y operan de manera independiente una de otra. Su uso potencial es en casos de desastres naturales.

El objetivo de este trabajo es proponer una arquitectura de red híbrida de contingencia en situaciones de desastres naturales en eventos meteorológicos como huracanes.

¹ *Always Best Conected*

2.2 Redes híbridas: estado del arte.

En relación a las redes híbridas y su inclusión dentro de las NGN, para proponer una red de contingencia para casos de desastres ocasionados por huracanes, es necesario considerar las tecnologías comunicaciones tanto terrestres como satelital o la combinación de ambas así como las distintas configuraciones que adquieren, por tal motivo, en este capítulo se presenta un análisis de los aspectos tecnológicos que rodea a estas redes, donde es importante destacar los esfuerzos nacionales e internacionales de institutos o empresas en esta área.

Un ejemplo de estas redes de NGN y aplicado a nuestro país, es el propuesto por (Colín, Álvarez, y Serrano, 2015) quién plantea el diseño de un modelo de red NGN, que considera la integración de diferentes redes de acceso inalámbrico (fijo y móvil) y alámbricas, para proporcionar acceso telefónico a zonas rurales remotas y aisladas de México, catalogadas como vulnerables por no disponer de servicios básicos de salud, educación en comparación con las zonas urbanas; todo a través de la infraestructura de e-México (ahora México Conectado) proyecto de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) que busca ofrecer las herramientas y oportunidades de mejora de la calidad de vida de los mexicanos por medio de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC).

En particular, la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) a través de su dirección de Telecomunicaciones y Aplicaciones Integradas (TIA, en inglés) desarrolla el programa de Investigación Avanzada en Sistemas de Telecomunicación (ARTES, por sus siglas en inglés) el cual apoya a la industria europea y canadiense en explorar, a través de la Investigación y el Desarrollo (I+D), conceptos innovadores para elaborar productos y servicios de comunicaciones por satélite de última generación, especialmente en el área de Ayuda en Desastres y Manejo de Emergencias (ESA, 2015).

Entre sus proyectos, se encuentra SkyPlexNet, que explota el poder de las imágenes por satélite para proporcionar asistencia durante desastres naturales a las autoridades de Protección Civil en Piamonte Italia. Además los servicios de rescate italianos pueden utilizar la red para coordinar las operaciones entre las unidades de emergencia y una Autoridad Central sobre todo el país, lo que permite una cobertura de la totalidad de Europa y la cuenca mediterránea (ESA, 2007).

El proyecto STICK (*Satellite-Terrestrial Integrated Communications Kit*), un prototipo desarrollado por la compañía española GTD; tiene como objetivo proporcionar capacidad de comunicaciones de banda ancha para la Protección Pública y los equipos de ayuda ante desastres, a través de nodos de red que se conectan entre sí con puentes inalámbricos punto a punto (PTP) o punto a multipunto (PMP) con línea de vista (LOS, por sus siglas en inglés) sobre uno o más saltos, que una vez desplegados se ponen en contacto con el Centro de Gestión de la Red a través del enlace satelital (ESA, 2014).

La compañía griega Aratos Technologies debido múltiples retrasos de actividades, en 2009 da por terminado el proyecto ECM-GR (*Earthquake Crisis Management For Greece*), que tenía como objetivo diseñar un servicio integrado para los departamentos de Protección Civil basado en datos de observación de la Tierra, las tecnologías SIG (Sistema de información geográfica, en inglés) y las telecomunicaciones por satélite en el caso de desastres naturales o de origen humano o aplicaciones de telemedicina. La arquitectura general del sistema ECM-GR consta de tres componentes principales: i) Terminal del Centro Operativo (PTU), ii) Terminal Móvil en Sitio de Incidente (ISMT), y iii) Dispositivos Terminales del usuario (HUTs). El Centro Terminal Operacional (OCT) se encuentra en la Sede de comando y tiene por objeto a proporcionar los medios para la evaluación rápida situación y gestión de desastres, así como la coordinación de los equipos de rescate. El ISMT se encuentra en el lugar del incidente y se centra en la prestación de servicios de comunicación entre el lugar del incidente y la OCT. El ISMT establece comunicación con los PTU a través de un enlace vía satélite y transmite los datos necesarios para los servicios prestados desde la OCT. Además, el ISMT establece a través de la red WiFi, la comunicación TCP/IP con los HUTS que están en manos de los miembros del equipo de rescate, y así transmitir datos de voz, imágenes y video digital, así como datos de posicionamiento GPS y datos de identificación (ESA, 2014).

El proyecto WISECOM², cofinanciado por la Comisión Europea, despliega una arquitectura conformada por un segmento espacial y un segmento terrestre en el cual se estudia, desarrolla y valida las infraestructuras de comunicaciones de peso

² Wireless Infrastructure over Satellite for Emergency Communications Coordinator.

ligero y rápido despliegue para las condiciones de emergencia (después de una amenaza natural o industrial) e incorpora los servicios basados en la localización. El sistema integra varias redes de radio móviles terrestres (GSM, UMTS, WiFi, y, opcionalmente, WiMax y TETRA) a través de satélite (Inmarsat BGAN³ y sistemas DVB-RCS⁴). La infraestructura debe cubrir las necesidades inmediatas en las primeras horas y días después del desastre, al igual que las necesidades a largo plazo, durante la fase de recuperación y reconstrucción después de una emergencia (Thomasson, et al., 2008).

El Departamento de Seguridad Nacional de Estados Unidos y su programa SAFECOM, trabaja con los programas federales de comunicaciones existentes y los principales actores claves en la respuesta ante emergencias para hacer frente a la necesidad de desarrollar mejores tecnologías y procesos para la coordinación de los sistemas existentes de comunicación y redes futuras. En este marco (Yarali, Ahsant, y Rahman, 2009), describe las capacidades y la arquitectura del sistema de comunicaciones “*Man-portable interoperable*” del Centro de Operaciones Tácticas (MITOC) usado en Seguridad Pública y Recuperación de desastres (PSDR, *Public Safety and Disaster Recovery*) del Departamento de Seguridad Nacional de Estados Unidos. Este sistema utiliza en el segmento de comunicaciones satelitales, una terminal VSAT para proveer conexiones a internet y en el segmento terrestre integra WiMAX y WiFi para formar redes malladas inalámbricas (WMN, *Wireless Mesh Network*) que pueden proporcionar cobertura en grandes áreas sin depender de una infraestructura de red troncal cableada o puntos de acceso dedicados.

De igual manera la ITU en 2003, presenta un Informe (ITU-R M.2033) para determinar los objetivos, las aplicaciones, los requisitos, y soluciones destinadas a facilitar el interfuncionamiento de la protección pública de operaciones de socorro (PPDR, por sus siglas en inglés) para la puesta en práctica de soluciones de futuro avanzadas que satisfagan las necesidades operaciones de las organizaciones de PPDR (ITU, 2003).

³ Broadband Global Area Network

⁴ Digital Video Broadcasting – Return Channel Satellite

2.3 Redes híbridas: análisis de la tecnología.

Tanto los proyectos internacionales como nacionales de redes híbridas presentados anteriormente, muestran coincidencias en el uso de tecnologías inalámbricas terrestres y satelitales, por lo que se hace necesario analizar tanto la tecnología e infraestructura en dichos campos con la finalidad de proponer una red para contingencia.

En esta sección se abordan aspectos técnicos relevantes para la propuesta de red híbrida de contingencia, englobados en dos segmentos de comunicación interconectados: el espacial y el terrestre.

2.3.1 Red de comunicaciones espaciales

Se le conoce como segmento espacial al conformado por el sistema satelital y las estaciones terrenas que permiten la comunicación desde y hacia el satélite. Estos satélites, son repetidores de comunicaciones que están destinados a proporcionar comunicaciones de manera simple, rápida y fiable desde cualquier lugar sobre la superficie del globo terráqueo (Lee, Ku, y Ahn, 2010).

Para el diseño de una red de comunicación con satélites deben considerarse una serie de componentes, cuya elección determina el desempeño del sistema. Los componentes son: posición orbital, área de cobertura, tipo de servicio, frecuencia, método de acceso, potencia, anchura de banda, modulación, codificación, tasa de transferencia, tipo de servicio y topología, algunos de las cuales se describen en los siguientes apartados de este capítulo.

2.3.1.1 Posición orbital

Referido como la longitud de una posición en que son colocados los satélites, determina en buena parte el uso al que estarán dedicados. Dicha posición en los que son colocados impacta directamente en el periodo orbital, debido a la distancia a la tierra: mientras más cerca esté, más corto es el periodo.

Son tres las posiciones orbitales mayormente utilizadas: la órbita geoestacionaria (GEO, por sus siglas en inglés), órbita media terrestre (MEO, *Medium Earth Orbit*) y órbita terrestre baja (LEO, *Low Earth Orbit*).

Los satélites en órbita GEO, son los únicos que tienen una posición fija a 36,000 km sobre el ecuador terrestre, con un periodo de rotación de 24 horas alrededor de la tierra, un día terrestre. Debido a esta distancia la señal tienen una latencia de 0.24 segundos. Un sólo satélite cubre 1/3 de la superficie terrestre, lo que representa ventajas para adquirir imágenes del espectro visible e infrarrojo de la superficie, y atmósfera de la Tierra y su uso en sistemas de telecomunicaciones.

Los satélites en órbita MEO se posicionan a una distancia aproximada entre 6000 y 11000 kilómetros de la Tierra, se utilizan mayormente para navegación y sistemas de posicionamiento geográfico, por ejemplo GPS (Sistema de posicionamiento global por sus siglas en inglés). Son necesarios de 10 a 15 satélites para abarcar todo el globo terráqueo.

Los satélites LEO operan en orbitas entre los 780 y 1500 km, por lo que su latencia es casi despreciable (0.03s), debido a que la visibilidad es reducida desde una estación en tierra se requieren más satélites para cubrir la tierra en comparación con los MEO y gran parte del espectro se desaprovecha al cubrir los océanos, esto implica un alto costo (Alcaraz Espín, Sanchez Medina, y Urios Perez, 2003). Su principal uso es para telefonía móvil, teledetección (*remote sensing*), investigación espacial, vigilancia, meteorología y experimentación científica.

Ya que la posición orbital determina el número de satélites utilizados para cubrir la tierra, implica que al transmitir señales desde un satélite esta cubre ciertas zonas geográficas, dicha área se denomina área de cobertura.

2.3.1.2 Área de cobertura

El área de cobertura dada por un satélite se le conoce como “huella satelital”, que depende de la potencia de la señal en cada área. Dicha potencia es denominada potencia isotrópica radiada (*PIRE*), cuya importancia radica en la calidad de la señal lograda en la recepción y su valor es dado por el fabricante o por el operador, ecuación (1). Las huellas satelitales consisten en curvas de nivel que indican la potencia y son mayores en las áreas hacia donde apunta la antena directamente y más débiles fuera de esas áreas. También a través de las curvas de nivel se puede conocer factores como ganancias y permiten aplicar ajustes por medio de los factores Beta (β) que es la diferencia entre la ganancia en el borde del haz del satélite y la ganancia en dirección de la estación terrena.

Anteriormente los sistemas satelitales tenían sólo una gran huella (figura 3), ahora se emplean haces puntuales (*spot beams*) para enviar diferentes señales de datos al utilizar la misma frecuencia, de tal forma que solo las estaciones de recepción en tierra de una zona geográfica en específico reciban correctamente la señal satélite. Debido a que los satélites utilizan un número limitado de frecuencias, a la capacidad de volver a utilizar una frecuencia para diferentes ubicaciones geográficas se le llama “reúso de frecuencias”.

$$PIRE = P_{TX} - G_a - L_c \quad (1)$$

$$P_{TX} = \text{Potencia de transmisión} \quad [\text{dBm}]$$

$$G_a = \text{ganancia de la antena} \quad [\text{dBi}]$$

$$L_c = \text{pérdidas del cable} \quad [\text{dB}]$$

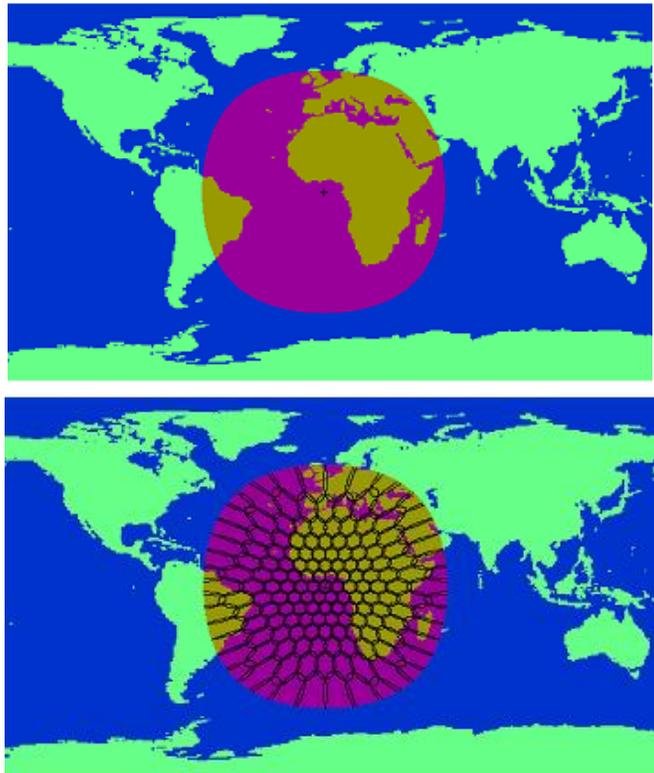


Figura 3. Área de cobertura, sin spotbeams (superior) con spotbeams (inferior) (Wood, 1998)

Las condiciones atmosféricas, de ubicación y la frecuencia de operación elegida influyen en el diseño de la red y en la tasa de datos de cada enlace. Una cobertura optimizada permite tener ahorros en las estaciones terrenas y en servicios.

2.3.1.3 Tipo de servicio

Los servicios de radiocomunicaciones espaciales de acuerdo al Reglamento de Radiocomunicaciones se refiere a la transmisión o recepción de ondas de radio para aplicaciones de telecomunicaciones específicas como *Fixed Satellite Service* (FSS); *Mobile Satellite Service* (MSS); *Broadcasting Satellite Service* (BSS); *Earth Exploration Satellite Service* (EES); *Space Research Service* (SRS); *Space Operation Service* (SOS); *Radiodetermination Satellite Service* (RSS); *Inter-Satellite Service* (ISS) y *Amateur Satellite Service* (ASS), (Maral, 2011). Tanto los servicios fijos (FSS), los servicios móviles (MSS) y los de radiodifusión por satélite son los más utilizados. Ver anexo 1 para la descripción de los servicios mencionados.

2.3.1.4 Frecuencias de operación

La designación de una posición orbital es atribución de la ITU, al mismo tiempo gestiona la utilización de radiofrecuencias de operación "a fin de evitar toda interferencia perjudicial entre las estaciones de radiocomunicaciones de los distintos países" (Lewis, 2015) por lo que la porción del espectro electromagnético asignado se convierte en un recurso de importancia para los países.

Es importante destacar que en comunicaciones satelitales se utilizan varios umbrales de frecuencia para operación. La elección del mismo define su desempeño, determina la infraestructura terrestre como antenas equipo transmisión, etc., pero al mismo tiempo expone sus desventajas por la degradación de la señal ante los efectos provocados por las condiciones atmosféricas a frecuencias elevadas. Las bandas de frecuencia de operación utilizadas así como los servicios a que se asignan se muestran en la tabla 1.

Para comunicaciones móviles entre personas, transportes terrestres, marítimos y aéreos, aún en condiciones de climatológicas adversas, se utiliza la banda L, lo cual requiere equipos terrestres con menor potencia pero tiene poca capacidad de transmisión de datos. La banda C tiene mejor rendimiento ante los efectos climatológicos pero el costo es elevado. La banda Ku transporta gran cantidad de

datos pero la mayoría de las posiciones orbitales ya están adjudicadas. La banda Ka requiere transmisores muy potentes, es sensible a interferencias climatológicas y transporta gran cantidad de información. El uso de frecuencias diferentes para los enlaces de subida y de bajada evita interferencia entre las señales de enviadas desde y hacia el satélite.

Tabla 1. Banda de frecuencias

Banda	Rango de frecuencias (MHz)		Servicios ⁵
	Uplink	Downlink	
L	1626.5 - 1660	1525 - 1559	BSS, MSS, RNSS
S	2110 -2120	2290 - 2300	BSS
C	5925-6425	3700-4200	FSS
X	7900-8395	7250-7745	FSS, MSS
Ku (América)	FSS: 14000-14500 BSS: 17300-17800	FSS: 11700-12200 BSS: 12200-12700	FSS, BSS
Ka	27500-30000	17700-21200	FSS, MSS

FSS=Servicio Fijo por Satélite; MSS= Servicio Móvil por Satélite; BSS=Servicio de Radiodifusión por Satélite; RNSS=Servicio de Radio Navegación por Satélite, por sus siglas en inglés.

2.3.1.5 Topología

La topología de una red, sea lógica o física, determina la configuración y distribución de las conexiones entre nodos para intercambiar datos. Las redes satelitales se caracterizan por tener una topología malla, estrella o múltiple estrella donde los nodos son estaciones terrenas, equipos terminales o nodos centrales o hubs.

En una red mallada (figura 4a), cada nodo es capaz de comunicarse con todos los demás nodos a través de enlaces satelitales en un solo “salto de satélite” por lo que el retraso es mínimo. En una red estrella (figura 4b), cada nodo puede comunicarse sólo con un único nodo central, a menudo llamado el Hub, donde se requieren “dos saltos de satélite”. En una topología de varias estrellas, se identifican varios nodos centrales (hubs). Los otros nodos pueden comunicarse sólo con aquellos nodos centrales.

⁵ Ver Anexo 1 para mayor descripción de los servicios satelitales ofrecidos.

Una red múltiple estrella (figura 4c), consta de estaciones terrenas que puede comunicarse únicamente con una estación central de tierra, el hub (Maral, 2011).

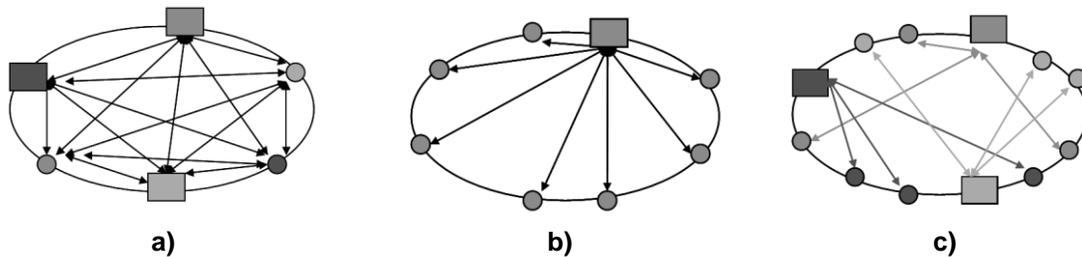


Figura 4. Topologías de red satelitales (Maral, 2011)

En términos generales, en los párrafos anteriores se revisan los elementos que conforman la plataforma del satélite, que consiste en todos los subsistemas que permiten funcionar a la carga útil. Dicha carga útil se conforma de las antenas receptoras y transmisoras, y el equipo electrónico utilizado para la transmisión de las señales. En algunos de estos elementos no se puede inferir pero existen otros que dependen de la elección para su funcionamiento y parte de servicios.

2.3.1.6 Técnicas de acceso al servicio satelital

Técnica de acceso se refiere al método por el cual los usuarios comparten un mismo recurso simultáneamente. Elegir la técnica de acceso adecuada permite, entre otros casos, atender cierta cantidad de usuarios.

Las técnicas de acceso al medio fundamentales son: Acceso Múltiple por División de Frecuencias, FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), Acceso Múltiple por División de Tiempo, TDMA (*Time Division Multiple Access*) y Acceso Múltiple por División de Código CDMA (*Code Division Multiple Access*). Mientras que en TDMA y FDMA los recursos se dividen en ranuras de tiempo o en frecuencia para cada usuario, en CDMA todos los usuarios pueden transmitir al mismo tiempo y en la misma banda de frecuencia, ya que a cada usuario se le asigna un código pseudoaleatorio. Depende del código asignado a cada usuario puede ser en dos modalidades, acceso en secuencia directa o de salto en frecuencia. Una secuencia que codifica su transmisión con una palabra única binaria (código de chip) a esta modalidad se denomina DS-SS (*Direct Sequence Spread Spectrum*, DSSS); la segunda se llama salto en frecuencia (*Frequency-hopping spread spectrum*, FHSS),

en la cual los códigos determinan los saltos en frecuencia de la señal durante un intervalo de tiempo.

2.3.1.7 Modulación y codificación

El propósito de elegir una modulación y codificación se liga a la probabilidad de error (BER: Bit Error Rate) que es un objetivo de la calidad del enlace en el sistema y su disponibilidad.

La codificación pretende detectar y corregir errores, transformar una determinada información en un mensaje mediante el uso de un código de corrección de errores hacia adelante (FEC) pero esto a expensas de aumentar el ancho de banda (B). La ganancia de codificación representa la reducción de la potencia utilizada y esta cantidad de potencia puede ser representada por la relación energía de bit a ruido E_b/N_0 , esencial en las comunicaciones digitales, la cual depende de tres características: BER, la modulación y la codificación utilizadas.

Las modulaciones adoptadas por las transmisiones vía satélite son generalmente en fase binaria (BPSK) y en fase cuaternaria (QPSK), se requiere la misma potencia en ambos, con la diferencia que en este último se requiere sólo la mitad del ancho de banda que el primero. Otras modulaciones adoptadas son 8PSK, 8QAM y 16QAM. Utilizar técnicas de modulación, incrementa la velocidad de datos (número de bits) para un mismo ancho de canal de radiocomunicación.

A partir de estos elementos se puede calcular la tasa de símbolos con (2) (W6ZE, 2010).

$$SR = \frac{DR}{M \cdot CRV \cdot CRRS} \quad (2)$$

donde

SR = tasa de símbolos, DR = tasa de información, M = factor de modulación
y en BPSK, $M = 1$; QPSK, $M = 2$; 8PSK, $M = 3$; 8QAM, $M = 3$; 16QAM, $M = 4$

CRV = Viterbi Forward Error Correction (FEC), $\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{5}{6}, \frac{7}{8}$

$CRRS=188/204$, denominado Reed Solomon de corrección de errores hacia adelante (FEC).

2.3.1.8 Tasa de transferencia

La tasa de transferencia de datos es la cantidad de bits transferida en cierto periodo de tiempo en un sistema; también se usa el término “tasa de bits” para referirse a ella. En un enlace de telecomunicaciones se desea que con el mínimo uso de recursos, el beneficio sea máximo, esto es, una tasa de bits óptima al usar la mínima potencia. La tasa de bits de información R_b se determina por el servicio o actividad para ser soportado por el enlace de comunicaciones y está relacionada con la relación de densidad de ruido (C/N_0), la anchura de banda de ruido (B_N) y la energía por bit con proporción a la densidad de ruido (E_b/N_0) través de la relación fundamental

$$\frac{E_b}{N_0} = \left(\frac{C}{N_0} \right)_{total} \left(\frac{B_N}{R_b} \right) \quad (3)$$

2.3.1.8.1 Ancho de banda ocupado

El Ancho de Banda asignado es un rango de frecuencias específico al considerar las características propias de la señal a ser transmitida. Un ancho de banda ocupado es el espacio que utiliza una señal de radiofrecuencia para ser retransmitida por el satélite. En la ecuación (4) se indica cómo se calcula el ancho de banda ocupado. Para controlar ese ancho de banda ocupado se utiliza el factor conocido como factor de roll-off (α).

$$B_{oc} = \frac{R_b}{FEC \cdot M} (1 + \alpha) \quad (4)$$

$\alpha=0.35$ valor propuesta por el estándar el Comité de Sistemas de Televisión Avanzada (ATSC, por sus siglas en inglés)

2.3.1.8.2 Back-off

Un amplificador de potencia al entregar a su salida el máximo de potencia posible, opera en su punto de saturación; pero conlleva el riesgo de operar en zonas no lineales, para que el punto de operación de un amplificador de potencia esté lo más cerca posible a la región de operación lineal, se incluye un valor de denominado back-off para garantizar esta zona.

2.3.1.9 Flota satelital mexicana

A través de la ITU, México obtuvo por adjudicación el derecho a ocupar y explotar las posiciones orbitales y sus bandas asociadas para el servicio de radiodifusión por satélite, 69° Oeste, 77° Oeste, 127° Oeste y 136° Oeste, la mitad del territorio nacional se cubre desde cada una de esas posiciones, y 113° Oeste para el servicio fijo por satélite con cobertura nacional. Las cuatro primeras posiciones son para uso comercial, bajo concesión, mientras que la 113° pertenece al sistema mexicano MEXSAT el cual está destinado a comunicaciones asociadas a la seguridad nacional, la atención a la población en caso de desastres, la ampliación de la cobertura social y la reducción de la brecha digital. La tabla 2 muestra algunos características de importancia en la flota satelital MEXSAT.

Tabla 2. Flota satelital MEXSAT del Gobierno Federal (COFETEL, 2013)

POG ⁶ nominal	Satélite	Servicios	Bandas de frecuencia (MHz)		Cobertura
			Espacio-tierra	Tierra-espacio	
113°O	Centenario ⁷ (MEXSAT 1)	Móvil	10700-10950 11200-11450 (Ku)	12750-13250	Territorio nacional
			1525-1559 (L)	1626.5-1660.5	
114.9°O	Bicentenario (MEXSAT 3)	Fijo	11450-11700	6425-6725	Territorio nacional
			3400-3700	12750-13250	
116.8°O	Morelos III (MEXSAT 2)	Móvil	10700-10950 11200-11450 (Ku)	12750-13250 (Ku)	Territorio nacional
			1525-1559 (L)	1626.5-1660.5 (L)	

Los satélites MEXSAT 1 (Centenario) y MEXSAT 2 (Morelos III) son aparatos gemelos que tienen una potencia de 14 kW (Boeing, 2015). El MEXSAT 2 se lanzó el 2 de octubre de 2015, y este ocupa ahora la posición 113.1 O° (SCT, 2015), este satélite proporcionará servicios de comunicaciones móviles a cinco Instancias de Seguridad Nacional (ISN) y a diversas entidades de gobierno en los ámbitos social y productivo y tendrá cobertura en la totalidad del territorio nacional, el mar patrimonial y la zona económica exclusiva. Como parte de los servicios a prestar en el ámbito social se contempla llevar conectividad a sitios y espacios públicos del

⁶ Posición Orbital Geoestacionaria

⁷ Misión de lanzamiento falló

país a través del programa “México Conectado”, principalmente a las zonas remotas y marginadas (SCT, 2015).

La posición 113° Oeste se encuentra identificada en la UIT como MEX00000, cuyas características técnicas se describen a continuación:

Tabla 3. Adjudicación MEX00000 en 113° Oeste (COFETEL, 2013)

Frecuencia (MHZ)		P.I.R.E [dB(W/Hz)]	
Downlink	Uplink	Estación Terrena	Satélite
4500-4800	6725-7025	-4.7	-38.8
10700 – 10950 11200 - 11450	12750-13250	9.1	-23.7

El sistema de comunicaciones móviles del MEXSAT cuenta con un Sistema de Formación de Haces Píxel en Tierra (GBBF, por sus siglas en inglés) con cancelación adaptativa de frecuencias. Dicho sistema permite a los sistemas móviles satelitales la conformación de haces o celdas y reutilizar frecuencias y multiplicar así la capacidad de comunicación. El GBBF puede ser considerado como un “despachador” en tierra que asigna segmentos de frecuencia (alterados en fase y amplitud) y produce haces de diferentes contornos sobre la superficie terrestre. El sistema de cancelación de frecuencias permite cancelar la interferencia de otros operadores, usuarios no autorizados, o cualquier otra intromisión, lo que se traduce en una mayor capacidad de transmisión y en consecuencia, de usuarios (AEM y Duarte, 2012).

Otro elemento de importancia en el segmento satelital son los dispositivos que enlazan el satélite con el segmento terrestre: las terminales de comunicación vía satélite.

2.3.1.10 Terminales de comunicación vía satélite

Las terminales de comunicación vía satélite proveen acceso de banda ancha a los nodos en tierra, normalmente son empleadas las denominadas VSAT (*Very Small Aperture Terminals*), estas terminales por lo general resultan más idóneas para instalaciones permanentes que requieren un ancho de banda mayor. Las denominadas terminales BGAN (*Broadband Global Area Network*) resultan

apropiadas para un uso eventual o móvil y que operan en banda L (1-2GHZ) por lo que las condiciones climáticas no afectan el servicio.

Ambas tienen sus ventajas y desventajas, mientras VSAT necesita enfocarse a puntos específicos, lo que requiere equipos voluminosos y pesados lo cual impacta directamente en el costo de los equipos. BGAN es mucho más fácil de operar al ser compacto, portátil y fácil de usar sin requerir un posicionamiento preciso, por lo que son idóneas para utilizar en la red de contingencia a plantear. La velocidad de transmisión que actualmente alcanza BGAN es cercano a los 500 Kbps. En el Anexo 4 se muestran algunas características de equipos comerciales.

2.3.2 Segmento Terrestre

De la revisión del estado del arte (sección 2.2) y del análisis de la tecnología (sección 2.3) se coincide en la integración de dos segmentos: satelital y terrestre inalámbricos. Desde el punto de vista de las redes híbridas, contar con una red de contingencia para caso de desastre, implica contar con una red de flexible y móvil por lo cual, las tecnologías satelitales y terrestres inalámbricas representan una opción viable en su elección.

Anteriormente se revisó el segmento de comunicación satelital por lo que ahora es necesario analizar el segmento terrestre inalámbrico; del cual además, es importante considerar las características de propagación de las radiofrecuencias, debido a las pérdidas que se pueden experimentar, por el tipo de terreno, adicional a las pérdidas debido a condiciones atmosféricas. El modelo de propagación electromagnética denominado Modelo de Longley-Rice incluye parámetros para el cálculo de pérdidas debido a las condiciones atmosféricas (Hufford, Longley, y Kissick, 1982).

2.3.2.1 Estándares inalámbricos terrestres IEEE 802

El presente estudio incluye una revisión de las tecnologías terrestres inalámbricas a fin de seleccionar aquellas cuya cobertura pueda alcanzar distancias considerables y que permita la comunicación de información con la calidad requerida en casos de desastres debido a la presencia de huracán. Para ello se acude a organismos internacionales de estandarización y desarrollo en áreas técnicas para lograr una completa integración con los futuros elementos a emplear.

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés) es el encargado de desarrollar estándares y recomendaciones en áreas técnicas a través de sus distintos en grupos de trabajo. El Comité de Estándares IEEE 802 LAN/MAN desarrolla y mantiene los estándares de redes y recomendaciones prácticas para redes de área local (LAN, *Local Area Network*), redes de área metropolitana (MAN, *Metropolitan Area Network*) entre otras, mediante un proceso abierto y acreditado a nivel mundial. En la tabla 4 se detallan los principales estándares publicados para redes inalámbricas. Los estándares son válidos para 10 años después de su aprobación, pasado ese tiempo debe ser revisado o retirado (IEEE 802, 2015).

Los grupos de trabajo dedicados a las comunicación inalámbrica son el IEEE 802.11 o Grupo de Trabajo de Redes Inalámbricas de Área Local (LAN), IEEE 802.15 o Grupo de Trabajo de Redes Inalámbricas de Área Personal (PAN), IEEE 802.16 o Grupo de Trabajo de Redes Inalámbricas de Área Metropolitana (MAN) y finalmente el IEEE 802.22 o Grupo de Trabajo de Redes Inalámbricas de Área Regional (WRAN).

2.3.2.2 Estándares IEEE 802.11

Una de las redes más populares es la conocida como red WiFi (*Wireless Fidelity*) que en realidad es una red que cumple con el estándar IEEE 802.11. Los estándares IEEE 802.11 trabajan en las bandas de frecuencia 2.4, 3.6, 5 y 60 GHz, en este estándar se establecen las especificaciones para la capa física (PHY) en donde se define la modulación y características de señalización para la transmisión de datos; y la capa de enlace (compuesta por control de enlace lógico LLC y control de acceso al medio MAC) esta capa define la interfaz entre el bus del equipo y la capa física. El estándar 802.11 (ver figura 5) tiene distintas versiones surgidas de la modificación del original para optimizar el ancho de banda o especificar componentes para garantizar seguridad o compatibilidad.

En la tabla 5 se muestra un resumen de las características técnicas de las distintas versiones para 802.11.

Tabla 4. Principales estándares IEEE 802 de sistemas de comunicación inalámbricos (IEEE, 2015).

Tipo	Estándar	Descripción
Redes inalámbrica de área local	IEEE 802.11-1997	Normativa IEEE para LAN inalámbricas y especificaciones MAC (<i>Media Access Control</i>) y capa física (PHY)
	IEEE 802.11a-1999	Velocidad de datos de hasta 54 Mbps en la banda de 5 GHz
	IEEE 802.11b-1999	Velocidad de datos de hasta 11 Mbps en la banda de 2.4 GHz
	IEEE 802.11g-2003	Evolución de IEEE 802.11a-1999 en la banda 2.4 GHz
	IEEE 802.11-2007	Un sólo documento donde se revisan los estándares IEEE802.11 de 1999 hasta 2005
	IEEE 802.11n-2009	Velocidad de datos de hasta 600 Mbps, en 2.4 y 5 GHz
	IEEE 802.11ac-2013	Velocidad de al menos 1Gbps por debajo de 6 GHz
	IEEE 802.11ad-2012	Velocidades de transferencia de datos de hasta 7 Gbps a 60 GHz
	IEEE 802.11af-2013	Utiliza los espacios en blanco de TV para su funcionamiento
	IEEE 802.11ah	Modificación de IEEE 802.11-2007 para menor consumo de energía.
	IEEE 802.11ax	WLAN (<i>Wireless Local Area Network</i>) sucesor de 802.11ac (en desarrollo), en la banda de 2.4 y 5 GHz
Redes inalámbricas de área personal	IEEE 802.15.1-2002	Especificaciones inalámbricas de capa MAC y capa física (PHY) de Redes inalámbricas de área Personal (WPAN) a 2.4GHz
	IEEE 802.15.4-2011	WPAN de baja velocidad (ZigBee) de 250kbit/s a 2.4GHz
	IEEE 802.15.6-2012	Redes inalámbricas de Área Corporal, WBAN (<i>Wireless Body Area Network</i>) hasta 1Mbps a 2.4GHz.
Redes inalámbricas de área Metropolitana (WMAN)	IEEE 802.16-2001	Acceso Fijo Inalámbrico de Banda Ancha (10–66 GHz)
	IEEE 802.16a-2003	Estaciones de usuarios fijas y frecuencias menores a 11 GHz
	IEEE 802.16d-2004	Mantenimiento y perfiles de sistema para 2–11 GHz
	IEEE 802.16e-2005	IEEE 802.16 para sistemas móviles (WiMAX móvil).
	IEEE 802.16m-2011	Interfaz aérea avanzada con tasa de transferencia de 100 Mbps móvil y 1 Gbps sobre punto fijo. Conocida como <i>Mobile WiMAX Release 2</i> o <i>WirelessMAN-Advanced</i> , utilizado en sistemas 4G.
Redes inalámbricas de área regional (WRAN)	IEEE 802.22-2011	Normativa IEEE para WRAN especificaciones de capa (MAC) y capa física (PHY). Instalación e implementación de Sistemas IEEE 802.22
	IEEE P802.22.1	es un estándar desarrollado para mejorar la protección de interferencias perjudiciales para los dispositivos de bajo consumo con licencia que operan en banda de radiodifusión de televisión
	IEEE P802.22.2	es una práctica recomendada para la instalación e implementación de Sistemas de IEEE 802.221

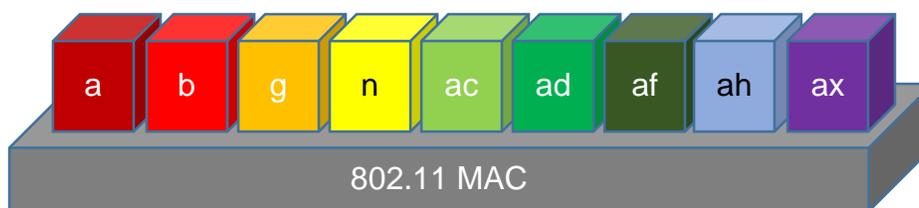


Figura 5. Versiones del estándar 802.11

Los estándares 802.11a, 802.11b, 802.11g y 802.11n permiten alcanzar distintas velocidades en la transferencia de datos según su distancia de alcance. El estándar 802.11ah se finalice y apruebe en 2016; está diseñado para trabajar en la banda de los 900MHz. El estándar 802.11ax debe ser completado en julio de 2018, está diseñado para operar en la banda de los 5GHz.

Tabla 5. Versiones y características del estándar IEEE 802.11

Estándar	Velocidad máx. teórica	Frecuencia	Técnica de modulación	BW de canal	Cobertura (m)
802.11	1–2 Mbps	2.4 GHz	FHSS – DSSS	--	100
802.11a	54 Mbps	5 GHz	OFDM	20 MHz	120
802.11b	11 Mbps	2.4 GHz	DSSS	20 MHz	140
802.11g	54 Mbps	2.4 GHz	DSSS – OFDM	20 MHz	140
802.11n	600 Mbps	2.4 y 5 GHz	OFDM	20 y 40 MHz	250
802.11ac	1 Gbps	1 a 6 GHz	OFDM	20, 40 y 160 MHz	250
802.11ad	6.75 Gbps	2.4, 5 y 60 GHz	OFDM	2.16 GHz	30
802.11af	12 Mbps	470–710 MHz	OFDM	6,7 y 8 MHz	5000
802.11ah	--	2.4 y 5 GHz	--	--	--
802.11ax	--	2.4 y 5 GHz	--	--	--

BW= *bandwidth* (ancho de banda). OFDM= *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*; FHSS= *Frequency Hopping Spread Spectrum*. DSSS= *Direct Sequence Spread Spectrum*.

Las velocidades máximas de transmisión de datos en IEEE802.11 se consideran en condiciones ideales, pero es de destacarse que conforme la distancia va en

aumento respecto a la estación base la velocidad de transmisión decrece. La tabla 6 muestra un ejemplo de las velocidades alcanzadas por 802.11g.

Tabla 6. Estándar 802.11g velocidad de transmisión a diferentes distancias

Velocidad hipotética	Rango (en ambientes cerrados)	Rango (al aire libre)
54 Mbit/s	27 m	75 m
48 Mbit/s	29 m	100 m
36 Mbit/s	30 m	120 m
24 Mbit/s	42 m	140 m

2.3.2.3 Estándares IEEE 802.15

IEEE 802.15 es un grupo de trabajo de IEEE 802 que especifica las normas para redes inalámbricas de área personal conocidos como WPAN, por sus siglas en inglés. Hay 10 áreas principales de desarrollo pero no todas están activas. Entre las activas se encuentra IEEE 802.15.1, IEEE 802.15.4 e IEEE 802.15.6.

IEEE 802.15.1-2002 proporciona la normativa técnica para las Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN). La tecnología Bluetooth se basa en el estándar IEEE 802.15.1, que opera en la banda de frecuencias de 2.4 GHz y ofrece un radio de cobertura aproximado entre 1 y 10 metros. Las WPAN se utilizan para aplicaciones de comunicación entre dispositivos tales como teléfonos celulares, computadores portátiles o dispositivos de audio.

IEEE 802.15.4-2011 proporciona los fundamentos técnicos para las Redes de Área Personal con una tasa de transferencia de 250 kbit/s. Opera en la banda de 2.4 GHz con un radio de cobertura que va desde los 10 hasta los 75 m. La tecnología ZigBee basa la capa física y de acceso al medio en el estándar IEEE802.15.4 y se utilizada fundamentalmente en aplicaciones de domótica.

IEEE 802.15.6-2012, proporciona la base para las Redes Inalámbricas de Área Corporal o WBAN (*Wireless Body Area Network*), opera en la banda de 2.4 GHz y ofrece velocidades de hasta 1 Mbps con un radio de cobertura de hasta 5 metros. Este tipo de red, se utiliza en el cuerpo humano para fines médicos y permite el monitoreo y diagnóstico en tiempo real de diferentes tipos de afecciones a la salud por lo que se le denominada eHealth.

La banda ISM (industriales, científicos y médicos por sus siglas en inglés) utiliza la banda de radiofrecuencias de 2.4 GHz para uso no comercial, es una porción del espectro radioeléctrico reservado internacionalmente.

2.3.2.4 Estándares IEEE 802.16

Ante la necesidad de cubrir una mayor zona que las logradas con las redes de área local, la junta de trabajo IEEE estableció un grupo de trabajo para desarrollar estándares para banda ancha denominados Redes Inalámbricas de Área Metropolitana (WMAN, por sus siglas en inglés), de esto surgen las redes WiMAX que son redes que trabajan en el manejo de microondas. La IEEE se da a la tarea de su regulación por lo que surge el subcomité IEEE 802.16. De manera comercial la familia de estándares 802.16 es conocida como WiMAX (interoperabilidad mundial para acceso por microondas, por sus siglas en inglés).

WiMAX (*Wireless Interoperability for Microwave Access*) cumple el estándar IEEE 802.16, sin embargo, debido a que existen multitud de posibilidades y características opcionales tanto para la capa PHY y capa MAC, se fundó el *WiMAX Forum* que tiene como objetivo principal el reducir el conjunto de características opcionales para facilitar dicha interoperabilidad y acelerar la adopción, implementación y expansión de las tecnologías WiMAX en todo el mundo, así mismo facilita acuerdos en estrecha colaboración con los proveedores de servicios y reguladores para garantizar que los sistemas certificados por el WiMAX Forum cumplan los requisitos del cliente y del gobierno (WiMAX Forum, 2015). En el Anexo 3 se listan equipos WiMAX de diferentes fabricantes utilizados en el presente trabajo.

La primera versión fue lanzada en 2001 (conocida como IEEE 802.16-2001, ya obsoleta) y desde entonces ha tenido modificaciones y actualizaciones. Las cuales se describen brevemente en los párrafos siguientes.

En IEEE 802.16 se proporciona las especificaciones para la capa física y de control de acceso al medio (MAC) para brindar acceso inalámbrico entre estaciones fijas con Línea de Vista (LOS por sus siglas en inglés) en configuraciones punto a punto y punto multipunto en frecuencias que van desde los 10 hasta los 66 GHz a una tasa de transferencia de datos de 32 hasta 134 Mbps y una cobertura estimada de 5 km, con anchos de banda de canal de 20, 25 y 28 MHz. IEEE 802.16 utiliza

antenas inteligentes para mejorar la eficiencia espectral y que en un determinado instante, a través de un esquema de modulación adaptativa, se adecue a las condiciones del SNR (*Signal to Noise Ratio*).

IEEE 802.16a modificación pensada para enlaces fijos de hasta 50 Km y para operar en la banda de 2 a 11 GHz la cual no requiere licencia de operación. Utiliza topología punto multipunto y soporta redes en malla. No requiere LOS y permite velocidades teóricas de hasta 75Mbps. Si opera en la banda de 3.5 a 10.5 GHz es necesario licencias.

IEEE 802.16d, surgió de la incorporación de los estándares 802.16-2001, 802.16a y 802.16c. Proporciona tasas de transferencia de datos de hasta 70 Mbps (condiciones ideales) en frecuencias que van desde los 2 GHz hasta los 11 GHz, y una cobertura promedio de 10 km, con conectividad exclusivamente entre puntos fijos de la red pero a diferencia de 802.16-2001, proporciona la posibilidad de operar sin línea de vista (NLOS, por sus siglas en inglés). Actualmente aún se encuentra en uso.

IEEE 802.16e opera entre los 2 GHz y los 6 GHz a una velocidad superior a los 15 Mbps y proporciona acceso móvil a redes de área metropolitanas inalámbricas (con velocidad de movimiento de hasta 120 km/h). Su diseño teórico permite en condiciones ideales conectividad en distancias de hasta 50Km, con la suposición de que la altura de la estación base es menor de 30m, no obstante, en la realidad los diversos reportes indican que opera en un tamaño de celda promedio con LOS a 11 km en canales de 5/10 MHz con IEEE802.16m (Martínez, 2010) y entre 7 y 8 Km en NLOS para IEEE 802.16e (Boronat Seguí, Pineda García, y Loret Mauri, 2008) en un canal de 10 MHz de ancho de banda. En la tabla 7 se muestran las especificaciones para 802.16e en sus distintas modulaciones y codificaciones, en conjunto con la tasa de datos alcanzada a un valor de SNR (relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido).

IEEE 802.16m-2011 y al igual que IEEE 802.16e opera entre los 2 y 6 GHz pero la primera a una velocidad superior a los 300 Mbps, y ofrece la capacidad de conectividad tanto móvil como fija hasta a 350 km/h de velocidad.

En la tabla 8 se resumen las principales características técnicas para el estándar IEEE 802.16.

Tabla 7. IEEE 802.16e: SNR mínimo requerido ($P_b=10^{-6}$ en Canal AWGN) y tasa de bits para un canal de 5 MHz (Yang, 2010), (Abate, 2009)

Modulación	Codificación	SNR [dB]	Tasa de datos (Mbps)	
			Downlink	Uplink
QPSK	1/2	2.9	3.17	2.28
	3/4	6.3	4.75	3.43
16-QAM	1/2	8.6	6.34	4.75
	3/4	12.7	9.5	6.85
64-QAM	1/2	13.8	9.5	6.85
	2/3	16.6	12.67	9.14
	3/4	18	14.6	10.28

Tabla 8. Características técnicas de los principales estándares IEEE 802.16

Estándar	Velocidad máx. teórica	Frecuencia (GHz)	Modulación	BW (MHz)	Cobertura máx. (Km)
802.16	134 Mbps	10 - 66	QPSK, 16 QAM y 64QAM	20, 25 y 28	5 (LOS)
802.16a	75 Mbps	2 - 11	OFDM con 256 portadoras QPSK, 16 QAM, 64 QAM	20	50 (NLOS)
802.16d	70 Mbps	2 - 11	Igual que 802.16a	1.5-20	10 (NLOS)
802.16e	15Mbps	2 - 6	Igual que 802.16a	1.5-20	50 (NLOS)
802.16m	>300Mbps	2 - 6	OFDMA	5, 10 y 20	50

BW= *bandwidth* (ancho de banda).

La sensibilidad o sensibilidad se refiere a la capacidad que tienen los receptores de responder a la mínima potencia de la señal detectada. Un valor de sensibilidad menor indica una mejor recepción de señales débiles.

La sensibilidad mínima que un equipo WiMAX debe tener está indicada por el propio estándar y se describe por medio de la ecuación (5)

$$RSSI = -101 - SNR_x + 10 \log_{10} \left(F_s \frac{N_{used}}{N_{FFT}} \cdot \frac{N_{subcanales}}{16} \right) \quad (5)$$

En donde SNR_x representa relación señal a ruido en el receptor, F_s la frecuencia de muestreo, N_{used} el número de subportadoras usadas, $N_{subcanales}$ el número de subcanales y N_{FFT} el tamaño de FFT⁸ (*Fast Fourier Transform*) usada.

Antes de describir el último de los estándares inalámbricos terrestres analizados en este capítulo es resulta interesante exponer una técnica empleada por este el estándar: radio cognitiva.

La radio cognitiva (CR, por sus siglas en inglés) optimiza el uso del espectro de radiofrecuencia a través de reducir al mínimo la interferencia entre los usuarios, así, los mismos nodos inalámbricos de transmisión o de recepción usan un transceptor inteligente que detecta los canales de comunicación ocupados por otras transmisiones del espectro en tiempo real, y al instante pasa a los canales no ocupados para lograr transmitir una señal. La radio cognitiva hace uso de los espacios blancos o “*White Spaces*” dentro de las bandas de frecuencias de radiodifusión VHF/UHF de TV, con un ancho de banda de 6, 7 y 8 MHz para cada canal empleado, esto depende de las regulaciones de cada región. En el continente americano (Región 2 en la clasificación de la ITU) utiliza canales de 6 MHz.

2.3.2.5 Estándar IEEE 802.22

El estándar IEEE 802.22, conocido como WRAN (*Wireless Regional Area Network*), es el primer estándar en emplear radio cognitiva como técnica de acceso al medio, al usar en forma eficiente el espectro radioeléctrico (Sherman, Mody, Martinez, y Rodriguez, 2008).

El estándar IEEE 802.22 opera en el intervalo de frecuencias de 54 a 862MHz, correspondientes a la televisión digital y analógica, al mismo tiempo que se asegura que no haya ninguna interferencia perjudicial para las operaciones de dispositivos de baja potencia con licencia, como micrófonos inalámbricos. Para ello la capa física (PHY) tiene tres funciones primarias: comunicación de datos, detección del espectro

⁸ FFT= 128, 256, 512, 1024, 2048

(SSF, por sus siglas en inglés) y geolocalización (GPS). En conjunto SSF y geolocalización proporcionan la funcionalidad necesaria para apoyar las capacidades cognitivas del sistema.

La topología que emplea el estándar IEEE 802.22 es punto a multipunto; así el sistema está formado por una estación base (BS, *Base Station*) y equipos cliente (CPE, *Customer Premises Equipment*). La estación base permite el acceso a la red principal y transmite la información a los diferentes receptores y además controla el acceso al medio a través de los aspectos de la Radio Cognitiva. La cobertura que especifica la IEEE 802.22 es de una circunferencia de 33 Km de radio en condiciones normales y de hasta 100 Km en condiciones ideales.

Las características técnicas de IEEE 802.22 son comparables a las especificaciones de IEEE 802.16e: modulación, codificación y ancho de canal. Este estándar define una única interfaz aire de 2048 portadoras en OFDMA y duplexado por dominio del tiempo (TDD), para proveer un enlace fiable de extremo a extremo. La tabla 9 muestra los modos de transmisión soportados, con la combinación de 3 modulaciones y cuatro tasas de codificación.

Tabla 9. IEEE 802.22 SNR, modulación y tasas de datos (Stevenson, et al., 2009)

Modulación	Codificación	SNR [dB]	Canal 6 MHz Prefijo cíclico (PC)=1/16	
			Tasa de datos (Mbps)	Eficiencia espectral (bits/s·Hz)
QPSK	1/2	4.3	4.54	0.76
	2/3	6.1	6.05	1.01
	3/4	7.1	6.81	1.13
	5/6	8.1	7.56	1.26
16-QAM	1/2	10.2	9.08	1.51
	2/3	12.4	12.10	2.02
	3/4	13.5	13.61	2.27
	5/6	14.8	15.13	2.52
64-QAM	1/2	15.6	13.61	2.27
	2/3	18.3	18.15	3.03
	3/4	19.7	20.42	3.40
	5/6	20.9	22.69	3.78

El estándar IEEE 802.22 opera con un desempeño comparable a los ofrecidos por las tecnologías de acceso de banda ancha fija existentes, la tasa de transmisión de datos máxima es de 22.69 Mbps por lo que puede proporcionar conectividad al emplear el espectro que normalmente se asigna a otros servicios de telecomunicaciones, sin causar interferencias (Cordeiro, Challapali, y Birru, 2006).

La *White Space Alliance* (WSA) es una organización mundial de la industria que permite intercambio de tecnología y pruebas de interoperabilidad para promover el desarrollo, el despliegue y uso de las normas basadas en productos y servicios de banda ancha a través del uso del espectro de espacios blancos. Esta organización se refiere al estándar IEEE 802.22 en Redes de Área Regional como WiFAR.

En este trabajo IEEE 802.22 y WRAN serán usados de manera indistinta para referirse al uso del espectro de espacios blancos de TV.

2.4 Conclusiones del capítulo

Una red de comunicación para contingencias abona a que los equipos de emergencia y rescate estén mejor coordinados. El contar con una red híbrida de contingencia puede potencializar la efectividad al brindar auxilio y protección a los sectores más vulnerables a la acción de fenómenos meteorológicos (huracanes), ya que contribuye en forma directa en la fase de respuesta en la gestión de la emergencia. Es por ello que los recursos empleados deben cumplir con las mejores características tecnológicas, ser de fácil acceso, simples en su operación y en la medida de lo posible, con el menor costo.

En base al análisis de estado del arte y las tecnologías realizado en los apartados anteriores, se indica a manera de conclusión la elección de la arquitectura y la tecnología inherentes en su implementación; esto permitirá su simulación y en base al análisis de resultados establecer la viabilidad de instrumentación

La propuesta de la implementar del satélite MEXSAT 2, de la flota satelital mexicana en la red de contingencia para situaciones de emergencia en caso de huracanes coadyuva a los esfuerzos del gobierno mexicano en la prevención y gestión de desastres por lo que el diseño de la red satelital debe permitir que la gestión de los sistemas de comunicación en desastres permita enlaces punto a punto o punto multipunto entre los diferentes elementos terrestres y trabajar en bandas de frecuencia que permitan, así la red de contingencia en su segmento de comunicación satelital se propone con topología estrella, compartiendo recurso utilizando la técnica de TDMA en la banda de frecuencia L.

En el segmento de comunicaciones terrestres de acuerdo al estudio del estado del arte de los estándares inalámbricos IEEE 802, como IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16 y IEEE 802.22, se indica que deben elegirse aquellos que proporcionen mayor área de cobertura con enlaces de calidad a fin de brindar movilidad y al mismo tiempo garantizar las comunicaciones en el lugar de la emergencia.

Para el segmento terrestre se descarta implementar los estándares 802.11 y 802.15 ya que fueron diseñados para operar en pequeñas celdas (menor a 100 m) y además su rendimiento es pobre en enlaces a largas distancias por lo cual no se considera en el proceso de simulación.

Por el contrario el estándar IEEE 802.16 fue creado para ser una solución inalámbrica de conectividad en áreas metropolitanas, redes MAN. IEEE 802.16e. Su diseño teórico permite en condiciones ideales conectividad en distancias de hasta 50Km, sin embargo, en la práctica opera en un tamaño de celda promedio entre 7 y 8 Km en NLOS.

La migración de la televisión analógica a la digital supone la liberación de espacios en el espectro que pueden ser aprovechados en otras áreas de las telecomunicaciones. De ello surge IEEE 802.22, pensado para el uso compartido del espectro en base de no-interferencia y ser capaz de ofrecer telecomunicaciones a zonas de ambientes rurales y baja densidad de población.

El estándar IEEE 802.22 (WRAN) indica que tiene un alcance de hasta 100Km en condiciones ideales (alturas típicas de antenas receptoras no mayores a 10m y antenas de transmisión menores a 30m), sin embargo tal como para las tecnologías WiMAX, en la realidad se tiene un alcance promedio de 33 km. Aun así esa distancia representa una distancia de transmisión considerable en estándares inalámbricos actuales. Esto proporciona una ventaja adicional, ya que permite acceder a la red pública de telecomunicaciones con un menor número de radio bases al cubrir una mayor área. Por tal motivo se elige 802.22 como una alternativa inalámbrica que se incluye dentro del diseño de la red de contingencia en situaciones de desastre provocados por huracanes.

Con base en lo anterior y hasta el momento de elaborar esta propuesta, en la literatura no existe ley o marco regulatorio en México que delimite el uso de estos nuevos espacios de espectro radioeléctrico liberado, por lo que este trabajo, pretende contribuir a la elección de un segmento de las radiofrecuencias que

mejores prestaciones brinden y así proponerlas para su uso en la gestión de desastres.

Así mismo una vez seleccionada la tecnologías de comunicación inalámbrica terrestre y comunicación por satélite, en el siguiente capítulo se presenta la propuesta de una arquitectura de red híbrida de contingencia (terrestre y satelital) para la península de Yucatán (entidades Campeche, Yucatán y Quintana Roo) en donde se plantea el escenario junto con sus parámetros que lo delimitan, se describe la arquitectura del sistema y el despliegue de estaciones base transportables para la comunicación con las terminales remotas móviles.

Capítulo 3 - Metodología

3.1 Introducción

La interrupción de las comunicaciones es una constante que se repite en situaciones de desastre, ya sea en forma parcial o completa. En este sentido, contar con una infraestructura de telecomunicaciones flexible, dinámica, interoperable y asequible para los distintos equipos de auxilio y rescate, resulta primordial para atender a la población más vulnerable en situaciones de emergencia.

El presente estudio se centra principalmente en la fase de respuesta ante un desastre por huracán, aunque no es ajeno a las demás fases de la gestión del desastre. Se requiere información previa a través de los diferentes canales de alerta temprana así como otros mecanismos para el despliegue de la red propuesta (fase de prevención). Posterior a la respuesta, es necesario que esta red contribuya, en medida de lo posible, a la reconstrucción, restauración y reparación que lleven a cabo los diferentes organismos gubernamentales.

La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR, por sus siglas en inglés) indica que el 95% de los registros extensivos documentados en América Latina y el Caribe, entre 1990 y 2011 fueron desencadenados por fenómenos hidrometeorológicos y climáticos (UNISDR y OSSO, 2013). Por otra lado en el “Plan de Trabajo Anual y Estrategia 2014-2015” (UNISDR, 2013) indica que de acuerdo con la Base de Datos Internacional de Desastres de la Universidad de Lovaina en 2011, México se encontraba en la lista de los diez primeros puestos en cuanto a mayor número de desastres de origen natural.

En definitiva, México ha experimentado los embates de los huracanes por décadas y en ese sentido la cultura de la prevención ayuda a mitigar los efectos de estos fenómenos. Tal es el caso del 23 de octubre de 2015 en donde el huracán Patricia impactó las costas del Pacífico sin acercarse a centros urbanos pero fue debilitado rápidamente al estrellarse en las montañas de la Sierra Madre. Pese a ello, la UNISDR (2015) precisa que “México ha ganado elogios de los expertos en gestión de desastres por la eficacia y la claridad de sus primeras advertencias, la decisión

de avanzar rápidamente en las evacuaciones y la buena coordinación entre los gobiernos federales y estatales”.

Los avances tecnológicos permiten hacer frente a los retos que los desastres naturales conllevan en las zonas aisladas, incomunicadas o apartadas. Como consecuencia es necesario reforzar las comunicaciones para emergencia por lo que en este trabajo se propone una arquitectura de red híbrida de contingencia ante los casos de huracanes, cuyos elementos que la conforman puedan moverse hacia y en el lugar del evento.

En el capítulo 2 se abordó distintas tecnologías inalámbricas empleadas en redes híbridas y se dio pie a discernir entre ellas con la finalidad de elegir las adecuadas, así en este capítulo se desarrolla la metodología para elaborar la propuesta de una red híbrida de contingencia.

En una primera parte se plantean aspectos concernientes al escenario de estudio (la península de Yucatán), las especificaciones de la tecnología satelital y terrestre inalámbrica empleada, los elementos que la conforman la estructura de la arquitectura del sistema y los parámetros a emplear en las simulaciones, así como las observaciones pertinentes. En la segunda parte se revisan aspectos relacionados con el tipo de tráfico y la capacidad del sistema para determinar la cantidad de usuarios por atender. Es por ello que a través de las siguientes secciones se revisarán cada uno de los elementos mencionados anteriormente.

3.2 Diseño de red

Para ir incluyendo los elementos de la red híbrida de contingencia, en la figura 6 se muestra el esquema elegido para el diseño de la red híbrida de contingencia. A través de cada elemento del esquema se consideran aspectos descriptivos, técnicos, normativos y consideraciones pertinentes a mencionar al momento de realizar la propuesta, como por ejemplo, el ancho de canal de televisión para el continente americano en la clasificación de la ITU que es de 6 MHz, mencionado en la sección 2.3.2.4.

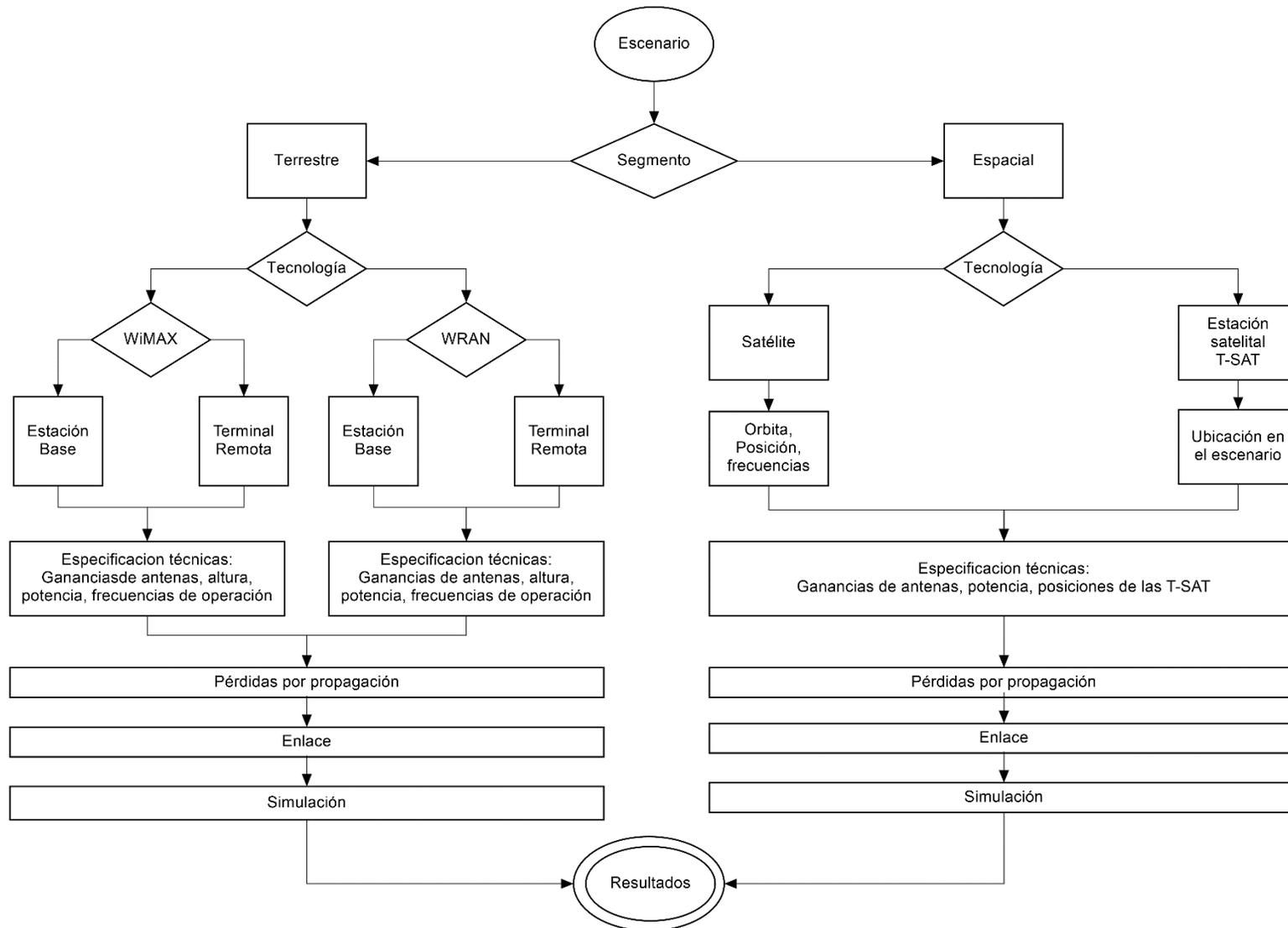


Figura 6. Esquema utilizado para el diseño de red una red híbrida de contingencia

En el capítulo 2 (secciones 2.3.2.4 y 2.3.2.5 respectivamente) se resaltó que los estándares IEEE 802.16e, e IEEE 802.22 son tecnologías inalámbricas terrestres cuya distancia alcanzada en cobertura es considerable para analizar en este estudio. Por ello la propuesta de hibridación se basa en estos dos estándares, en conjunto con los enlaces satelitales, considerados para la Banda-L, con las especificaciones del MEXSAT 2 que en particular el gobierno mexicano proyecta su uso en auxilio de la población. Por tanto nuestra red híbrida de contingencia estará formada por estos estándares IEEE 802.16e e IEEE 802.22 en conjunto con la tecnología satelital del MEXSAT 2.

3.2.1 Escenario de propagación

En México el Centro Nacional de Prevención del desastre (CENAPRED) “es el organismo encargado de crear, gestionar y promover políticas públicas para la prevención de desastres y reducción de riesgos a través de la investigación” (CENAPRED, 2015), por ello a través de su Atlas Nacional de Riesgos (figura 7) ubica a la península de Yucatán (Campeche, Quintana Roo y Yucatán) como una zona de grado de riesgo de alto a muy alto por ciclones tropicales en la gran mayoría del territorio (CENAPRED, 2001) por lo que se considera este escenario como el marco de referencia para la ubicación del presente estudio.

En particular la orografía de la península de Yucatán en su gran mayoría es terreno llano, y alcanza en la zona sur del estado de Yucatán una altura máxima 390m snm, lo que resulta un indicador importante al momento de la propagación de las ondas electromagnéticas ya que las cerros y montañas actúan como obstáculos.

En la tabla 10 se muestran parámetros cruciales que identifican al territorio bajo estudio.

Otro aspecto que se considera de relevancia es la población ya que según cifras del INEGI existen aproximadamente cerca de 4.2 millones de habitantes en la península (INEGI, 2010) dato que resulta importante al momento de ubicar poblaciones vulnerables por huracanes.

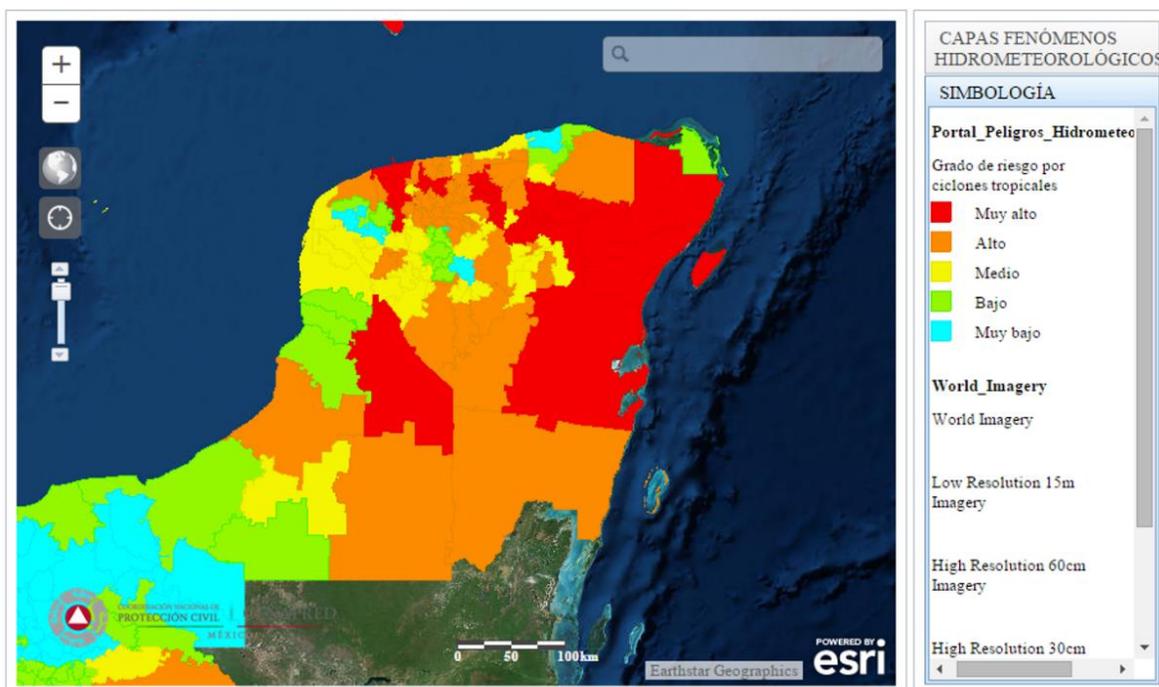


Figura 7. Grado de riesgo en la península de Yucatán (Atlas Nacional de Riesgos, 2015)

Tabla 10. Información por Entidad Federativa

Entidad (No. Municipios)	Población	Extensión (km ²)	Precipitación media anual	Clima (Cálido)
Campeche (Municipios: 11)	75% urbana 25% rural	57,516	Entre 1200 y 2000 mm	Subhúmedo 92% Cálido Húmedo 7.75%
Quintana Roo (Municipios: 9)	88% urbana 12% rural	44,825	1300mm	Subhúmedo 99% Cálido húmedo 1%
Yucatán (Municipios: 106)	84% urbana 16% rural	39,871	1100mm	Subhúmedo 85.5% Cálido húmedo 14.5%

La selección de los lugares para colocar las radiobases se toman en consideración de la cantidad de habitantes que cada municipio tiene, sin embargo, Boose (2003) realiza un estudio de la variación histórica de las huracanes a través de la Península de Yucatán e identifica las zonas donde existe mayor frecuencia de recurrencia de estos fenómenos (figura 8 y figura 9), por lo que se considera al momento de posicionar las Estaciones Base en el escenario.

En la figura 8 las zonas sombreadas con un tono más oscuro poseen un indicador de mayor fuerza de impacto (F1, F2, F3) de estos fenómenos hidrometeorológicos en la zona costera de la península; por mencionar algunas localidades se encuentran Cancún, Chetumal, Cozumel, Progreso, y Tulum.

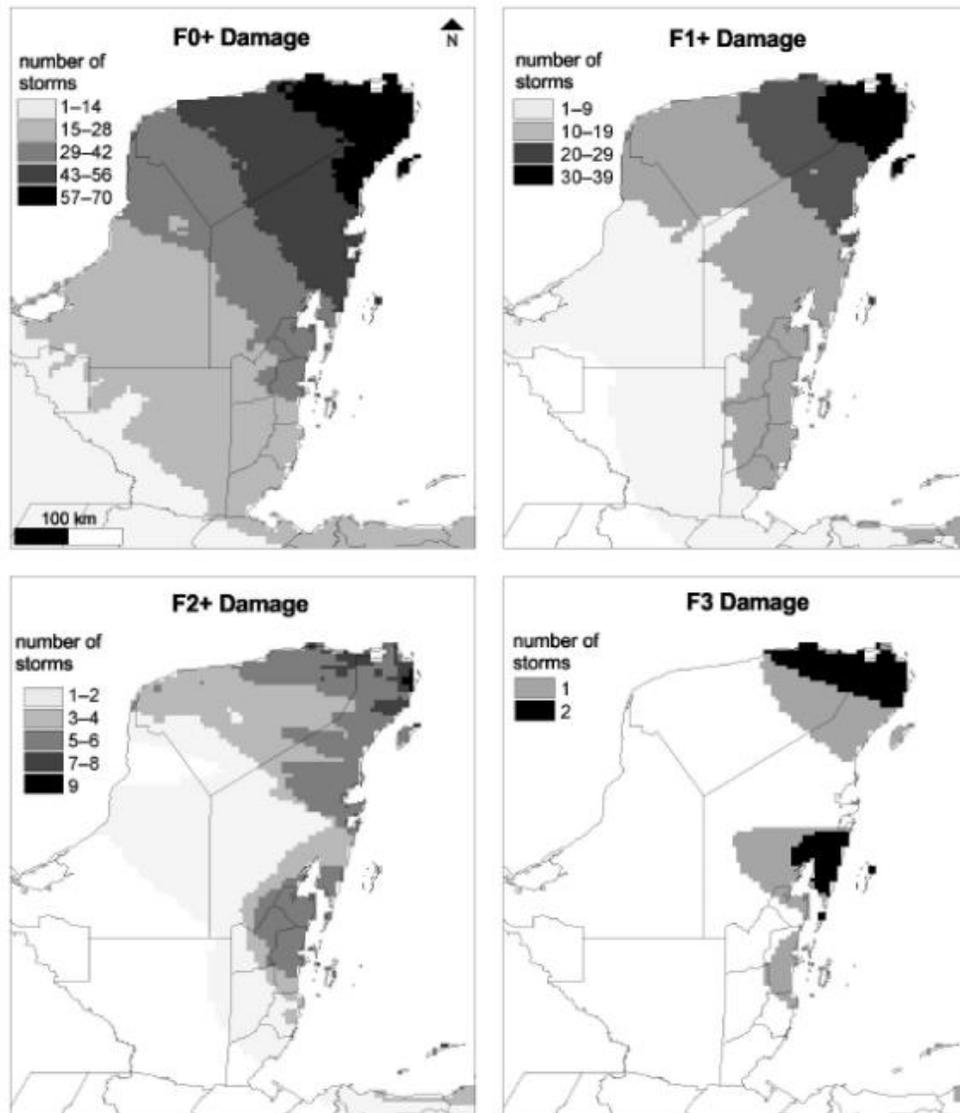


Figura 8. Número de huracanes en diferentes niveles de daño durante el período de estudio (1851-2000) (Boose, Foster, Plotkin, y Hall, 2003).

En la figura 9 se indica el intervalo de tiempo (años) y la fuerza en los cuales estos fenómenos se presentan.

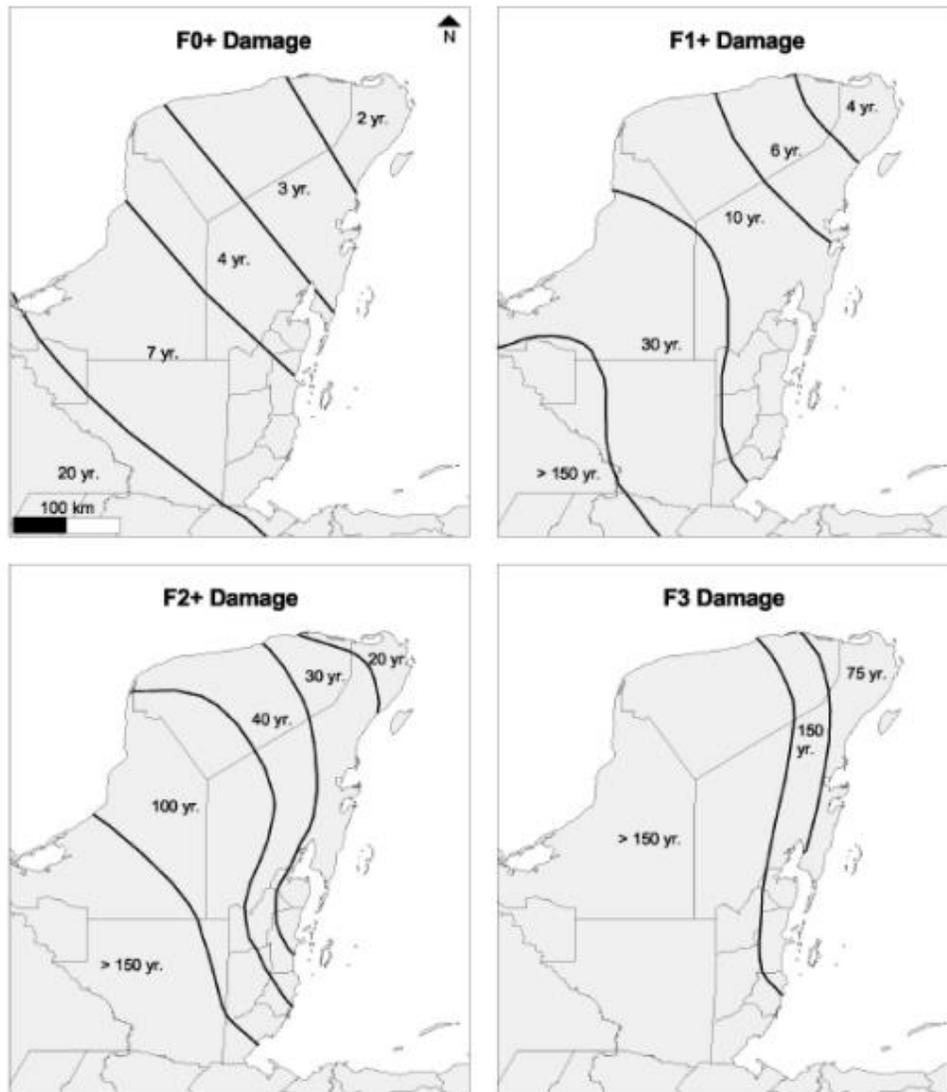


Figura 9. Intervalos promedio de impacto y los diferentes niveles de daño durante el período de estudio (1851-2000) (Boose, Foster, Plotkin, y Hall, 2003).

3.2.2 Tecnologías: satelital y terrestre.

En el esquema de la figura 6, este indica que son dos los segmentos de comunicación: el terrestre y la satelital. El segmento satelital es dado con las especificaciones del Morelos 3 (MEXSAT 2) que se muestran en la tabla 11 y en el segmento terrestre se utilizan las tecnologías IEEE 802.16e y IEEE 802.22 descritas en la tabla 12. En la tabla 12 se hace un comparativo entre las tecnologías inalámbricas terrestres WRAN y WiMAX.

Tabla 11 Especificaciones del satélite MEXSAT 2 (Vázquez, 2011)

Característica	Descripción
Órbita Posición	GEO 113.1 W
Potencia (Cochetti, 2014)	15 kW
Banda	L para MSS
Antena	22 metros
Segmentos (SCT, 2012)	Espacio-Tierra: 1518-1559 MHz Tierra-Espacio: 1668-1675 MHz
Espectro	250 MHz, 122 haces, 2.2 MHz por haz, 17 Grupos de 7 celdas

Tabla 12. Comparación IEEE 802.16e e IEEE 802.22

Parámetro	IEEE 802.16e	IEEE 802.22
Técnica de acceso múltiple	OFDMA, OFDM	OFDMA
FFT ⁹ (Tamaño)	2048, 1024, 512, 128	2048
Ancho de banda del canal (MHz)	28, 20, 17.5, 14, 10, 8.75, 7, 3.5, 1.25	6, 7 u 8
Burst Allocation ¹⁰	bidimensional	Lineal
Permutación de subportadoras	Adyacente o distribuido	Distribuido con una mejora de intercalador
Técnicas de antena múltiple	Multiplexión ⁵ , codificación espacio tiempo, beamforming ⁵ .	No soportada
Robustez para retrasar la propagación	Débil (CP= 22.8µseg)	Fuerte (CP= 74.7µseg)
Espacio entre subportadoras	10.9 (kHz)	3.3 (kHz)

Tabla 13. Comparación WiMAX y WRAN a utilizar en este estudio

Parámetro	WiMAX	WRAN
Capa Física Ancho de canal	OFDMA 5 MHz	OFDMA 6 MHz
FFT (Tamaño)	512	2048
Frecuencia de muestreo (MHz) F_s	5.6	6.9
Número de subcanales	8	60
Numero de portadoras usadas (N_{used})	360	1440
Espacio entre subportadoras	10.9 KHz	3.3 KHz
Tiempo de símbolo ($1/\Delta f$)	91.4 µseg	298.7 µseg
Max CP Time (µsec)	11.4	74.7
Tasa pico de datos (Mbps)	15.8	22.7
<i>Burst Allocation</i>	bidimensional	Lineal
Técnicas de antena múltiple	Multiplexión, codificación espacio tiempo, beamforming.	No soportado

⁹ FFT es la abreviatura del inglés *Fast Fourier Transform* (Transformada rápida de Fourier)

¹⁰ Ver Anexo 2 para una descripción del concepto

Posteriormente, una vez identificado el escenario y la tecnología a emplear es necesario organizar cada una de las partes que conforman la red de contingencia por ello resulta indispensable elegir una arquitectura del sistema.

3.2.3 Arquitectura del sistema

Dado que la gestión de la emergencia por parte de los organismos de auxilio y Protección Civil se lleva a cabo de manera escalonada, la arquitectura del sistema debe permitir a cada nodo de la red ser independiente y al mismo tiempo estar enlazado a una entidad de gobierno de mayor rango, por lo que es adecuada una red multinivel.

Así, se plantea una red dividida en tres niveles, donde los dos primeros estarán en el segmento terrestre y el tercero en el segmento espacial (ver figura 10).

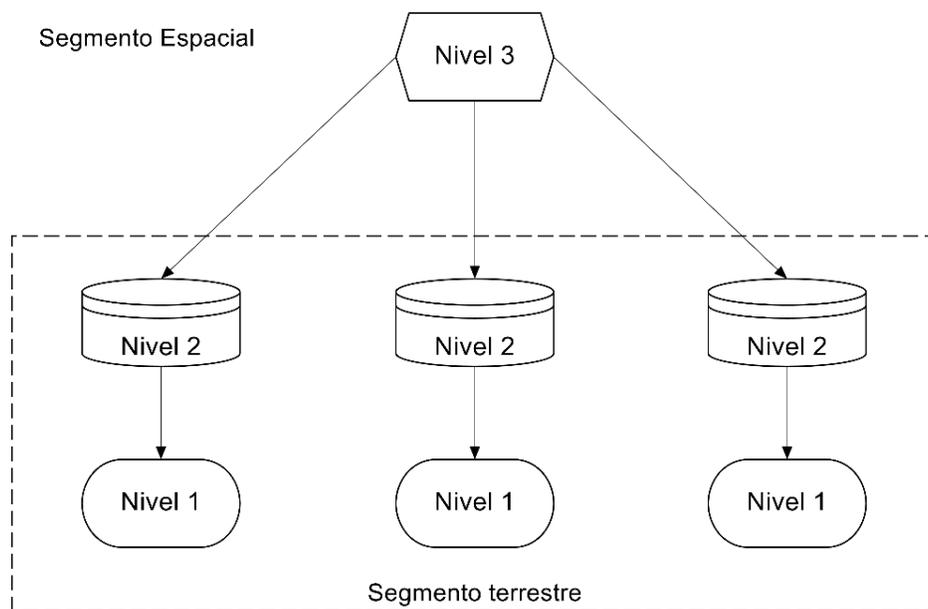


Figura 10. Red multinivel.

El Nivel 1 (N1) contiene a los elementos locales, las Terminales Remotas (TR_m) (figura 11a), que se encuentran en el lugar de emergencia y se desplazan alrededor de manera aleatoria a diferentes distancias (r_m) de la radio base (EB_j , figura 11b) y les provee comunicación inalámbrica a través de tecnologías WiMAX o WRAN. Ambas tecnologías operan en un sistema punto multipunto, sin utilizar o configurarse conexiones tipo malla entre las TR_m cercanas.

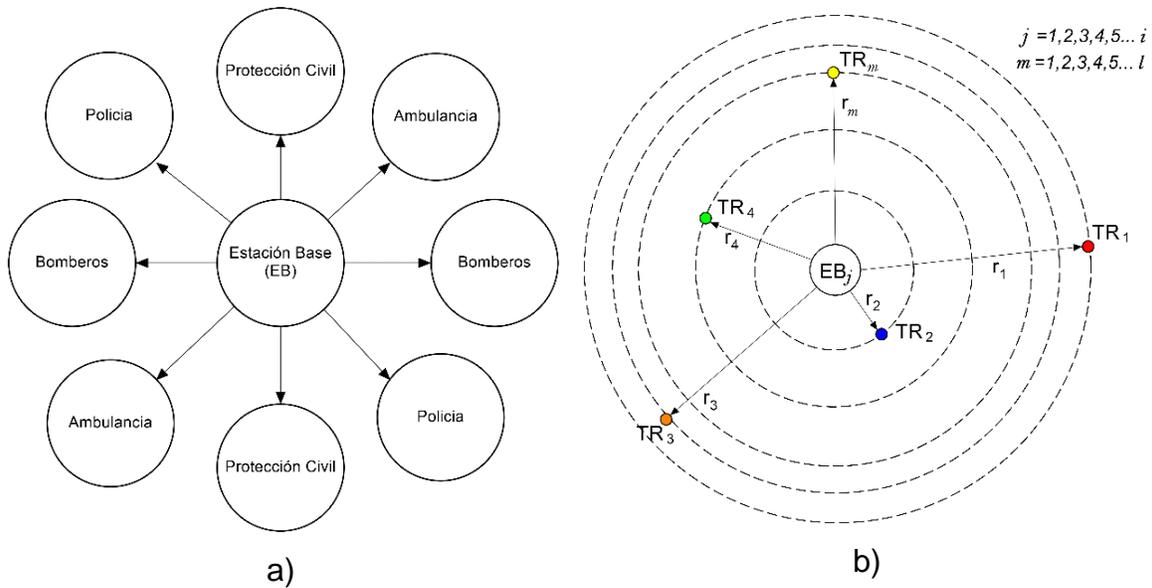


Figura 11. Nivel 1: elementos locales.

El Nivel 2 (N2) de la arquitectura propuesta, está formada por los nodos base (NB, figura 12). Un nodo base está integrado por la estación base (EB_j), y el equipo de comunicación de la estación satelital (T-SAT). A través del nodo base se realiza la comunicación con el Nivel 3 (N3), hacia el segmento espacial.

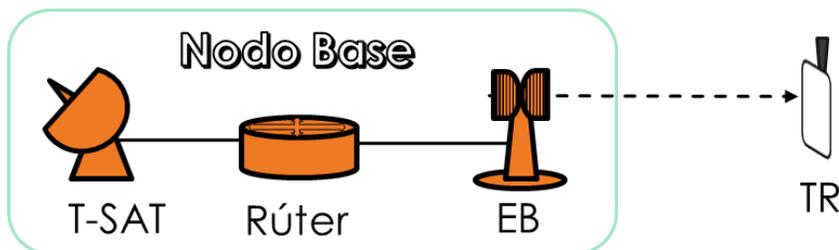


Figura 12. Nodo Base: Terminal Satelital y Estación Base

Las T-SAT son terminales de comunicación vía satélite tipo BGAN para su uso a través de un enlace satelital en Banda-L, lo que permite comunicaciones bidireccionales con el satélite MEXSAT 2, para enviar y recibir información. Estas terminales satelitales realizan funciones de modulación, demodulación, conversión de frecuencias, codificación, multiplexación, conversión analógico-digital, entre otras.

En relación a los nodos, las EB_j son equipos de tecnología WRAN/WiMAX que enlazan de manera inalámbrica las terminales de los usuarios finales (TR_m) distribuidos en el lugar del evento. En el nodo base (N2) la principal función del rúter es la interconexión de las subredes a través del encaminamiento de los paquetes. El nivel 3 (N3) contiene la tecnología satelital, básicamente la función de un dispositivo satélite es recibir la señal, amplificarla y transmitirla a través del transpondedor (Trasmisor/Respondedor) el cual permite conexión de los distintos nodos base del nivel 2 (N2). Para lograr esto, en N3 se requiere una conexión tipo estrella en la topología de red de comunicación satelital, como se muestra en la figura 13. La arquitectura elegida permite crear pequeñas células de área local “Células WRAN/WiMAX” (figura 14) que están conectadas entre sí, y en caso de ser necesario, cuando la distancia entre cada nodo base en tierra no garantiza la conexión directa entre los nodos, utilizar el enlace satelital. Una característica primordial en las células terrestres es la movilidad de las TR_m , los cuales generan tráfico de información local, el de mayor importancia en la red de contingencia.

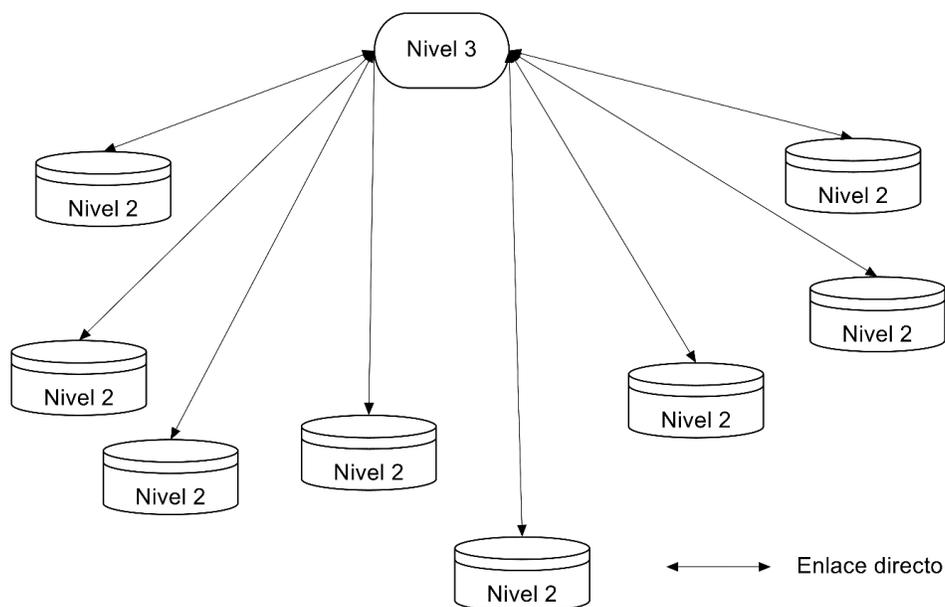


Figura 13. Nivel 3: topología tipo malla

En la figura 14, el Centro de Control de Red (CCR) será el responsable de gestionar y asignar recursos de comunicación satelital a aquellas células de área local que

requieran comunicación con otros nodos fuera de su alcance de cobertura evitando el impacto en la comunicación satelital generado por el tráfico terrestre

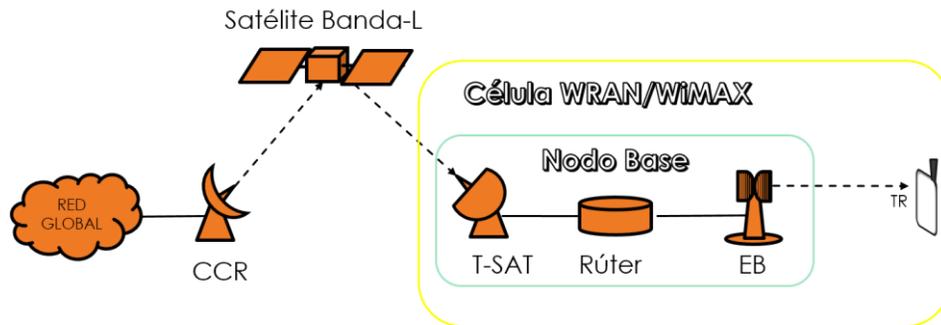


Figura 14. Células WRAN/WiMAX

A modo de ejemplo, el despliegue de la red de contingencia a desarrollar se muestra en la figura 15. En ella se observa que por cada entidad existe una estación terrena maestra (ETM) donde se encuentra la Unidad Estatal de Protección Civil hacia la cual están conectadas las demás instancias especializadas de protección civil.

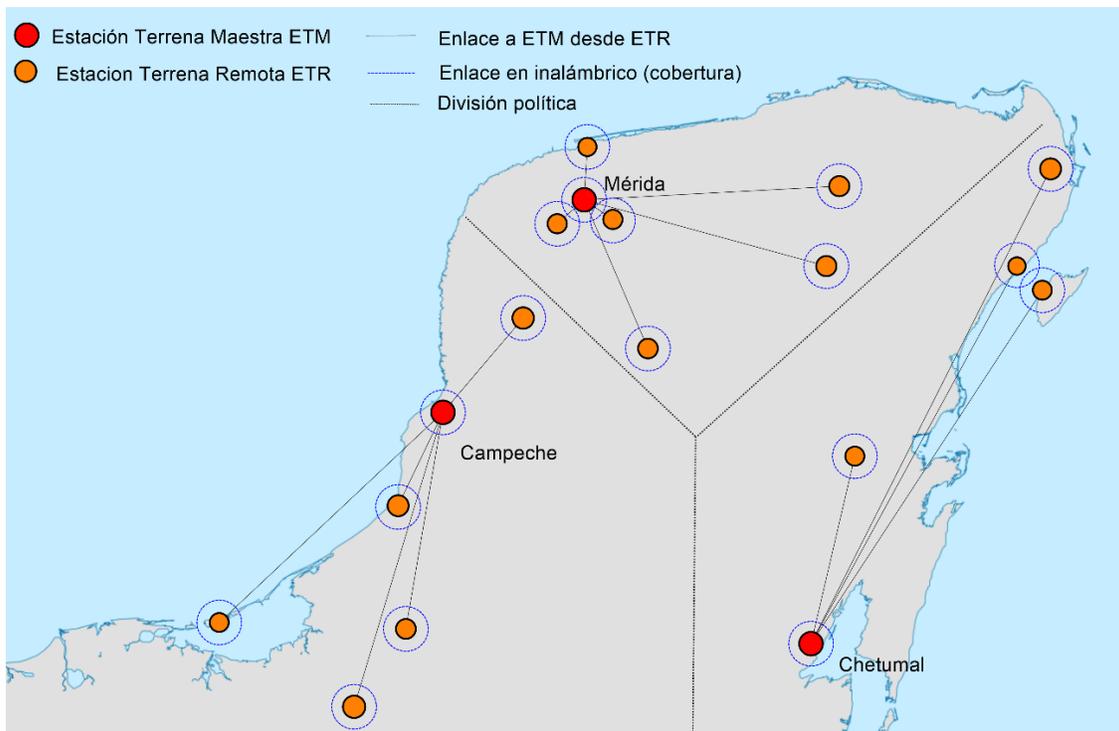


Figura 15. Red de contingencia con topología estrella en cada estado de la península

Las instancias de actuación especializada, son propias de la autoridad municipal y en caso de que su capacidad de respuesta ante la emergencia sea sobrepasada, acude a la instancia estatal correspondiente.

La configuración que se logra con esta red de contingencia pretende dar el dinamismo requerido en la actuación de las autoridades, ya que no siempre los huracanes tienen el mismo impacto en todos los territorios.

La distribución de las estaciones base en el área afectada dependerá de las autoridades correspondientes en cada Unidad Estatal de Protección Civil, mismas que evalúan las posibles áreas de mayor impacto a través de los mecanismos de alerta temprana.

Este trabajo hace hincapié en que la primera distribución propuesta fue en base al número de habitantes en los sitios elegidos y al estudio presentado por Boose (2003)

3.2.4 Parámetros del sistema

Con las secciones anteriores 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 (escenario, tecnologías y arquitectura respectivamente) se ilustra de manera general la red, en este sentido resulta necesario acotar ciertos valores en los cuales la red está definida. Los tipos de antenas y frecuencias de operación, las especificaciones de los equipos empleados en estaciones base y equipos remotos apoyan para obtener un marco de referencia en las simulaciones posteriormente realizadas.

3.2.4.1 Antenas

Las características adecuadas de las antenas utilizadas en las estaciones terrenas permitirá un correcto enlace con el satélite; en (6) la ganancia (G) al ser directamente proporcional a la eficiencia (η) de la antena debe ser lo más grande posible para las frecuencias de bajada (Downlink) y subida (Uplink)

$$G = \eta \frac{4\pi A_{fis}}{\lambda^2} \quad (6)$$

G = Ganancia; A_{fis} = área de apertura física de antena; λ = longitud de onda

Las antenas utilizadas en equipos de Banda-L son pequeñas y ligeras, lo que las hace adecuadas para operar de manera móvil. Por otra parte las antenas utilizadas en los equipos terrestres de las estaciones base son antenas omnidireccionales y generalmente en los equipos remotos de tipo fijo son antenas direccionales. Para este trabajo se asume que las antenas en los equipos remotos móviles son omnidireccionales.

La altura de las antenas de transmisión tiene un impacto directo en la calidad del enlace ya que representa una limitante en el escenario al requerir que sea de peso ligero y rápido despliegue, es decir, que sea fácil de transportar. Por tanto se propone que, en las estaciones base (EB_j) la altura máxima alcanzada sea de 3 m y en los terminales remotas (TR_j), la altura sea del promedio de estatura nacional reportado por el INEGI de 1.64 m, bajo la suposición que el personal de auxilio y rescate contarán con equipos móviles.

Actualmente en México no existe un marco regulatorio del espectro radio eléctrico en UHF/VHF que permita el uso de espacios blancos para IEEE 802.22. A diferencia de los Estados Unidos donde la *Federal Communications Commission* (FCC) determinó que dichos espacios pueden usarse para nuevas tecnologías de comunicación. Así las especificaciones de la FCC, indican que para la tecnología Wi-FAR las ganancias de antena deben limitarse generalmente a 6 dBi para dispositivos fijos y 0 dBi para dispositivos personales/portátiles. Dichas especificaciones de la FCC son consideradas en el desarrollo del presente trabajo. Además subraya que, la altura de la antena de transmisión no debe exceder de 30m sobre el suelo en las estaciones base y las de transmisión deben tener un mínimo de 10m.

La tecnología WiMAX móvil define en sus equipos las antenas y características que cada fabricante utiliza. En las simulaciones realizadas en este trabajo de tesis se usarán algunos ejemplos que se mencionan en el Anexo 3.

3.2.4.2 Radiofrecuencias de operación en ambos segmentos

La tecnología satelital empleada trabaja en la Banda-L, la cual la SCT indica que, “cuenta con características que la hacen muy valiosa para las condiciones geográficas y demográficas de nuestro país: i) alta movilidad y penetración, ii) opera

adecuadamente aún en condiciones climáticas extremas (huracanes, lluvia, entre otras), iii) puede re-utilizarse en aplicaciones terrestres (telefonía celular), iv) se pueden prestar servicios de voz y datos con terminales pequeñas, v) permite entablar comunicación, en algunos casos, sin que la antena tenga que apuntar al satélite (versatilidad de aplicaciones), vi) permite dar cobertura nacional, incluido el mar patrimonial y la zona económica exclusiva, y vii) México es el único país que ha reservado la Banda-L para uso exclusivo del gobierno”, por lo que se usa por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), la Secretaría de Marina (SEMAR), la Procuraduría General de la República (PGR), la Secretaría de Seguridad Pública (SSP), y el Centro de Investigación y Seguridad Nacional (CISEN).

Según el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (SCT, 2012), la banda L de frecuencias en México queda dividida como se muestra en la figura 16. Para los fines de este trabajo se eligen las frecuencias de 1535-1559 (24 MHz) para los enlaces de bajada y las frecuencias de 1626.5-1660.5 (34 MHz) para enlaces de subida.

Para el segmento terrestre, con la finalidad de utilizar el espectro que se libera con el apagón analógico, se decidió utilizar el estándar IEEE 802.22 el cual hace uso de las bandas de frecuencia radiodifusión en VHF/UHF, correspondiente a las frecuencias entre los 54 y 862 MHz.

La televisión analógica se distribuye en las frecuencias VHF desde los 54 MHz hasta los 216 MHz, mientras que la televisión digital en UHF desde 462 MHz hasta los 692 MHz (tabla 14).

Tabla 14. Asignación de frecuencias de los canales de TV

Canal	Banda de Frecuencia	Descripción
2- 4	54 – 72 MHz	VHF
5 - 6	76 – 88 MHz	
7 - 13	174 – 216 MHz	
14 – 20	470 – 512 MHz	UHF
21 - 51	512 – 692 MHz	

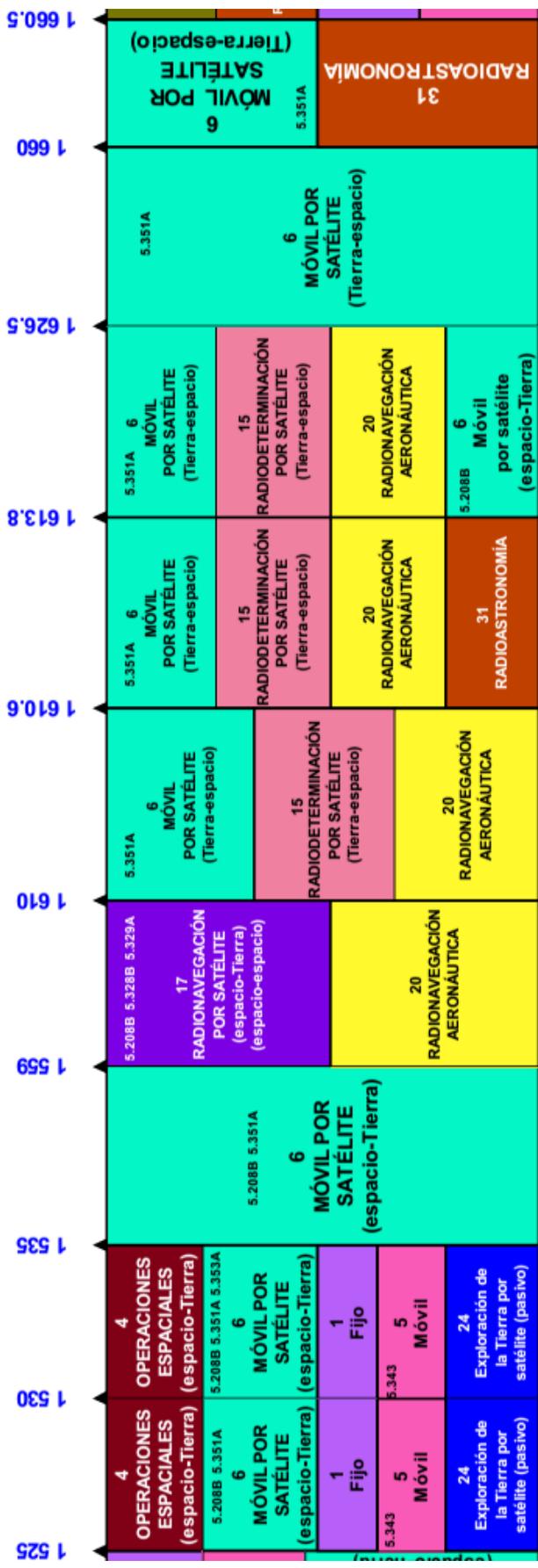


Figura 16. Asignación de frecuencias Banda L (segmento de imagen) (SCT, 2012)

En el rango de estas frecuencias, la recomendación ITU-R M.2033 PPDR en la región 2 (continente americano) recomienda el uso de las frecuencias desde 30 MHz hasta 869 MHz y en particular, en México, la Secretaría de Seguridad Pública (SSP) y otras instituciones de seguridad pública a nivel estatal y municipal, tiene asignadas las frecuencias de 380-400 MHz y 4940-4990 MHz (DOF, 2015) (IFT, 2013). En la tabla 15 se enlistan los segmentos de la banda de frecuencia de la recomendación ITU-R M.2033.

Tabla 15. Bandas de frecuencia utilizadas en la Recomendación ITU-R M.2033

Descripción	Banda de frecuencias (MHz)
I	3 -30
II	68 -88
III	138-144
IV	148-174
V	380-400
VI	400-430
VII	440-470
VIII	746-776
IX	776-794
X	794-806
XI	806-869

El rango 806-869 está distribuido de “806-821/851-866 MHz, para el servicio de radiocomunicación móvil especializada de flotillas en rutas carreteras y ciudades (*“trunking”*); mientras que de 821-824/866-869 MHz, está atribuido al mismo tipo de servicio pero para aplicaciones de seguridad pública” (IFT, 2015).

Otro aspecto de importancia para la protección pública es la banda 4940-4990 MHz, identificada por la UIT como importante para lograr un espectro armonizado para la protección pública y operaciones de socorro avanzado (APT Recommendation, 2006). La banda de frecuencias (4940-4990 MHz) se cataloga en WiMAX Forum® como WiMAX Evolucionado (IEEE 802.16e-2005, OFDM) y usa un canal de 5MHz de ancho (WiMAX Forum, 2007). IEEE 802.16 utiliza las frecuencias entre 2 y 66 GHz, sin embargo, para las especificaciones WiMAX que se utilizan en este trabajo estará limitada hasta los 11 GHz.

3.2.4.3 Equipos de radiocomunicación terrestre

Estos equipos son utilizados en los niveles N1 y N2 en el área de emergencia. Aunque cada fabricante puede determinar las características de sus equipos a su conveniencia, es importante destacar ciertos aspectos generales.

En primer lugar, el desarrollo de equipos que soportan el estándar IEEE 802.22 aún está en despegue, por tanto, no existen equipos comerciales. La WSA (*White Space Alliance*) promueve el desarrollo, despliegue y uso de las normas para desarrollar productos y servicios con IEEE 802.22. En segundo lugar, las normas mexicanas establecen un límite de potencia emitidas por las antenas de radiocomunicación (García Hernández, Ibargüengoytia González, Flores García, y Franco Campos, 2011).

Las recomendaciones de la FCC indican que los dispositivos bajo estándar IEEE 802.22 pueden usar una potencia de hasta 4W (36 dBm PIRE), los dispositivos personales/portátiles tienen permitido un máximo de 100mW de PIRE (20 dBm). Los umbrales de sensibilidad para IEEE 802.22 van desde -94dBm para TV analógica hasta -116dBm para DTV (Televisión digital), se establecen de -107dBm corresponde a micrófonos inalámbricos (Saeed y J. Shellhammer, 2012).

Bajo el cobijo de Hitachi-Kokusai Electric, Inc., Hasegawa (2013), se desarrolló un prototipo para Estación Base para usarse en sistemas de redes para desastres. La tabla 16 muestra las características del modelo desarrollado.

Referente al desempeño de la capa física Wang (2009) presenta un estudio del primer dispositivo personal/portable que cumple con las especificaciones existentes de la FCC que alcanza un tasa de datos de datos de 23.74 Mbps a 100m de distancia y 4.75Mbps a 1,000 m de distancia; las características de este se muestran en la tabla 17.

WiMAX Forum® definió perfiles que admiten diferentes clases de potencia que depende del esquema de modulación empleado. Los niveles de potencia típicos de la estación base son alrededor 36 dBm con la posibilidad de aumentar hasta un nivel máximo de alrededor de 43 dBm. Se espera que los niveles de potencia de terminales móviles sean de hasta 23 dBm aunque están sujetas al control de potencia.

Tabla 16. Especificaciones técnicas de la estación base (transmisión/receptor) (Hasegawa, Masayuki, y Keat-Beng, 2013)

Descripción	Características
Frecuencia	470 – 710 MHz
Ancho de banda del canal	6 MHz
Ancho de banda de la señal	5.6 MHz
Salida de potencia desde T _{RX}	1 mW ¹¹
Esquema de modulación	QPSK, 16-QAM,64-QAM
Esquema de codificación (código convolucional: tasa)	1/2, 2/3, 3/4, 5/6
Técnica de acceso múltiple	OFDMA
FFT	2048
Factor de sobremuestreo	8/7
Calidad de servicio	<i>Unsolicited Grant Service</i> ¹²

Tabla 17. Características del equipo remoto (Wang y Sun Song, 2009)

Descripción	Características
Frecuencia	600 MHz
Ancho de banda del canal	6, 7 y 8 MHz
Potencia Máxima	20 dBm
Esquema de modulación	64-QAM (tasa de código 5/6)
Técnica de acceso múltiple	OFDMA

3.2.4.4 Equipos de radiocomunicación satelital

Como se indicó en la sección 3.2.3 la arquitectura del sistema es multinivel donde permite movilidad de los equipos remotos conectados a una Estación Base, por lo que se emplea la tecnología WiMAX/WRAN en estas estaciones que forman un Nodo base en conjunto con terminales T-SAT tipo BGAN que comunican al nivel N2 con el nivel N3. Esta relación entre las T-SAT y el satélite y las frecuencias en Banda-L, se logra mediante un vínculo entre el segmento espacial y el segmento terrestre: el enlace. Por lo que en el apartado siguiente se tratará lo relativo a los

¹¹ La salida es amplificada a 1W (30dBm)

¹² Ver Anexo 2 para descripción.

enlaces de comunicación satelital que tienen como finalidad comunicar las Estaciones Base de la red de contingencia propuesta.

3.2.4.4.1 Relación portadora a ruido total

En los enlace satelitales utilizados la calidad en la recepción de una señal satelital dependerá de los efectos que se produzcan en la subida y bajada al satélite desde y hacia las T-SAT. La relación de la potencia de una portadora de una señal digital respecto a la potencia del ancho de banda que ocupa se denomina, relación portadora a ruido total $(C/N)_T$ y es un indicador del parámetro de calidad del enlace, ya sea para una señal de telefonía, TV o datos.

El ruido del receptor del satélite (N_s) así como el ruido de la estación terrena (N_B), las pérdidas por espacio libre (FSL), los efectos de intermodulación (N_i), las ganancias de los sistemas de la estación terrena y estación transmisora ($G_{TX}/G_{RX ET}$), la $PIRE$, la ganancia de antenas ($G(\theta)_{RX/TX sat}$) y la potencia de salida (P_{sat}) del satélite y la estación terrena (P_{ET}), frecuencias (f) de subida y bajada, los anchos de banda ($B_{(\uparrow TX)}, B_{(\downarrow Emis)}$), y la distancia (d) entre el posición del satélite de las estaciones (latitud, longitud), son los parámetros principales que determinan dicha relación.

La figura 17 muestra un esquema de un enlace satelital, por supuesto, los satélites y terminales satelitales poseen una complejidad mayor que la mostrada.

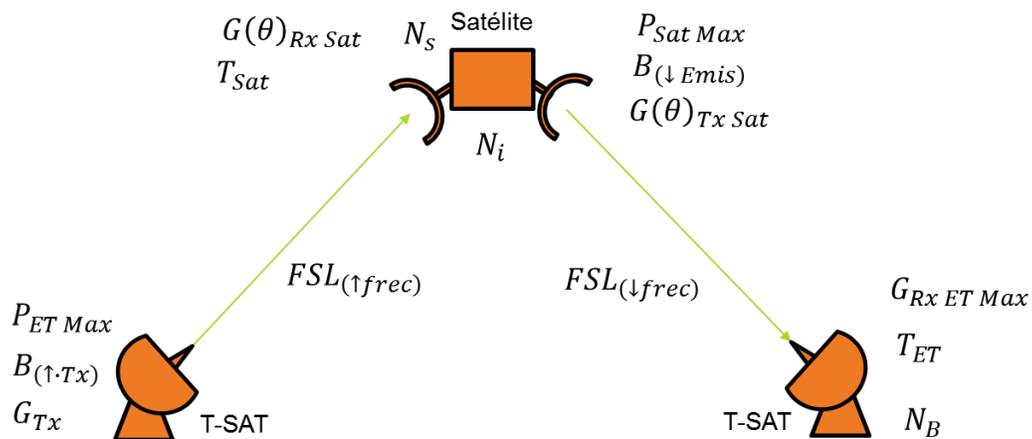


Figura 17. Esquema de enlace Satelital

Al considerar los ruidos relativos a la polarización cruzada, interferencias terrestres o satélites cercanos $(C/N)_i$, la expresión para la relación portadora a ruido total se expresa como

$$(C/N)_T = \left(\frac{1}{\frac{1}{10^{\{(C/N)_S\}}} + \frac{1}{10^{\{(C/N)_B\}}} + \frac{1}{10^{\{(C/N)_i\}}}} \right) \quad (7)$$

en donde

$$(C/N)_S = P_{ET\ Max} + G_{Tx} + G(\theta)_{Rx\ Sat} - FSL_{(\uparrow f)} - (k + T_{sat} + B_{(\uparrow Tx)}) \quad (8)$$

$$(C/N)_B = P_{Sat\ Max} + G(\theta)_{Tx\ Sat} + G_{Rx\ ET\ Max} - FSL_{(\downarrow f)} - (k + T_{ET} + B_{(\downarrow Emis)}) \quad (9)$$

$$(C/N)_i = 30dB \text{ cuando existe reuso de frecuencia} \quad k = -228.6 \frac{dBW}{K \cdot Hz}$$

$$N = 20 \log_{10}(k \cdot B_{(Tx/Emis)} \cdot T_{(ET/sat)}) \quad [dB] \quad (10)$$

$$FSL = 20 \log \left(\frac{4\pi d f [MHz]}{c} \right) \quad [dB] \quad (11)$$

$$d = 42644(1 - 0.254 \cos \psi)^{0.5} \quad [km] \quad (12)$$

$$\cos \psi = \cos \zeta \cos \beta \quad (13)$$

ζ : latitud de la estación terrena

β = diferencia en longitud entre la estación terrena y el satélite

3.2.4.4.2 Características del enlace satelital

Para la descripción de las características del enlace satelital se recurrió a la solicitud presentada ante la ITU por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) MEXSAT116.8 L-CEXT-X parte I-S (IFT, 2014) y la sección especial CR/C/2798

(IFT, 2014), estos documentos están disponibles en el portal del IFT (<http://www.ift.org.mx>).

Dichos documentos indican que la temperatura de ruido del sistema es de 560 K en la sección espacial. Se indica también que la máxima potencia isotrópica para la ganancia de una estación terrena con un diámetro de 11 m es de 50.36 dBi en recepción con una temperatura de ruido de 127 K y de 50.96 dBi de la ganancia para la antena de transmisión. La figura 18 y Figura 19 muestran las ganancias en recepción (41.7 dBi) y emisión (41.1 dBi) del satélite, respectivamente. Las frecuencias de operación son las descritas en anteriormente, 1535-1559 MHz de bajada y 1626.5-1660.5 MHz de subida.

Definido todo lo anterior se procede a asignar los valores de los elementos descritos para parametrizar nuestra red.

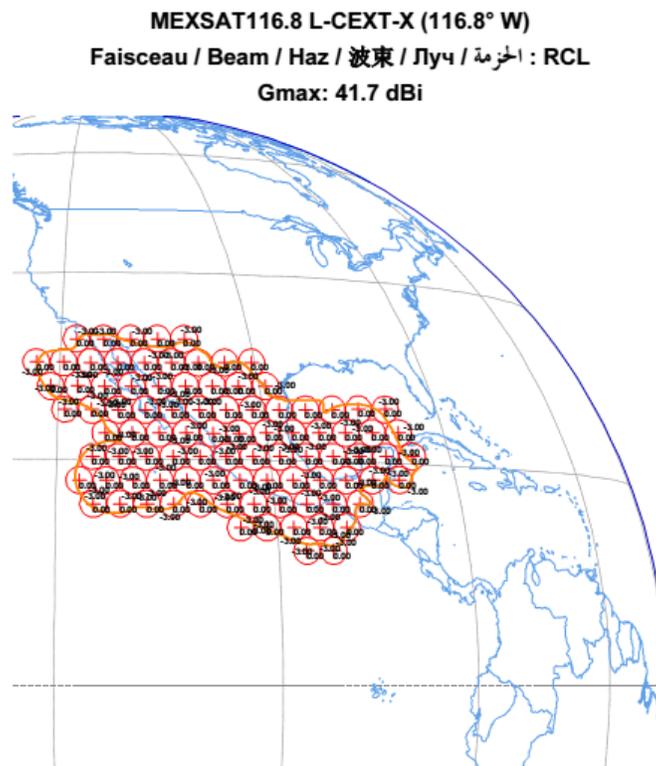


Figura 18. Ganancia de recepción del satélite (41.7 dBi). Tomado de MEXSAT116.8 L-CEXT-X

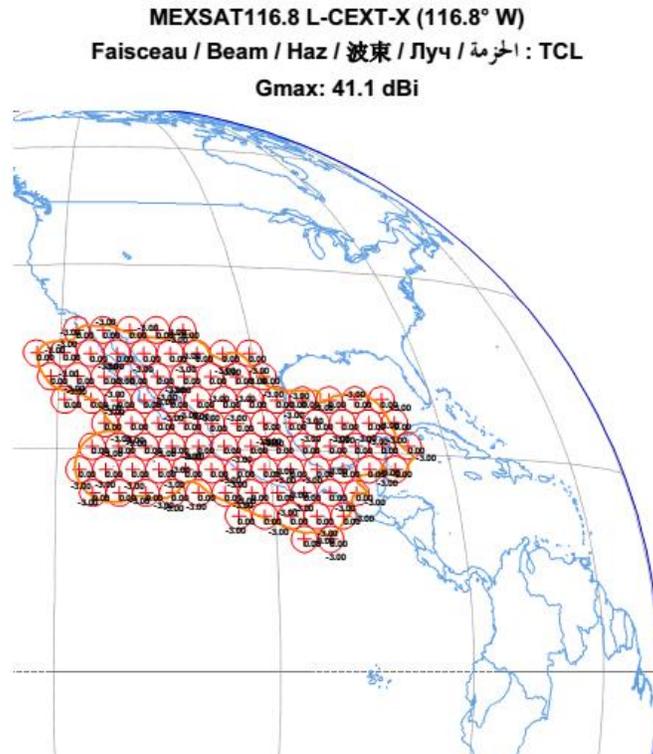


Figura 19. Ganancia de transmisión del satélite (41.1 dBi). Tomado de MEXSAT116.8 L-CEXT-X

3.2.4.5 Parametrización de la red

En esta sección se pronuncian las condiciones con las cuales el escenario y equipos propuestos son utilizados para las simulaciones realizadas.

Las simulaciones hechas se dividen en dos secciones, tal como en la arquitectura. Para las simulaciones del segmento terrestre, se utiliza el simulador conocido como Radio Mobile (que se describe en el apartado siguiente) y con el cual se obtienen las distribuciones del espectro y por tanto las coberturas a alcanzar en los intervalos de frecuencia de operación entre otros.

En segundo, en el segmento espacial es de interés obtener la relación portadora a ruido total proporcionada por los enlaces satelitales, como indica la ecuación (7), cuyos valores se obtienen utilizando software para hojas de cálculo.

3.2.4.5.1 Radio Mobile

Radio Mobile es un software de libre distribución desarrollado por Roger Coudé, dedicado a la radioafición y el uso humanitario, y brinda apoyo al diseño y simulación de los enlaces y las redes de telecomunicaciones. Utiliza el modelo ITM (*Irregular*

Terrain Model o *Long Rice Model*) que fue creado debido a las necesidades de planificación de frecuencias de radio difusión de televisión en los Estados Unidos de Norteamérica en 1960 por A.G. Longley y P.L Rice para el cálculo de enlaces en un rango de frecuencias desde 20Mhz hasta 20GHz en distancias de 1 hasta 2,000 km.

Los parámetros a introducir para realizar las simulaciones permiten reflejar a los correspondientes equipos reales que estarían destinados en la instalación. RadioMobile utiliza el perfil geográfico de las zonas de trabajo a través de una completa base de mapas topográficos digitales de alta resolución de la Tierra como SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), los GTOPO30 (*Global 30 Arc-Second Elevation*) y los DTED (*Digital Terrain Elevation Data*) (Coudé, 2015). Para información específica puede consultar <http://radiomobile.pe1mew.nl>.

3.2.4.5.2 Configuración de las redes inalámbricas terrestres en Radio Mobile

Dentro de Radio Mobile es necesario primero ubicar los equipos que formaran parte de la red, tanto estaciones base (EB_j) y terminales remotas (TR_m) e indicar su posición (latitud, longitud y altura) dentro del mapa del simulador. En el Anexo 3 se indican sólo, las posiciones de las estaciones base sin incluir la ubicación de las TR_m .

Los nodos base son trasportable y una vez ubicados en el área de estudio estarán con una posición fija (figura 20) las estaciones remotas por el contrario acuden al mismo lugar que la estación base en cuestión pero se desplazan en el área afectada, y tienen acceso a comunicación inalámbrica para así reportar lo sucedido, a fin de brindar auxilio a la población, dicha acción supone una posición aleatoria entorno a la estación base. Se supone en primera instancia que las distancias máximas en las que se pueden desplazar son de 8 km y 33 km desde la Estación Base, estas distancias son los alcances promedio de las tecnologías WiMAX y WRAN, respectivamente (sección 2.4).

En el mapa mostrado en la figura 20 se indica la altura del terreno en la esquina superior izquierda. A manera de recordatorio en la sección 3.2.1 se indicó el tipo de terreno es llano.

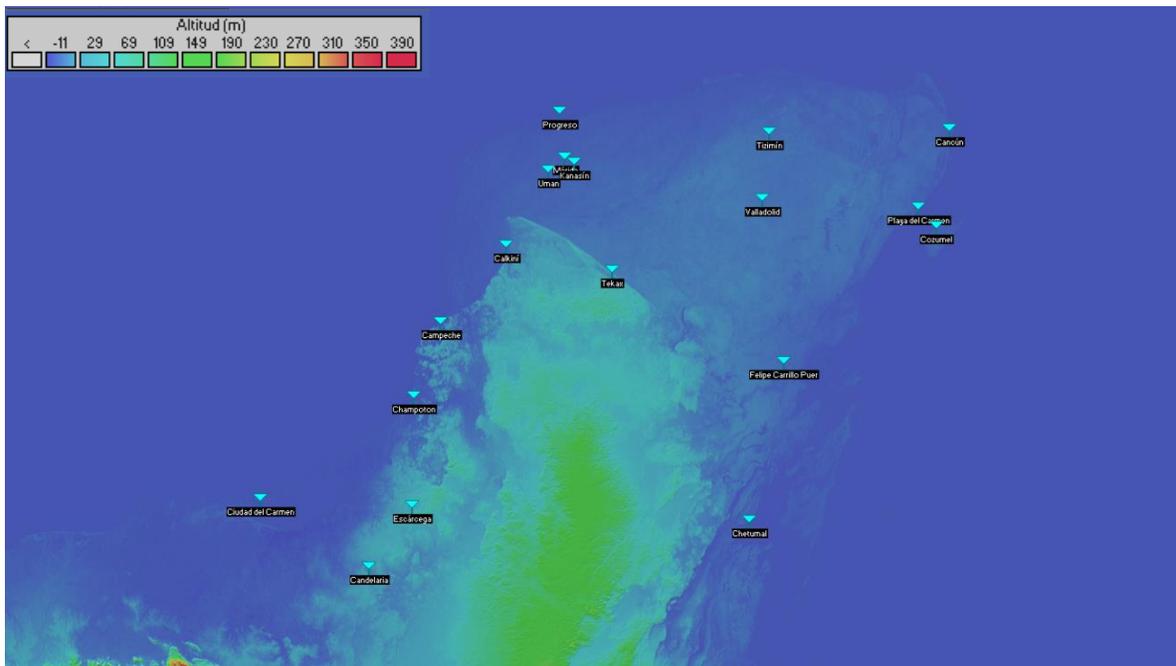


Figura 20. Mapa SRTM de la Península de Yucatán con EBi distribuidas.

En otra sección del software correspondiente a los “Parámetros por defecto” (figura 21) se describe el nombre de la red a utilizar y se le asigna las frecuencias de operación de acuerdo al estándar seleccionado, tal como se muestra en la tabla 18.

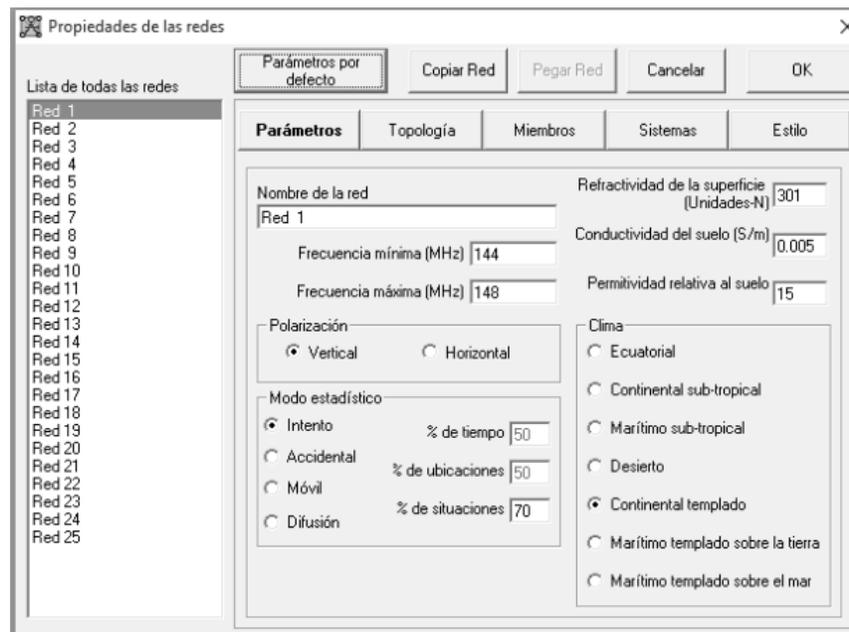


Figura 21. Ventana de la sección “Parámetros por defecto” en Radio Mobile.

Tabla 18. Distribución de frecuencias utilizadas en Radio Mobile

Descripción	Bandas de frecuencias
IEEE 802.16e	2000 – 6000 MHz
IEEE 802.16-2004	2000 – 11000 MHz
IEEE 802.22 VHF	54 – 216 MHz
IEEE 802.22 UHF	470 – 692 MHz
IEEE 802.22 Hitachi	470 – 710 MHz
ITU-R M.2033 V-MX	380 – 400 MHz
ITU-R M.2033 VI-VII	400 – 470 MHz
ITU-R M.2033 VIII-XI	746 – 869 MHz

También se especifican parámetros importantes para los enlaces como clima polarización de antenas, conductividad del suelo entre otros, que son características del escenario a implementar. En la tabla 19 se delimitan los datos del terreno correspondiente a la Península de Yucatán.

Tabla 19. Características del terreno (IFT, 2015)

Parámetro	Tipo de enlace	Valor
Refractividad de la superficie terrestre (N)	cualquiera	370 (IFT-003-2014) ¹³
Conductividad de la superficie terrestre (s/m)	terrestre	0.005
Permitividad relativa del terreno	terrestre	15
Polarización	Radio VHF/UHF	Vertical
Modo de variabilidad (Modo estadístico)	802.16-2004 Otros casos	Accidental Móvil F(50,90) (Saeed y J. Shellhammer, 2012)
Clima (UIT-R P.617-1) ¹⁴ (ITU, 2013)	Marítimo-subtropical	Selección

En el simulador debe indicarse la topología de la red a utilizar (figura 22) y los equipos que conforman parte de dicho sistema en particular. Se elige “Red de datos, topología en estrella” ya que esta opción es para una red de datos (Maestro/esclavo) sin vínculos entre unidades esclavas.

¹³Especificaciones y requerimientos mínimos para la instalación y operación de estaciones de radiodifusión de televisión analógica (bandas VHF y UHF)

¹⁴ Datos de propagación y técnicas de predicción necesarios para el diseño de sistemas de radioenlaces transhorizonte

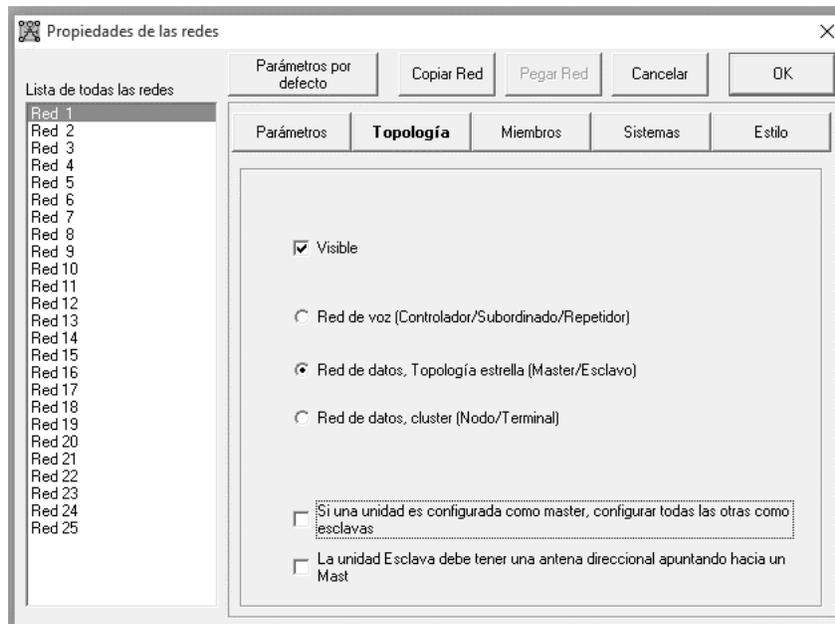


Figura 22. Ventana de la sección “Topología” en Radio Mobile.

En la sección de “Miembros” (figura 23) se indica el rol que adoptarán las unidades: maestro o esclavo y luego se asignan a las redes creadas.



Figura 23. Ventana de la sección “Miembros” en Radio Mobile.

Las estaciones base tendrán el rol de maestro, mientras que las estaciones remotas tendrán la de esclavo. Estas unidades tendrán asignadas las características de algún sistema, que se describe en la ventana “Sistemas”.

En sección “Sistemas” (figura 24) se ingresan las características de los equipos a utilizar en nuestras simulaciones: potencia de operación, ganancias y tipo de antenas, sensibilidad, frecuencias de operación, pérdidas por cableado y alturas.

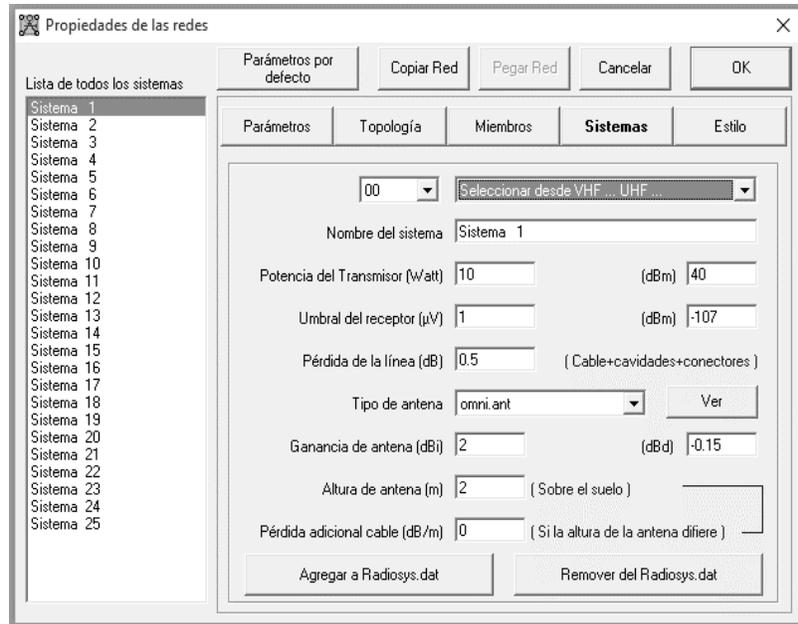


Figura 24. Ventana de la sección “Sistemas” en Radio Mobile: se ingresan los parámetros de los equipos utilizados (ejemplo).

Es necesario indicar el rango de sensibilidad o sensibilidad de los equipos tanto WiMAX (tabla 20) y como WRAN para que pueda ser creado el mapa de cobertura.

Tabla 20. Rangos de sensibilidad para IEEE802.16 e IEEE 802.22

Descripción	Rango
Sensibilidad (dBm) WiMAX	-98 a -115
Sensibilidad (dBm) WRAN	-94 a -116

De este modo se ingresan las características de las estaciones base y estaciones remotas WiMAX en conjunto con las de IEEE 802.22/WRAN, indicados en el Anexo 3 y Anexo 2.

La altura para la antena de estación base es de 3 metros, mientras que para la estación remota se considera una altura de 1.64 metros.

Todos estos parámetros ingresados permiten realizar la evaluación de los enlaces entre los distintos elementos de la red y obtener los mapas de cobertura de cada estación base en un intervalo de frecuencias elegido.

Radio Mobile permite representar los radioenlaces y analizar las características de un enlace punto a punto de una estación base a una estación remota en particular. El “Enlace de Radio” (figura 25) muestra algunos parámetros de interés tales como, pérdidas por espacio libre (*Espacio Libre*), pérdidas totales (*Pérdidas*), distancia entre Emisor-Receptor (*Distancia*), potencia de recepción (*Nivel Rx*) entre otros.

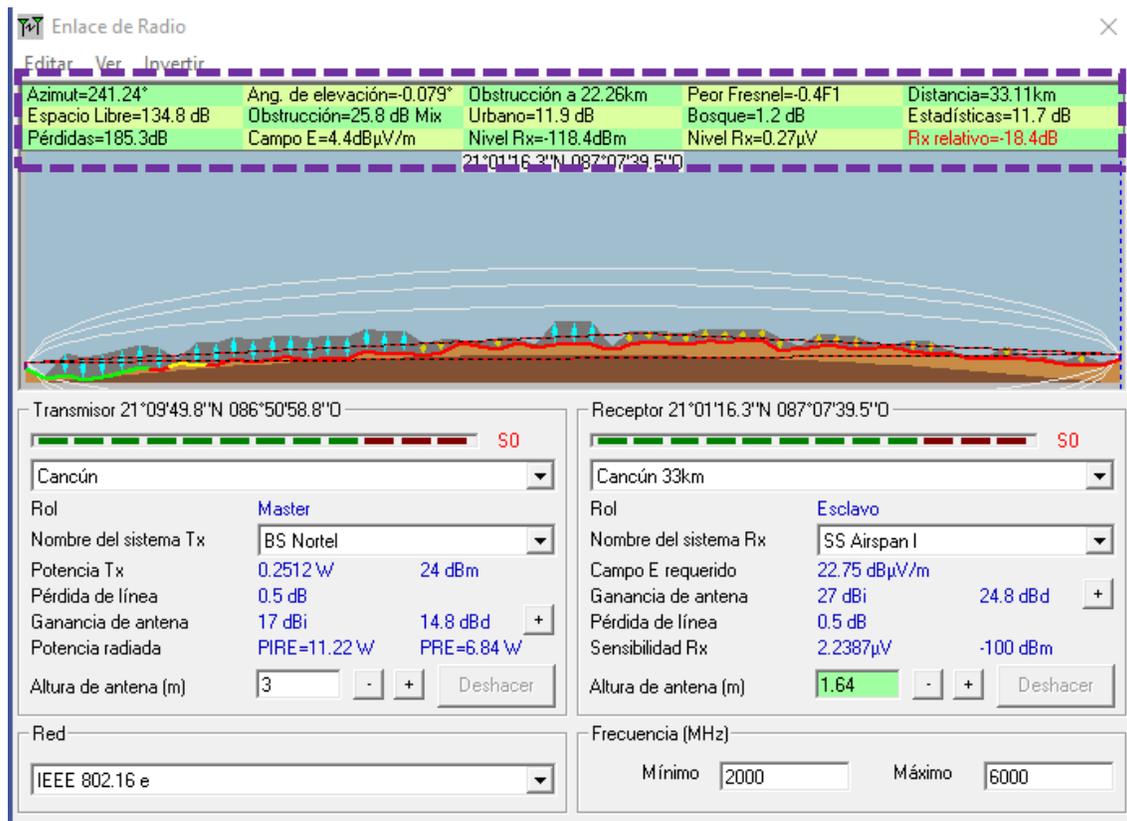


Figura 25. Ventana de la sección “Enlace radio” en Radio Mobile: muestra las características de un enlace en particular.

Así mismo en la misma ventana permite evaluar diferentes enlaces entre los elementos ya que es posible elegir entre los distintos equipos ingresados con anterioridad (EB_j y TR_m) y modificar sus alturas y variar el rango de frecuencias de operación.

Radio Mobile también permite realizar un análisis visual del espectro de radio frecuencias y el alcance que se logra entre las EB_j y las TR_m a través de un “mapa

de cobertura” (figura 26), al mismo tiempo que genera un archivo de datos del mapa creado. Se pueden trazar en este mapa, circunferencias que indiquen la distancia que existe desde las EB_j .

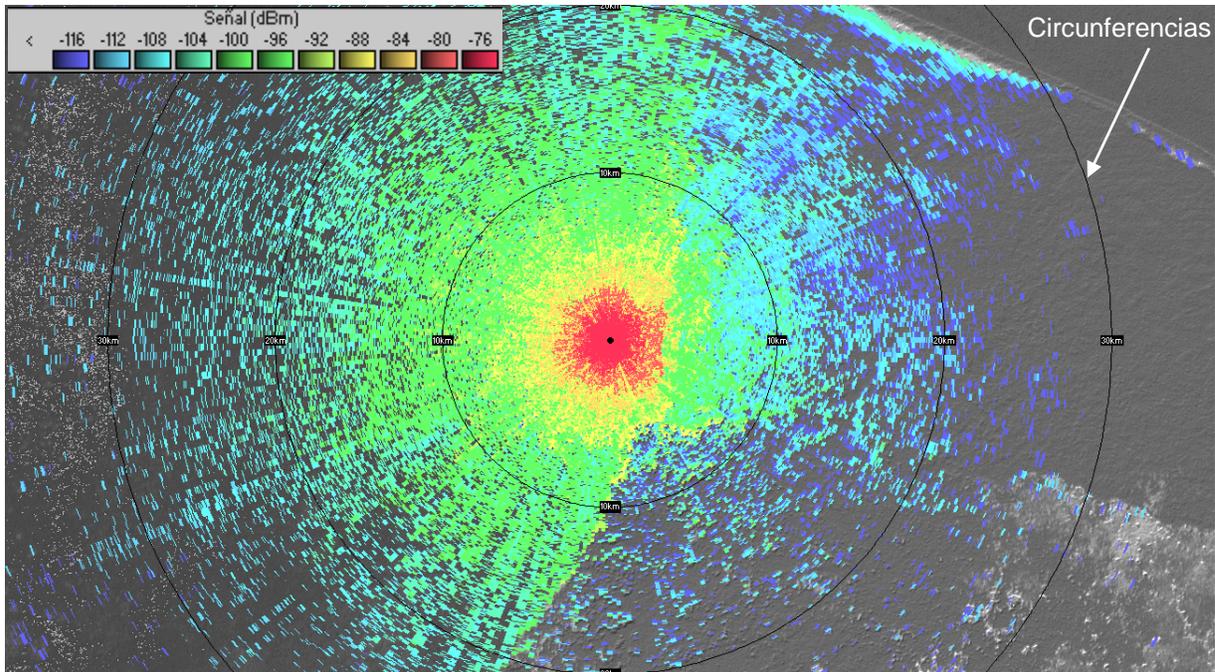


Figura 26. Mapa de cobertura generado por RadioMobile

El mapa de cobertura se logra al utilizar una de las dos técnicas: cobertura radio polar y cobertura de radio cartesiana (*Single polar* y *combined cartesian*) la primera nos muestra los cálculos de cobertura efectuados alrededor de una EB_j en especial, la segunda opción puede dibujar la cobertura de más de una estación base para analizar la interferencia entre estaciones cercanas. En particular se elige trabajar con el mapa de cobertura radio polar (figura 27) ya que la interferencia entre radio bases no se evalúa en este trabajo, por considerar que se encuentran lo suficientemente alejadas una de otra.

El mapa de cobertura resulta del registro de la potencia recibida en determinado punto, en donde se le asigna un color en específico. La potencia de emisión desde la estación base es afectada por los distintos elementos en el escenario y atenúan la señal recibida por el equipo remoto lo que provoca una disminución de su valor de potencia a medida que la distancia entre la EB_j y TR_m se incrementa. Así el valor de la potencia de la señal recibida “Señal (dBm)” mostrada en la esquina superior

izquierda de la figura 26, requiere equipos más sensibles o incrementar la potencia de transmisión para poder lograr el enlace a medida que se incrementa la distancia entre el transmisor y el receptor.

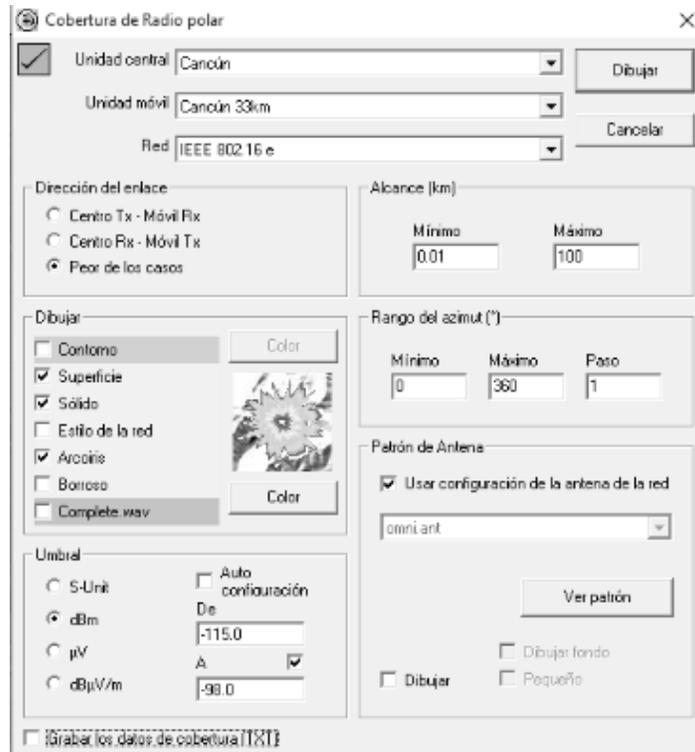


Figura 27. Cobertura de radio polar

Con todo lo anteriormente descrito, escenario, tecnologías, arquitectura, y demás parámetros de la red se procede a realizar las simulaciones para la red terrestre.

3.3 Simulaciones

Con la distribución de frecuencias de la tabla 18 y con las características del terreno de la tabla 19, se crean las redes a evaluar (figura 28). Además, tal como se muestra en la figura 22, la topología usada en el simulador es una “Red de datos, topología estrella (Master/esclavo)” opción que permite simular una estación maestra que controla a varias estaciones esclavas, sin que ellas puedan comunicarse entre sí. Esto se ajusta a la descripción de IEEE 802.22 donde “una red mallada” aún no se implementa y sólo se permite conexiones punto a punto (Point-to-point), sección 2.3.2.5. Además, se hace notar que nuestra red no estará limitada sólo a voz por lo

que se prescinde de usar de la opción “Red de voz” entre las opciones de la ventana de la figura 22.

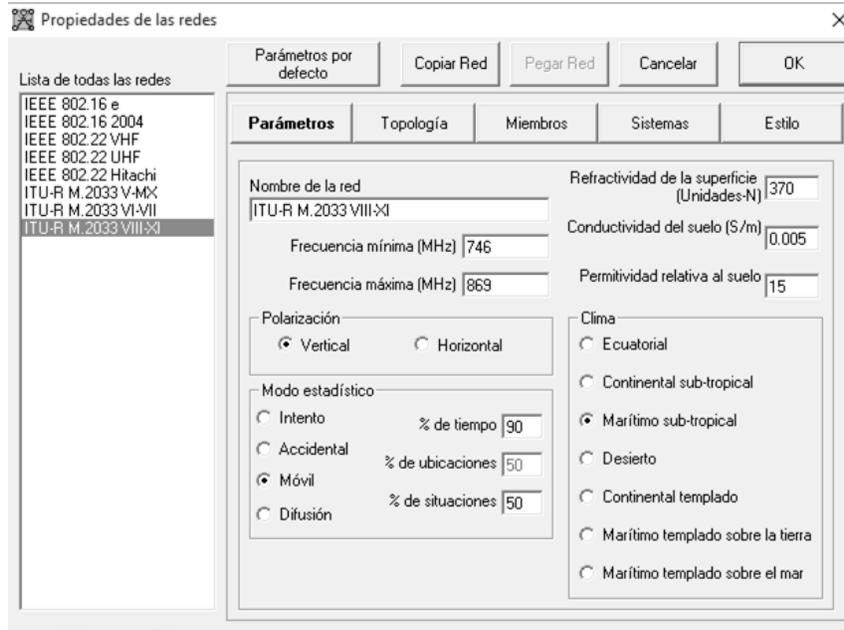


Figura 28. Equipos Miembro de la red creada

En estas primeras simulaciones se incluye IEEE802.16-2004 (WiMAX fijo) donde se avalúan el intervalo de frecuencias de 2 a 11 GHz, a diferencia de WiMAX móvil donde el intervalo de frecuencias es de 2 a 6 GHz.

Se utilizan las frecuencias especificadas para un equipo Hitachi entre 470 a 710 MHz, adicionalmente se realizan simulaciones en todo el rango de frecuencias de los espacios blancos de la tabla 18 (54-869 MHz).

En la figura 29 se muestra que para cada red creada se asignan distintas unidades; estas fueron nombradas para mayor referencia de acuerdo al municipio donde se ubica, y en cada una de estas estaciones base se vinculan dos estaciones remotas a diferentes distancias, una a 8Km (promedio del alcance WiMAX) y otra a 33km (promedio de alcance WRAN), las estaciones base son nombradas de igual forma acorde al municipio en el que se encuentran y las estaciones remotas se adiciona “8Km” o “33Km” para diferenciarlos de la distancia a la que se encuentran de la estación base.

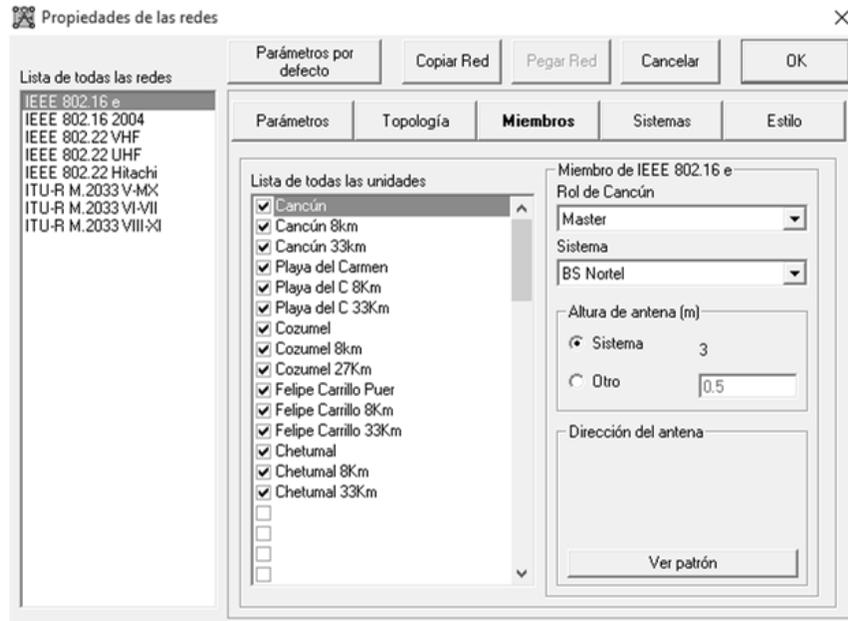


Figura 29. Lista de unidades asignadas a cada red creada

Estas unidades asignadas a una red en particular se muestran en la figura 30.

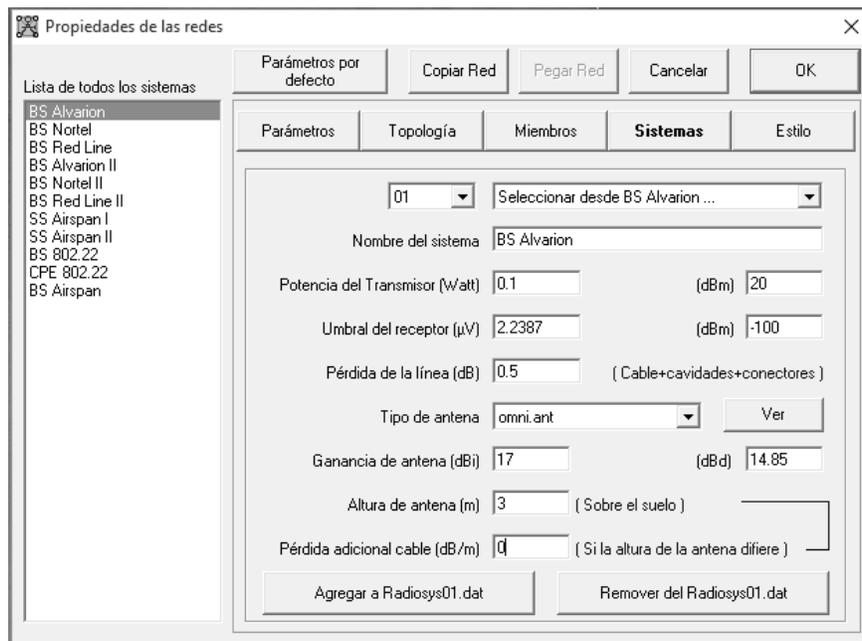


Figura 30. Descripción de unidades en el sistema

En dicha figura se puede observar en la sección “lista de todos los sistemas” BS Alvarion, BS Nortel, BS Red Line, SS Airspan que representan marcas comerciales, mientras que la etiqueta BS 802.22 y CPE 802.22 es para la tecnología de espacios blancos.

Los indicados con la etiqueta “II” representan al segundo equipo indicado en el Anexo 3. El prefijo BS se utiliza para denotar que es una Estación Base, SS y CPE se refieren a las transmisoras remotas (TR_m) de WiMAX y WRAN respectivamente. Es importante destacar que las simulaciones hechas en Radio Mobile, incluyeron una comparación entre potencia de recepción de los equipos remotos desde las diferentes estaciones base, es decir, se avalúa la calidad del enlace entre los distintos equipos WiMAX.

Al marcar la casilla de “grabar los datos de cobertura” en la figura 27, se generan los datos que luego son exportados directamente a un archivo de formato “.txt”.

En este archivo se indica cual es la ubicación del punto medido (latitud, longitud) y su potencia de recepción registrada y cuál es la distancia que existe entre la estación base el equipo remoto.

Estos datos generados son exportados al software *Matlab*, en donde se elaboran algoritmos para realizar simulaciones que permitan obtener el valor de SNR a diferentes distancias del enlace y evaluar la tasa de transferencia de datos que se puede proveer en el enlace, al usar las especificaciones de la tabla 7 y la tabla 9 tratadas en capítulo 2. Posteriormente se realiza una comparación de los radios de cobertura alcanzados.

Para lograr esto se recurre a la ecuación (14)

$$SNR = P_{RX} - P_{NE} \quad (14)$$

$$SNR = \text{Potencia de recepción} - \text{Potencia de ruido total efectivo}$$

donde

$$P_{NE} = P_{NR} + MI \quad (15)$$

P_{NR} representa la potencia de ruido real y MI es el margen de interferencia, es decir, lo que un equipo interfiere con otro (estaciones base o remotas). Además P_{NR} puede describirse como

$$P_{NR} = N_{[dB]} + NF_{[dB]} \quad (16)$$

$$\text{donde} \quad N_{[dB]} = -138.6 [dBm] + 10 \log_{10}(BW) + 10 \log_{10}(290) \quad (17)$$

Así $N_{[dB]}$ representa el ruido térmico, BW es el ancho de banda del canal en MHz y NF la figura de ruido del sistema, que es tomada de las especificaciones de WiMAX y WRAN para las estaciones base cuyos valores son 4 y 3 dB respectivamente.

Finalmente estos valores de SNR obtenidos marcan la pauta para determinar el alcance máximo que se logra con los equipos terrestres al encontrarse entre los valores mínimos de SNR y para asegurar una tasa de transferencia de datos.

En el segmento satelital se utilizan las ecuaciones de la sección 3.2.4.4.1 para encontrar el valor mínimo de la portadora a ruido C/N .

3.4 Tráfico y número de usuarios

La red propuesta debe proveer la disponibilidad de transmitir voz, video y datos. La tabla 21 indica algunas características de este tráfico.

Tabla 21. Parámetro de tráfico utilizado en la red de contingencia.

Prioridad	Transmisión	Códec	Tasa promedio
Alta	Voz (Alvarion, 2006)	G.711, G.729	64 kbps
	Video (Wikipedia, 2015)	H.264	768 kbps
Baja	Datos (Pal Grønsund, 2014)	--	5 Mbps

El estado del arte indica que son tres los modelos de tráfico usados en IEEE 802.22-2011, tasa de bit variable (VBR, *Variable bit rate*), tasa de bit constante (CBR, *Constant bit rate*) y protocolo en tiempo real (RTP, *real time protocol*) (Pal Grønsund, 2014).

La voz transmitida será VoIP (voz sobre IP) y modulada como un tráfico ON/OFF y por tanto tendrá una duración promedio, con una distribución exponencial.

Por otra parte IEEE 802.22 está orientado a conexión al implementar diferentes servicios de flujo o perfiles de Calidad de Servicio (QoS) que son tomados de IEEE802.16, mismos que dependen de valores mínimos de SNR para alcanzar cierta tasa de transferencia de transmisión.

Al obtener la tasa de transmisión y determinar la eficiencia espectral de cada combinación de modulación y codificación, es posible calcular la capacidad del canal con

$$\text{Capacidad de canal} = \frac{\text{Tasa de transmisión}}{\text{eficiencia espectral}} \quad (18)$$

y enseguida obtener número de usuarios por terminal, en un ancho de banda definido.

$$\text{No. Usuarios} = \frac{\text{Ancho de canal}}{\text{capacidad de canal}} \quad (19)$$

3.5 Conclusiones del capítulo

El propósito de este capítulo es plasmar los elementos necesarios para realizar las simulaciones y cálculos correspondientes para así obtener los resultados de la red híbrida de contingencia propuesta, que serán tratados en el siguiente capítulo. De este modo se describió cada uno de los elementos presentes, se indicó su organización, parámetros y características que lo definen, se revisaron y consideraron las distintas recomendaciones, normas y limitaciones que cada tecnología conlleva.

La red híbrida de contingencia propuesta se adecúa y atiende las recomendaciones internacionales de la ITU al mismo tiempo que obedece a especificaciones mexicanas. Esto permite participar en los esfuerzos internacionales por parte de UNISDR en la Reducción del Riesgo de Desastres y así adecua a la realidad mundial para la gestión y recuperación ante los desastres naturales de tipo hidrometeorológico como los huracanes.

En particular la elección del satélite MEXSAT 2, en Banda-L en conjunto con la tecnología de espacios blancos representa un precedente en su aplicación de este sistema, para auxilio en la población en caso de desastre en el territorio mexicano.

Si bien es cierto que el escenario propuesto por sus características (llano principalmente) representa ventajas en la propagación sin obstrucciones de las ondas electromagnéticas, como por ejemplo las montañas, su aplicación deriva en un primer caso de estudio académico de la distribución del espectro, pudiéndose extender a todo el territorio mexicano y elaborar mapas de cobertura en distintas frecuencias VHF/UHF para aplicaciones futuras.

Cabe resaltar que en este capítulo se dio énfasis en configuración de la red de contingencia ya que en el siguiente se abordarán los resultados de los cálculos y el análisis de estos iniciar la discusión de los mismos y concluir este estudio.

Capítulo 4 – Resultados y análisis

4.1. Introducción

En el capítulo anterior se revisó cada uno de los elementos que conforman la red, su estructura, parámetros y propiedades así como los simuladores a emplear. Ahora corresponde revisar los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas.

Este capítulo comienza con el análisis y discusión de los resultados obtenidos en el segmento terrestre, debido a que representa el segmento con mayor operación y actividad entre sus elementos que lo conforman. Luego, en el segmento espacial se analizan las relaciones C/N entre cada nodo base y la tasa de transferencia alcanzada, junto con el BER alcanzado.

Por tanto, en este capítulo los resultados se presentan a través de gráficas, mapas de cobertura, y tablas así como la realización de comparativos de las modificaciones hechas a los elementos que conforman la célula WRAN/WIMAX y las diferencias encontradas entre las tecnologías usadas. No es posible plasmar todo y cada uno de los resultados debido a lo extenso que resulta, sin embargo, se darán ejemplos para mostrar la estructura de los datos obtenidos.

4.2. Caracterización de la Red de Contingencia

La Península de Yucatán según datos del INEGI cuenta con un total de 4 103 596 habitantes, de los cuales 822 441 habita en Campeche, 1 325 578 en Quintana Roo y 1 955 577 en Yucatán. Para distribuir las estaciones base en el escenario de estudio se eligen aquellos municipios cuya población esté por encima de los 40 mil individuos. Por lo tanto en el estado de Campeche se colocan 6 estaciones base; en Quintana Roo, 5 estaciones base; en Yucatán, 7 estaciones base, esto representa un total de 18 estaciones distribuidas en toda la península. La cantidad de habitantes de los municipios donde se colocan las estaciones base es de 474 959 en Campeche, 1 032 452 habitantes en Quintana Roo y 1 023 530 habitantes en Yucatán, lo que es un total de 2 560 941 habitantes en la península, es decir, el 62.4% de la población total. La distribución de las estaciones base en toda la Península de Yucatán se muestra en la figura 31.

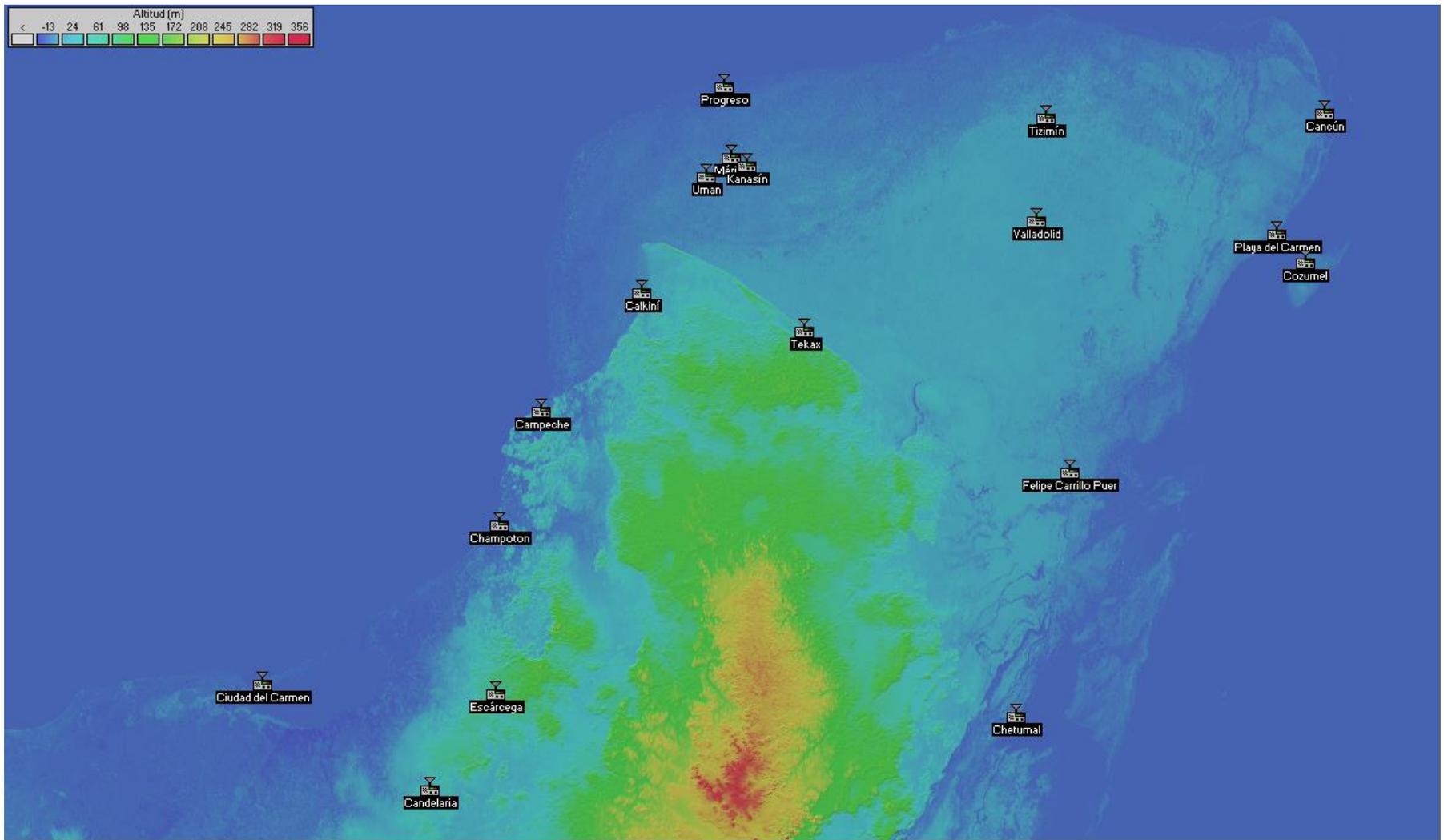


Figura 31. Distribución de los nodos en la península de Yucatán en el segmento terrestre.

En el segmento terrestre, se evalúa cada nodo distribuidos en toda la península de acuerdo con la red propuesta en la figura 31; equipos a utilizar y alcance de las estaciones base.

Como primer acercamiento se obtienen los resultados entre relación de la potencia recibida y la sensibilidad del equipo. Esta relación denominada “Margen” (M) es un indicativo del rendimiento del sistema, donde

$$M = P_{RX} - S_x \quad (20)$$

$$\text{Margen [dB]} = \text{Potencia recibida [dBm]} - \text{Sensibilidad [dBm]}$$

este valor indica que para valores negativos en el Margen, el emisor y receptor no pueden alcanzarse entre sí, es decir, no se establece el radio enlace.

4.2.1. Equipos IEEE 802.16e (WiMAX móvil)

Con las características de los equipos de tecnología WiMAX mencionados en el Anexo 3 se procede a encontrar el valor de M para las distancias de 8 y 33Km desde cada Estación Base hasta una Estación Remota en un enlace punto a punto (PP). Las simulaciones se efectúan para cada uno de los 18 nodos distribuidos en la península a fin de determinar la combinación de los equipos con tecnología IEEE 802.16 que ofrece un mejor rendimiento. En la ventana de simulaciones se muestra el valor de M obtenido, el cual está indicado por el valor “Rx relativo”, ver figura 32. Estos márgenes se calculan para cada uno de los 18 nodos (Estaciones Base) que conforman la red, en la tabla 22 se muestran los valores obtenidos para el nodo Mérida utilizando la tecnología IEEE 802.16e en enlaces punto a punto a las distancias de 8 y 33 km.

Al realizar las simulaciones para cada *Estación Base - Estación Remota* que forma parte de la red de contingencia y obtener las tablas correspondientes, como mostrada en la tabla 22, se observa que, la combinación *Alvarion II – Airspan I* ofrece un valor de M superior a las demás combinaciones de las tecnologías WiMAX. Los valores negativos en la tabla indican que la potencia de recepción a una distancia de 33 km está por debajo del umbral de sensibilidad del equipo, lo cual indica que las pérdidas en el escenario son considerables.

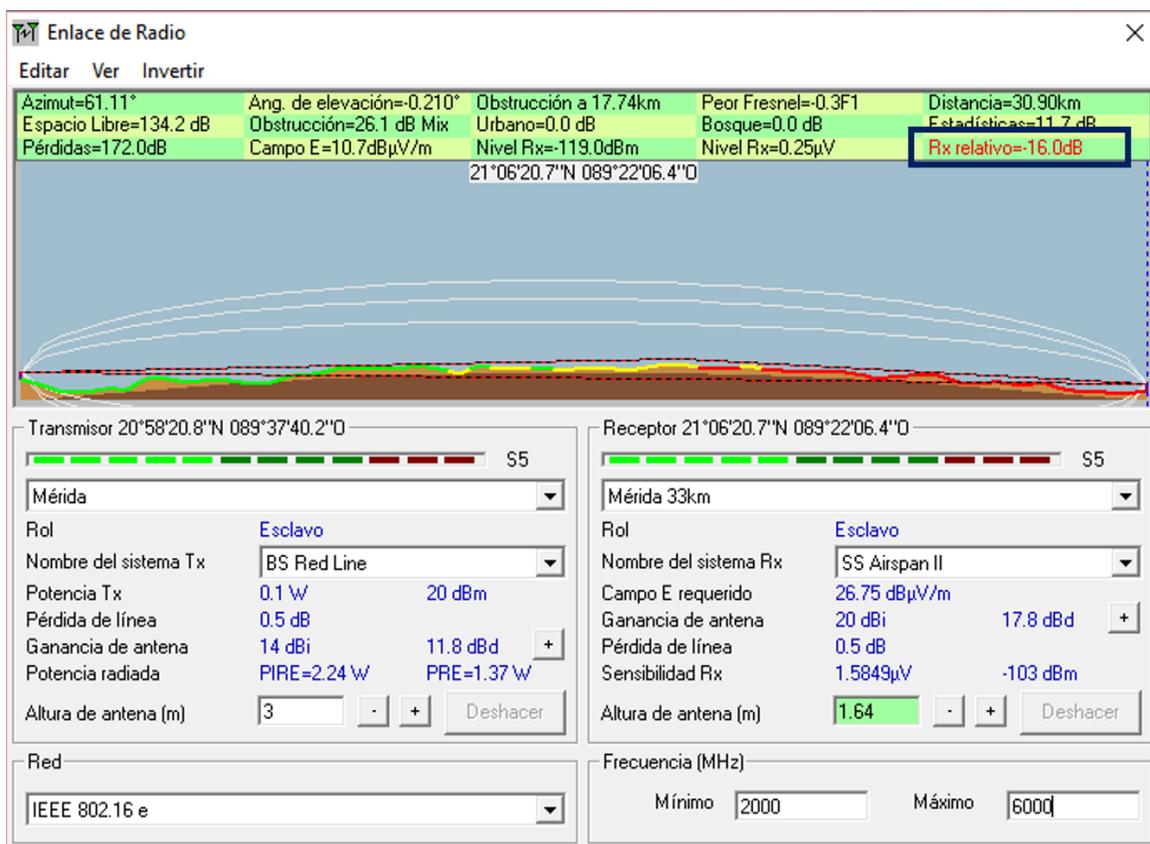


Figura 32. Enlace de radio muestra el valor de Rx relativo cuyo es valor negativo. Para la Estación Base Mérida enlazada con una Estación remota a 8Km de distancia.

Tabla 22. Márgenes calculados para el nodo Mérida para la tecnología IEEE 802.16e a diferentes distancias.

Tecnología	Estación		Valor del margen (dB) a	
	Base	Remota	8km	33km
IEEE 802.16e	BS Alvarion	SS Airspan I	23.7	-9
		SS Airspan II	19.7	-13
	BS Nortel	SS Airspan I	27.7	-5
		SS Airspan II	23.7	-9
	BS Red Line	SS Airspan I	20.7	-12
		SS Airspan II	16.7	-16
	BS Alvarion II	SS Airspan I	31.7	-1
		SS Airspan II	27.7	-5
	BS Nortel II	SS Airspan I	30.7	-2
		SS Airspan II	26.7	-6
	BS Red Line II	SS Airspan I	23.7	-9
		SS Airspan II	19.7	-13
	Pruebas	SS Airspan I	42.7	10
		SS Airspan II	38.7	6

Por tal motivo se elige este dúo de equipos para conformar la red de contingencia y quedan definidas las características del equipo WiMAX a emplear, para las simulaciones subsecuentes, se utilizan los equipos Alvarion II – Airspan I.

4.2.2. Radiofrecuencias para IEEE 802.22 (WRAN)

Para la tecnología IEEE 802.22 no fue necesario realizar estas simulaciones, de comparación de equipos debido a que, como se mencionó en la sección 3.2.4.3, el desarrollo de equipos que soportan el estándar IEEE 802.22 aún está en despegue. Sin embargo, se realiza un análisis de las diferentes frecuencias de operación de los equipos utilizados, ya que como se indica en la sección 3.2.4.1, en México no existe un marco regulatorio del espectro radioeléctrico que defina la operación de estos equipos. Las características de la tecnología WRAN empleadas en la simulación son las mostradas en la tabla 23.

Tabla 23. Tecnología IEEE 802.22 (WRAN)

Descripción	WRAN EB	WRAN ER
Potencia [dBm]	30	28
Sensitividad [dBm]	-116	-116
Ganancia de antena [dBi]	6	0
Altura de antena [m]	3	1.64

EB= estación base; ER= estación remota.

De igual manera que en la sección 4.2.1, se calculan los valores para el margen en los enlaces para los equipos con tecnología WRAN utilizados las distintas redes, en donde las frecuencias de operación son diferentes y por tanto permite determinar que segmento de frecuencias que brinda mejores prestaciones para este trabajo.

A manera de ejemplo se muestran en la tabla 24 los resultados obtenidos para el nodo Cozumel. En particular este nodo sólo alcanza los 27km de distancia en tierra entre el emisor y receptor, debido al tamaño de la isla. Se repiten estas simulaciones para cada uno de los 17 nodos restantes.

Tabla 24. Valores del Margen calculados para el nodo Cozumel para la tecnología WRAN

Red	Estación		Valor del margen (dB) a	
	Base	Remota	8km	27km
IEEE 802.22 VHF	BS 802.22	CPE 802.22	38.2	-9.6
IEEE 802.22 UHF			21.1	-10.7
IEEE 802.22 Hitachi			20.9	-10.9
IEEE 802.22 V-MX			25.7	-6.8
IEEE 802.22 VI-VII			24.4	-7.9
ITU-R M.2033 VIII-XI			17.4	-14.1

Se observa de lo obtenido en la tabla 24 que en la red IEEE 802.22 VHF se obtienen resultados del valor en el margen (M) de mayor orden, en comparación con las demás redes mostradas en la tabla. Al revisar los resultados para los demás simulaciones de las demás *Estaciones Base –Estaciones Remotas* realizadas, se obtienen el mismo comportamiento. Por lo que se concluye que estas frecuencias proveen el mejor alcance para la Red de Contingencia con la tecnología IEEE 802.22 VHF, localizado entre las bandas de frecuencia de 54 a 216 MHz, es decir, entre los canales 2 y 13 de TV. Además como anotación, las frecuencias en VHF a pesar de que pueden ser bloqueadas por las características orográficas, tales como colinas y montañas, se ven menos afectadas por los edificios y se pueden recibir en el interior. En particular nuestro escenario de estudio se caracteriza por ser llano en la extensa mayoría del territorio y con una población urbana entre el 75 y 88% (ver tabla 10), por lo cual, la implementación de IEEE 802.22 resulta de relevancia como un primer caso de estudio en este escenario.

Realizado lo anterior, el siguiente paso es determinar el área de cobertura de cada estación base, por lo que cada nodo se debe simular mediante Radio Mobile.

4.3. Mapa de cobertura

De los cálculos realizados para los enlaces punto a punto de cada nodo, se obtiene un valor de M específico para un equipo remoto. Sin embargo, resulta necesario determinar un radio de alcance promedio para las Estaciones Base del segmento terrestre inalámbrico.

Tal como se mencionó anteriormente la opción “Cobertura de Radio polar” (figura 33) que ejecuta el software Radio Mobile se adecúa a lo perseguido. El mapa creado alrededor de un equipo en particular, para el caso de la red propuesta será alrededor de la Estación Base, así se obtiene la potencia de recepción en determinados puntos alrededor de esta.

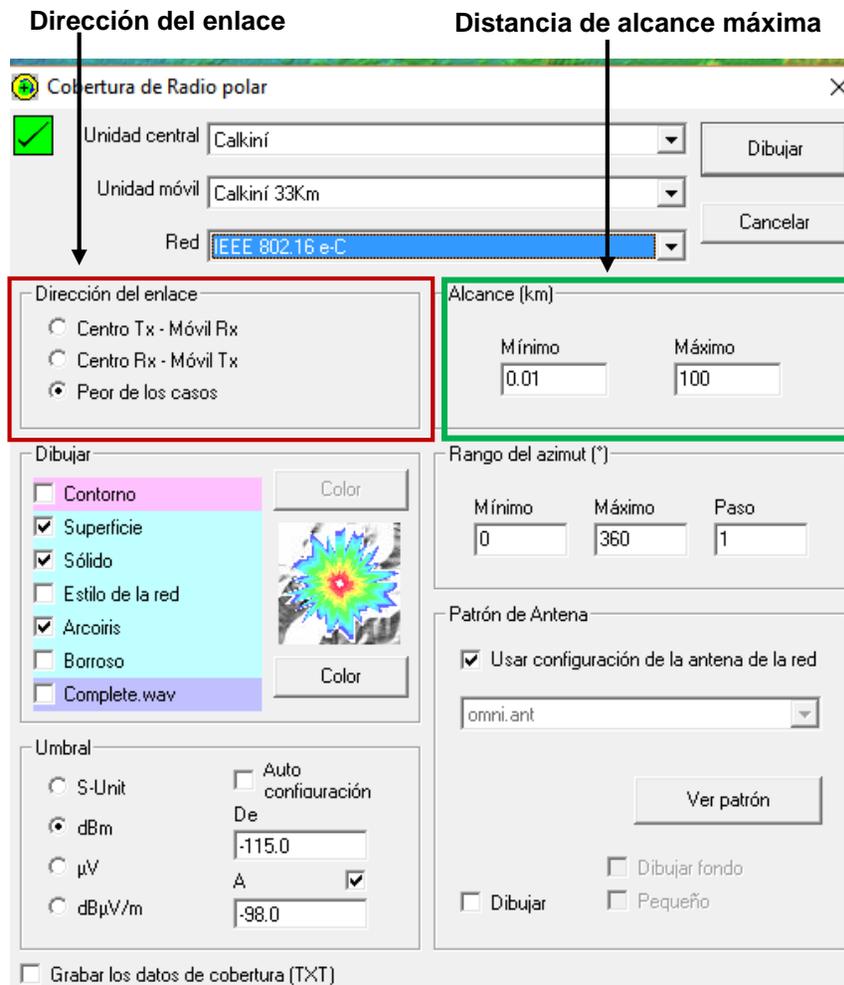
Además entre las opciones de configuración en la ventana “Cobertura de Radio polar”, es posible elegir la dirección del enlace (figura 33a), la distancia hasta la cual las ondas electromagnéticas pueden dispersarse en el escenario, la distancia de alcance máxima (Figura 33a); la Red a utilizar (figura 33b) y modificar el rango de sensibilidad que se desea obtener en la red empleada (figura 33b)

En la tabla 25 se muestra la descripción de las opciones de dirección del enlace de la figura 33a)

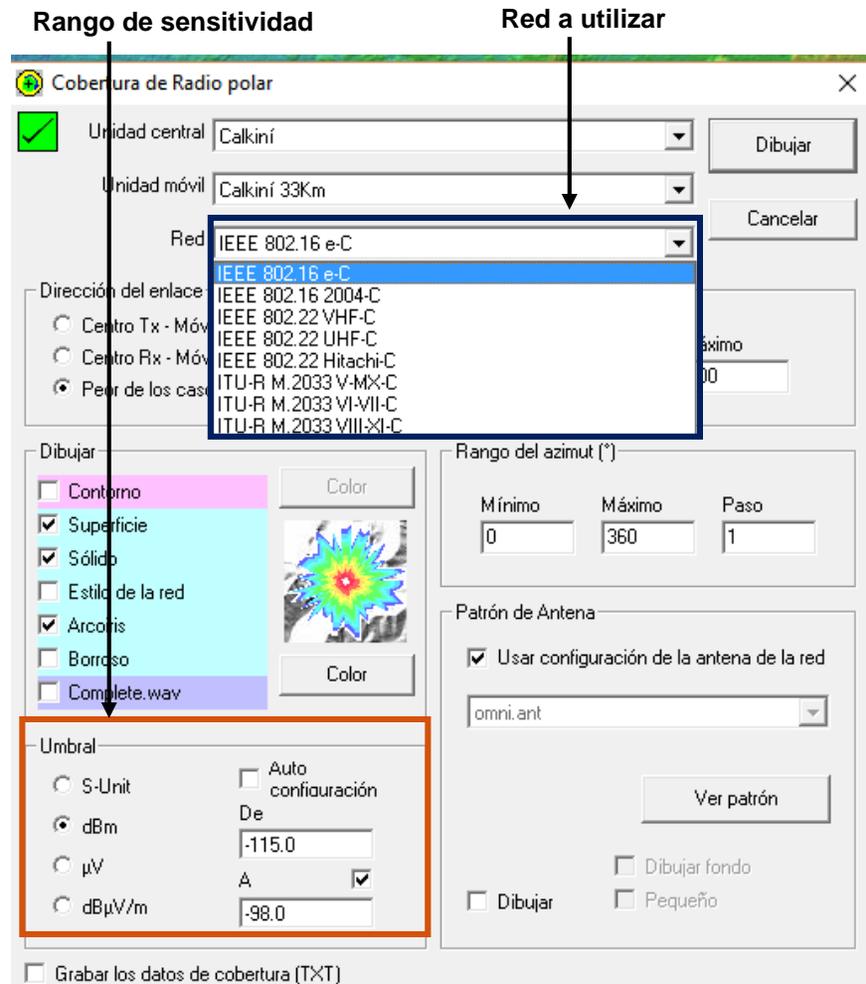
Tabla 25. Descripción de la dirección del enlace de comunicación

Dirección del enlace	Descripción
Centro Tx – Móvil Rx	Radio enlace calculado de la BS a la subscriptora – Enlace ascendente
Centro Rx – Móvil Tx	Radio enlace calculado de la subscriptora a la BS – Enlace descendente.
Peor de los casos	Para comunicaciones bidireccionales

Para realizar las simulaciones del área de cobertura, en nuestro caso de estudio se utiliza la distancia de alcance hasta los 100 Km, que es la distancia máxima de alcance para el protocolo IEEE 802.22 (sección 2.3.2.5) en situaciones ideales. Se selecciona en cada nodo la *Unidad Central* como la Estación Base y la *Unidad Móvil* como la Estación Remota, se elige la unidad más lejana de la estación base como referencia a 33 km, en cada una de las 8 diferentes redes configuradas a intervalos de frecuencia (indicadas en la tabla 18).



a)



b)

Figura 33. Opciones de la ventana: Cobertura de Radio polar

En la tabla 26 se describen las características potencia, ganancia y alturas de antenas de las estaciones empleadas para obtener el mapa de cobertura.

Tabla 26. Características de las Estaciones Base y Estaciones Remotas usadas en las simulaciones

Descripción	Estación Base WiMAX	Estación Base WRAN	Estación Remota WiMAX	Estación Remota WRAN
Potencia [dBm]	28	30	17	20
Ganancia de antena [dBi]	17	6	27	0
Altura de antena [m]	3	3	1.64	1.64

Una vez concluida la simulación se proporcionan los valores resultantes los cuales están indicados en “El área de cubierta es 186 kilómetros cuadrados”.

En la tabla 27 se muestra los valores obtenidos del área de cobertura en una simulación para el nodo denominado “Escárcega”, a diferentes frecuencias y en diferentes direcciones del enlace, con un alcance entre 0 y 100 km a la redonda, con base en los equipos de la tabla 26

Tabla 27. Área de cobertura alcanzada por una Estación Base usando las características de las estaciones base y estaciones remotas descritas en la tabla 26

Frecuencias		Área de cobertura (km ²)		
		Centro Tx - Móvil	Centro Rx - Móvil	Peor de los casos
IEEE 802.16 e	Sx: -98 a -115	955	308	308
IEEE 802.16 2004	Sx: -98 a -115	1221	431	431
IEEE 802.22 VHF	Sx: -94 a -116	2092	1043	1043
IEEE 802.22 UHF	Sx: -94 a -116	520	190	190
IEEE 802.22 Hitachi	Sx: -94 a -116	507	186	186
ITU-R M.2033 V-MX	Sx: -94 a -116	860	296	296
ITU-R M.2033 VI-VII	Sx: -94 a -116	757	259	259
ITU-R M.2033 VIII-XI	Sx: -94 a -116	330	138	138

La tabla 27 muestra en la columna de frecuencias, valores “Sx”, referido como el rango de sensibilidad en el que pueden operar los equipos. El estándar IEEE 802.16e condiciona el valor mínimo de sensibilidad (*RSSI*) de los equipos WiMAX dado por la ecuación (5); es por ello al considerar los datos de la tabla 13 de la sección 3.2.2 se obtiene

$$RSSI = -101 - SNR_x + 10 \log_{10} \left(5.6 \frac{360}{512} \cdot \frac{8}{16} \right)$$

La señal se percibe por el equipo que se encuentra en el umbral, es decir, donde la relación señal a ruido es la unidad (0 dB), entonces se puede fijar el valor mínimo teórico para *RSSI* a -98.06 dBm .

Así el rango de sensibilidad utilizado en las simulaciones, resulta de usar el valor de menor y mayor sensibilidad de los equipos listados en el Anexo 3, -98 dBm y -115 dBm respectivamente. Para la tecnología WRAN se utiliza el rango de sensibilidad que indica el estándar: -116 a 94 dBm .

Para el desarrollo de este trabajo, los valores de la columna “Peor de los casos” de la tabla 27 son de relevancia ya que la comunicación entre la Estación Base y los Equipos Remotos es bidireccional, es decir, ambos envían y reciben información. Aunque también se obtienen los resultados para los demás direcciones de enlaces. Así los valores obtenidos darán pie al cálculo del SNR en cada punto; esto será abordado en secciones posteriores.

A manera de ejemplo, en la figura 34 y la figura 35 se muestran los mapas de cobertura generados para las simulaciones de el “enlace peor de los casos” para las áreas de cobertura mostradas en la tabla 27 desde una Estación Base. Estas figuras corresponden a la mayor y menor área cubierta en las frecuencias para IEEE 802.22 VHF y ITU-R M.2033 VIII-XI respectivamente. Se elige mostrar este nodo ya que representa lo valores de menor área de cobertura en las simulaciones realizadas, debido a las pérdidas significativas que se registran en la zona donde está ubicado el nodo base.

La figura 34 muestra el área de cobertura del nodo Escárcega, un área de 1043 km^2 reportado en la tabla 27 en el enlace “peor de los casos” en las frecuencias de IEEE 802.22 VHF, y se incluye circunferencias con radios de 10 y 20 Km para apreciar de manera más clara el área cubierta. La figura 35 muestra el área de cobertura de 138

Km² reportado en la tabla 27 para la red ITU-R M.2033 VIII-XI, de igual manera se incluyen de circunferencias con radios de 10 y 20 Km.

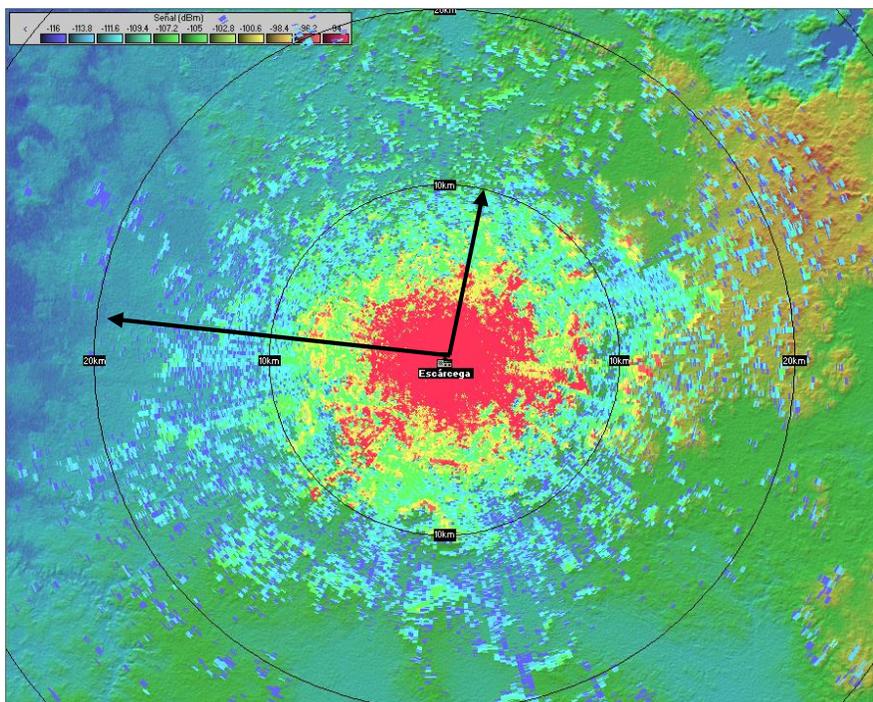


Figura 34. Área de cobertura en el nodo Escárcega en la red IEEE 802.22 VHF: 1043 km².

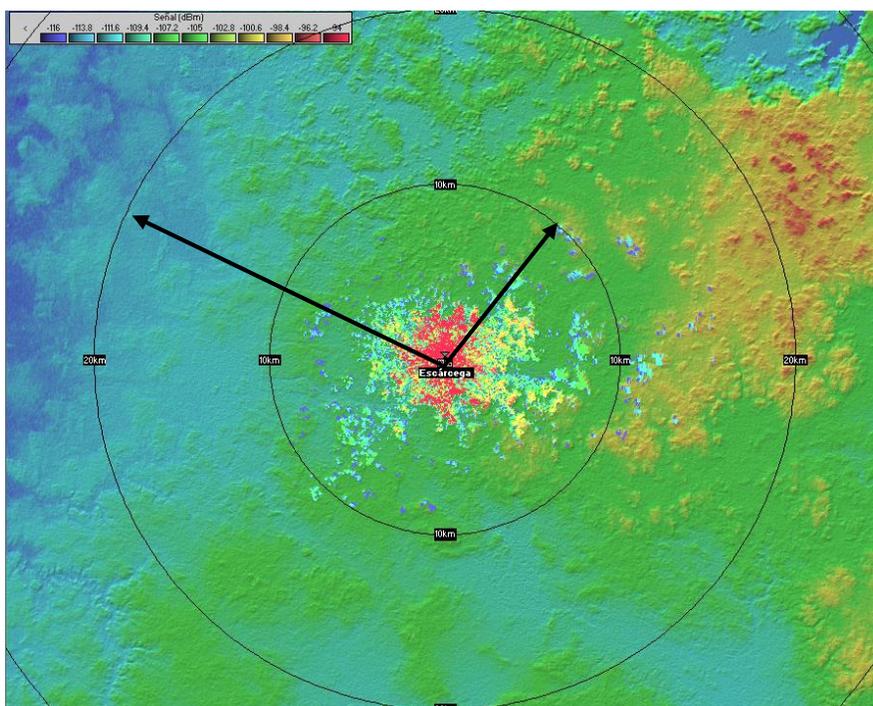


Figura 35. Área de cobertura en el nodo Escárcega en la red ITU-R M.2033 VIII-XI: 138 km².

La figura 34 y la figura 35 permiten observar de manera gráfica los resultados obtenidos para el área de cobertura, sin embargo, es necesario procesarlos para obtener de manera cuantitativa el alcance promedio de cada Estación Base. Estos datos se obtienen de manera directa al momento de generar el mapa de cobertura, los datos se guardan en un archivo de texto. Para cada simulación se obtiene la figura del mapa de cobertura y también los datos de potencia recibida a determinada distancia en cada punto del mapa, los cuales se indican en la figura 36.

Azimuth(deg)	Distance(Km)	Latitude(deg)	Longitude(deg)	Elevation(m)	Rx(dBm)	Margin(dB)
0	0.111	18.60566	-90.73199	85	-47.22	68.78
0	0.167	18.60616	-90.73198	83	-61.07	54.93
0	0.223	18.60666	-90.73199	84	-61.86	54.14
0	0.278	18.60716	-90.73199	84	-65.13	50.87
0	0.334	18.60766	-90.73199	83	-68.32	47.68
			⋮			
360	19.805	18.78289	-90.73199	48	-151.58	-35.58
360	19.861	18.78339	-90.73198	52	-152.26	-36.26
360	19.917	18.78389	-90.73199	55	-149.73	-33.73
360	19.972	18.78439	-90.73198	52	-152.13	-36.13
360	20.028	18.78489	-90.73198	54	-150.9	-34.9

Figura 36. Datos obtenidos en la simulación para el nodo Escárcega en el enlace “peor de los casos” para la red ITU-R M.2033 VIII-XI.

En la tabla 28 se muestra los valores del área de cobertura obtenidos para los nodos en el estado de Yucatán para el enlace el “Peor de los casos”.

En la figura 37 se muestra el mapa de cobertura de las Estaciones Base en el estado de Yucatán para la tecnología WiMAX (IEEE 802.16e), en la figura 38 se muestra el mapa de cobertura de las Estaciones Base en el estado de Yucatán para la tecnología IEEE 802.22 (WRAN), ambos reportados en la tabla 28.

Tabla 28. Área de cobertura obtenida para los nodos en el estado de Yucatán en el enlace “peor de los casos”

Peor de los casos		Área (km ²)							
		Mérida	Kanasín	Umán	Progreso	Tizimín	Valladolid	Tekax	Total
IEEE 802.16e	S: -98 a -115	1451	1576	1672	2500	1492	1860	1529	12080
IEEE 802.16 2004		1937	1987	2080	2767	1793	2232	1757	14553
IEEE 802.22 VHF	S: -94 a -116	996	821	686	569	685	775	2102	6634
IEEE 802.22 UHF		424	524	555	1221	484	608	562	4378
IEEE 802.22 Hitachi		411	509	539	1251	472	594	549	4325
ITU-R M.2033 V-MX		818	857	932	1096	757	963	838	6261
ITU-R M.2033 VI-VII		680	742	808	1134	669	848	744	5625
ITU-R M.2033 VIII-XI		253	341	364	933	330	424	385	3030

Tecnología WiMAX: Estación Base, Alvarion. Estación Remota, Airspan I.

Tecnología WRAN: Estación Base, WRAN EB. Estación Remota, WRAN ER, indicados en la tabla 23.

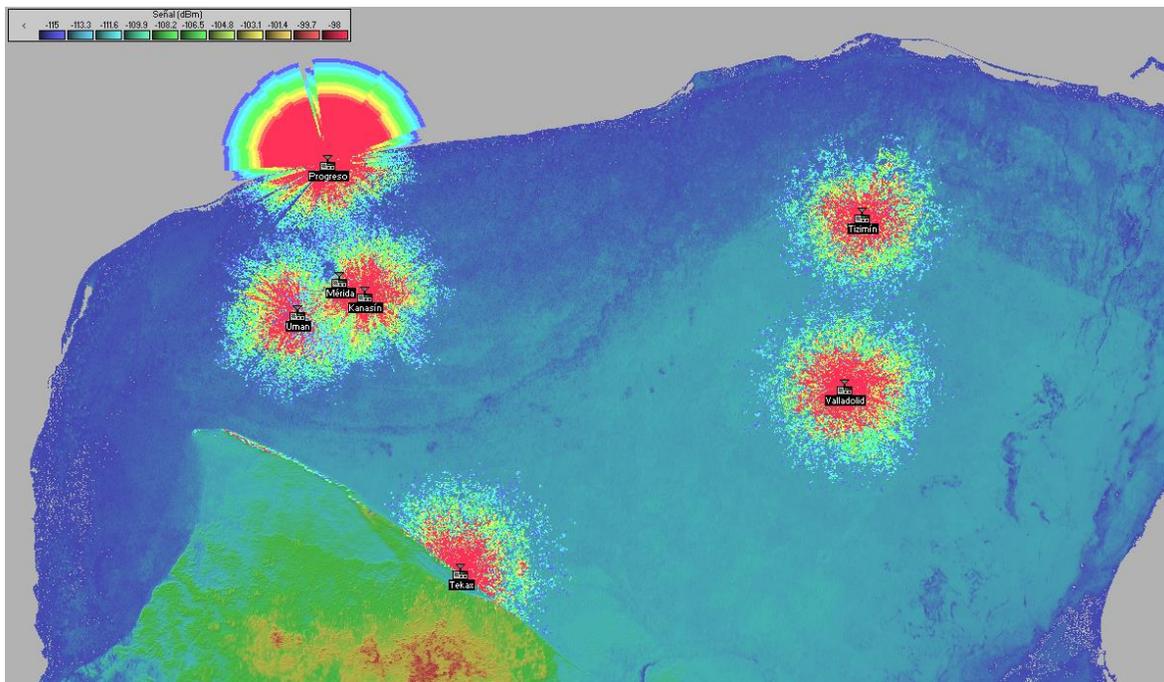


Figura 37. Mapa de cobertura de las Estaciones Base en el estado de Yucatán que utiliza la tecnología WiMAX. Área de cobertura 12080 Km².

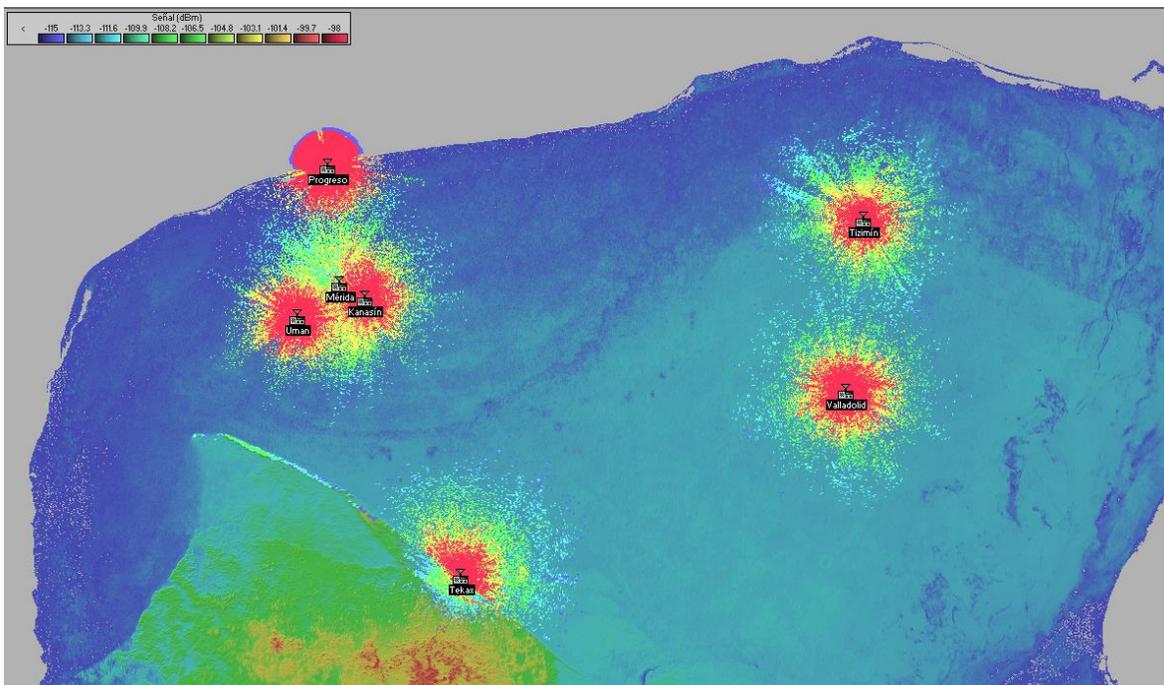


Figura 38. Mapa de cobertura de las Estaciones Base en el estado de Yucatán que utiliza la tecnología WRAN. Área de cobertura 6634 Km².

En la figura 37 se muestra el mapa de cobertura de las Estaciones Base en el estado de Yucatán para la tecnología WiMAX (IEEE 802.16e), reportado en la tabla 28, que registra un área de cobertura de 12080 Km², en el enlace “peor de los caos”

En la figura 38 se muestra el mapa de cobertura de las Estaciones Base en el estado de Yucatán para la tecnología WRAN (IEEE 802.22), reportado en la tabla 28, que registra un área de cobertura de 6634 Km², en el enlace “peor de los casos”.

Estas simulaciones se repiten para todos los nodos en los estados de Campeche y Quintana Roo.

El mapa de cobertura para la tecnología WiMAX (IEEE 802.16e) se muestra en la figura 39 y en la figura 40 se muestra el de la tecnología WRAN (IEEE 802.22).

Cabe resaltar que el área de cobertura alcanzada por IEEE 802.16–2004, que se reporta en la tabla 28 es mayor que el área cubierta por las demás tecnologías. Sin embargo, IEEE 802.16e fue desarrollado para unidades móviles mientras que IEEE 802.16–2004 es para equipos fijos, lo que limita su empleo en este trabajo. Así IEEE 802.16e será finalmente la utilizada en la red de contingencia ya que se requiere movilidad en los equipos remotos. Los resultados obtenidos en la tabla 28 permiten observar y comparar el área de cobertura alcanzada por esta tecnología.

En la sección 3.2.1 se indicó que la distribución de las Estaciones Base obedecía al número de habitantes de cada municipio y también que el estudio realizado por Boose (2003) se adopta al distribuir los nodos en la toda la península. Así, el mapa de cobertura obtenido anteriormente en la figura 39 y en la figura 40 debe ajustarse. Ya que resulta necesario modificar la distribución de los nodos a fin de abarcar el mayor territorio posible con la red de contingencia.

Del mismo modo, en base a los resultados obtenidos al comparar el área cubierta con la tecnología WIMAX contra el área cubierta con tecnología WRAN, resulta necesario modificar algunos parámetros en el enlace. Ya que las unidades móviles son las mismas, se mantiene las alturas de las antenas para las estaciones base y remotas.

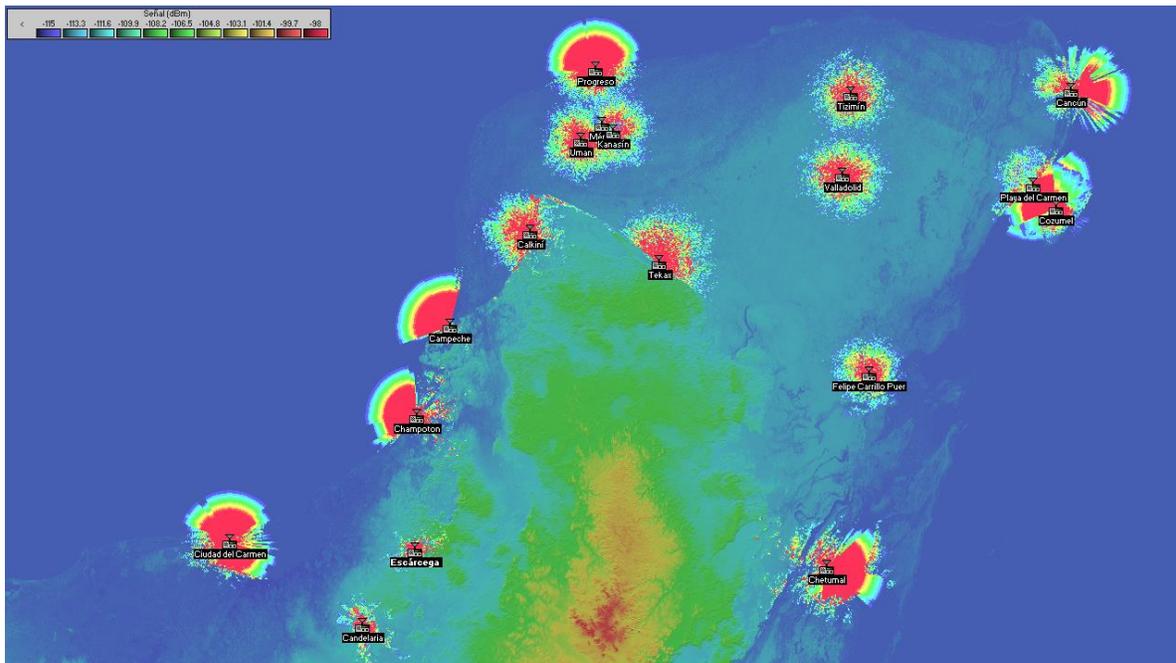


Figura 39. Mapa de Cobertura de la Península de Yucatán (Campeche, Quintana Roo y Yucatán) para el enlace “peor de los casos” con IEEE 802.16e. Área de 22936 Km².

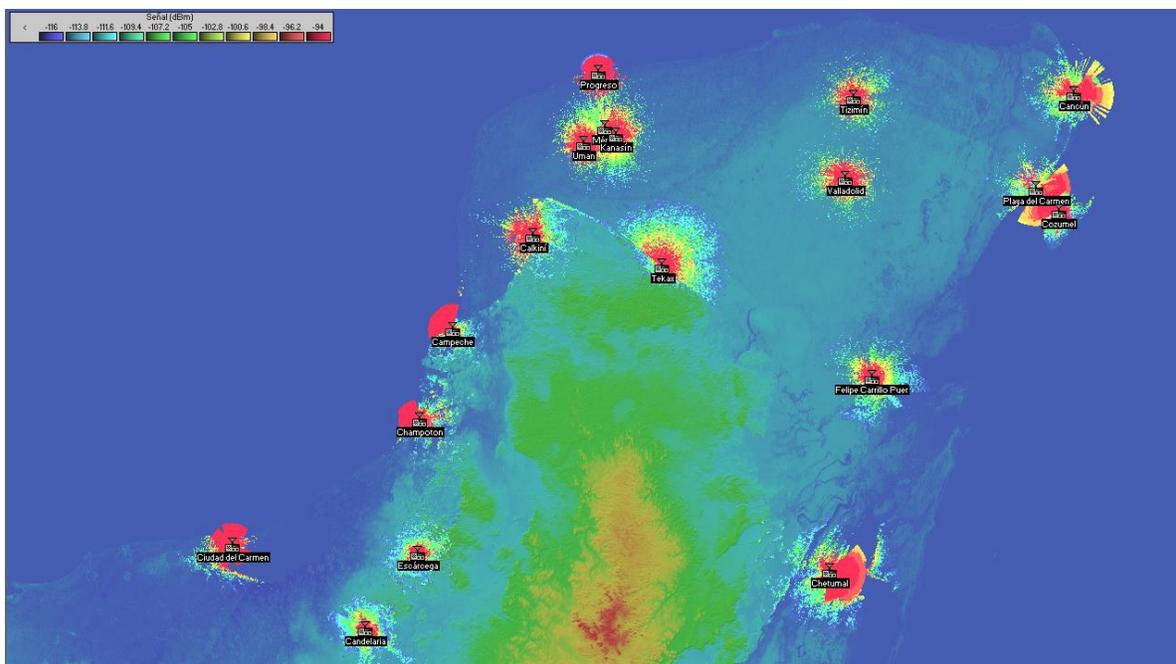


Figura 40. Mapa de Cobertura de la Península de Yucatán (Campeche, Quintana Roo y Yucatán) para el enlace “peor de los casos” con IEEE 802.22 VHF. Área de 13432 Km².

Se recurre a los datos de tabla 26 y utilizando la ecuación (1) se calcula el PIRE para las estaciones base (EB) y las estaciones remotas (ER) de ambas tecnologías. Se considera en estos cálculos la pérdida por cable L_c de 0.5 dB (LMR-600¹⁵).

PIRE en Estaciones Base

$$PIRE_{WiMAX_EB} = 28dBm - 0.5dB + 17dBi = 44.5dBm$$

$$PIRE_{WiFAR_EB} = 30dBm - 0.5dB + 6dBi = 35.5dBm$$

PIRE en Estaciones Remotas

$$PIRE_{WiMAX_ER} = 17dBm - 0.5dB + 27dBi = 43.5dBm$$

$$PIRE_{WiFAR_ER} = 20dBm - 0.5dB + 0dBi = 19.5dBm$$

Los resultados anteriores muestran existen 9 dB de diferencia en la PIRE entre las estaciones base WiMAX y WRAN, por lo que es necesario modificar la potencia de este último, a fin de alcanzar un valor de similar de PIRE en ambas estaciones base.

PIRE en Estaciones Base

$$PIRE_{WiMAX_EB} = 28dBm - 0.5dB + 17dBi = 44.5dBm \quad (21)$$

$$PIRE_{WiFAR_EB} = 36dBm - 0.5dB + 6dBi = 41.5dBm \quad (22)$$

En la modificación para la potencia de la estación base se emplea la máxima permitida por las especificaciones de la FCC de los Estados Unidos, que es de 36dBm y además los valores de las ganancias de las antenas son los que están indicados como recomendación (0 y 6 dBm), las estaciones remotas WRAN utilizan 20dBm como máximo en su potencia, por lo que no es posible incrementar la potencia de transmisión ni las ganancias de antenas de las estaciones remotas. Así, se incrementa 6 dB la potencia de la estación base WRAN.

Los nuevos parámetros de los equipos utilizados en las simulaciones subsecuentes para la red de contingencia con la tecnología WRAN son los mostrados en la tabla 29, los equipos con tecnología WiMAX permanecen con los mismos valores.

¹⁵ Cable coaxial LMR-600 (4000MHz), pérdidas de 16.5 dB/100m

Tabla 29. Modificación de la potencia. Nuevos parámetros en los equipos base con tecnología WRAN que serán utilizados en simulaciones posteriores

Descripción	Estación Base WiMAX	Estación Base WRAN	Estación Remota WiMAX	Estación Remota WRAN
Potencia [dBm]	28	36	17	20
Sensitividad [dBm]	-103	-116	-100	-116
Ganancia de antena [dBi]	17	6	27	0
Altura de antena [m]	3	3	1.64	1.64

4.4. Red de contingencia

A partir resultados obtenidos en las simulaciones se hace una propuesta final considerando los parámetros de los equipos empleados en la tecnología terrestre inalámbrica, y una nueva distribución de las estaciones base en el área de estudio. Para Yucatán se opta por sustituir 3 nodos (Mérida, Umán y Kanasín) por uno solo, denominado “Central M”, debido a la cercanía de estas tres estaciones base. Entre las ciudades de Mérida y Kanasín existen menos de 10 Km de distancia, entre Mérida y Umán a menos de 15 km de distancia. El nodo base “Central M”, se sitúa dentro de un punto estratégico entre estas ciudades.

Se agregan cuatro nuevos nodos, Kantunil, Hunucmá, Dzidzantún y Rio Lagartos, estos tres últimos tienen localidades cercanas a las costas por lo que resulta de mayor beneficio a las poblaciones vulnerables de esa zona y cuya población excede los 3 mil habitantes cada uno. Se tiene un total de 9 estaciones base en Yucatán.

En el estado de Quintana Roo los nodos Cozumel y Playa del Carmen son sustituidos solo por un nodo denominado “Central Playa”, esto debido a que existe una cercanía entre ambos, menor a 20 Km. Ya que la frecuencia de impacto es mayor en la zona del Mar Caribe, según Boose (2003), se agregan los nodos Limones, Tulum, Kantunilkin y Chuiquilá a fin de tener nodos en la franja costera del estado de Quintana Roo. Estas poblaciones en conjunto tienen cerca de 30 mil habitantes, además dicha zona de Quintana Roo es altamente turística. Con ello se tiene un total de 8 estaciones base en el estado.

Para el estado de Campeche los nodos propuestos en un principio no sufren cambios a los establecidos. Además la zona no presenta una frecuencia de

impactos de huracanes de mayor grado en comparación con Quintana Roo o Yucatán.

La distribución de los nodos en toda la península para esta nueva configuración al tomar en cuenta las consideraciones anteriores está en el Anexo 6 y se muestra en la figura 41.

Ahora resulta necesario realizar las simulaciones correspondientes a la red de contingencia, en base a los parámetros de equipos anteriormente descritos y así encontrar el área de cobertura de para la propuesta final.

Los ajustes indicados líneas arriba son necesarios realizarlos en cualquier situación con la finalidad no solo para tener mayor cobertura sino satisfacer las necesidades de protección civil.

4.4.1. Área de cobertura de la red de contingencia

En la sección 4.2.1 se indica que la combinación *Alvarion II – Airspan I* ofrece las mejores prestaciones en tecnología WiMAX y en la sección 4.2.2 que la red IEEE 802.22 VHF con frecuencias de 54 a 216 MHz brinda las mejores prestaciones en el espectro radio eléctrico para la tecnología WRAN. Además el estándar IEEE 802.16e se ajusta a las necesidades de la red de contingencia de este trabajo, por tanto, en las simulaciones siguientes se recurre a las especificaciones de los quipos mostrados en la siguiente tabla

Tabla 30. Especificaciones de equipos utilizados en la red de contingencia

RED	IEEE 802.16e		IEEE 802.22	
	Estación Base WiMAX	Estación Remota WiMAX	Estación Base WRAN	Estación Remota WRAN
Potencia [dBm]	28	17	36	20
Sensitividad [dBm]	-103	-100	-116	-116
Ganancia de antena [dBi]	17	27	6	0
Altura de antena [m]	3	1.64	3	1.64

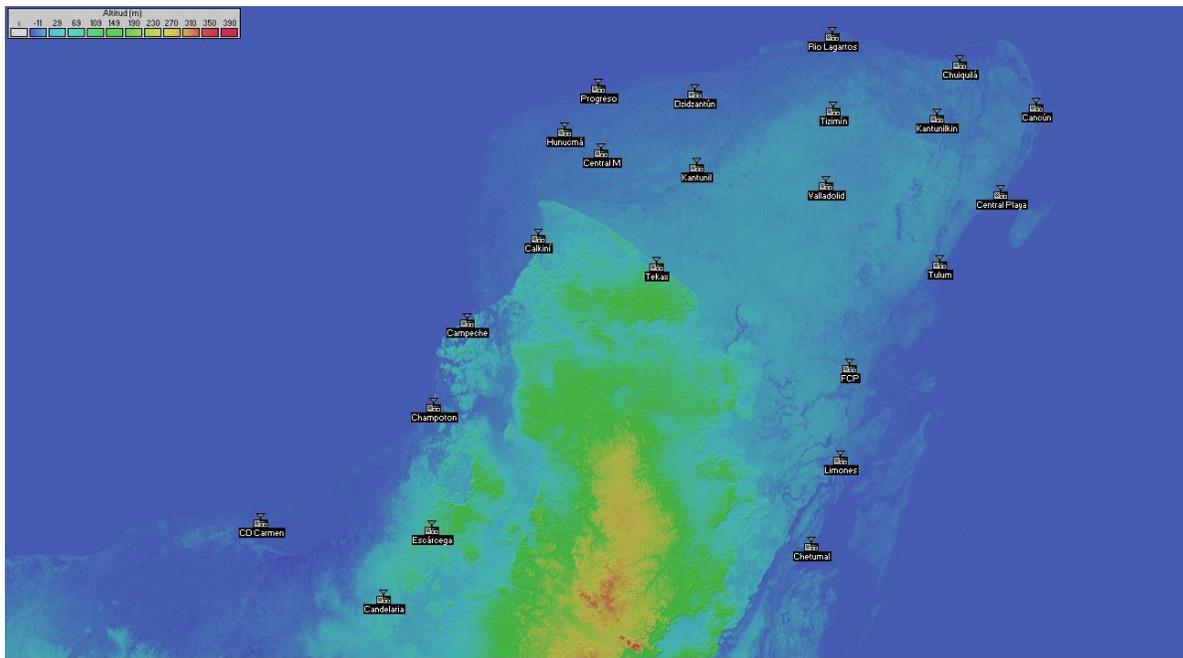


Figura 41. Distribución de radio bases de la red de contingencia

De nuevo se realizan las simulaciones correspondientes a cada nodo y en las distintas direcciones del enlace mencionadas en la tabla 25, sólo en las frecuencias para IEEE 802.22 en VHF e IEEE 802.16e.

El rango de sensibilidad para IEEE 802.22 se mantiene con los valores iniciales de -94 a -116, se modifica la sensibilidad para IEEE 802.16e de -98 a -103 dBm, el umbral de la estación base. La distancia máxima de alcance se fija hasta lo 100Km. Los resultados de estas nuevas simulaciones se muestran en la tabla 31 para el enlace “peor de los casos”, en la tabla 52 se muestran los resultados para el enlace “Tx-Rx”.

Con los datos mostrados en la tabla 31, para IEEE 802.16e se obtiene un área de cobertura total de 8164 km² y un área de 36172 km² para IEEE 802.22, esto representa cerca de un 26 % más del territorio cubierto con la tecnología WRAN.

De manera particular el total del territorio cubierto para el estado de Campeche con IEEE 802.16e es de 1455 km² y para IEEE 802.22 es de 5360 km², lo que representa un 27% más de cobertura.

Para el estado de Quintana Roo el territorio cubierto con IEEE 802.16e es de 3796 km² y para IEEE 802.22 es de 19587 km², lo que representa un 19% más.

En el estado de Yucatán el territorio cubierto con IEEE 802.16e es de 2913 km² y para IEEE 802.22 es de 11225 km², lo que resulta cerca de un 26% más del territorio cubierto al emplear WRAN.

En la figura 42 y figura 43. muestran el mapa de cobertura obtenido de las cantidades presentadas en la tabla 31.

Este mismo análisis se realiza para el enlace "Tx-Rx" presentado en la tabla 32 , así para IEEE 802.16e se tiene un área de cobertura total de 20366 km² y la para IEEE 802.22 un área de 64003 km², esto representa cerca de un 31 % más del territorio cubierto con la tecnología WRAN.

Con esta configuración se logra cubrir en Campeche 3069 km² con IEEE 802.16e y 16077 km² al usar IEEE 802.22. Pare el estado de Quintana Roo se logra cubrir un área de 9467 km² con IEEE 802.16e y 22385 km² con IEEE 802.22.

En el estado de Yucatán se logra cubrir un área de 7830 km² con IEEE 802.16e y 25541 km² al usar IEEE 802.22. En el Anexo 2 se muestra lo obtenido para la tabla 52. Estos resultados indican que la tecnología WRAN provee una mayor área de cobertura en el terreno de estudio.

Tabla 31. Resultados para las simulaciones de red de contingencia en la Península de Yucatán con los parámetros de la tabla 30 para el enlace el “peor de los casos”.

Campeche NODOS	Cobertura Área (km²) Enlace: Tx-Rx					
	Calkiní	Campeche	Champotón	Escárcega	Candelaria	Ciudad del Carmen
IEEE 802.16 e (Móvil)	438	182	134	73	125	503
IEEE 802.22 VHF	1117	1442	448	783	1045	525

Quintana Roo NODOS	Cobertura Área (km²) Enlace: Tx-Rx							
	Cancún	Central Playa	Chetumal	Chiquilá	Felipe Carrillo Puerto	Limones	Tulum	Kantunilkin
IEEE 802.16 e (Móvil)	445	1011	947	453	244	270	188	238
IEEE 802.22 VHF	11145	1329	1854	900	1165	1269	859	1066

Yucatán NODOS	Cobertura Área (km²) Enlace: Tx-Rx								
	Central M	Dzidzantún	Hunucmá	Kantunil	Progreso	Rio Lagartos	Tekax	Tizimín	Valladolid
IEEE 802.16 e (Móvil)	173	290	410	270	214	183	636	306	431
IEEE 802.22 VHF	2616	834	632	1172	421	404	3057	914	1175

Tabla 32. Resultados para las simulaciones de red de contingencia en la Península de Yucatán con los parámetros de la tabla 30 para el enlace: Tx-Rx.

Campeche	Cobertura Área (km²) Enlace: Tx-Rx					
	NODOS	Calkiní	Campeche	Champotón	Escárcega	Candelaria
IEEE 802.16 e (Móvil)	1018	389	278	153	320	911
IEEE 802.22 VHF	2905	4633	1472	2426	3173	1468

Quintana Roo	Cobertura Área (km²) Enlace: Tx-Rx							
	NODOS	Cancún	Central Playa	Chetumal	Chiquilá	Felipe Carrillo Puerto	Limones	Tulum
IEEE 802.16 e (Móvil)	1445	1989	1737	1283	745	887	563	818
IEEE 802.22 VHF	2481	2998	3941	2620	2847	2829	1984	2685

Yucatán	Cobertura Área (km²) Enlace: Tx-Rx								
	NODOS	Central M	Dzidzantún	Hunucmá	Kantunil	Progreso	Rio Lagartos	Tekax	Tizimín
IEEE 802.16 e (Móvil)	629	1051	1073	759	524	529	1342	822	1101
IEEE 802.22 VHF	4198	2485	2361	2752	1475	1419	5248	2474	3129

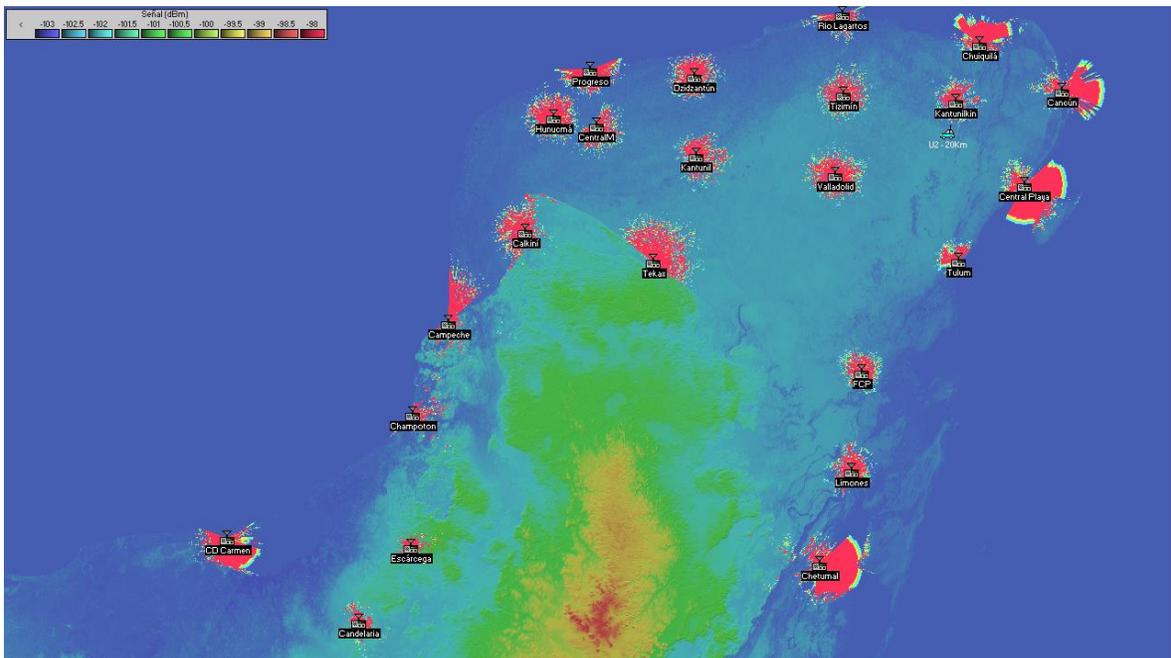


Figura 42. Mapa de cobertura generado por la distribución de los estaciones base en la Península de Yucatán en el enlace “peor de los casos” para la tecnología IEEE 802.16e.

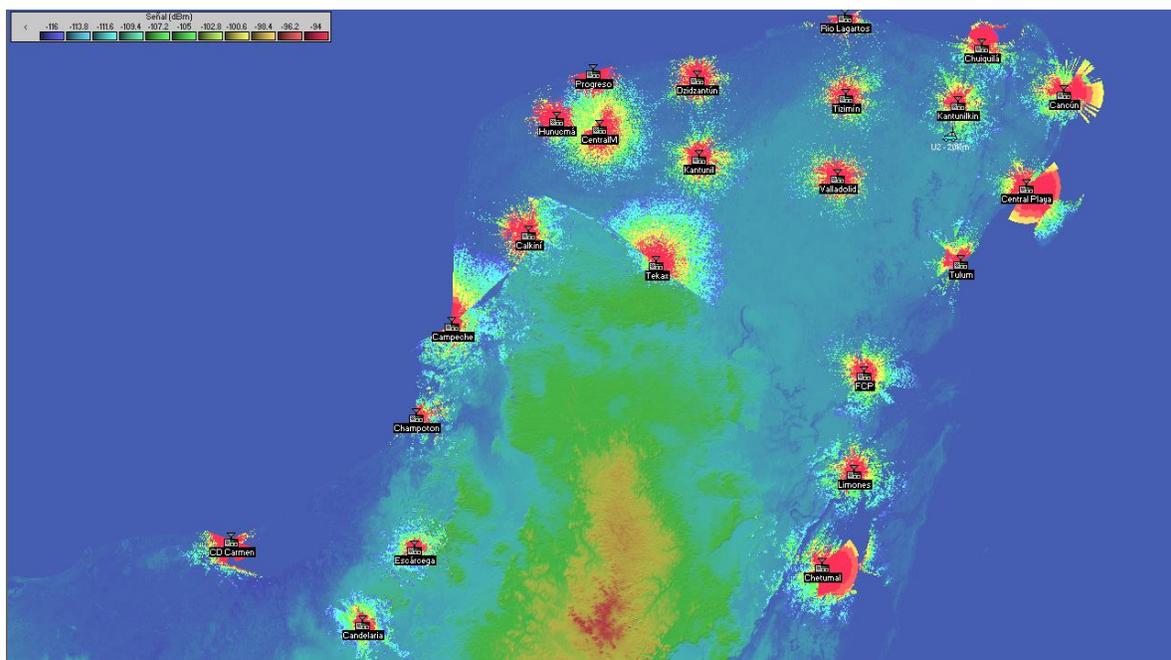
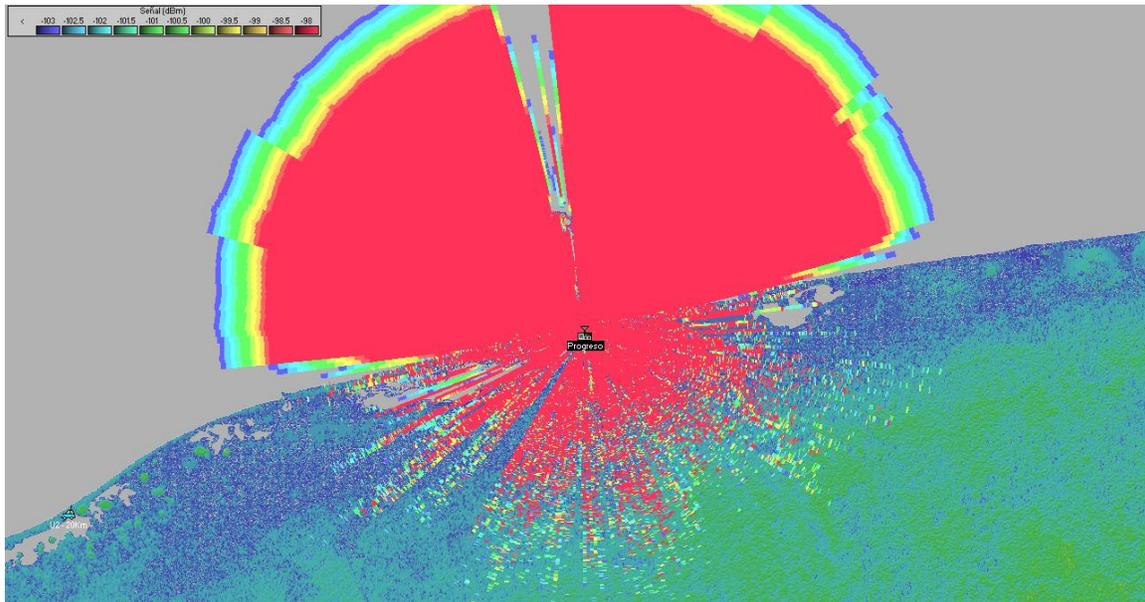


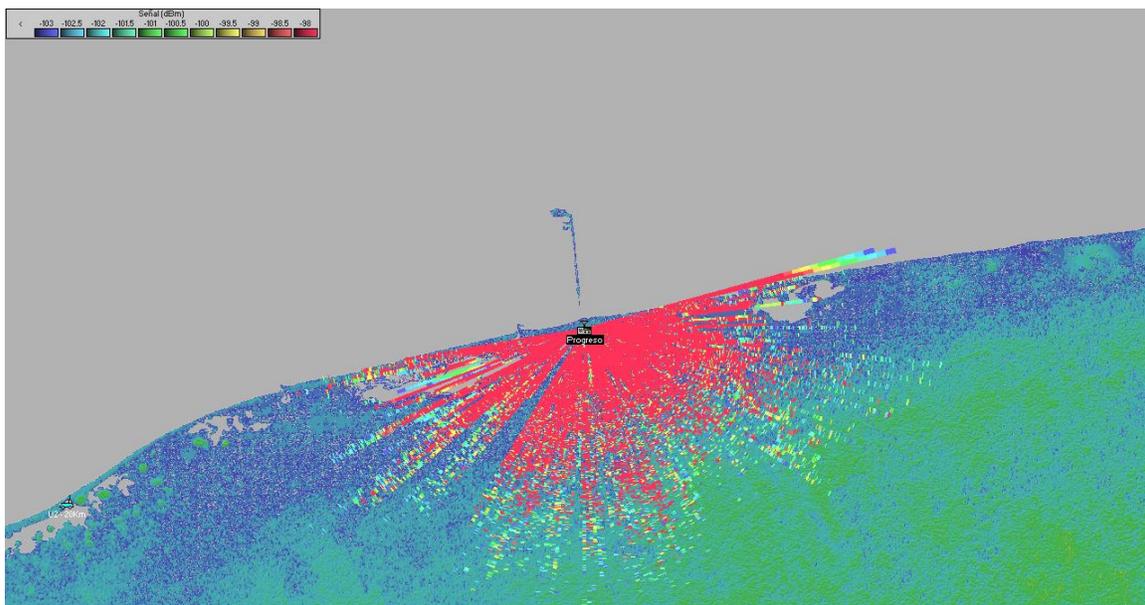
Figura 43. Mapa de cobertura generado por la distribución de los estaciones base en la Península de Yucatán en el enlace “peor de los casos” para la tecnología IEEE 802.22.

Los datos de la tabla 31 y de tabla 32 incluyen un ajuste en los nodos Campeche, Ciudad del Carmen, Champotón, Tulum, Progreso y Rio Lagartos, debido a que

gran parte del espectro en estas localidades se dirige hacia mar adentro. Lo que representa un área de cobertura “fantasma” al momento de generar la información. El ajuste consiste en limitar la creación de datos en la zona en marítima como se muestra en la figura 44.



a) Área de cobertura 2464 km²



b) Área de cobertura 214 km²

Figura 44. Zona marítima en el nodo Progreso para la tecnología IEEE 802.16e: a) sin limitar, b) limitada

4.4.2. Datos del mapa de cobertura

Una vez generados los datos del mapa de cobertura reportado en la tabla 31 en las simulaciones realizadas con Radio Mobile, estos pueden ser tratados a través de Matlab para obtener gráficas que brinden mayor información acerca del enlace. En la sección 4.3 se mencionó que los datos son exportados a un archivo de texto al generar el mapa de cobertura. Por ejemplo, se logra obtener la variación de la potencia de recepción con respecto a la distancia y así es posible observar la degradación que sufre la señal a medida que se dispersa por el entorno, tal como se muestra en la figura 45, la cual corresponde a un enlace del nodo Candelaria a una distancia de hasta 35Km de la estación base.

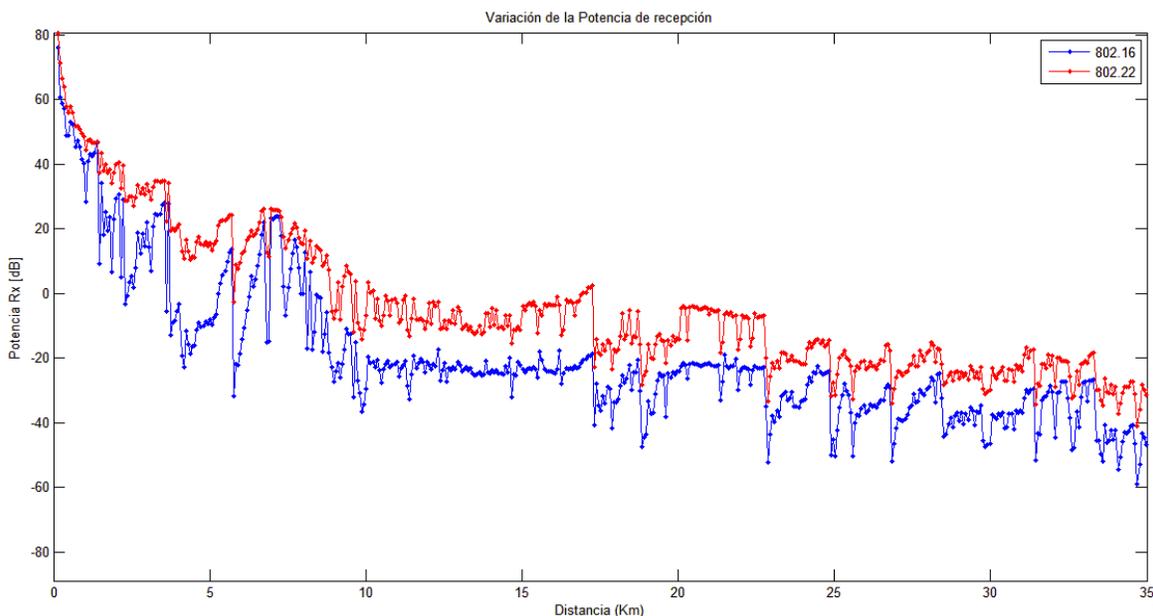


Figura 45. Variación de la potencia respecto a la distancia del nodo denominado “Candelaria” en el enlace “peor de los casos” para IEEE 802.16e e IEEE 802.22 hasta una distancia de 35 Km de la estación base

La figura 45 corresponde sólo a un enlace (PP), sin embargo, es posible obtener una nueva gráfica para los puntos alrededor de la radio base al incluir totalidad de los datos de la simulación, tal como se muestra en la figura 46. Los datos de esa misma gráfica pueden ser tratados a fin de que sólo aquellos que se encuentren por encima del umbral de sensibilidad se consideren para los cálculos; ya que en la ecuación (20) se fija un umbral en el Margen, a fin de garantizar el enlace entre la estación base y la estación remota. En la figura 47 se muestra la gráfica en la cual

los valores por debajo de umbral de sensibilidad para ambas tecnologías fueron eliminados.

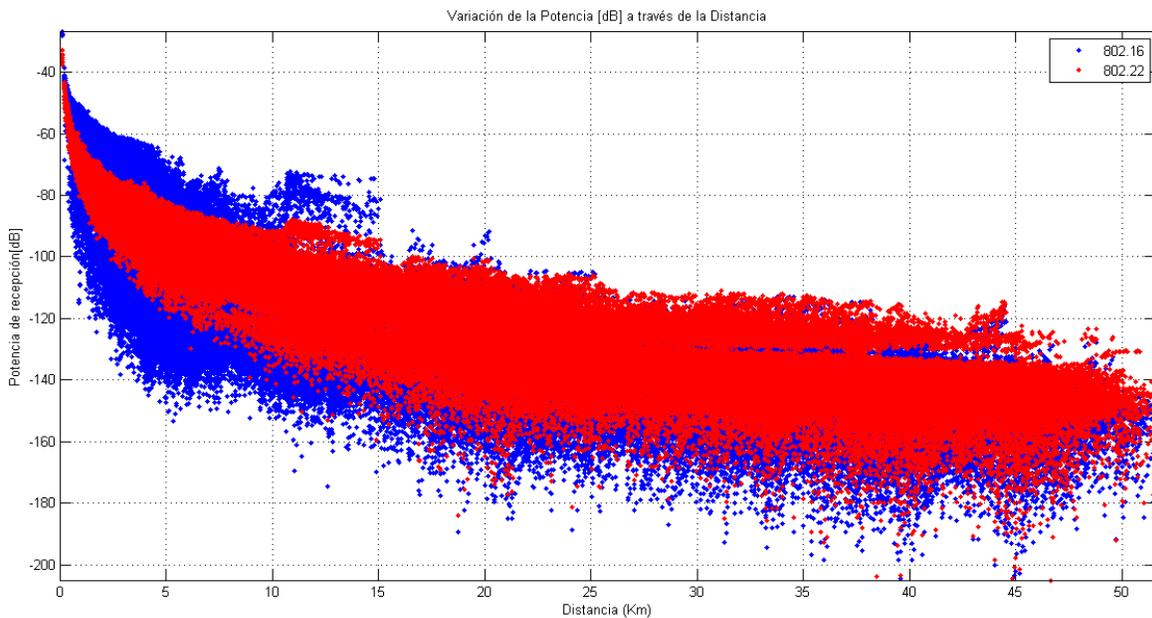


Figura 46. Potencia de recepción en la simulación del nodo base denominado “Candelaria” para las tecnologías IEEE 802.16e e IEEE 802.22 en el “Peor de los casos”

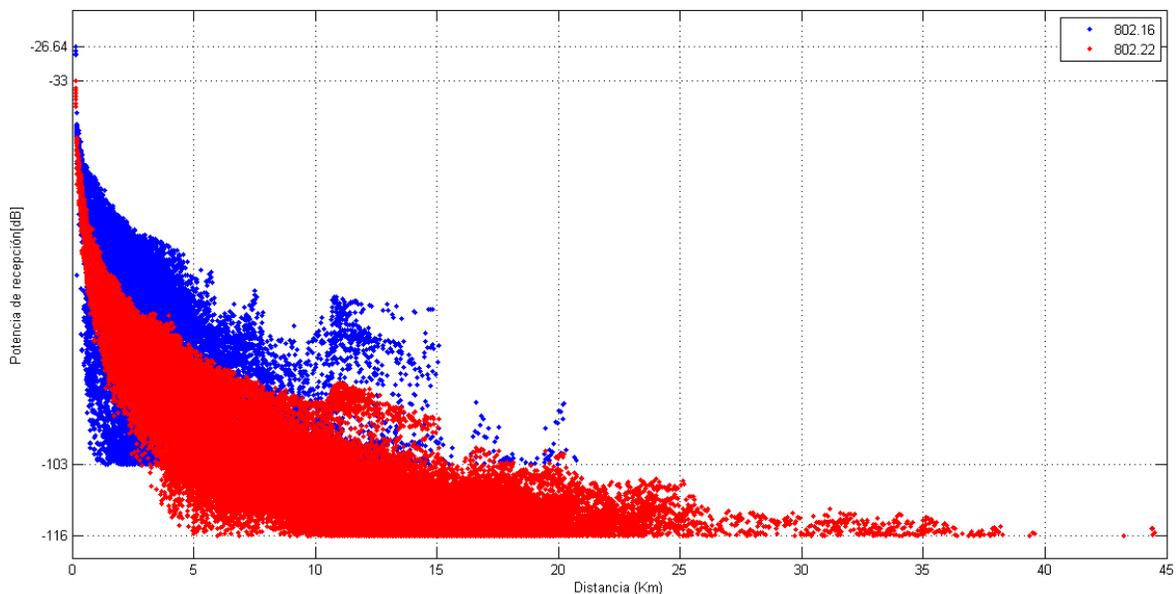


Figura 47. Potencia de recepción en la simulación del nodo base denominado “Candelaria” para las tecnologías IEEE 802.16e e IEEE 802.22 en el “Peor de los casos” donde los valores por debajo del umbral de sensibilidad fueron eliminados

Como se indica anteriormente, las gráficas de las figura 46 y figura 47 corresponden al nodo denominado Candelaria y fueron obtenidas a través de los datos generados

por el mapa de cobertura. Dichos mapas de cobertura generados por radio Mobile se muestra en la figura 48 y figura 49.

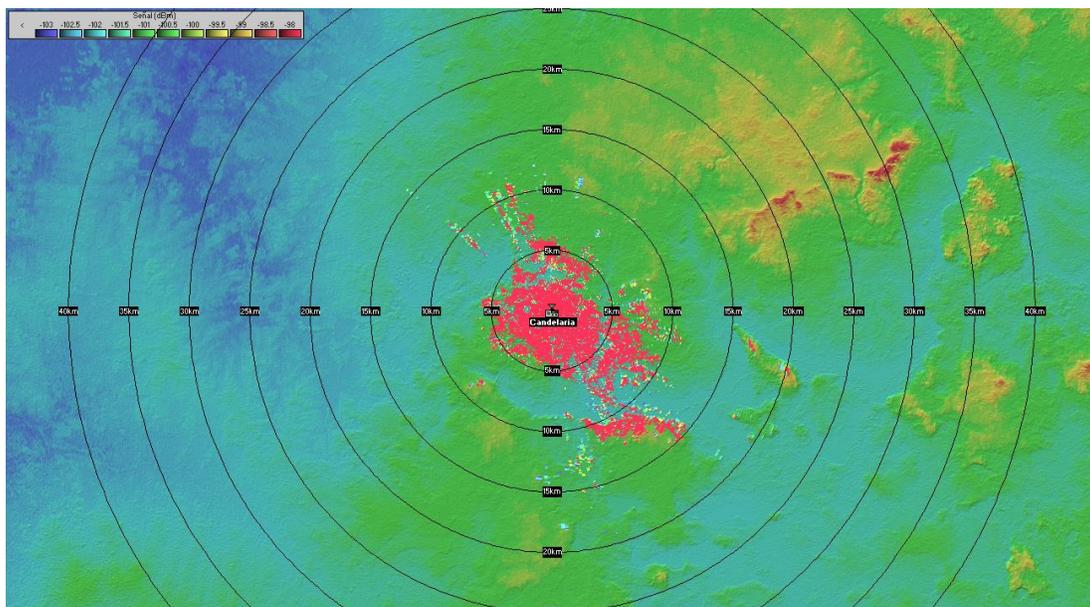


Figura 48. Mapa de cobertura generado para IEEE 802.16e para el nodo candelaria en el enlace “peor de los casos”. Las circunferencias en la figura que aumentan en 5 Km de radio.

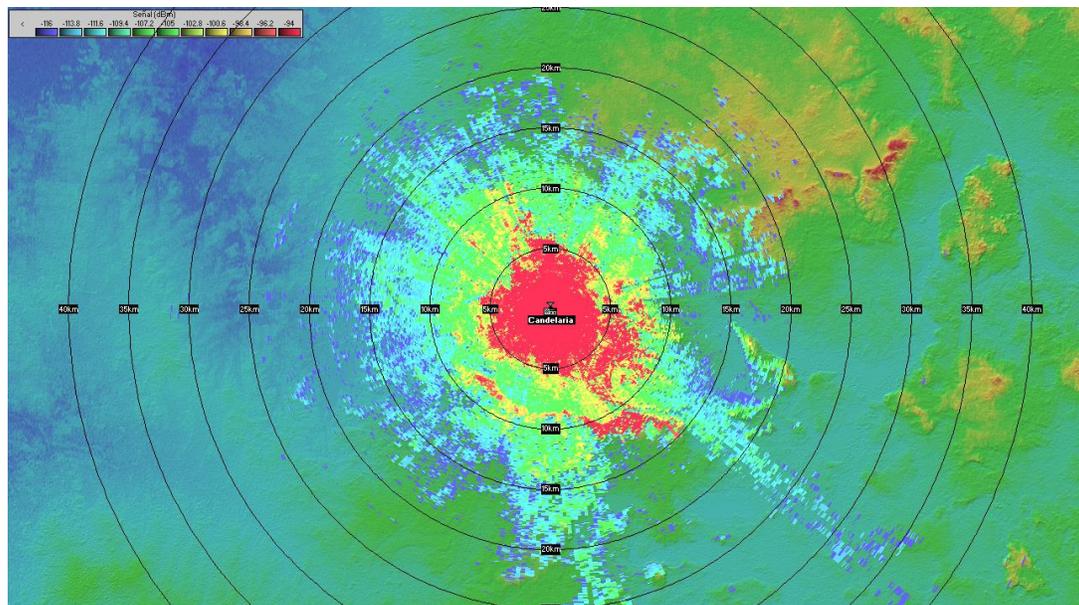


Figura 49. Mapa de cobertura generado para IEEE 802.22 para el nodo candelaria en el enlace “peor de los casis”. Las circunferencias en la figura que aumentan en 5 Km de radio.

Para lograr la figura 47 primero se genera un algoritmo que determine el valor de potencia de recepción (en la posición del usuario) de estas y cuales encuentran por encima del umbral de sensibilidad (S_x) que utiliza el equipo.

$$S_{x-min} < P_{Rx} \quad (23)$$

Con ello se garantiza el enlace entre la Estación Base y la estación remota a fin de que se pueda llevar a cabo la intercomunicación. Estas mismas simulaciones se realizan en los nodos restantes de la red de contingencia a fin de obtener sus similares en los datos y figuras figura 46, 47, 48 y figura 49.

Los resultados obtenidos en estas primeras simulaciones con este algoritmo arrojan que, en promedio WiMAX alcanza los 18Km de radio de cobertura, mientras que WRAN sobrepasa los 25Km de radio de alcance promedio, esto en el enlace “peor de los casos”. Este mismo comportamiento se observa en el enlace “Rx-Tx” mientras que para el enlace “Tx-Rx” en promedio se alcanzan más de 40 Km de radio de cobertura.

Además se observa al graficar los resultados obtenidos, que las ondas de las señales electromagnéticas al propagarse por el canal inalámbrico adquieren una distribución del tipo *log-normal*, y esto se entiende al no poder predecirse con exactitud cómo se propaga en el medio, debido a su naturaleza aleatoria.

La figura 50 muestra la distribución de las ondas electromagnética sobre el terreno en una vista 3D y su degradación a través de este.

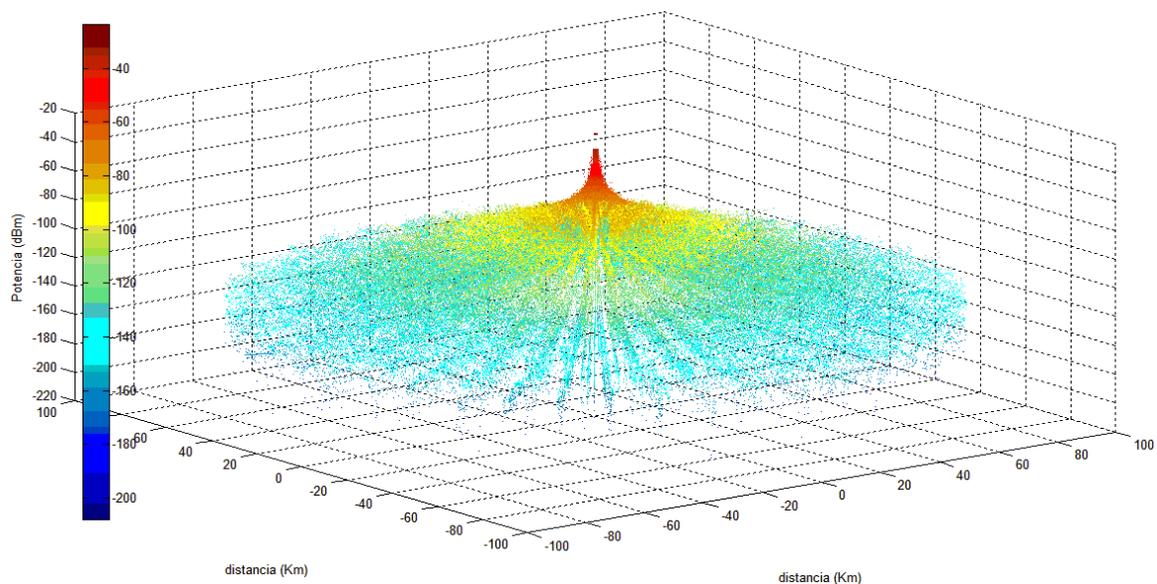


Figura 50. Nodo: Tekax. Tecnología: IEEE 802.22. Enlace: Tx-Rx

4.5. Rendimiento del segmento terrestre en la red de contingencia

Es importante destacar que resulta primordial que la señal llegue al receptor pero además se requiere que haya cierto “margen” para garantizar el funcionamiento adecuado. La relación entre el ruido y la señal (SNR) provee la información sobre el rendimiento que el sistema puede brindar.

En el capítulo anterior en la ecuación (14) se mencionaron las variables involucradas en la relación señal a ruido, ahora a partir de los datos utilizados para generar la gráfica en la figura 47 se obtienen los cálculos para el SNR en el segmento terrestre

4.5.1. Relación señal a ruido de los equipos terrestre inalámbricos

Los equipos terrestres inalámbricos utilizan canales de 5 MHz para IEEE 802.16e y de 6MHz para IEEE 802.22, lo cual representa una potencia de ruido de térmico de -106.99 dB y -106.19 dB, respectivamente y además que, se adicionan la Figura de Ruido de cada tecnología (3 o 4 dB) y el margen de interferencia (1dB), por lo que es posible escribir la ecuación (14) para WiMAX como

$$SNR_{IEEE802.16e} = P_{RX} + 101.98 \text{ dB} \quad (24)$$

y para WRAN como

$$SNR_{IEEE802.22} = P_{RX} + 102.19 \text{ dB} \quad (25)$$

Ya que en los datos generados con el mapa de cobertura está presente la potencia de recepción P_{RX} , es posible generar un nuevo algoritmo que permita calcular el SNR en cada punto alrededor de la radio base y al mismo tiempo que generar las gráficas correspondientes a su variación del SNR con respecto a la distancia, así se genera una gráfica como la se muestra en la figura 51.

Los resultados presentados en la figura 51 son para valores de potencia de recepción por arriba del umbral de sensibilidad para WiMAX (-116 dB) y WRAN (-103 dB) esto significa que obtendrán valores negativos en el valor del SNR calculado a partir de (24) y (25), ya que el nivel de ruido se encuentra por arriba del umbral de sensibilidad. Al filtrar los valores de SNR negativos se genera una gráfica como la presentada en la figura 52, tanto para IEEE 802.16e e IEEE 802.22.

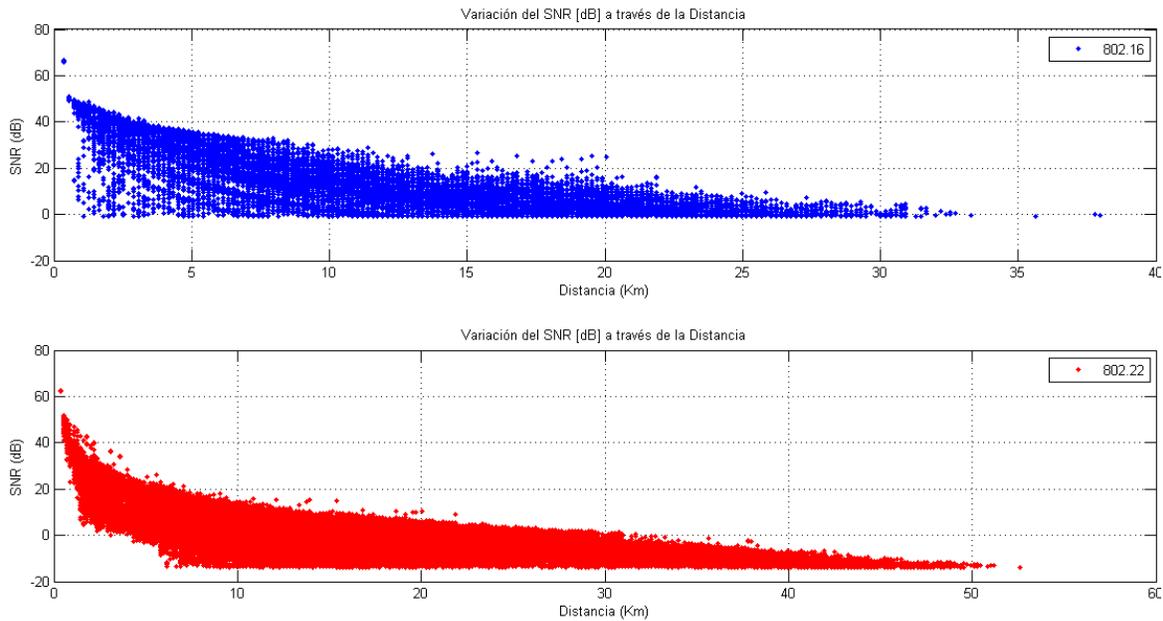


Figura 51. Gráfica de la variación del SNR respecto a la distancia para el nodo Tekax en el enlace “peor de los casos” para IEEE 802.16e e IEEE 802.22

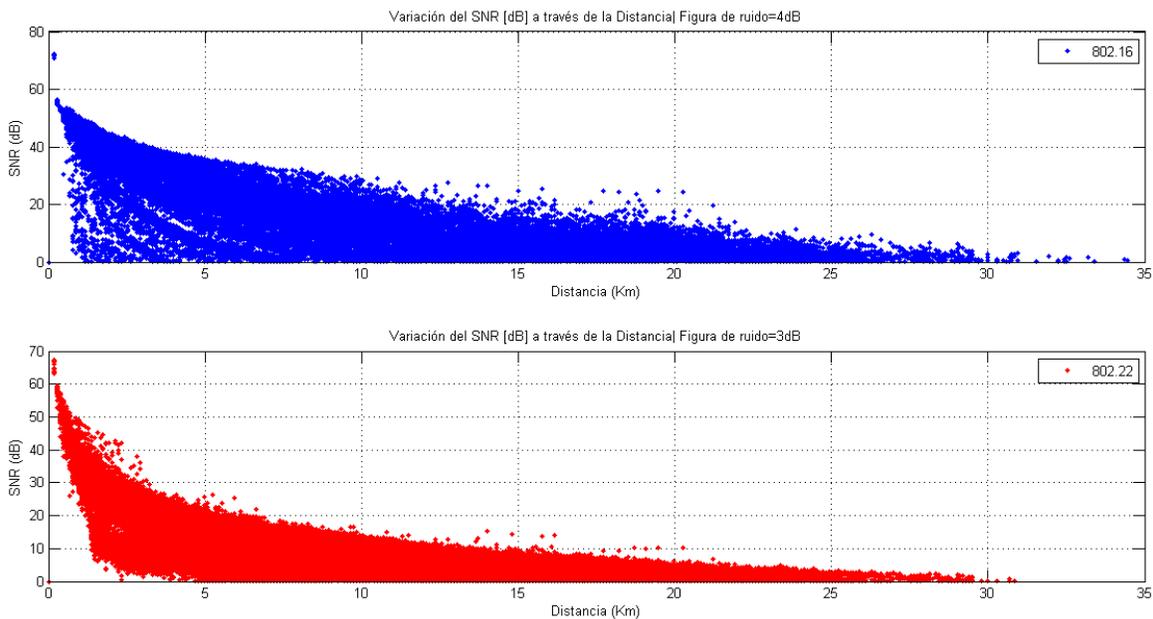


Figura 52. Gráfica de la variación del SNR respecto a la distancia para el nodo Tekax en el enlace “peor de los casos” para IEEE 802.16e e IEEE 802.22 con valores de SNR >0 dB.

Se recurre a la tabla 7 y tabla 8 donde, de acuerdo a los estándares IEEE802.16 e IEEE 802.22, depende de la modulación y codificación utilizada se alcanza un valor de SNR. En conjunto con las ecuaciones (24) y (25) se elabora la tabla 33 en donde se indica que valor de potencia de recepción debe alcanzar.

Tabla 33. Valores de SNR requeridos en las tecnologías inalámbricas y su relación con la potencia de recepción para un ancho de canal de 5 y 6 MHz.

Modulación	Codificación	SNR [dB] IEEE 80.16	Potencia mínima de recepción [dB]	SNR [dB] IEEE 80.22	Potencia mínima de recepción [dB]
QPSK	1/2	2.9	-98.29	4.3	-97.89
	2/3	6.3	-94.89	6.1	-96.09
	3/4	--	--	7.1	-95.09
	5/6	--	--	8.1	-94.09
16-QAM	1/2	8.6	-92.59	10.2	-91.99
	2/3	12.7	-88.49	12.4	-89.79
	3/4	--	--	13.5	-88.69
	5/6	--	--	14.8	-87.39
64-QAM	1/2	13.8	-87.39	15.6	-86.59
	2/3	16.6	-84.59	18.3	-83.89
	3/4	18	-83.19	19.7	-82.49
	5/6			20.9	-81.29

De la tabla 33 se concluye que si el nivel de potencia recibida es menor que -81.29 dB para WRAN o -83.19 dB para WiMAX entonces no se logra un canal de comunicación para intercambiar información.

Ya que anteriormente un valor de potencia por encima del umbral de sensibilidad garantizaba el enlace, ahora es necesario determinar que tasas de transferencia son alcanzadas a diferentes distancias desde la estación base por los equipos remotos.

4.5.2. Distancia de alcance promedio y tasa de transferencia

Para encontrar el alcance promedio que es posible lograr con las tecnologías terrestres inalámbricas, se elabora un algoritmo que delimita los umbrales de potencia de recepción tomados de la tabla 33 y se asocia con la tabla 7 para IEEE 802.16e y la tabla 9 para IEEE 802.22 a fin de conformar las tabla 34 y tabla 35. Los datos de la potencia de recepción son obtenidos del mapa de cobertura, con el objetivo de determinar que posiciones (valor de distancia) son registradas dentro del rango de potencias, según sea el caso

En la figura 53 y la figura 54 se presentan resultados de la variación del SNR a través de la distancia y se traza la tasa de bits correspondiente a determinado valor de SNR .

Tabla 34. Rango de valores para la potencia de recepción a emplear en las simulaciones y su correspondencia con la tasa de transferencia de datos

Modulación	Codificación	IEEE 802.16e [dB]			
		SNR [dB]	Rango de potencias de recepción [dB]	Downlink (Mbps)	Uplink (Mbps)
QPSK	1/2	2.9	$-98.29 \leq P_{RX} < -94.89$	3.17	2.28
	2/3	6.3	$-94.89 \leq P_{RX} < -92.59$	4.75	3.43
16-QAM	1/2	8.6	$-92.59 \leq P_{RX} < -88.49$	6.34	4.75
	2/3	12.7	$-88.49 \leq P_{RX} < -87.39$	9.5	6.85
64-QAM	1/2	13.8	$-87.39 \leq P_{RX} < -84.59$	9.5	6.85
	2/3	16.6	$-84.59 \leq P_{RX} < -83.19$	12.67	9.14
	3/4	18	$P_{RX} = -83.19$	14.6	10.28

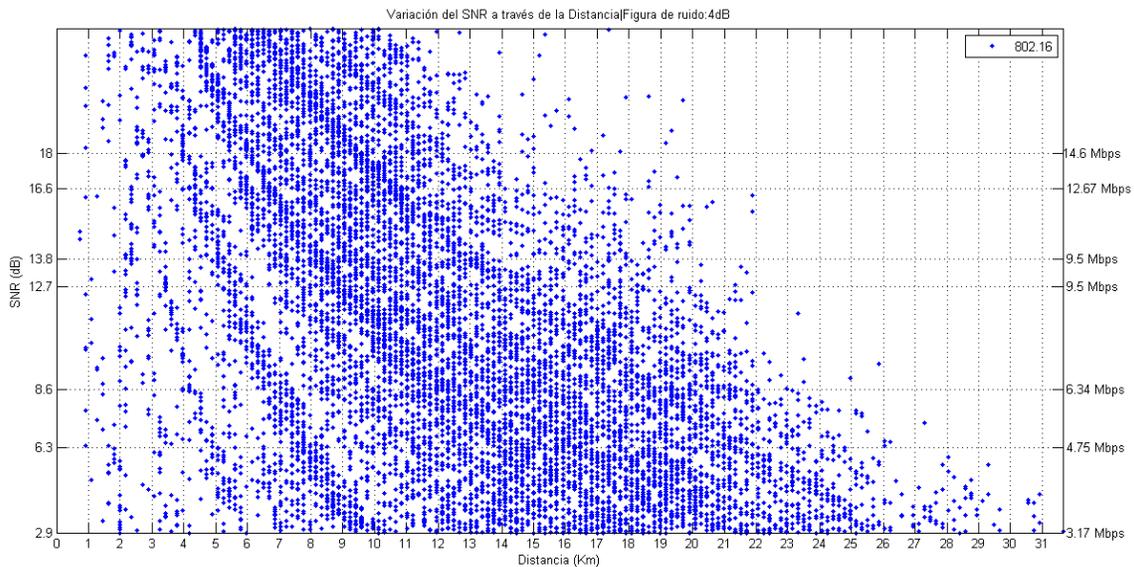


Figura 53. Valores de SNR y tasa de transferencia correspondiente para IEEE 802.16e. Resultados obtenidos para el nodo Tekax.

Tabla 35. Rango de valores para la potencia de recepción a emplear en las simulaciones 802.22 y su correspondencia con la tasa de transferencia de datos

Modulación	Codificación	IEEE 802.22 [dB]			
		SNR [dB]	Rango de potencias de recepción [dB]	Tasa de datos (Mbps)	Eficiencia espectral (bits/s-Hz)
QPSK	1/2	4.3	$-97.89 \leq P_{RX} < -96.09$	4.54	0.76
	2/3	6.1	$-96.09 \leq P_{RX} < -95.09$	6.05	1.01
	3/4	7.1	$-95.09 \leq P_{RX} < -94.09$	6.81	1.13
	5/6	8.1	$-94.09 \leq P_{RX} < -91.99$	7.56	1.26
16-QAM	1/2	10.2	$-91.99 \leq P_{RX} < -89.79$	9.08	1.51
	2/3	12.4	$-89.79 \leq P_{RX} < -88.69$	12.10	2.02
	3/4	13.5	$-88.69 \leq P_{RX} < -87.39$	13.61	2.27
	5/6	14.8	$-87.39 \leq P_{RX} < -86.59$	15.13	2.52
64-QAM	1/2	15.6	$-86.59 \leq P_{RX} < -83.89$	13.61	2.27
	2/3	18.3	$-83.89 \leq P_{RX} < -82.49$	18.15	3.03
	3/4	19.7	$-82.49 \leq P_{RX} < -81.29$	20.42	3.40
	5/6	20.9	$P_{RX} = -81.29$	22.69	3.78

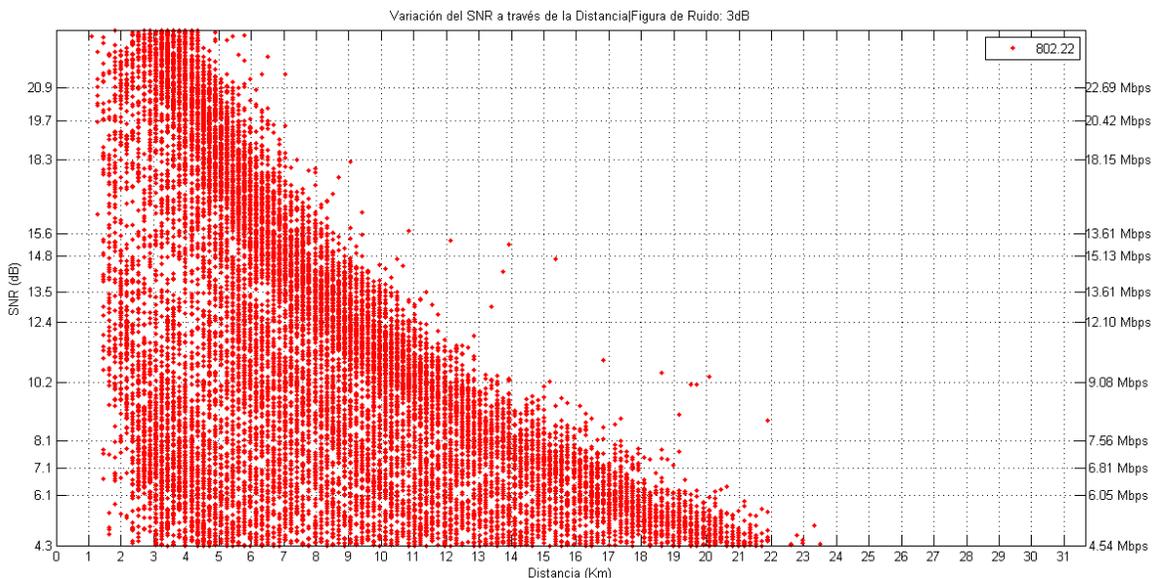


Figura 54. Valores de SNR y tasa de transferencia correspondiente para IEEE 802.22. Resultados obtenidos para el nodo Tekax.

Las figuras fueron truncadas a un valor de 23 dB como máximo para una mejor apreciación. La Estación Base “Tekax”, al igual que la estación base de nominada “Central M” son las que mayor área de cobertura registran en las simulaciones.

Con los resultados de las simulaciones por cada nodo base, tal como en el ejemplo de la tabla 36 y la tabla 37 que emplea IEEE 802.16e e IEEE 802.22 respectivamente, para el enlace el “peor de los casos”, son calculadas las medidas estadísticas (μ , σ) de las posiciones ocupadas y enseguida se presentan las gráficas correspondientes, con las posiciones y valores de potencia dentro de un rango específico de potencias, como los mostrados en la figura 55 y figura 56. En las gráficas se incluyen los límites laterales.

Tabla 36. Valores obtenidos para el nodo CentralM con IEEE 802.16e, en el peor de los casos

NODO: CentralM	Escárcega	Distancias (km)		
		$\mu - \sigma$	μ	$\mu + \sigma$
Rango	Rango de potencias			
64QAM-3/4	$P_{RX} = -83.19$	0.401	1.784	3.168
64QAM-2/3	$-84.59 \leq P_{RX} < -83.19$	1.790	3.469	5.148
64QAM-1/2	$-87.39 \leq P_{RX} < -84.59$	1.928	3.836	5.745
16QAM-2/3	$-88.49 \leq P_{RX} < -87.39$	2.022	4.165	6.307
16QAM-1/2	$-92.59 \leq P_{RX} < -88.49$	1.924	4.703	7.483
QPSK-2/3	$-94.89 \leq P_{RX} < -92.59$	2.734	5.659	8.584
QPSK-1/2	$-98.29 \leq P_{RX} < -94.89$	3.379	6.303	9.228

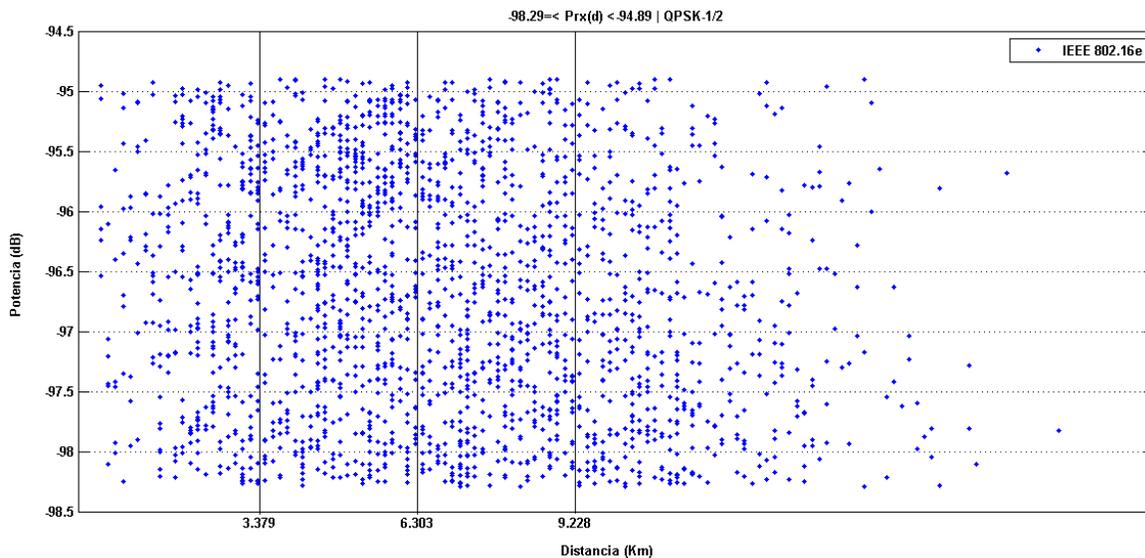
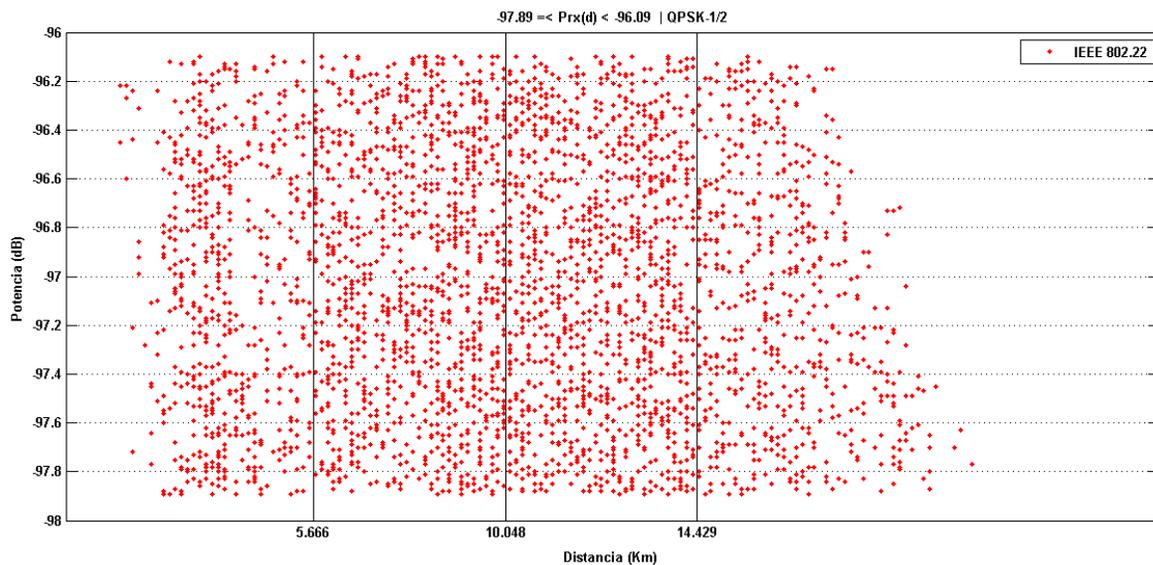


Figura 55. CentralM. Potencia de recepción con IEEE 802.16e en el rango $-98.29 \leq P_{RX} < -94.89$.

Tabla 37. Valores obtenidos para el nodo CentralM con IEEE802.22, en el peor de los casos

NODO: CentralM	Escárcega	Distancias (km)		
		$\mu - \sigma$	μ	$\mu + \sigma$
Rango	Rango de potencias			
64QAM-5/6	$P_{RX} = -81.29$	0.436	1.376	2.316
64QAM-3/4	$-82.49 \leq P_{RX} < -81.29$	1.407	2.587	3.767
64QAM-2/3	$-83.89 \leq P_{RX} < -82.49$	1.516	2.875	4.235
64QAM-1/2	$-86.59 \leq P_{RX} < -83.89$	1.618	3.368	5.119
16QAM-5/6	$-87.39 \leq P_{RX} < -86.59$	1.752	3.680	5.608
16QAM-3/4	$-88.69 \leq P_{RX} < -87.39$	2.277	4.375	6.473
16QAM-2/3	$-89.79 \leq P_{RX} < -88.69$	2.768	4.987	7.207
16QAM-1/2	$-91.99 \leq P_{RX} < -89.79$	3.301	5.901	8.500
QPSK-5/6	$-94.09 \leq P_{RX} < -91.99$	4.203	7.411	10.619
QPSK-3/4	$-95.09 \leq P_{RX} < -94.09$	5.260	8.751	12.243
QPSK-2/3	$-96.09 \leq P_{RX} < -95.09$	5.196	9.153	13.109
QPSK-1/2	$-97.89 \leq P_{RX} < -96.09$	5.666	10.048	14.429

Figura 56. CentralM. Potencia de recepción con IEEE 802.22 en el rango $-97.89 \leq P_{RX} < -96.09$

Los resultados de las medias aritméticas de las distancias en cada rango de potencias registrados en cada nodo pueden de nueva cuenta ser tratadas como datos de un nuevo conjunto por lo se obtiene una media ponderada para cada rango de potencias y así determinar la distancia de alcance promedio. De este modo para IEEE 802.16e los resultados son mostrados en la tabla 38 junto con su gráfico en la

figura 57. Los resultados para IEEE 802.22 se muestran en la tabla 39 y su respectivo gráfico en la figura 58

Tabla 38. Alcance promedio para la red de contingencia al utilizar IEEE 802.16e

NODO	Escárcega	Distancias (km)		
		$\mu - \sigma$	μ	$\mu + \sigma$
64QAM-3/4	$P_{RX} = -83.19$	0.639	2.433	4.226
64QAM-2/3	$-84.59 \leq P_{RX} < -83.19$	2.458	4.689	6.921
64QAM-1/2	$-87.39 \leq P_{RX} < -84.59$	2.747	5.406	8.064
16QAM-2/3	$-88.49 \leq P_{RX} < -87.39$	3.324	6.217	9.110
16QAM-1/2	$-92.59 \leq P_{RX} < -88.49$	3.620	7.075	10.529
QPSK-2/3	$-94.89 \leq P_{RX} < -92.59$	4.171	7.968	11.765
QPSK-1/2	$-98.29 \leq P_{RX} < -94.89$	5.039	8.837	12.634

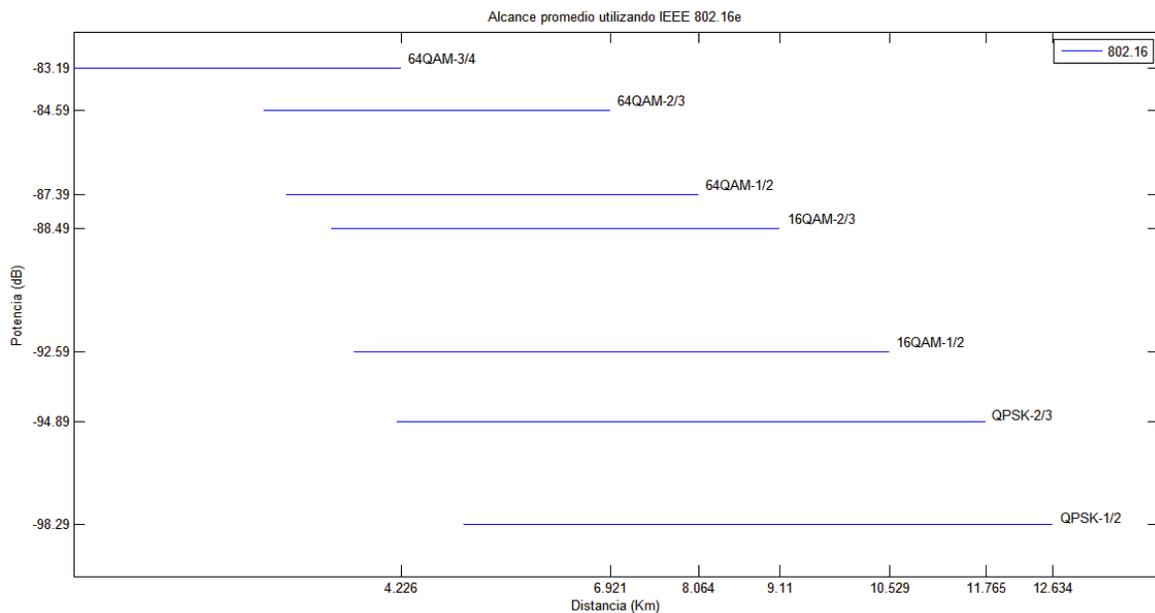


Figura 57. Distancia de alcance promedio IEEE 802.16e

Estos resultados indican que la distancia promedio alcanzada es cercana a los 9 km pudiéndose extender hasta el máximo de 12.6 km desde la estación base hasta la estación remota, con WiMAX.

Tabla 39. Alcance promedio para la red de contingencia al utilizar IEEE 802.22

NODO	Escárcega	Distancias (km)		
		$\mu - \sigma$	μ	$\mu + \sigma$
64QAM-5/6	$P_{RX} = -81.29$	0.617	1.549	2.481
64QAM-3/4	$-82.49 \leq P_{RX} < -81.29$	2.193	3.082	3.971
64QAM-2/3	$-83.89 \leq P_{RX} < -82.49$	2.454	3.483	4.511
64QAM-1/2	$-86.59 \leq P_{RX} < -83.89$	2.848	4.167	5.486
16QAM-5/6	$-87.39 \leq P_{RX} < -86.59$	3.299	4.858	6.416
16QAM-3/4	$-88.69 \leq P_{RX} < -87.39$	3.475	5.203	6.931
16QAM-2/3	$-89.79 \leq P_{RX} < -88.69$	3.719	5.623	7.527
16QAM-1/2	$-91.99 \leq P_{RX} < -89.79$	4.199	6.442	8.685
QPSK-5/6	$-94.09 \leq P_{RX} < -91.99$	4.879	7.495	10.110
QPSK-3/4	$-95.09 \leq P_{RX} < -94.09$	5.289	8.229	11.169
QPSK-2/3	$-96.09 \leq P_{RX} < -95.09$	5.453	8.569	11.685
QPSK-1/2	$-97.89 \leq P_{RX} < -96.09$	5.915	9.265	12.615

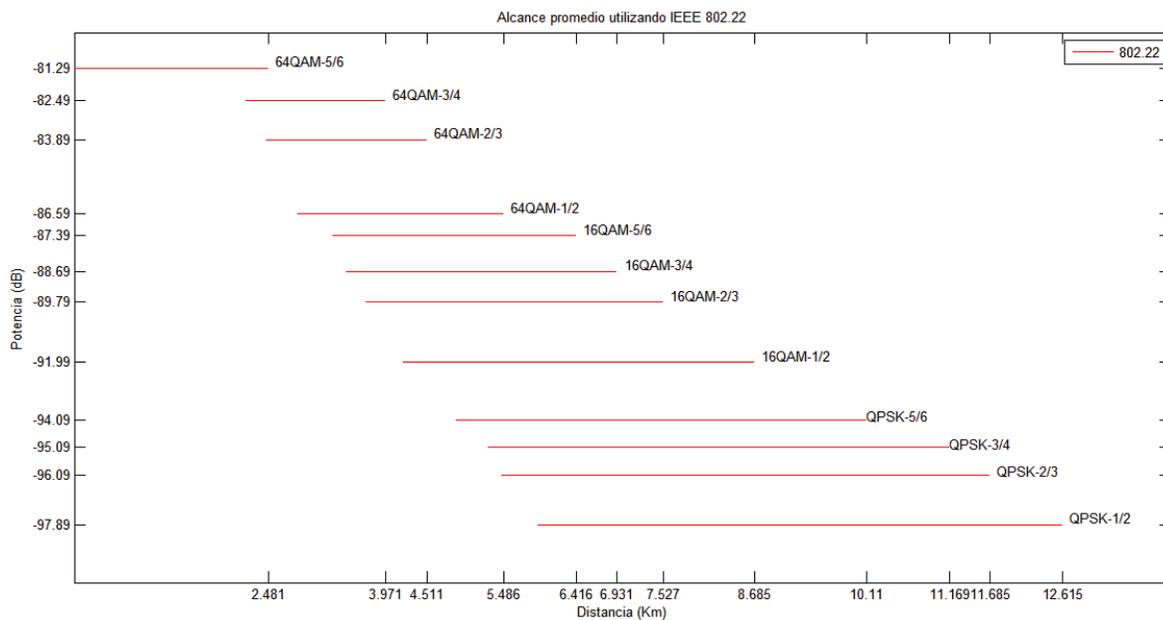


Figura 58. Distancia de alcance promedio IEEE 802.22

La distancia promedio alcanzada con WRAN está por encima de los 9 Km pudiéndose extender hasta los 12.6 km, una distancia similar a la alcanzada con WiMAX.

Con estos resultados se comprueba que al alcanzar la distancia máxima se utilizará modulación QPSK-1/2 para llevar a cabo la transferencia de información, esta

proporciona una tasa máxima de transmisión de datos de 3.17 Mbps en WiMAX y de 4.54 Mbps en WRAN.

Al realizar las simulaciones para el enlace Tx-Rx y repetir el mismo análisis se obtienen un alcance promedio de 13 Km con la IEEE 802.16e pudiéndose extender su cobertura hasta los 18 Km como máximo de la estación base, mientras que para IEEE 802.22 el alcance promedio es de 22 km extendiéndose hasta 28 km desde la estación base. Estos alcances máximos se logran al emplear QPSK-1/2

Aunque ambas tecnologías brindan aproximadamente el mismo alcance en el enlace “peor de los casos” (radio de la cobertura) las prestaciones con respecto a la tasa de transferencia de información marcan una diferencia significativa. Del mismo modo la tecnología que utiliza los espacios blancos, WRAN, tiene una gran flexibilidad en términos de perfiles de transferencia de tráfico (modulación-codificación).

Con todo lo anteriormente expuesto se concluye que la utilización de la IEEE 802.22 en la red de contingencia resulta con las mejores prestaciones, tanto en cobertura como en la capacidad de transmisión de datos.

Otro aspecto de relevancia en la red de contingencia es la cantidad de usuarios que puede soportar, lo cual será abordado en el siguiente apartado.

4.5.3. Número de usuarios de la red de contingencia.

Con los resultados anteriores se determina que distancia es la que se logra alcanzar y que esquema de modulación y codificación será el utilizado, además de que también permite saber que tasa de transmisión se logra.

En la sección 3.4 se presentaron las ecuaciones (18) y (19) que permiten obtener la cantidad de usuarios que puede soportar un canal, así, una vez identificada la tecnología a emplear en la red de contingencia y la tasa de transmisión que provee, es necesario conocer la eficiencia espectral que esta proporciona.

En particular para IEEE 802.22 la eficiencia espectral de cada modulación para un canal de 6MHz, se indica en la tabla 9. Además el protocolo fue diseñado para proporcionar conexión de alta velocidad y soportar como máximo hasta 512 equipos ya sean fijo o móviles.

Además se considera las características del tráfico indicadas en la tabla 21 para la transmisión de voz al utilizar QPSK-1/2, la capacidad de canal

$$\text{Capacidad de canal} = \frac{\text{Tasa de transmisión de voz}}{\text{eficiencia espectral}} = \frac{64\text{kbps}}{0.76 \frac{\text{bits}}{\text{s}} \cdot \text{Hz}} = 84.21 \text{ kHz}$$

y con un canal de 6 MHz de ancho de banda, el total de usuarios soportados es de

$$\text{No. Usuarios} = \frac{6 \text{ MHz}}{84.21 \text{ kHz}} = 71.25 \text{ usuarios}$$

Si consideramos la transmisión de video (768kbps) con QPSK se atiende a 5 usuarios (sin sobre suscripción) y para la transmisión de datos debe utilizarse QPSK-2/3 como mínimo en las distancias máximas de alcance si se requiere transmitir una tasa promedio de 5Mbps de datos, para tasas menores de 4.5 Mbps se logra atender a sólo un usuario (sin sobre suscripción). Al considerar una sobre suscripción de 10:1 entonces se logran 710 usuarios en voz, 50 usuarios en video y 10 en transmisión de datos.

En WiMAX la eficiencia espectral alcanzada en el enlace de subida al usar QPSK-1/2 es de $0.634 \frac{\text{bits}}{\text{s}} \cdot \text{Hz}$ y para un canal de 5MHz. soporta 49 usuarios por voz, 4 para video, y para datos debe utilizarse 16QAM-1/2 para soportar a un usuario en el alcance máximo.

La red de contingencia propuesta asigna una alta prioridad a la transmisión de voz por lo cual la tecnología IEEE 802.22 brinda un número importante de usuarios soportados en comparación con WiMAX. Además de que se considera a la red de contingencia en uso privado por lo que la congestión que se experimenta en las redes públicas no está presente.

4.6. Enlace satelitales

Para realizar el cálculo de los enlaces satelitales se utiliza las ecuaciones descritas en la sección 3.2.4.4.1 y las especificaciones para el MEXSAT 2 descritas en la sección 3.2.4.4.2. Además entre las consideraciones hechas en este segmento destacan que las terminales terrestres BGAN son de las mismas características técnicas para cada estado. Ya que los municipios en los estados deben estar subordinados a una Unidad Estatal, se considera a los nodos en las capitales como

las estaciones terrenas a las que reportan y solicitan información, entendiéndose por ello que será la unidad que brinda apoyo a las estancias de actuación especializada distribuidas en el escenario. De este modo la red cuenta con ETM, correspondientes a Campeche, Chetumal y Central M (Mérida).

En la tabla 40 se detallan los parámetros para realizar el cálculo de los enlaces satelitales, el ancho de banda del satélite hacia la estación terrena será el total de las estaciones terrenas presentes ($B_T = N \cdot B_{T_{Boc}}$). Se utiliza modulación QPSK ($M = 2$) y FEC a 3/4. Se utiliza un 20% en banda de guarda

Para realizar los presupuestos en los enlaces se realizan algunas consideraciones

Tabla 40. Parámetros para el cálculo del enlace satelital

Característica	ET	ETM	Satélite
Potencia Transmisión (dBW)	11	9.1	41.46
Ganancia de antena Rx (dBi)	9	50.26, ($\emptyset = 11m$)	41.7
Ganancia de antena Tx (dBi)	9	50.96, ($\emptyset = 11m$)	41.1
PIRE (dBW)	20	60.6	82.56
Back-off (dB)	--	--	5
Perdidas por borde (SCT, 2011)	--	--	3
Frecuencias ¹⁶ (MHz) (Ascen./descen.)	1643/1542		
Tasa de transmisión (kbps)	492 (UL)	640 (UL)	500(DL)
Ancho de banda ocupado (kHz) $\alpha = 0.35$, $B_{T_{Boc}} = B_{oc} + 0.2B_{oc}$, (con banda de guarda)	531.36 ≈ 532	691.2 ≈ 692	540 (Nodos=23)
Temperatura de ruido del sistema (K)	127	127	560
Probabilidad de error requerida 1×10^{-6}			

Las pérdidas por espacio libre experimentadas tienen un máximo de 188.6 dB y un mínimo de 187.28 dB en todo el escenario. En el Anexo 6 se indica el valor de las pérdidas para cada caso.

Se considera un back-off (BO) de 5dB (típico) y pérdidas por borde (P_B) de 3 dB en el enlace en el satélite, tomado al observar la imagen. Además se consideran 30 dB para la intermodulación ascendente $(C/N)_i$, al considerar un reúso de frecuencias.

¹⁶ Se elige la frecuencia central en el ancho de banda ascendente y descendente.

Se considera que las estaciones terrenas son de características idénticas por lo cual el presupuesto de enlace de subida se describe como

Estación Remota	Pérdidas	MEXSAT
$P_{ET_{Max}} = 11 \text{ dBW}$ $G_{Tx} = 9 \text{ dBi}$ $B_{(\uparrow Tx)} = 532 \text{ kHz}$ $B_{(\uparrow Tx)} = 57.26 \text{ dBHz}$	$FSL_{(\uparrow f)}$ dependerá del nodo tomar valores del Anexo 6 $k = -228.6 \frac{\text{dBW}}{^{\circ}\text{K} \cdot \text{Hz}}$	$G(\theta)_{Rx Sat} = 41.7 \text{ dBi}$ $T_{sat} = 560 \text{ K}$ $T_{sat} = 27.5 \text{ dBK}$ $BO = 5 \text{ dB}$

por lo tanto

$$(C/N)_S = 11 \text{ dBW} + 9 \text{ dBi} - 5 \text{ dB} + 41.7 \text{ dBi} - FSL_{(\uparrow f)} - (-228.6 + 27.5 \text{ dBK} + 57.26 \text{ dBHz}) \quad (26)$$

El enlace de bajada está descrito como

MEXSAT	Pérdidas	Estación Remota
$P_{Sat Max} = 41.46 \text{ dBW}$ $G(\theta)_{Tx Sat} = 41.1 \text{ dBi}$ $B_{(\downarrow Emis)} = 23 \cdot (532 \text{ KHz})$ $B_{(\downarrow Emis)} = 70.88 \text{ dBHz}$ $P_B = 3 \text{ dB} , BO = 5 \text{ dB}$	$FSL_{(\downarrow f)}$ dependerá del nodo tomar valores del Anexo 6 $k = -228.6 \frac{\text{dBW}}{^{\circ}\text{K} \cdot \text{Hz}}$	$G_{Rx ET Max} = 9 \text{ dBi}$ $T_{ET} = 127 \text{ K}$ $T_{ET} = 21.04 \text{ dBK}$

por lo tanto

$$(C/N)_B = 41.46 \text{ dBW} - 8 \text{ dB} + 41.1 \text{ dBi} + 9 \text{ dBi} - FSL_{(\downarrow f)} - (-228.6 + 21.04 \text{ dBK} + 70.88 \text{ dBHz}) \quad (27)$$

y el enlace de subida para la estación terrena maestra queda descrita como

Estación Terrena Maestra	Pérdidas	MEXSAT
$P_{ET_{Max}} = 9.1 \text{ dBW}$ $G_{Tx} = 50.96 \text{ dBi}$ $B_{(\uparrow Tx)} = 427 \text{ kHz}$ $B_{(\uparrow Tx)} = 56.30 \text{ dBHz}$	$FSL_{(\uparrow f)} = 187.733$ $k = -228.6 \frac{\text{dBW}}{^{\circ}\text{K} \cdot \text{Hz}}$	$G(\theta)_{Rx Sat} = 41.7 \text{ dBi}$ $T_{sat} = 560 \text{ K}$ $T_{sat} = 27.5 \text{ dBK}$

por lo tanto

$$\begin{aligned} \left(\frac{C}{N}\right)_S &= 9.1 \text{ dBW} + 50.96 \text{ dB} + 41.7 \text{ dBi} - 187.733 \\ &\quad - (-228.6 + 27.5 \text{ dBK} + 56.30 \text{ dBHz}) \\ \left(\frac{C}{N}\right)_S &= 58.827 \text{ dB} \end{aligned} \quad (28)$$

y el enlace de bajada está descrito como

MEXSAT	Pérdidas	Estación Remota
$P_{Sat \text{ Max}} = 41.46 \text{ dBW}$ $G(\theta)_{Tx \text{ Sat}} = 41.1 \text{ dBi}$ $B_{(\downarrow \text{Emis})} = 23 \cdot (532 \text{ KHz})$ $B_{(\downarrow \text{Emis})} = 70.88 \text{ dBHz}$ $P_B = 3 \text{ dB} , BO = 5 \text{ dB}$	$FSL_{(\downarrow f)} = 187.182$ $k = -228.6 \frac{\text{dBW}}{\text{°K} \cdot \text{Hz}}$	$G_{Rx \text{ ET Max}} = 50.26 \text{ dBi}$ $T_{ET} = 127 \text{ K}$ $T_{ET} = 21.04 \text{ dBK}$

por lo tanto

$$\begin{aligned} (C/N)_B &= 41.46 \text{ dB} - 3 \text{ dB} - 5 \text{ dB} + 41.1 \text{ dBi} + 50.26 \text{ dBi} - 187.182 \\ &\quad - (-228.6 + 21.04 \text{ dBK} + 70.88 \text{ dBHz}) \\ \left(\frac{C}{N}\right)_B &= 74.23 \text{ dB} \end{aligned} \quad (29)$$

Si realizamos el presupuesto del enlace entre la ETM y el nodo Central Playa cuyas pérdidas son $FSL_{(\uparrow f)} = 187.855$ y utilizamos (26) y (27) entonces para la relación portadora a ruido en la subida queda definida como

$$\begin{aligned} (C/N)_S &= 11 \text{ dBW} + 9 \text{ dBi} - 5 \text{ dB} + 41.7 \text{ dBi} - 187.856 \\ &\quad - (-228.6 + 27.5 \text{ dBK} + 57.26 \text{ dBHz}) \\ (C/N)_S &= 12.68 \text{ dB} \end{aligned} \quad (30)$$

Por consiguiente para la relación portadora a ruido total entre la estación remota y la estación terrena está descrita por la ecuación (7) al utilizar los resultados obtenidos en (29) y (30) para enlace ascendente de estación remota-satélite $(C/N)_S = 12.68 \text{ dB}$ y en la bajada del satélite-estación remota es $\left(\frac{C}{N}\right)_B = 74.23 \text{ dB}$, y se considera 30 dB por el reuso de frecuencias. Por lo tanto

$$(C/N)_T = \left(\frac{1}{\frac{1}{10^{\frac{12.68dB}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{74.23dB}{10}}} + \frac{1}{10^{\frac{30dB}{10}}}} \right) = 18.197$$

Así la energía de bit está descrita como

$$\frac{C}{N} = \frac{E_b R_b}{N_0 B} \quad (\text{bits/s})/\text{Hz} \quad (31)$$

$$\left[\frac{C}{N} \right]_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{E_b}{N_0} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{R_b}{B} \right) \quad (32)$$

donde B es el ancho de banda y R_b es la tasa de bit.

Por lo tanto al enviar información a una velocidad de 492 kbps y que ocupa un ancho de banda de 532 kHz la energía de bit es

$$\frac{E_b}{N_0} = 18.197 \frac{532 \times 10^3}{492 \times 10^3} = 19.67$$

Además la probabilidad de error al seleccionar modulación QPSK está descrita como

$$P_{e,QPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (33)$$

Para este enlace

$$P_{e,QPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{19.67})$$

Por lo tanto

$$P_{e,QPSK} = 1.78 \times 10^{-10}$$

Este valor obtenido se adecúa a la probabilidad de error que el diseño de la red requiere, ya que se considera un BER de 1×10^{-6} como aceptable.

Este proceso se repite en cada enlace estaciones terrenas al satélite en subida (ER-SAT) y luego el del satélite a la estación terrena maestra (SAT-ETM), estos resultados son presentados en la tabla 41.

Tabla 41. Relación portadora a ruido total y BER (1×10^{-6}) calculado, con 30 dB de intermodulación por reúso de frecuencias para el enlace entre las estaciones remotas y la estación terrena maestra a 60kbps con un ancho de banda de 532 KHz

NODO	Subida	Bajada	C/N_{Total}	E_b/N_0	BER
	ER-SAT [dB]	SAT-ETM [dB]			
Calkiní	11.719	74.328	14.639	15.810	9.37E-09
Campeche	11.549	74.328	14.084	15.211	1.74E-08
Champotón	11.184	74.328	12.963	14.000	6.07E-08
Escárcega	11.075	74.328	12.647	13.659	8.63E-08
Candelaria	11.217	74.328	13.061	14.106	5.44E-08
CD Carmen	11.277	74.328	13.240	14.299	4.45E-08
Cancún	11.639	74.328	14.376	15.526	1.26E-08
Central Playa	11.703	74.328	14.586	15.753	9.94E-09
Chetumal	11.093	74.328	12.699	13.715	8.15E-08
Chuiquilá	11.326	74.328	13.388	14.459	3.78E-08
FCP	11.267	74.328	13.209	14.266	4.61E-08
Limones	10.987	74.328	12.397	13.389	1.14E-07
Tulum	11.690	74.328	14.541	15.704	1.05E-08
Kantunilkin	11.452	74.328	13.777	14.879	2.45E-08
CentralM	11.718	74.328	14.634	15.805	9.43E-09
Dzidzantún	11.612	74.328	14.288	15.431	1.39E-08
Hunucmá	11.687	74.328	14.531	15.693	1.06E-08
Kantunil	11.691	74.328	14.546	15.709	1.04E-08
Progreso	11.711	74.328	14.611	15.780	9.67E-09
Río Lagartos	11.074	74.328	12.644	13.655	8.67E-08
Tekax	11.717	74.328	14.632	15.803	9.44E-09
Tizimín	11.364	74.328	13.505	14.585	3.31E-08
Valladolid	11.659	74.328	14.442	15.597	1.17E-08

Con las características de los elementos en tierra seleccionados se logra el enlace hacia el satélite.

Para el enlace de retorno de la estación terrena al satélite (ETM-SAT) y del satélite a la estación remota se presenta (SAT-ER) la tabla 42 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 42. Relación portadora a ruido total y BER (1×10^{-6}) calculado, con 30 dB de intermodulación por reuso de frecuencias para el enlace entre las estaciones remotas y la estación terrena maestra a 640 kbps con un ancho de banda de 12.22 MHz

	Subida	Bajada	C/N_{Total}	E_b/N_0	BER
	ETM-SAT [dB]	SAT-ETR [dB]			
Calkiní	58.8404	33.0682	669.0364	446.3727	1E-35<
Campeche	58.8404	32.7915	654.8194	436.8873	1E-35<
Champotón	58.8404	32.4263	635.6198	424.0776	1E-35<
Escárcega	58.8404	32.3177	629.8220	420.2094	1E-35<
Candelaria	58.8404	32.4595	637.3820	425.2533	1E-35<
CD Carmen	58.8404	32.5193	640.5531	427.3690	1E-35<
Cancún	58.8404	32.8819	659.4967	440.0080	1E-35<
Central Playa	58.8404	32.9459	662.7884	442.2041	1E-35<
Chetumal	58.8404	32.3357	630.7850	420.8518	1E-35<
Chuiquilá	58.8404	32.5683	643.1371	429.0930	1E-35<
FCP	58.8404	32.5092	640.0155	427.0103	1E-35<
Limonos	58.8404	32.2299	625.1035	417.0613	1E-35<
Tulum	58.8404	32.9322	662.0829	441.7335	1E-35<
Kantunilkin	58.8404	32.6943	649.7561	433.5092	1E-35<
CentralM	58.8404	32.9602	663.5233	442.6945	1E-35<
Dzidzantún	58.8404	32.8547	658.0900	439.0694	1E-35<
Hunucmá	58.8404	32.9291	661.9269	441.6294	1E-35<
Kantunil	58.8404	32.9336	662.1563	441.7824	1E-35<
Progreso	58.8404	32.9534	663.1757	442.4625	1E-35<
Rio Lagartos	58.8404	32.3166	629.7591	420.1674	1E-35<
Tekax	58.8404	32.9598	663.5020	442.6803	1E-35<
Tizimín	58.8404	32.6065	645.1516	430.4371	1E-35<
Valladolid	58.8404	32.9020	660.5300	440.6973	1E-35<

Los resultados obtenidos en esta última tabla muestran que las características de la estación terrena maestra (ETM) están sobre dimensionadas. Esto permite elegir equipos con menor potencia en transmisión y ganancias de antenas a fin de que se reduzcan los costos que conllevan los equipos utilizados. Gran parte de estos resultados se debe a la potencia que tiene MEXSAT. Se evalúa la modificación de estos y se encuentra que es posible tener las mismas características tanto en potencias y ganancias de antenas de las estaciones remotas (ETR). Incluso estas

estaciones remotas con un $PIRE = 20 \text{ dBW}$ continúan el BER alcanzado continua dentro del margen.

Por tal motivo al considerar características similares entre el ETM y la ETR es posible la interconexión entre estaciones remotas en las distintas ubicaciones propuestas. Aunque las cuestiones relacionadas con el comando y control que se requieren para lograr estas conexiones son temas que sobrepasan el objetivo de este trabajo.

Tabla 43. Relación portadora a ruido total y BER (1×10^{-6}) calculado, con 30 dB de intermodulación por reuso de frecuencias para el enlace entre las estaciones remotas y la estación terrena maestra con una ETM de $G_{TX} = 5 \text{ dBi}$, $P_{TX} = 15 \text{ dBW}$ a 60 kbps con un ancho de banda de 12.22 MHz.

	Subida	Bajada	C/N_{Total}	E_b/N_0	BER
	ETM-SAT [dB]	SAT-ETR [dB]			
Calkiní	18.7804	33.0682	67.8632	45.2775	8.99567E-22
Campeche	18.7804	32.7915	67.7140	45.1780	9.94744E-22
Champotón	18.7804	32.4263	67.5032	45.0373	1.14675E-21
Escárcega	18.7804	32.3177	67.4373	44.9933	1.19889E-21
Candelaria	18.7804	32.4595	67.5230	45.0505	1.13152E-21
CD Carmen	18.7804	32.5193	67.5585	45.0742	1.1048E-21
Cancún	18.7804	32.8819	67.7637	45.2111	9.61955E-22
Central Playa	18.7804	32.9459	67.7983	45.2342	9.3977E-22
Chetumal	18.7804	32.3357	67.4483	45.0007	1.19001E-21
Chuiquilá	18.7804	32.5683	67.5871	45.0933	1.08367E-21
FCP	18.7804	32.5092	67.5525	45.0702	1.10927E-21
Limones	18.7804	32.2299	67.3828	44.9570	1.24375E-21
Tulum	18.7804	32.9322	67.7910	45.2293	9.44465E-22
Kantunilkin	18.7804	32.6943	67.6595	45.1416	1.032E-21
CentralM	18.7804	32.9602	67.8060	45.2393	9.34914E-22
Dzidzantún	18.7804	32.8547	67.7489	45.2012	9.71657E-22
Hunucmá	18.7804	32.9291	67.7893	45.2282	9.45507E-22
Kantunil	18.7804	32.9336	67.7917	45.2298	9.43975E-22
Progreso	18.7804	32.9534	67.8024	45.2369	9.37206E-22
Río Lagartos	18.7804	32.3166	67.4365	44.9928	1.19948E-21
Tekax	18.7804	32.9598	67.8058	45.2392	9.35054E-22
Tizimín	18.7804	32.6065	67.6093	45.1081	1.06757E-21
Valladolid	18.7804	32.9020	67.7746	45.2184	9.54914E-22

4.7. Conclusiones del capítulo

A través del presente capítulo se establecen los elementos presentes en la red de contingencia y las características que cada uno posee. Se seleccionan las características que describen el escenario y los equipos de transmisión-recepción involucrados en el escenario de estudio para los segmentos terrestre y espacial.

Se expuso de igual forma qué banda de frecuencia se recomienda para la red de contingencia con los resultados obtenidos. Para ello comparamos las coberturas que en kilómetros cuadrados alcanza con un segmento de radiofrecuencias específico, de manera particular el interés fue el seleccionar el de mejores características, y resultó la banda compuesta por las frecuencias en VHF buenas prestaciones.

El segmento espacial involucra unidades que se distribuyen en el segmento terrestre y son empleados en la conexión hacia la una Unidad Estatal para coordinación, con los elementos presentes en la sección espacial se concluye que si es posible establecer dichos enlaces cuando sean requeridos y llevar a cabo la comunicación con las unidades en tierra y lograr el soporte.

Se reprodujo en un escenario de simulación los alcances logrados y se expone a través de mapas de cobertura, presentadas en figuras, el área cubierta por estas radiofrecuencias en comparación con las demás estudiadas. De manera particular se compara el alcance que se logran en la banda frecuencias utilizada por IEEE 80216e en comparación con la utilizada por IEEE 802.22.

Se precisa que los resultados obtenidos son para el enlace bidireccional “peor de los casos” ya que resulta primordial la comunicación por ambas vías, además se exponen los resultados para el enlace “Tx-Rx” el enlace de bajada. Son mostrados los resultados tanto para el área de cubierta y el alcance que se logra en este enlace. Con la distribución de las radio bases en el territorio se cubre un 40% la entidad de Quintana Roo, cerca de un 30 % la entidad de Yucatán y un 10% de territorio en

Campeche al emplear tecnología IEEE 802.22, esto sin considerar tasas mínimas de transferencia de datos.

Los resultados obtenidos establecen que el alcance máximo que se logra con las características técnicas de los equipos elegidos (incluyendo las alturas propuestas) en el área que una estación base cubre, es de 12.6 km de radio, cercanos a los 455 Km². A esta distancia se garantiza la comunicación bidireccional a una tasa pico, al emplear QPSK-1/2, de 4.54 Mbps con la tecnología IEEE 802.22 y un máximo de 3.17 Mbps al emplear IEEE 802.16e.

Esto conlleva a indicar que el área efectiva que se logra es cercana a los 10,500 Km² con el total de Estaciones Bases utilizadas en este primer estudio, área que cubre las principales ciudades dentro del escenario de estudio y con mayor número de habitantes.

Es esencial resaltar que el área cubierta por la red de contingencia propuesta es sobre el municipio elegido, sin embargo, existen localidades cercanas a estas estaciones base que quedan dentro del área de cobertura de la misma (12.6 km de radio). Un análisis más exhaustivo sobre las localidades alcanzadas en relación con el número de individuos que en ellas habita establece que para el total de las poblaciones por estado, para Campeche se logra cubrir un 60% de la población; en Quintana Roo se logra un 77% de la población y para Yucatán un 59%, de la población.

Es posible aumentar el número de estaciones base en los estados con el fin de incrementar el porcentaje de población atendida. En relación con el número de habitantes que logra incluirse dentro del radio de cobertura de la célula formada por una nueva Estación Base, resulta necesario considerar poblaciones con menos de 40 mil individuos. Por ejemplo, al considerar 7 estaciones más (Ticul, Motul, Chemax, Oxkutzcab, Izamal, Peto y Maxcanú) y 6 más en Quintana Roo (José María Morelos, Bacalar, Maya Balam, Leona Vicario, Puerto Morelos e incluir una más en Cozumel) se aumenta en un 10% más la población atendida en Yucatán y un 8% más en Quintana Roo. Por lo tanto aumentar el número de estaciones base

en comparación con la expuesta en la sección 4.4, resulta de menor impacto con respecto al número de individuos por cada nueva estación base. Aunque en el aspecto social atender a la población más desprotegida resulta relevante, los mecanismos que se utilicen para decidir a qué o cual población incluir por cada nueva Estación Base, forman parte de otros aspectos fuera de esta tesis.

Para el estado de Campeche no se realizan cambios del número de Estaciones Base.

En conclusión es posible entonces que, a través de una red de contingencia, se pueda proveer servicios de telecomunicaciones con características mínimas que puedan dar soporte a las telecomunicaciones inalámbricas con un impacto directo en la población vulnerable.

Capítulo 5 – Conclusiones y recomendaciones

5.1 Introducción

En este apartado se dan las conclusiones a este trabajo. A manera de recapitulación se harán algunas anotaciones pertinentes sobre lo presentado y sobre los resultados para luego finalizar este documento con las recomendaciones u observaciones para el futuro.

5.1.1 Sobre lo presentado

Es esencial en la gestión de los desastres contar con una red de comunicaciones de respuesta rápida que coadyuve en la coordinación de las distintas unidades o agencias que brinden esa respuesta. Para ello se propuso una red de contingencia para situaciones de desastres.

Este estudio se limitó al escenario donde los huracanes están presentes, debido a que este tipo de fenómenos, permite describir una posible trayectoria de impacto y por tanto, desplegar la red de contingencia en el área que será afectada. Todo dependerá de la información que se logre obtener a través de los canales de alerta temprana.

El presente estudio propone una arquitectura de red multinivel en el marco de las NGN, lo que representa emplear diferentes tecnologías de manera coordinada. Es importante destacar que la hibridación en la red de contingencia, hace referencia a la integración de tecnología terrestre y satelital, en particular establecer enlaces terrestres mediante IEEE 802.22 y en el ámbito satelital emplea el MEXSAT-2 (Morelos III).

El propósito de adoptar estos elementos en la red de contingencia conduce a adecuarse a los esfuerzos del gobierno en contribuir con una línea de acción del gobierno federal, estatal y municipal para responder a las emergencias y desastres naturales. El MEXSAT 2, tal como se indicó, tiene un enfoque para la atención a la población en caso de desastres. El protocolo de comunicaciones IEEE 802.22, desde su publicación en julio de 2011, fue diseñado para operar en el segmento de

frecuencias de la televisión analógica, mismo segmento que actualmente en México se encuentra recién liberado y representa una oportunidad de gran potencial para el desarrollo de nuevos estudios y aplicaciones de carácter social. De igual forma, en el presente trabajo se incluye la integración con el protocolo de comunicaciones IEEE 802.16e en la red de contingencia, esto para contrastar la cobertura en el área afectada y la tasa de datos lograda.

5.1.2 Sobre los resultados

En base a los primeros resultados obtenidos en el margen (M) del enlace, por comparación se seleccionaron los equipos IEEE 802.16e a utilizar en el escenario de simulación y para IEEE 802.22 se evaluó qué segmento de frecuencias ofreció un valor de margen (M) mayor en comparación con los demás segmentos. En un sentido hipotético, en un medio ideal la potencia emitida debe ser igual a la potencia recibida, sin embargo, en la práctica el medio atenúa la señal, por ello un valor de margen mayor indicaba que potencia de recepción se encuentra por arriba de sensibilidad del equipo, comprobando que el enlace entre emisor y receptor se logra establecer.

Ya que la potencia de recepción es una métrica de importancia, el contar con herramientas que permitan reproducir de manera fiel el comportamiento de una onda electromagnética propagándose por el medio es de gran relevancia. Por ello el utilizar Radio Mobile que integra los mapas topográficos de STRM y el Modelo de pérdidas ITM apoya lo perseguido en este trabajo.

Los mapas de cobertura obtenidos junto con los datos generados esbozan el comportamiento de las señales electromagnéticas propagándose en el medio a través de grandes distancias. Esto permite encontrar el radio de alcance de las tecnologías inalámbricas utilizadas, implementando distintos algoritmos en Matlab que evalúan la potencia de la señal recibida y selección la tasa de transferencia de información lograda al cumplir requisitos mínimos de SNR.

Los resultados establecen que el alcance logrado por la red de contingencia en un enlace bidireccional se ubica por debajo del promedio de alcance logrado por IEEE

802.22 de 33 km de radio, pero por arriba del promedio que logra IEEE 802,16e los 8km.

Ya que finalidad de cada estación base es operar cuando las telecomunicaciones de uso tradicional no están disponibles, se asume que están aisladas de la conexión global por tanto, por medio de los enlaces satelitales se enlaza a un centro de comando que le brinda el soporte para estar comunicado con la Unidad Estatal. Esto se garantiza por medio de tasa de error en el bit cuyo parámetro de medida se fija en 1×10^{-6} como un mínimo para garantizar el enlace y así transmitir información fiable.

5.2 Conclusiones

Es posible desplegar una red de contingencia que utilice tecnología inalámbrica terrestre y enlaces satelitales en el sitio de la emergencia, con un radio de cobertura limitado.

En las estaciones base en tierra se recomienda utilizar tecnología con el protocolo IEEE 802.22 para desplegar una red de contingencia para la península de Yucatán, debido a que con los resultados obtenidos del radio de alcance, esta tecnología logra cubrir en gran medida el área urbana de los municipios donde se encuentran las estaciones base. Sin embargo, las estaciones remotas representan el principal limitante debido a la isotropía en sus antenas, esto impacta directamente el valor de la PIRE que es crucial al momento de transmitir una señal, lo anterior porque, se encontró que al implementar el enlace "Tx-Rx", donde sólo se involucra la transmisión de la Estación Base, se logran alcanzar distancias de mayores de 25 km de radio, manteniendo las alturas propuestas en la estación base (3m) y la estación remota (1.64m). Por ello para la red de contingencia propuesta se establece que un requisito mínimo en la potencia de transmisión en la que operen los equipos remotos sea la máxima permitida, es decir, 20 dBm.

Al comparar los valores obtenidos en el área de cobertura con una radiobase de 28 dBm de potencia con una de 36 dBm de potencia (ambas con una antena cuya ganancia es de 6dBm) se cubre un 40% más del área con la Estación Base cuya

potencia es de 36 dBm. Por ello en la red de contingencia los equipos deben utilizar la potencia máxima permitida en la recomendación tomada de la FCC.

Un aspecto importante de destacar es la altura a la cual, se encuentra la estación base, en este trabajo se propuso como un mínimo 3 metros en la altura de la antena de estación base, parámetro que puede modificarse según las condiciones del entorno geográfico. Un punto más alto permite evitar obstrucciones durante la propagación de las ondas electromagnéticas. Tal es el caso del nodo base denominado Tekax cuya altura sobre el nivel del mar excede los 50 metros, este alcanza una mayor área de cobertura en comparación con las demás estaciones base. De igual forma para la estación remota se fijó una altura con base a la estatura promedio de un mexicano, sin embargo esta altura puede modificarse, no se considera mínima, es sólo un referente. Por lo tanto, cuando las condiciones del terreno lo permitan, se recomienda elegir el punto más elevado en el área de emergencia donde la estación base sea colocada.

Actualmente implementar a corto plazo la red de contingencia propuesta, que utilice el protocolo IEEE 802.22 no es factible, debido a que los dispositivos electrónicos están en vías de desarrollo. Frente a esto, la tecnología con el protocolo IEEE 802.16e resulta efectiva para su pronta implementación en una red de contingencia y proveer a las Unidades Estatales de Protección Civil una red de telecomunicaciones independiente de los modelos tradicionales (telefonía fija y móvil de algún proveedor).

Existe un mercado extenso que comercia terminales base y terminales remotas con la tecnología IEEE 802.16e, en este trabajo se mencionaron algunos en los anexos.

En el segmento satelital la implementación de los enlaces en Banda L cuya ventaja estriba en que no se ve afectada por las lluvias y que necesita equipos de menor potencia y sin estar con una antena que apunte directamente a la posición del satélite.

Con las especificaciones del MEXSAT 2, los equipos terrestres de la comunicación por satélite requieren con un mínimo en el PIRE de 20 dBW ($P_{TX} = 15 \text{ dBW}$, $G_{TX} = 5 \text{ dB}$) para logran un enlace confiable. Emplear terminales utilizando otras

frecuencias de mayor rango, por ejemplo Banda Ku, requiere equipos con mayor potencia y sobre todo estar expuestos a las pérdidas que las condiciones climatológicas adicionan al enlace satelital.

Desplegar un red de contingencia requerirá personal técnico en telecomunicaciones que conozca tanto las tecnologías terrestres así como las satelitales; en especial sobre WiMAX, WIFAR, BGAN, MEXSAT, frecuencias de radio operación y conocimientos sobre antenas Tx/Rx. Debe integrarse un equipo que evalúe las mejores características a emplear de los elementos comerciales costo/calidad y un área de Protección Civil encargada de la logística en la distribución de las Nodos Base en el escenario de emergencia, con fundamento en la información que los mecanismos de alerta temprana brinden.

5.3 Recomendaciones

Para continuar con el trabajo presentado en esta tesis, se hacen las siguientes recomendaciones:

- Implementar la capa física (PHY) y lógica (MAC) para IEEE 802.22 utilizando OMNET++.
- Hacer más simulaciones en escenarios híbridos y analizar el tráfico total del sistema conjuntando el segmento satelital y terrestre en un enlace PMP donde se establece intercambio de información entre una Estación Base y las Estaciones Remotas.

Trabajo futuro:

Se propone extender esta herramienta a otros escenarios y situaciones de emergencia considerando distintas áreas geográficas, distintos tipos de terrenos, distinto número de poblaciones, y distinto tipo de fenómenos naturales que generen desastres, aunque se deja como un proyecto a futuro.

Ya que la red de contingencia propuesta requiere de movilidad en todos sus elementos, debe evaluarse la factibilidad de una red de contingencia con Estaciones Base Fijas en sitios específicos de la República Mexicana para así extender el área de cobertura al incrementar la altura en las antenas de las Nodos Base hasta los límites permitidos por el estándar IEEE 802.16e o IEEE 802.22.

Lista de referencias bibliográficas

- Abate, Z. (2009). *WiMAX RF Systems Engineering*. Boston: Artech House.
- AEM, y Duarte, C. (2012). Telecom y el Sistema Satelital Mexicano: MEXSAT. *Space for Human and Environmental Security in the Americas: Space policy, Long-term Sustainability and Cyber-health*. México, D.F.: Agencia Espacial Mexicana. Recuperado el 2013 de Noviembre, de http://swfound.org/media/78888/30_telecomm%20y%20el%20sistema%20satelital%20mexicano.pdf
- Alcaraz Espín, J. J., Sanchez Medina, I., y Urios Perez, A. (2003). *Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación*. Recuperado el 2 de Mayo de 2015, de Sistemas de satélites: <http://www.upv.es/satelite/trabajos/pracGrupo17/sistemas.html>
- Alvarion. (2006). *Implementing VoIP Service Over Wireless Network*. Mainz: Alvarion. Obtenido de Connect Netzweke für Ihren Erfolg: http://www.cnct.de/uploads/media/VoIP_over_wireless_networks_060706.pdf
- APT Recommendation. (2006). Use of the band 4940-4990 MHz for public protection and disaster relief (PPDR) applications. En APT (Ed.), *The 31st Session of the APT Management Committee*. Korea. Recuperado el Febrero de 2015, de http://www.apt.int/sites/default/files/APT-AWF-REC-01Rev.1PPDR_Rec_at_5Ghz_Revision_1.pdf
- Atlas Nacional de Riesgos. (2015). *VISOR DE MAPAS*. Recuperado el Abril de 2015, de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/images/PHPcenapred/index/fase1/Hidros>
- Boeing. (Noviembre de 2015). *Boeing*. Obtenido de Mexican Satellite System: <https://web.archive.org/web/20150314075810/http://www.boeing.com/boeing/defense-space/space/bss/factsheets/702/mexsat/mexsat.page>
- Boose, E. R., Foster, D. R., Plotkin, A. B., y Hall, B. (2003). Geographical and Historical Variation in Huracanes Across the Yucatán Peninsula. En A. Gomez-Pompa, M. Allen, S. L. Fedick, y J. Jiménez-Osornio (Edits.), *The Lowland Maya Area* (págs. 495-515). Nueva York: Food Products Press.
- Boronat Seguí, F., Pineda García, M., y Loret Mauri, J. (2008). *IPTV, la televisión por Internet*. Málaga, España: Vértice.
- CENAPRED. (2001). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*. Obtenido de Centro Nacional de Prevención de Desastres: <http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/SerieEspecial/diagnostico.pdf>

- CENAPRED. (2015). *Centro Nacional de Prevención de Desastres*. Obtenido de CENAPRED: <http://www.cenapred.unam.mx/es/dirQuienesSomos/Objetivo/>
- CENAPRED. (Enero de 2015). *Visor de Mapas*. (Atlas Nacional de Riesgos) Recuperado el 5 de Abril de 2015, de Centro Nacional de Prevención de Desastres: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/images/PHPcenapred/index/fase1/Hidros>
- Cochetti, R. (2014). Military Mobile Satellite Communications Systems. En R. Cochetti, *Mobile Satellite Communications Handbook* (2 ed., págs. 182-183). New Jersey, Estados Unidos: John Wiley y Sons.
- COFETEL. (2013). *Regulación Satelital en México: Estudio y Acciones*. México: Comisión Federal de las Telecomunicaciones (COFETEL). Obtenido de <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/regulacionsatelitalenmexicoestudioyacciones19-06-2013-final.pdf>
- Colín, A., Álvarez, E., y Serrano, A. (12 de Febrero de 2015). NGN Model for the Mexican Rural Context Applied to the e-Mexico System. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 13(1), 337-344.
- Cordeiro, C., Challapali, K., y Birru, D. (2006). IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios. *Journal of Communications*, 1(1), 38-47.
- Coudé, R. (2015). *Radio Mobile*. Recuperado el Enero de 2014, de <http://www.cplus.org/rmw/rme.html>
- DOF. (2015). *CONVENIO Específico de Coordinación para conjuntar acciones y recursos para contribuir al desarrollo de la Red Estatal de Educación, Salud y Gobierno del Estado*. Recuperado el 17 de Enero de 2015, de Diario Oficial de la Federación: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5309567&fecha=07/08/2013&print=true
- Education, C. B. (2006). *A Supplementary Textbook in Geography for Class XI on Unit 11* (Primera ed.). Delhi: Preet Vihar.
- ESA. (10 de Agosto de 2007). *ARTES Applications*. Recuperado el 13 de Octubre de 2015, de SKYPLEXNET: <https://artes.esa.int/projects/skyplexnet>
- ESA. (9 de Diciembre de 2014). *ARTES Applications*. Recuperado el Octubre de 2015, de ECM-GR (Earthquake Crisis Management For Greece): <https://artes.esa.int/projects/ecm-gr>

- ESA. (2014). *ARTES Applications*. Recuperado el Octubre de 2015, de STICK - Satellite-Terrestrial Integrated Communications Kit: <https://artes.esa.int/projects/stick>
- ESA. (2015). *Artes Applications*. Recuperado el Octubre de 2015, de ARTES: <https://artes.esa.int/about-artes>
- García Hernández, C. F., Ibargüengoytia González, P. H., Flores García, A., y Franco Campos, L. E. (2011, enero-marzo). Investigación sobre posibles riesgos a la salud humana por exposición a la radiación de ondas electromagnéticas producidas por las radiocomunicaciones. *Boletín IIE*, 35(1), 12-19. Retrieved from <http://www.iie.org.mx/boletin012011/biie012011.pdf>
- Ground Control. (Noviembre de 2015). *BGAN terminal comparison chart*. Obtenido de Ground Control: http://www.groundcontrol.com/BGAN_Terminal_Comparison_Chart.htm
- Hasegawa, K., Masayuki, T., y Keat-Beng, T. (2013). IEEE 802.22-based WRAN System for Disaster-Resistant Network Systems. 264-269.
- HIID, e INCAE. (Diciembre de 1998). *Estrategia para la Reconstrucción y Transformación de C.A. después del Huracán Mitch*. Harvard Institute for International Development. Nicaragua: INCAE Business School. Obtenido de <http://www.incae.edu/ES/clacds/publicaciones/articulos/cen1101.php>
- Hufford, G., Longley, A., y Kissick, W. (01 de Abril de 1982). *A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode*. National Telecommunications y Information Administration, United States Department Of Commerce. Washington: NTIA. Obtenido de <https://www.ntia.doc.gov/report/1982/guide-use-its-irregular-terrain-model-area-prediction-mode>
- Iapichino, G.; Bonnet, C.; del Rio Herrero, O.; Baudoin, C.; Buret, I. (2008, Junio). Advanced Hybrid Satellite and Terrestrial System Architecture for Emergency Mobile Communications. *26th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2008)* (pp. 1-8). San Diego: AIAA.
- IEEE. (2012). *IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems*. Nueva York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- IEEE. (2015). *802.11: LAN inalámbricas*. Recuperado el 20 de Abril de 2015, de <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>
- IEEE 802. (2015). *IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee*. Recuperado el 9 de Mayo de 2015, de <http://www.ieee802.org>

- IFT. (2013). *Espectro Radioeléctrico en México. Estudio y Acciones*. Instituto Federal de las Telecomunicaciones. IFT. Obtenido de <http://www.ift.org.mx/iftweb/wp-content/uploads/2013/02/Espectro-Radioel%C3%A9ctrico-en-M%C3%A9xico-VP.pdf>
- IFT. (Diciembre de 2014). *MEXSAT116.8 L-CEXT-X*. Recuperado el Enero de 2015, de Instituto Federal de Telecomunicaciones: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/espectro-radioelectrico/telecomunicaciones/2014/2/part1s113500072mexsat1168l-cext-xbrific2748.pdf>
- IFT. (2014). *Portal anterior IFT*. Recuperado el 2015, de http://portalanterior.ift.org.mx/iftweb/wp-content/uploads/2014/07/APIa5520_MEXSAT116_8_L-CEXT-X_BR_IFIC_2640.pdf
- IFT. (2015). *Disposición Técnica IFT-003-2014: Especificaciones y requerimientos mínimos para la instalación y operación de las estaciones de radiodifusión de televisión analógica*. México: Instituto Federal de Telecomunicaciones. Recuperado el Febrero de 2015, de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5358463&fecha=02/09/2014
- IFT. (2015). *Plan para la banda 806-824/851-869 Mhz*. Instituto Federal de Telecomunicaciones, Unidad de Espectro Radioeléctrico. México: IFT. Obtenido de http://apps.ift.org.mx/publicdata/P_IFT_080715_208.pdf
- INEGI. (2010). *Información por entidad*. Recuperado el Febrero de 2015, de <http://www.cuentame.inegi.org.mx/default.aspx>
- ITU. (2003). *Radiocommunication objectives and requirements for public protection and disaster relief*. ITU, ITU Radiocommunication Sector. Geneva: ITU. Obtenido de <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2033>
- ITU. (04 de Noviembre de 2004). *NGN Working definition*. Recuperado el 25 de Agosto de 2015, de International Telecommunication Union: http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com13/ngn2004/working_definition.html
- ITU. (25 de Agosto de 2005). *T-REC-Y.2001-2004 Serie Y: infraestructura mundial de la información, aspectos del protocolo internet y redes de la próxima generación*. Obtenido de International Telecommunications Union (ITU): <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2001-200412-l/es>
- ITU. (2013). *Recomendación ITU-R P.617-1: Datos de propagación y técnicas de predicción necesarios para el diseño de sistemas de radioenlaces transhorizonte*. Genova: Unión Internacional de Telecomunicaciones. Recuperado el Enero de 2015, de https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.617-1-199203-S!!PDF-E.pdf

- ITU. (2013). *Working Party 4B (WP 4B) - Systems, air interfaces, performance and availability objectives for FSS, BSS and MSS, including IP-based applications and satellite news gathering*. Recuperado el 14 de Octubre de 2015, de ITU: <http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg4/rwp4b/Pages/default.aspx>
- Jones, V., Karagiannis, G., y Heemstra de Groot, S. (Junio de 2005). *Ad hoc networking and ambient intelligence to support future disaster response*. Institut National de Telecommunications. Paris: Hossam Afifi and Djamel Zeglache. Obtenido de http://doc.utwente.nl/66393/1/ieee_aswn_MIS_119-finalwithheader.pdf
- Kota, S., Giambenel, G., y Sooyung, K. (2011). Satellite component of NGN: Integrated and hybrid networks. *International Journal Satellite Communications and networking*, 29 (3), 191-208.
- Lee, Y.-M., Ku, B.-I., y Ahn, D. S. (17-19 de Noviembre de 2010). A Satellite Core Network System for Emergency Management and Disaster Recovery. *Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2010 International Conference on* (págs. 549-552). Jeju: IEEE.
- Lewis, J. (2015). *Procedimientos espaciales*. Recuperado el 13 de Noviembre de 2015, de Union Internacional de Telecomunicaciones (ITU): <http://www.itu.int/itu-news/manager/display.asp?lang=es&year=2009&issue=02&ipage=26&ext=html>
- Maral, G. (2011). *Satellite Communications Systems: systems, techniques and technology*. Noida: John Wiley y Sons Ltd.
- Martínez, C. (2010). Plataformas Tecnológicas para un México Digital. *Modelos de Conectividad: Hacia la creación de Ciudades Digitales* (págs. 1-22). Monterrey: Política Digital. Obtenido de http://conectividad2009.politicadigital.com.mx/pdf/09_motorola.pdf
- Pal Grønsund. (2014). Sensing of Wireless Microphones in IEEE 802.22: A System Level Performance Evaluation. *IEEE Communications Magazine*, 52(1), 200-209.
- Perla Anaya, J. (2001). Telecomunicaciones en el Perú: el marco jurídico. En *El Reglamento general de la Ley de telecomunicaciones comentado* (pág. 216). Perú: PUCP, Fondo Editorial.
- Saeed, R., y J. Shellhammer, S. (2012). *TV White Space Spectrum Technologies: Regulations, Standards, and Applications*. Florida: CRC Press.
- SCT. (2011). Mexican Satellite System. En UNOOSA (Ed.), *COPUOS. Committee on the Peaceful Uses of Outer Space*. Obtenido de <http://www.unoosa.org/pdf/pres/copuos2011/tech-05.pdf>

- SCT. (2012). *Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias*. México: Comisión Federal de Telecomunicaciones.
- SCT. (30 de Septiembre de 2015). *Avanza la cuenta regresiva para el lanzamiento del satélite Morelos 3*. Obtenido de Secretaría de Comunicaciones y transportes: <http://www.sct.gob.mx/despliega-noticias/article/avanza-la-cuenta-regresiva-para-el-lanzamiento-del-satelite-morelos-3/>
- SCT. (16 de Octubre de 2015). *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*. Obtenido de Satélite Morelos 3 inicia hoy despliegue de paneles solares: <http://www.sct.gob.mx/despliega-noticias/article/satelite-morelos-3-inicia-hoy-despliegue-de-paneles-solares/>
- SEGOB. (2012). *Plan Nacional de Desarrollo 2012-2018*. Obtenido de Plan Nacional de Desarrollo: <http://pnd.gob.mx/wp-content/uploads/2013/05/PND.pdf>
- Sherman, M., Mody, A. N., Martinez, R., y Rodriguez, C. (2008). IEEE Standards Supporting Cognitive Radio and Networks, Dynamic Spectrum Access, and Coexistence. *IEEE Communications Magazine*, 46(7), 72-79.
- Stevenson, C. R., Chouinard, G., Lei, Z., Hu, W., Shellmmer, S. J., y Caldwell, W. (2009). IEEE 802.22: the First Cognitive Radio Wireless Regional Area Network Standard. *IEEE Communications Magazine*, 47(1), 130-137.
- Thomasson, L., Verelst, G., Deprey, S., Boutry, P., Berioli, M., y Courville, N. (2008, Junio 14). Hybrid satellite-terrestrial based solutions for rapid deployment of wireless telecommunication networks in emergency situations. Sixth Framework Programme. Recuperado el 2014, de <http://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/3/034673/080/publishing/readmore/Paper-TIEMS-2008.pdf>
- Townsend , A. M., y Moss, M. L. (2005, Mayo 6). *Telecommunications Infrastructure in Disasters: Preparing Cities for Crisis Communications*. Center for Catastrophe Preparedness and Response. New York: New York University. Retrieved from The Center For Catastrophe Preparedness y Response: <http://www.nyu.edu/ccpr/pubs/NYU-DisasterCommunications1-Final.pdf>
- UNISDR. (2013). *Disaster Risk Reduction in the Americas : Annual Work Plan and Strategy 2014-2015*. Panamá: UNISDR regional office for the Americas.
- UNISDR. (2 de Nov de 2015). *How Mexico handled Patricia*. (U. N.–R. (UNISDR), Editor) Obtenido de UNISDR Publications: <https://www.unisdr.org/archive/46475>
- UNISDR, y OSSO, C. (Septiembre de 2013). *Impacto de los desastres en América Latina y el Caribe, 1990 -2011. Tendencias y estadísticas para 16 países*. Panama: United Nations Internacional Steategy for Disater Reduction

- (UNISDR). Obtenido de http://www.unisdr.org/files/35334_impactodelosdesastresenlasamericas1.pdf
- Valdés González, C. M. (2014). *Mensaje de bienvenida*. Recuperado el 23 de Enero de 2014, de Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED): <http://www.cenapred.unam.mx/es/dirQuienesSomos/Mensaje>
- Vázquez, F. R. (2 de Junio de 2011). *Mexican Satellite System*. (C. o. Space, Ed.) Recuperado el Noviembre de 2015, de United Nations Office for Outer Space Affairs: <http://www.unoosa.org/pdf/pres/copuos2011/tech-05.pdf>
- W6ZE. (Julio de 2010). Digital-ATV – Understanding Symbol-Rates, FEC and RF Bandwidth. *Orange County Amateur Radio Club*, 16-19. Obtenido de <http://www.w6ze.org/TechTalk76-DATV.pdf>
- Wang, J., y Sun Song, M. (2009). First Cognitive Radio Networking Standard for Personal/Portable Devices in TV White Spaces. *Ecma International*(Ecma/TC48-TG1/2009/132).
- Wikipedia. (9 de Junio de 2015). *Wikipedia*. (I. Fundación Wikimedia, Productor) Recuperado el Noviembre de 2015, de H.264/MPEG-4 AVC: https://es.wikipedia.org/wiki/H.264/MPEG-4_AVC
- WiMAX Forum. (2007). *Public Consultation on “Broadband Wireless Access*. Lisbon: WiMAX Forum. Obtenido de http://www.anacom.pt/streaming/BWA_WIMAX.pdf?contentId=494088&field=ATTACHED_FILE
- WiMAX Forum. (2015). *WiMAX Forum Membership*. Recuperado el 13 de Octubre de 2015, de <http://www.wimaxforum.org/membership>
- Wood, L. (1998). *A networking perspective on satellite constellations*. Surrey: Centre for Communication Systems Research.
- Yang, S. C. (2010). Chapter 6 Physical Layer Spatial Techniques. En S. C. Yang, *OFDMA System Analysis and Design* (pág. 117). Boston: Archet House.
- Yarali, A., Ahsant, B., y Rahman, S. (Junio de 2009). *Wireless Mesh Networking: A Key Solution for Emergency y Rural Applications*. *Second International Conference on Advances in Mesh Networks*, 143-149.
- Zhongxian, P. (2014). *Optimization on Burst Allocation in D2DWRAN*. Delft, Holanda: Delft University of Technology. Obtenido de <http://www.es.ewi.tudelft.nl/msc-theses/2014-Pan.pdf>

Anexo 1 Servicios satelitales: definiciones.

Los sistemas satelitales permiten que se desarrolle diferentes aplicaciones de servicios que se pueden ofrecer mediante dichos sistemas, y son regulados por el Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) de la UIT. Están definidos de la siguiente manera:

Servicio Fijo por Satélite (FSS): servicio de radiocomunicación entre estaciones terrenas situadas en cualquier punto fijo situado en una zona determinada. Este servicio incluye enlaces entre satélites que pueden realizarse también dentro del servicio entre satélites.

Servicio Móvil por Satélite (MSS): Servicio de radiocomunicación entre estaciones terrenas móviles por intermedio de una o varias estaciones espaciales.

Servicio Móvil Terrestre por Satélite (LMSS): Servicio móvil por satélite en el que las estaciones terrenas móviles están situadas en tierra.

Servicio Móvil Marítimo por Satélite (MMSS): Servicio móvil por satélite en el que las estaciones terrenas móviles están situadas a bordo de barcos; también pueden considerarse incluidas en este servicio las estaciones de embarcación o dispositivo de salvamento y las estaciones de radiobaliza de localización de siniestros.

Servicio Móvil Aeronáutico por Satélite (AMSS): Servicio móvil por satélite en el que las estaciones terrenas móviles están situadas a bordo de aeronaves; estaciones de embarcación, dispositivo de salvamento y estaciones de radiobaliza de localización de siniestros.

Servicio de Radiodifusión por Satélite (DBS): Servicio de radiocomunicación en el cual las señales emitidas o retransmitidas están destinadas a la recepción directa de manera individual o por el público en general.

Servicio de Radiodeterminación por Satélite (RSS): Servicio de radiocomunicación para fines de determinación de la posición, velocidad u otras características de un objeto fijo o móvil, u obtención de información relativa a estos parámetros, mediante las propiedades de propagación de las ondas radioeléctricas.

Servicio de Radionavegación por Satélite (RNSS): Servicio de radiodeterminación por satélite para fines de navegación y posicionamiento al usar recepción de señales vía satélite (radionavegación).

Servicio de Radionavegación Marítima por Satélite (MRNSS): Servicio de radionavegación por satélite en el que las estaciones terrenas están situadas a bordo de barcos.

Servicio de Radionavegación Aeronáutica por Satélite (ARNSS): Servicio de radionavegación por satélite en el que las estaciones terrenas están situadas a bordo de aeronaves.

Servicio de Meteorología por Satélite (MSS): Servicio de exploración de la Tierra por satélite destinado a las observaciones y sondeos utilizados en meteorología, incluido la hidrología.

Servicio de Aficionados por Satélite (ASS): Servicio de radiocomunicación que utiliza estaciones espaciales situadas en satélites para los mismos fines que el servicio de radioaficionados.

Servicio de Exploración de la Tierra por Satélite (EESS): Servicio de radiocomunicación en el que se obtiene información sobre las características de la Tierra y sus fenómenos naturales, por medio de plataformas situadas en el aire o sobre la superficie de la Tierra.

Servicio de Frecuencias Patrón y de Señales Horarias por Satélite (SFSS y TSSS): para los mismos fines que el servicio de frecuencias patrón y de señales horarias pero usando enlaces satélite.

Radiodifusión de audio digital por satélite (DARS/DABS): Servicio de radio digital para radiodifusión de estaciones de radio.

Servicio intersatélite (ISL): Servicio de radiocomunicación que establece enlaces entre satélites artificiales de la Tierra.

Servicio de operaciones espaciales (SOSS): servicio de radiocomunicación que concierne exclusivamente al funcionamiento de los vehículos espaciales, en particular el seguimiento espacial, la telemedida espacial y el telemando espacial, funciones que normalmente se realizan dentro del servicio donde la estación espacial está en funcionamiento (Perla Anaya, 2001).

Servicio de radioastronomía por satélite (RASS): servicio que implica el uso de datos y parámetros científicos relacionados con la radioastronomía.

Anexo 2 Vocabulario

Tabla 44. Definiciones y conceptos utilizados en esta tesis tomados del inglés

Terms	Description	In 802.22 (Zhongxian, 2014)
Burst	A group slots that are allocated to certain communication.	A burst on a subchannel has to cross at least 7 symbols.
Burst allocation	Allocating slots to different connection according to their requests.	The BS manages the burst allocation vertically in the DS subframe and horizontally in the US subframe.
DS	Downstream. Directions of the data flow are from the BS to CPEs	
US	Upstream. Directions of the data flow are from CPEs to the BS or between two CPEs.	Only the links that from CPEs to the BS are supported.
beamforming	Beamforming or spatial filtering is a signal processing technique used in sensor arrays for directional signal transmission or reception.	
Unsolicited Grant Service	is a service flow in which the transmission system automatically and periodically provides a defined number of timeslots and fixed packet size that is used by a particular receiver	

Tabla 45. Definiciones y conceptos utilizados (Traducción al español)

Términos	Descripción	En 802.22
Burst	Un grupo ranuras que se asignan a cierta comunicación.	Una ráfaga en un subcanal que tiene que cruzar por lo menos 7 símbolos.
Burst allocation	La asignación de ranuras para diferentes conexiones de acuerdo a sus peticiones.	La estación base (BS) gestiona la asignación de ráfaga verticalmente en la subtrama DS auxiliar y horizontalmente en la subtrama US auxiliar.
DS (Downstream)	Las direcciones de los flujos de datos son de la BS al equipo local del cliente (CPE).	
US (Upstream)	Las direcciones de los flujos de datos son de las CPEs a la BS o entre dos CPEs.	Sólo los vínculos desde CPE a las BS son compatibles.
Beamforming	Beamforming o filtrado espacial es una técnica de procesamiento de señales utilizado en redes de sensores para la transmisión de la señal direccional o recepción.	
Multiplexación	Transmitir información combinada en dos o más canales en un solo medio usando un dispositivo llamado multiplexor.	
Unsolicited Grant Service	flujo de servicio en la que el sistema de transmisión proporciona automática y periódicamente un número definido de intervalos de tiempo y tamaño de paquete fijo que se usa por un receptor particular	

Anexo 3 Equipos para las estaciones base y estaciones remotas

Tabla 46. Equipos WiMAX móvil (Estaciones Base)

Descripción	Alvarion	
	Equipo 1	Equipo 2
Potencia [dBm]	20	28
Sensibilidad [dBm]	-100	-100
Ganancia de antena [dBi]	17	17
Altura de antena [m]	30	30

Descripción	Nortel	
	Equipo 1	Equipo 2
Potencia [dBm]	24	27
Sensibilidad [dBm]	-103	-115
Ganancia de antena [dBi]	17	17
Altura de antena [m]	28	28

Descripción	Red Line	
	Equipo 1	Equipo 2
Potencia [dBm]	20	23
Sensibilidad [dBm]	-98	-98
Ganancia de antena [dBi]	14	14
Altura de antena [m]	25	25

Descripción	Prueba	
	Equipo 1	
PIRE [dBm]	56	
Sensibilidad [dBm]	-100	
Ganancia de antena [dBi]	20	
Altura de antena [m]	30	

Tabla 47. Equipos WiMAX móvil (Estaciones Remotas)

Descripción	Airspan/Fujitsu	
	Equipo 1	Equipo 2
Potencia [dBm]	17	24
Sensibilidad [dBm]	-100	-103
Ganancia de antena [dBi]	27	27

Tabla 48. Equipos WRAN

Descripción		
	Estación Base	Estación Remota
Potencia [dBm]	20	28
Sensibilidad [dBm]	-116	-116
Ganancia de antena [dBi]	6	0
Altura de antena [m]	3	1.67

Anexo 4 Terminales BGAN comerciales

Tabla 49. Terminales BGAN Comerciales (Ground Control, 2015)

Equipos									
Especificaciones	Explorer 500	Explorer 510	Explorer 700	Explorer 710	Hughes 9201	Hughes 9202	Hughes 9211	Wideye Ranger	MCD-4800
PIRE	15.1 dBW ±1dB	15.1 dBW ±1dB	20 dBW ±1dB	20 dBW ±1dB					
Velocidades de Internet	464 Kbps Down	464 Kbps Down	492 Kbps Down	492 Kbps Down	492 Kbps Down	464 Kbps Down	492 Kbps Down	384 Kbps Down	464 Kbps Down
	448 Kbps Up	448 Kbps Up	492 Kbps Up	492 Kbps Up	492 Kbps Up	448 Kbps Up	492 Kbps Up	240 Kbps Up	448 Kbps Up
Interfaz de datos	Ethernet	USB to Ethernet o WiFi	Ethernet 2 Puertos	Ethernet 2 puertos	Ethernet	Ethernet	Ethernet	Ethernet	Ethernet
Potencia (entrada DC)	10-31 Volts DC	10-31 Volts DC	10-32 Volts DC	10-32 Volts DC	10-34 Volts DC	10-34 Volts DC	10-34 Volts DC	n/a	12 to 28 Volts DC
Potencia	100V - 240VAC	100V - 240VAC	110V - 240VAC	110V - 240VAC	110V – 240 VAC	110V – 240 VAC	110V – 240 VAC	100V – 240 VAC	110V - 240VAC
AC Corriente	47-63 Hz	47-63 Hz	47-63 Hz	47-63 Hz				40 – 73 Hz	
Vida de la batería	36 horas	36 horas	36 horas	36 horas	36 horas	36 horas	36 horas	Alimentación externa	Más de 6 horas
Tamaño L x W	8.6" x 8.6"	7.8 x 7.8 x 1.6"	11" x 13" x 2.2"	11" x 13" x 2.13"	13.6" x 10.8"	8.5" x 8.5"	13.6" x 10.8"	12" x 7.23"	10.2" x 7.7"
Peso	3.3lbs (1.5 kg)	3.1lbs / 1.4kg	7lbs (3.2 kg)	7lbs (3.2 kg)	6.2lbs (2.8 kg)	3.3lbs (1.5kg)	4.45 lbs (2.02 kg)	3.3 lbs (1.5 kg)	15 lbs (7 kg)
Antena externa opcional	No	No	Sí. la 700 es una 2da antena	Sí, como las 700.	Si	No	Si	No	No

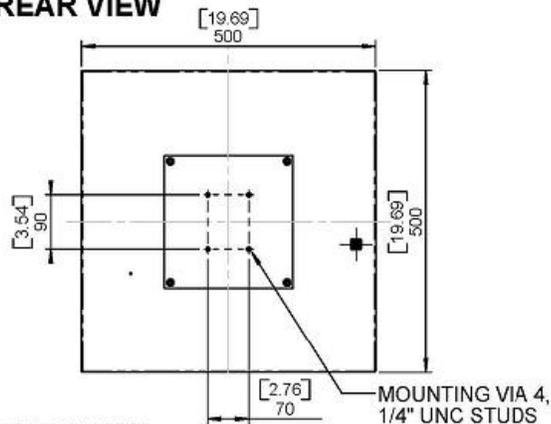
HUGHES[®]

FLAT PANEL ANTENNA

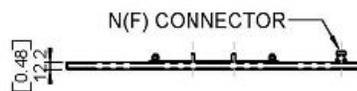
Part Number: 9501286-0001

FREQUENCY:	1.5250 - 1.6605 GHz	GAIN:	15.1 dBi Rx, 15.2 dBi Tx Nom. Including 10m Cable
POLARISATION:	R.H. Circular	BEAMWIDTH:	22° (Az.) x 22° (El.) Approx
AXIAL RATIO:	3 dB Worst Case on Boresight	FRONT TO BACK:	>30 dB
POWER RATING:	10 W	MASS:	1.7 Kg / 3.7 lbs Excl. Bracket
TEMPERATURE:	-50° to +60°C Operating, -50° to +80°C Storage	WIND LOADING:	Will survive 100mph/160kph winds
VSWR:	<1.5 : 1		
FINISH:	Painted White		

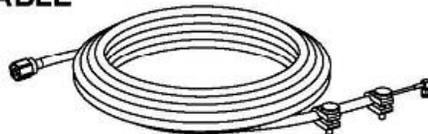
REAR VIEW



TOP VIEW

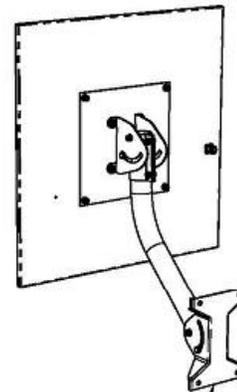


CABLE



ALL COMPONENTS USED IN THE ANTENNA AND ACCOMPANYING KIT ARE COMPLIANT WITH THE RoHS DIRECTIVES

PICTORIAL VIEW



OPTIONAL HNS MOUNTING BRACKET

Antenna supplied with $\varnothing 10.0\text{mm}$ flexible cable, terminated with N(M) connector and short length of $\varnothing 3.0\text{mm}$ flexible cable with SMA(M) right angle connector. Also supplied with strain relief mechanism and SMA to MCX adapter for attachment to the User Terminal.

Overall length = 10.0m Nominal
Insertion loss @ 1.542 GHz = 2.0 dB

DIMENSIONS: mm (inches) H
GA: 1275 - 1 Issued: 280906

HUGHES and Hughes Network Systems are trademarks of Hughes Network Systems, LLC.
©2005 Hughes Network Systems, LLC.
All information is subject to change.

HUGHES
NETWORK SYSTEMS

9605 Scripps Road, Suite #900
San Diego, California 92121 USA
www.hns.com

Figura 59. Antena transmisora/receptora para banda L

Anexo 5 Ubicación de estaciones terrenas en el escenario de estudio

Tabla 50. Ubicación de las estaciones base en la península Red 1.0

Nombre	Latitud	Longitud	Altura snm	Habitantes
Benito Juárez (Cancún)	21°09'50"N	86°50'59"O	14.7 m	661,176
Calkiní	20°22'28"N	90°02'57"O	19.7 m	52,890
Campeche	19°51'03"N	90°31'26"O	7.8 m	259,005
Candelaria	18°11'03"N	91°02'34"O	43.0 m	41,194
Ciudad del Carmen	18°38'57"N	91°49'52"O	6.3 m	221,094
Cozumel	20°30'19"N	86°56'18"O	8.0 m	79,535
Champotón	19°20'58"N	90°43'11"O	6.0 m	83,021
Escárcega	18°36'18"N	90°43'56"O	85.0 m	54,184
Felipe Carrillo Puerto	19°34'55"N	88°02'39"O	16.3 m	75,026
Kanasín	20°56'07"N	089°33'30"O	13.8 m	78,709
Mérida	20°58'21"N	089°37'40"O	17.0 m	830,732
Othón P. Blanco (Chetumal)	18°30'19"N	88°17'44"O	13.2 m	244,553
Progreso	21°16'58"N	089°39'47"O	4.8 m	53,958
Solidaridad (Playa del Carmen)	20°38'06"N	87°04'26"O	12.1 m	159,310
Tekax	20°12'11"N	089°17'17"O	37.5 m	40,547
Tizimín	21°08'35"N	088°09'05"O	23.0 m	73,138
Umán	20°53'03"N	089°44'55"O	13.4 m	50,993
Valladolid	20°41'25"N	088°12'04"O	28.0 m	74,217
Total de habitantes				3,133,282

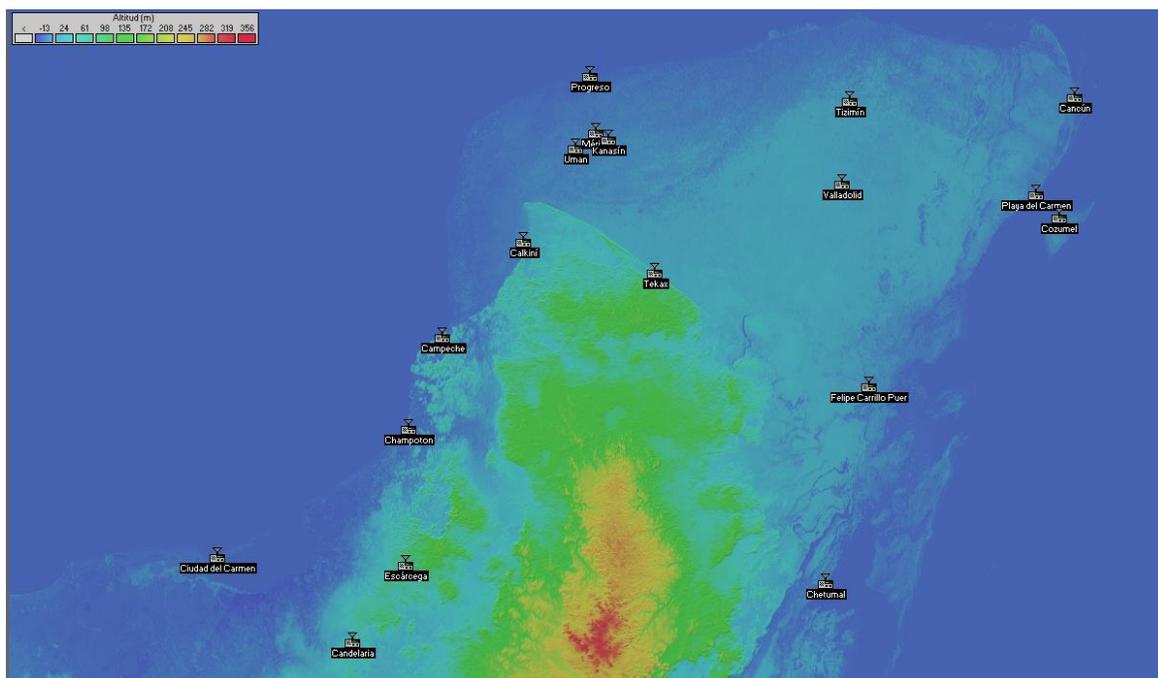


Figura 60. Ubicación de las estaciones base en la península Red 1.0

Anexo 6 Ubicaciones de estaciones terrenas en el escenario de estudio (extendido)

Tabla 51. Distribución de las estaciones base en la península en la reubicación.

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud (snm)	Distancia al satélite (Km)	FSL (asc) (1.643 GHz)	FSL (desc) (1.542 GHz)
ETM	19°23'40"N	99°08'53"E	526.5	35367.080	187.735	187.184
Calkiní	20°22'28"N	090°02'57"O	19.7	35797.474	187.840	187.289
Campeche	19°51'31"N	090°30'28"O	55.3	36506.178	188.010	187.459
Champotón	19°20'58"N	090°43'11"O	6.0	38073.780	188.375	187.824
Escárcega	18°36'18"N	090°43'56"O	85.0	38552.802	188.484	187.933
Candelaria	18°11'03"N	091°02'34"O	43.0	37928.735	188.342	187.791
CD Carmen	18°38'57"N	091°49'52"O	6.8	37668.334	188.282	187.731
Cancún	21°09'50"N	086°50'59"O	14.7	36128.254	187.920	187.369
Central Playa	20°38'06"N	087°04'26"O	12.1	35863.140	187.856	187.305
Chetumal	18°30'19"N	088°17'44"O	13.2	38473.048	188.466	187.915
Chuiquilá	21°25'34"N	087°20'24"O	5.5	37456.726	188.233	187.682
FCP	19°34'55"N	088°02'39"O	16.3	37712.429	188.292	187.741
Limones	19°01'36"N	088°06'21"O	10.3	38944.750	188.572	188.021
Tulum	20°12'41"N	087°27'55"O	9.6	35919.899	187.869	187.318
Kantunilkín	21°06'00"N	087°29'03"O	15.2	36916.962	188.107	187.556
Central M	20°53'19"N	089°38'51"O	15.0	35804.041	187.841	187.290
Dzidzantún	21°14'52"N	089°02'27"O	10.6	36241.761	187.947	187.396
Hunucmá	21°01'01"N	089°52'50"O	8.7	35932.455	187.872	187.321
Kantunil	20°47'57"N	089°01'49"O	21.2	35913.992	187.868	187.317
Progreso	21°16'58"N	089°39'47"O	5.2	35831.991	187.848	187.297
Rio Lagartos	21°35'41"N	088°09'24"O	4.5	38558.016	188.485	187.934
Tekax	20°12'11"N	089°17'17"O	56.6	35805.751	187.842	187.291
Tizimín	21°08'35"N	088°09'05"O	23.0	37292.105	188.195	187.644
Valladolid	20°41'25"N	088°12'04"O	28.0	36044.962	187.900	187.349
Valores de pérdidas máximos y mínimos				Máximo	188.572	188.021
				Mínimo	187.840	187.289

Las pérdidas debidas por lluvia no son considerables.

Anexo 7 Áreas de cobertura de las estaciones base en el escenario de estudio

Tabla 52. Área de cobertura obtenida para los nodos en el estado de Campeche en el enlace “peor de los casos”

Peor de los casos		Área (km ²)						Total
		Calkiní	Campeche	Champotón	Escárcega	Candelaria	Ciudad del Carmen	
IEEE 802.16 e	S: -98 a -115	1551	1431	1604	308	569	2420	7883
IEEE 802.16 2004	S: -98 a -115	1860	1518	1830	431	750	2832	9221
IEEE 802.22 VHF	S: -94 a -116	1170	683	762	1043	1285	718	5661
IEEE 802.22 UHF	S: -94 a -116	616	728	778	190	260	1107	3679
IEEE 802.22 Hitachi	S: -94 a -116	604	716	766	186	255	1098	3625
ITU-R M.2033 V-MX	S: -94 a -116	918	800	800	296	404	1201	4419
ITU-R M.2033 VI-VII	S: -94 a -116	814	851	851	259	358	1265	4398
ITU-R M.2033 VIII-XI	S: -94 a -116	434	602	602	138	180	876	2832

Tecnología WiMAX: Estación Base, Alvarion. Estación Remota, Airspan I.
Tecnología WRAN: Estación Base, WRAN EB. Estación Remota, WRAN ER.

Tabla 53. Área de cobertura obtenida para los nodos en el estado de Quintana Roo en el enlace “peor de los casos”

Peor de los casos		Área (km ²)					
		Cancún	Playa del Carmen	Cozumel	Felipe Carrillo Puerto	Chetumal	Total
IEEE 802.16 e	S: -98 a -115	2289	2573	2225	1352	2417	10856
IEEE 802.16 2004	S: -98 a -115	2793	2886	2828	1736	2924	13167
IEEE 802.22 VHF	S: -94 a -116	1165	1305	1121	1039	2168	6798
IEEE 802.22 UHF	S: -94 a -116	698	1094	855	397	1051	4095
IEEE 802.22 Hitachi	S: -94 a -116	682	1085	846	386	1040	4039
ITU-R M.2033 V-MX	S: -94 a -116	1116	1525	1152	653	1394	5840
ITU-R M.2033 VI-VII	S: -94 a -116	970	1980	1065	578	1283	5876
ITU-R M.2033 VIII-XI	S: -94 a -116	443	853	674	249	852	3071

Tecnología WiMAX: Estación Base, Alvarion. Estación Remota, Airspan I.
Tecnología WRAN: Estación Base, WRAN EB. Estación Remota, WRAN ER.

Anexo 8 Alcance de las estaciones base para el enlace Tx-Rx

Tabla 54. Valores del alcance obtenidos con IEEE 802.16e, en el enlace Tx-Rx

NODO	Escárcega	Distancias (km)		
		$\mu - \sigma$	μ	$\mu + \sigma$
Rango	Rango de potencias			
64QAM-3/4	$P_{RX} = -83.19$	1.079	4.447	7.815
64QAM-2/3	$-84.59 \leq P_{RX} < -83.19$	4.218	8.142	12.067
64QAM-1/2	$-87.39 \leq P_{RX} < -84.59$	4.546	8.787	13.028
16QAM-2/3	$-88.49 \leq P_{RX} < -87.39$	4.879	9.411	13.944
16QAM-1/2	$-92.59 \leq P_{RX} < -88.49$	5.651	10.429	15.208
QPSK-2/3	$-94.89 \leq P_{RX} < -92.59$	6.696	11.863	17.030
QPSK-1/2	$-98.29 \leq P_{RX} < -94.89$	8.210	13.377	18.544

Tabla 55. Valores del alcance obtenidos con IEEE 802.22, en el enlace Tx-Rx

NODO: CentralM	Escárcega	Distancias (km)		
		$\mu - \sigma$	μ	$\mu + \sigma$
Rango	Rango de potencias			
64QAM-5/6	$P_{RX} = -81.29$	1.583	4.948	8.314
64QAM-3/4	$-82.49 \leq P_{RX} < -81.29$	5.971	9.391	12.811
64QAM-2/3	$-83.89 \leq P_{RX} < -82.49$	6.415	10.022	13.630
64QAM-1/2	$-86.59 \leq P_{RX} < -83.89$	7.409	11.101	14.793
16QAM-5/6	$-87.39 \leq P_{RX} < -86.59$	8.415	12.320	16.224
16QAM-3/4	$-88.69 \leq P_{RX} < -87.39$	9.055	13.058	17.061
16QAM-2/3	$-89.79 \leq P_{RX} < -88.69$	9.870	14.107	18.344
16QAM-1/2	$-91.99 \leq P_{RX} < -89.79$	11.235	15.816	20.396
QPSK-5/6	$-94.09 \leq P_{RX} < -91.99$	13.418	18.251	23.084
QPSK-3/4	$-95.09 \leq P_{RX} < -94.09$	15.244	20.201	25.158
QPSK-2/3	$-96.09 \leq P_{RX} < -95.09$	15.896	21.258	26.621
QPSK-1/2	$-97.89 \leq P_{RX} < -96.09$	16.041	22.338	28.634

Anexo 9 Huella satelital del MEXSAT

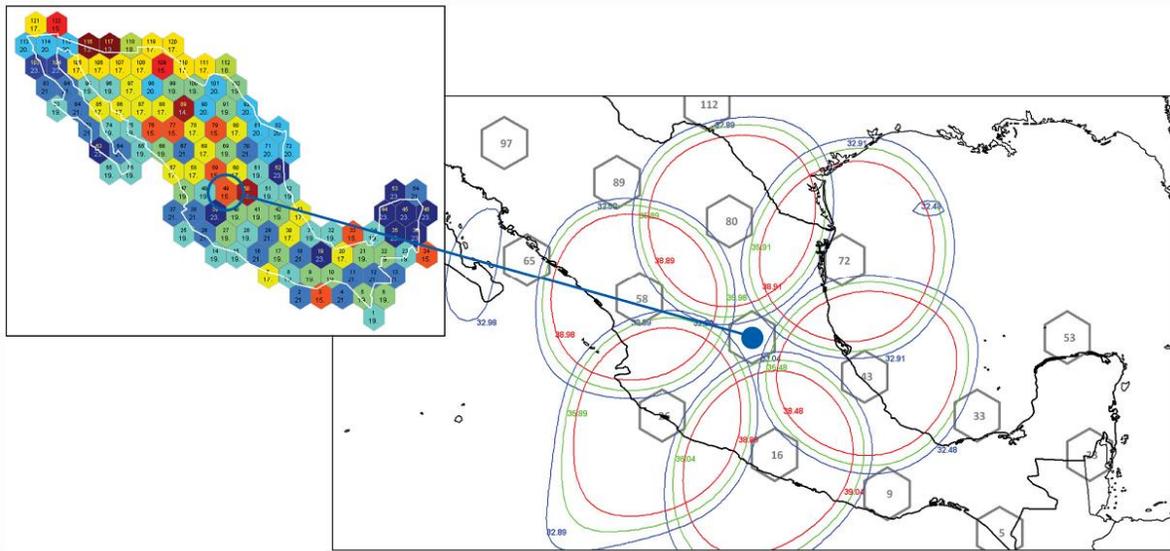


Figura 61. Patrón para reúso de frecuencias en el satélite MEXSAT (SCT, 2011)