

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

**Título: Diseño de una red inalámbrica para el grupo
empresarial Cubaníquel.**

Autor: Jorge A. Díaz Zambrana

Tutor: Msc. Lídice Romero Amondaray

Santiago de Cuba

6/2015

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

**Título: Diseño de una red inalámbrica para el grupo
empresarial Cubaníquel.**

Autor: Jorge A. Díaz Zambrana

Tutor: Msc. Lídice Romero Amondaray

Santiago de Cuba

6/2015



COMPROMISO DEL AUTOR

Hago constar que el presente trabajo de diploma es de mi autoría exclusivamente, no constituyendo copia de ningún trabajo realizado anteriormente y las fuentes usadas para la realización del trabajo se encuentran referidas en la bibliografía. Doy mi consentimiento a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización del Tutor o Institución.

Firma del Autor

DEDICATORIA

A mi madre, mi padre y mi abuela Nilda por su apoyo incondicional en todo momento.

A mis amigos, gracias por todo.

A Yanet, que siempre te recordaremos.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por dedicarme toda su vida incondicionalmente,

A mi padre que aún desde lejos siempre me ha apoyado,

A mi abuela Nilda,

A tía Anita,

A mi tutora Lídice por toda su ayuda y el tiempo que me dedicó,

A mis amigos Javier, Sergito, Yailén, Pupo, Jerjes, Rafa, Guitián, Sander, que desde lejos o

cerca siempre han estado en cada momento,

A Yoel, Yenisel, Osmel y Fidel del grupo técnico de SERCONI, por su ayuda en todo momento,

A mis compañeros de cuarto Deyler, Migue, Carlos, Reinaldo, Yandy,

A mis compañeros de la graduación anterior,

A todos los que de alguna manera contribuyeron a mi formación en esta universidad.

RESUMEN

En este proyecto se realiza un estudio del estándar IEEE 802.11n para diseñar la red inalámbrica del grupo empresarial Cubaníquel, que recibe servicios de la empresa SERCONI del municipio de Moa. El objetivo principal del proyecto es proveer redundancia en la red en caso de fallas de la red cableada y para que los trabajadores de dicho grupo puedan acceder desde cualquier lugar del municipio. Este trabajo está estructurado en dos capítulos: en el primero de ellos se hace un análisis teórico de las características y mejoras propuestas por el estándar IEEE 802.11n, partiendo de un breve repaso del camino seguido por la familia IEEE 802.11, comparando sus mejoras con al estándar original. En el segundo capítulo se analiza la red cableada y la cobertura de la red que se propone, se comenta sobre el equipamiento y las bandas de frecuencias a utilizar, todo con ayuda de los mapas de *Google Maps* y el *software Radio Mobile*. Esta red propuesta proporcionaría la ventaja de un enlace redundante de buena calidad y le brindaría la posibilidad a los trabajadores de realizar gestiones desde sus viviendas lo que sería un ahorro significativo de combustible para el grupo, pues no sería necesario desplazarse hasta el centro de trabajo para el acceso a la red.

Palabras clave: WiFi 802.11n, Puntos de acceso, Nodo, Terminal.

ABSTRACT

The present project involves a study of the standard IEEE 802.11n to design the wireless net of the business groups Cubaníquel that received services from SERCONI enterprise, located in Moa. The main objective is to supply redundancy in the net in case of breaks of the wired net and the workers who belong to this group can easily access to the net from any place of the municipality. This project work is structured in two chapters: in the first, one was made a theoretical analysis of the characteristics and improvements proposed by the standard IEEE 802.11n, beginning from a brief review of the backgrounds and the history of the family IEEE 802.11, comparing its improvements with the original standard. In the second chapter it is analyzed the wired net and the coverage of the proposed net, it gives information about the equipment and the bands frequency to use, all of the these with the help of Google Maps and the software Radio Mobile. The net proposed will give the advantage of redundant match with a good quality and also will after to workers the possibility to make from their homes, what will be significative saved of fuel for the groups due to their would not necessary to go to the workplace for having access to the net.

Keywords: WiFi 802.11n, Access point, Node, Terminal.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	7
1.1 Tecnologías inalámbricas de comunicaciones	11
1.1.1 Características de las microondas	12
1.1.2 Antenas para microondas	13
1.1.3 Potencia recibida	13
1.1.4 Ganancia de la antena	14
1.1.5 Sensibilidad de recepción	14
1.1.6 Margen de desvanecimiento	15
1.1.7 Zonas de Fresnel	15
1.1.8 Redes inalámbricas WiFi	16
1.1.9 Ventajas y desventajas de WiFi	17
1.1.10 Topologías de red para entornos inalámbricos	18
1.2 Estándar IEEE 802.11	20
IEEE 802.11b	21
IEEE 802.11a	22
IEEE 802.11g	22
1.2.1 IEEE 802.11n	23
1.2.1.1 Capa física (OFDM)	24
1.2.1.2 Capa física (MIMO, Múltiples Entradas – Múltiples Salidas)	25
1.2.1.3 <i>Transmit Beamforming</i>	26
1.2.1.4 <i>SDM (Spatial Division Multiplexion)</i>	27
1.2.2 Anchos de banda de canal: 20- 40 MHz	28
Canal de 40 MHz	29
Canal de 20 MHz	30
1.2.3 Operación de los canales de 20 y 40 MHz	31
1.2.4 Preámbulo <i>Greenfield (GF)</i>	33
1.2.5 Intervalo de guarda (<i>Short GI</i>)	33
1.2.6 Código de verificación de paridad de baja densidad (LDPC)	34
1.2.7 Capa MAC	34
1.2.7.1 Agregación	35
1.2.7.2 A-MSDU (<i>MAV Service Data Units</i> agregada)	35
1.2.7.3 A-MPDU (<i>MAC Service Data Units</i> agregada)	36

1.2.7.4 <i>Block Acknowledgement</i>	37
BA Inmediato HT.....	37
BA retrasado HT.....	39
1.2.8 Protocolo de dirección inversa.....	40
1.2.9 PMSP (<i>Power - Save Multi - Poll</i>).....	41
1.3 Nuevos estándares IEEE 802.11.....	42
IEEE 802.11ac.....	42
IEEE 802.11ad.....	44
CAPITULO 2. PROPUESTA DE RED INALÁMBRICA PARA EL GRUPO EMPRESARIAL CUBANÍQUEL.....	46
2.1 Infraestructura de la red cableada del Grupo empresarial Cubaníquel.....	46
2.2 Análisis de las bandas de frecuencia.....	48
2.3 Diseño del <i>backbone</i> inalámbrico.....	49
2.3.1 Resultados de las simulaciones en Radio Mobile.....	54
2.4 Análisis de la red para usuarios móviles.....	60
2.5 Enlace Moa-Nicaró.....	67
2.5.1 Análisis de los perfiles del enlace.....	70
2.6 Análisis de costos.....	72
CONCLUSIONES.....	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	76
ANEXOS.....	78
Anexo1: Perfiles del <i>backbone</i> inalámbrico.....	78
Anexo2: Perfiles de la red para usuarios móviles.....	87
<i>Anexo3: Perfiles del enlace Moa-Nicaró</i>	101
Anexo4: Especificaciones de la estación Lobometrics 999M.....	103
Anexo5: Patrón de radiación real de la antena LCOM HG 4958.....	104
Anexo6: Características de la antena L-COM HG5827G.....	104
Anexo7: Antena sectorial LCOM HG4958.....	106
Anexo8: Torre AT-20.....	107

INTRODUCCIÓN

En la actualidad una de las tecnologías más prometedoras y discutidas es la que permite comunicar computadoras sin la necesidad de cables (más conocidas como tecnologías inalámbricas). Éstas están cobrando gran auge con el monumental aumento de dispositivos portátiles como *palmtops*, *smartphones*, asistentes digitales personales (PDAs), dispositivos de audio, las más representativas son Bluetooth y las redes inalámbricas basadas en 802.11 y 802.16. Para poner en funcionamiento toda esta gama de dispositivos móviles es necesaria una infraestructura como puntos de acceso (AP) WiFi o WiMax y las estaciones base para la telefonía celular. Es previsible una gran convergencia de las redes de datos, servicios, aplicaciones, etc., las que aplicando estas tecnologías permitan implementar sistemas inalámbricos devengan en la obtención de una mejora sustancial en ambientes laborales, personales e industriales, jugando estas redes móviles un rol importante debido a la gran flexibilidad que presentan.

La conexión de computadoras mediante ondas de radio o luz infrarroja, actualmente está siendo ampliamente investigada y utilizada por las ventajas que presenta sobre la comunicación cableada.

Las ondas de radio pueden viajar a grandes distancias y penetrar los edificios sin problemas, razón por la cual se usan tanto en interiores como en exteriores. Las ondas de radio son omnidireccionales ósea viajan en todas las direcciones por lo que el transmisor y receptor no tienen que alinearse. Las propiedades de la onda dependen de la frecuencia. A bajas frecuencias las ondas de radio cruzan bien los obstáculos, pero la potencia disminuye drásticamente con la distancia de la fuente. A frecuencias altas, las ondas tienden a viajar en línea recta y a rebotar por los obstáculos, también son absorbidas por la lluvia. En todas las frecuencias, las ondas de radio están sujetas a interferencia por motores y otros equipos eléctricos. Esta es una de las razones por la cual, los gobiernos legislan el uso de los radiotransmisores.

Las ondas infrarrojas se usan mucho para la comunicación de corto alcance para evitar las interferencias pues no atraviesan objetos sólidos. Por ejemplo los controles remotos de los equipos utilizan comunicación infrarroja. Estos controles son direccionales, tienen el inconveniente de no atravesar los objetos sólidos. El hecho de que las ondas infrarrojas no atraviesen los sólidos es una ventaja ya que no interfieren a un sistema similar en un lado

adyacente. Además la seguridad de estos sistemas contra espionaje es mejor que la de los sistemas de radio. Este sistema no necesita de licencia del gobierno para operar en contraste con los sistemas de radio. Esta propiedad ha hecho del infrarrojo un candidato interesante para las LAN inalámbricas en interiores.

Las redes de luz infrarroja están limitadas por el espacio y casi generalmente la utilizan redes en las que las estaciones se encuentran en un solo cuarto o piso, algunas compañías que tienen sus oficinas en varios edificios realizan la comunicación colocando los receptores/emisores en las ventanas de los edificios.

Las transmisiones de radio frecuencia tienen una desventaja: que los países están tratando de ponerse de acuerdo en cuanto a las bandas que cada uno puede utilizar, al momento de realizar este trabajo ya se han reunido varios países para tratar de organizarse en cuanto a que frecuencias pueden utilizar cada uno. La transmisión por luz infrarroja no tiene este inconveniente por lo tanto es actualmente una alternativa para las redes Inalámbricas. El principio de la comunicación de datos es una tecnología que se ha estudiado desde los 70's, Hewlett-Packard desarrolló su calculadora HP-41 que utilizaba un transmisor infrarrojo para enviar la información a una impresora térmica portátil, actualmente esta tecnología es la que utilizan los controles remotos de las televisiones o aparatos eléctricos que se usan en el hogar. El mismo principio se usa para la comunicación de redes, se utiliza un transceptor que envía un haz de luz infrarroja, hacia otro que la recibe. La transmisión de luz se codifica y decodifica en el envío y recepción en un protocolo de red existente. Los primeros transceptores dirigían el haz infrarrojo de luz a una superficie pasiva, generalmente el techo, donde otro transceptor recibía la señal. Se pueden instalar varias estaciones en una sola habitación utilizando un área pasiva para cada transceptor.

Las redes inalámbricas facilitan la operación en lugares donde la computadora no puede permanecer en un solo lugar como en almacenes o en oficinas que se encuentren en varios pisos o en edificios separados a cortas o largas distancias. No se espera que las redes inalámbricas lleguen a reemplazar a las redes cableadas pero si son y serán siendo una alternativa a éstas en casos en que se necesite movilidad del usuario o que falle la red cableada. Las redes cableadas con el desarrollo de la fibra óptica ofrecen velocidades mayores que las logradas con las tecnologías inalámbricas a pesar de que los estándares más modernos han probado llegar hasta 600 Mbps en entornos de laboratorio. Lo importante es que se pueden mezclar las redes cableadas e inalámbricas generando una red híbrida que puede resolver los últimos metros hacia la estación. Se puede considerar que el sistema cableado sea la parte

principal y la inalámbrica le proporcione movilidad adicional al usuario para desplazarse con facilidad dentro de una oficina o de un edificio a otro como es el caso de la red que se propondrá en el presente trabajo.

El Grupo Empresarial Cubaníquel, está conformado por empresas productoras de níquel y otras que brindan servicios a las mismas, ubicadas fundamentalmente en Moa y Nicaro (municipio Mayarí) de la provincia de Holguín, además de una empresa productora de ferroníquel, en proceso de construcción, en Moa. Su misión es la de producir níquel y cobalto y más adelante insertarse en el mercado internacional, con la producción de ferroníquel, una vez construida la Planta que estará destinada a este fin.

SERCONI es una empresa que se dedica a prestar servicios informáticos, de automatización y de telecomunicaciones al resto de las empresas del grupo empresarial Cubaníquel, así como administrar la red telefónica del grupo. Para la comunicación entre sus sedes usan el *backbone* de fibra óptica del grupo Cubaníquel que es la vía de transmisión de datos entre todo el grupo empresarial. Este *backbone* podría fallar en caso de realizarse mantenimiento en alguna parte de este o por la existencia de algún fenómeno natural o de otro tipo incluyendo la mano del hombre lo que limitaría o eliminaría de forma temporal las comunicaciones entre las sedes de la empresa y a las que les presta servicios esta. Estas fallas no son muy comunes pero no se puede descartar la ocurrencia de alguna de ellas por lo que la implementación de un enlace inalámbrico sería la solución para el caso en que fallase la red cableada. El estudio del estándar a utilizar (802.11n) es muy necesario para dar a conocer las ventajas que presenta sobre los demás estándares en cuanto a velocidad y coste del equipamiento.

La ubicación de las dos sedes de la empresa SERCONI permite la comunicación por medio de la red cableada interempresarial, pero en caso de falla en esta red ni la empresa, ni el grupo empresarial tiene respaldo para continuar la comunicación entre ambas sedes o entre varias empresas del grupo por lo que un enlace inalámbrico dotaría de un medio de comunicación en ese caso, además es necesaria su existencia para proveer conexión a usuarios móviles que trabajen fuera del edificio o desde sus viviendas.

Es necesario en estos escenarios proyectar redes que den soporte adecuado a las nuevas necesidades, incorporando a las ya existentes, permitiendo una optimización de los sistemas, mejorando sus rendimientos con mejores costos.

El caso de este proyecto se realizarán varios enlaces de corta distancia y uno de larga distancia, pues el objetivo es una red corporativa (la red del grupo empresarial Cubaníquel);

para ello se utilizará el estándar 802.11n de la IEEE pues este provee por su avanzada tecnología de altas tasas de transmisión gran robustez frente a interferencias y el equipamiento no es de difícil acceso para la empresa que ejecutará la implementación del mismo.

Problema a resolver.

Inexistencia de redundancia ante fallos del *backbone* de fibra óptica de la red interempresarial del grupo empresarial Cubaníquel administrada por SERCONI.

Objeto de estudio.

La red interempresarial del grupo Cubaníquel.

Objetivos.

Diseñar y simular un enlace inalámbrico para comunicar, ante fallos del *backbone* de fibra óptica, las dos sedes de SERCONI y las principales empresas del grupo Cubaníquel.

CAPÍTULO 1. COMUNICACIONES INALÁMBRICAS.

1.1 Tecnologías inalámbricas de comunicaciones.

Microondas: la ingeniería moderna de microondas y radio frecuencias (RF) es una campo dinámico, debido en gran parte a la simbiosis entre los avances recientes en tecnología de dispositivos electrónicos modernos y la explosión actual en demanda de capacidad de comunicación de voz, datos y videos. Antes de esta revolución en las comunicaciones, la tecnología de microondas era casi de dominio exclusivo de la industria militar; el reciente y drástico aumento de la demanda de sistemas de comunicaciones para aplicaciones de telefonía móvil, transmisión de video, y las redes de computadoras han revolucionado la industria. La diversidad de aplicaciones y entornos operativos ha llevado, a través del acompañamiento de grandes volúmenes de producción, a alcanzar avances en la capacidad de fabricación de productos rentables de RF y microondas. Esto, a su vez, ha reducido el costo de su implementación.[1]

El término de microondas se usa para describir ondas electromagnéticas en el intervalo de frecuencias de 300MHz a 300GHz, las cuales corresponden a las longitudes de onda en espacio libre de 1m a 1mm. [1]

En la Tabla 1.1 se hace un resumen los principales parámetros a tener en cuenta cuando se utilizan microondas.

Tabla 1.1 Clasificación de microondas.

Bandas de frecuencias	Nombre	Datos analógicos		Datos digitales	Velocidad de transmisión	Aplicaciones principales
		Modulación	Ancho de banda			
300 -3000 MHz	UHF (frecuencia ultra alta)	FM, SBB	Para 20 MHz	PSK	Para 10 Mbps	Televisión VHF, microondas terrestres.

3 – 30 GHz	SHF (frecuencia súper alta)	FM, SBB	Para 500 MHz	PSK	Para 100 Mbps	Microondas terrestres, microondas por satélite.
30 – 300 GHz	EHF (frecuencia extremadamente alta)	FM, SBB	Para 1 GHz	PSK	Para 75 Mbps	Enlaces punto a punto cercanos experimentales.

Cuanto mayor sea la frecuencia utilizada, mayor es el ancho de banda potencial, y por tanto, es posible una mayor velocidad de transmisión para algunos sistemas típicos. Al igual que en cualquier sistema de transmisión, la principal causa de pérdidas en las microondas es la atenuación.[1]

1.1.1 Características de las microondas.

- Las microondas se reflejan en superficies terrestres planas.
- La trayectoria de propagación de microondas cambia por refracciones que sufre cuando pasa por el límite de medio diferentes.
- Sufren reflexión irregular por las irregularidades de la superficie terrestre (árboles, pequeñas colinas, etc.), las olas del mar y las masas de aire irregulares que existen en el medio atmosférico.
- Al encontrar un obstáculo a su paso, sufren difracción en el borde exterior del obstáculo.

Históricamente, el campo de microondas ha sido impulsado por aplicaciones que requieren el máximo rendimiento con poca preocupación por costos o fabricación. Estos sistemas han sido principalmente para aplicaciones militares, donde el requerimiento en caso cualquier precio podía ser justificado.[1]

La transformación actual del campo implica un cambio dramático desde las aplicaciones, con un cambio de enfoque de diseño de rendimiento a diseño de fabricación, manteniendo un grado aceptable de rendimiento a un mínimo costo, este cambio es muy aplicable a aplicaciones inalámbricas.[1]

Entre las aplicaciones de microondas se tienen la telefonía móvil celular, acceso de banda ancha inalámbrico, redes de área local inalámbrica WLAN, redes de área personal inalámbrica WPAN, sistemas de comunicaciones satelitales, comunicaciones celulares basadas en satélites, sistemas electrónicos de navegación, aviónica, radar, etc..[1]

1.1.2 Antenas para microondas.

La antena para microondas por su carácter tiende fuertemente a dirigir las ondas que transmite hacia un objetivo, por lo cual la concentración de energía es muy intensa. Lo anterior permite que la transmisión entre el punto emisor y el receptor, sea más eficiente y las interferencias de onda, menores. De esta manera, lograr un carácter de propagación específico de las ondas, depende del tipo antena que se utilice, tanto en la transmisión como en la recepción. No se puede pensar en las características de propagación de las ondas y los tipos de antena, como elementos independientes.[2]

Las antenas direccionales tienen la característica de dirigir las radiaciones que emite hacia una dirección determinada, con mayor intensidad que hacia el resto de las direcciones. Las utilizadas para las microondas (SHF) son: la antena parabólica, tipo lente, tipo bocina, *grid*.[3]

Las antenas de microondas se sitúan a una altura apreciable sobre el nivel del suelo para conseguir mayores separaciones entre ellas, y para evitar obstáculos en la transmisión.[3]

El umbral del receptor es un parámetro crítico de obtener dado que este es usado para determinar el margen de desvanecimiento. Estrictamente hablando, es un valor de mili volts (10^{-3} V) que es usado para el margen de desvanecimiento. Los usuarios a menudo prefieren el valor de micro volts (10^{-6} V) como un nivel de calidad mínimo para datos. Los valores de umbral del receptor serán valores negativos, típicamente alrededor de -70dBm a -90dBm.[3]

1.1.3 Potencia recibida.

En sistemas de comunicaciones inalámbricas la información se transmite a través de ondas electromagnéticas entre la estación base y la estación suscriptor. Durante la propagación, las ondas interactúan con el medio ambiente lo que causa pérdida de propagación. La pérdida de propagación se define con la Ecuación 1.1:[2]

$$PL \text{ (dB)} = P_T + G_T + G_R - P_R - L_T - L_R \text{ (Ecuación 1.1)}$$

Dónde:

PL (dB) = pérdida de propagación en dB

P_T = potencia de transmisión en dBm

G_T = ganancia de la antena de transmisión en dBi

G_R = ganancia de la antena de recepción en dBi

P_R = potencia de recepción en dBm

L_T = pérdida de línea del transmisor en dB

L_R = pérdida de línea del receptor en dB

Consecuentemente, la potencia recibida en dBm se formula como la diferencia entre la potencia de transmisión y las pérdidas de propagación, sumando las ganancias de las antenas y restando las pérdidas de las líneas tanto del emisor como del receptor.[2]

$$P_R \text{ (dBm)} = P_T + G_T + G_R - P_L - L_T - L_R \text{ (Ecuación 1.2)}$$

1.1.4 Ganancia de la antena.

Otro factor en la comunicación a través de ondas de radio frecuencia es la ganancia de la antena, esta determina cuanta energía adicional capta una antena para ser entregada a la estación, dicho de otra forma la ganancia de una antena es la capacidad de direccionar la señal de RF en un sentido de difusión disminuyendo la energía irradiada en otras direcciones. Mientras mayor sea su ganancia, y más estrecho el patrón de radiación, cubre mayores distancias y aumenta la exactitud para su alineación y montaje.[3]

Se expresa en dBi (dB = decibeles, i = antena isotrópica) decibeles con referencia a una antena isotrópica llamada también omnidireccional cuyo patrón de irradiación cubre un área de 360^0 . [3]

La ganancia es directamente proporcional a la potencia recibida e inversamente proporcional a la pérdida de propagación. A mayor ganancia menor pérdida de propagación consecuentemente la potencia recibida se incrementa. En materia de economía una antena con mayor ganancia genera un crecimiento exponencial en sus costos.[2]

1.1.5 Sensibilidad de recepción.

La sensibilidad de recepción es un parámetro fundamental que complementa la calidad y rendimiento del enlace ya que precisa el valor mínimo de potencia que la antena requiere para lograr extraer o decodificar información y alcanzar una determinada tasa de transferencia.[1]

Por ejemplo, al hacer una analogía entre dos personas que mantienen una conversación, se puede comparar la sensibilidad de recepción de un equipo con la característica de que tan fino es el oído de la persona que escucha para poder entender lo que el emisor dice; y la potencia de transmisión de un equipo con la fuerza del timbre de voz que la persona utiliza para comunicar su mensaje. De manera que si no existe la sensibilidad de recepción suficiente la persona que escucha no captará el mensaje, la información se perderá en el espectro, el emisor

deberá reenviar su mensaje con lo cual la velocidad de comunicación disminuirá; de igual forma si no existe la potencia de transmisión conveniente por más fino que sea el oído del receptor no se podrá establecer la comunicación. De ahí que estos dos parámetros se complementan, por lo tanto cuanto más fina sea la sensibilidad, mejor será la recepción del equipo.[3]

1.1.6 Margen de desvanecimiento.

Margen de desvanecimiento llamado también FM (*fading margin* por sus siglas en inglés) es un parámetro de diseño que se analiza en función de la confiabilidad que se requiere en el enlace inalámbrico. Generalmente se usa un valor de 10 dB como mínimo margen de operación, no obstante se utiliza un valor mayor de FM que va de 15 a 20 dB en áreas que presentan comportamientos complejos y cambiantes del clima.[1]

Cuanto mayor es el margen de desvanecimiento utilizado, existirá mayor confiabilidad del enlace y por consiguiente será menor la posibilidad de pérdidas de paquetes. FM se define como la diferencia en dB entre la potencia recibida y la sensibilidad de recepción.[1]

$$F_M \text{ (dB)} = P_R - S_R \text{ (Ecuación 1.3)}$$

FM (dB)= margen de desvanecimiento en dB

P_R = potencia de recepción en dBm

S_R = sensibilidad de recepción en dBm

Aplicar las fórmulas para el cálculo de potencia recibida en escenarios reales constituye el sustento teórico que garantiza la viabilidad técnica del proyecto en estudio.

1.1.7 Zonas de Fresnel.

Cuando se desarrollan enlaces RF para frecuencias en la banda UHF y microondas se necesita estar seguro de que se tiene LOS entre las dos antenas. Pero a estas frecuencias LOS no significa que de un sitio se pueda ver al otro. Cuando la distancia entre los puntos excede los 8Km, se necesita tomar en cuenta otros factores:[4]

- La curvatura de la tierra.
- El despeje de las zonas de Fresnel.
- La refracción atmosférica.

La zona de Fresnel es un elipsoide prolongado que se extiende entre dos antenas. La primera zona de Fresnel es la diferencia entre el camino directo (AB como se observa en la Figura 1.1) y

el camino indirecto que toca un solo punto en la zona de Fresnel (ACB), es decir, igual a la mitad de la longitud de onda.[4]

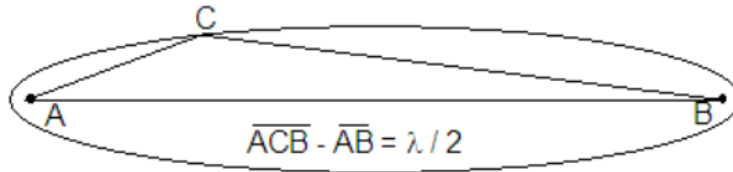


Figura 1.1 Primera zona de Fresnel.[2]

Si una porción significativa de la zona de Fresnel es obstruida la potencia de la señal recibida en la antena receptora puede ser atenuada significativamente. Típicamente se determina que se necesita al menos un 60% de la primera zona de Fresnel despejada totalmente de cualquier obstáculo, a fin de que la radio propagación se comporte como si estuviera en el espacio libre. Este valor significa un elipsoide más estrecho, con un radio que es el 60% de la primera zona de Fresnel. [4]

1.1.8 Redes inalámbricas WiFi.

La familia IEEE 802.11 constituye una serie de especificaciones para la tecnología de redes inalámbricas (WLAN). Estas especificaciones están orientadas a nivel de la capa física y la subcapa MAC del modelo OSI, para adaptarlas a los requerimientos especiales de las WLAN pero ofreciendo la misma interfaz para capas superiores, manteniendo así la interoperabilidad. [5]

Los sistemas basados en WiFi pueden ser usados para proveer banda ancha inalámbrica. WiFi está basado en la familia de estándares IEEE 802.11 y es principalmente una tecnología de redes LAN. Comparte algo de su funcionamiento interno con Ethernet, sin embargo, difiere en la especificación de la capa física (PHY) utilizando señales de radio en lugar de cable y en su capa de control de acceso al medio (MAC), ya que Ethernet para controlar el acceso al medio usa CSMA/CD, mientras que WiFi usa CSMA/CA.[5]

Aunque estos estándares son generalmente utilizados para ofrecer conectividad en casas, oficinas y ubicaciones públicas de puntos de acceso pueden ser utilizadas en exteriores si se introducen puntos de acceso adecuados para exteriores con antenas externas, entre otros dispositivos. Los municipios y las comunidades locales alrededor del mundo han tomado la

iniciativa de conseguir sistemas WiFi en configuraciones exteriores (*outdoor*) para proveer acceso de banda ancha a los centros de la ciudad y áreas rurales y sin servicio. Los desarrollos de área metropolitana de WiFi cuentan con transmisores de alta potencia que están instalados en postes de luz o techos de los edificios y radian a una potencia cerca o igual a la máxima permitida para operar en la banda no licenciada. Sin embargo WiFi ofrece velocidades de datos más altas que los sistemas 3G, principalmente porque opera a través de un mayor ancho de banda de 20MHz.[6]

1.1.9 Ventajas y desventajas de WiFi.

Ventajas

- Conectividad inalámbrica.
- Cero cables.
- La comodidad que ofrecen es muy superior a las redes cableadas porque cualquiera que tenga acceso a la red puede conectarse desde distintos puntos dentro de un rango suficientemente amplio de espacio.
- Elección de entre varias señales libres o con seguridad.
- Una vez configuradas, las redes WiFi permiten el acceso de múltiples ordenadores sin ningún problema ni gasto en infraestructura, no así en la tecnología por cable.
- La WiFi Alliance asegura que la compatibilidad entre dispositivos con la marca WiFi es total, con lo que en cualquier parte del mundo se podrá utilizar la tecnología WiFi con una compatibilidad total.

Desventajas

- Limitación en la cantidad de usuarios que se pueden conectar a un mismo punto de acceso,
- Distancia limitada para la recepción de la señal en dependencia de los dispositivos y antenas que se usen.
- El medio compartido es el aire, por lo que puede ser propenso a intrusiones de seguridad.
- El consumo de electricidad es bastante alto comparado con otros estándares, haciendo la vida de la batería corta y calentándola también.

- El sistema WiFi tiene una menor velocidad en comparación a una conexión con cables, debido a las interferencias y pérdidas de señal que el ambiente puede acarrear.
- Hay que señalar que esta tecnología no es compatible con otros tipos de conexiones sin cables como Bluetooth, GPRS, UMTS y otros.

1.1.10 Topologías de red para entornos inalámbricos.

Las redes inalámbricas se clasifican en tres configuraciones lógicas: enlaces punto a punto, enlaces punto a multipunto, y multipunto a multipunto. El diseño de una red puede hacer uso de estas configuraciones simultáneamente pero cada enlace va a estar solo dentro de una de estas topologías.[6]

Punto a punto: la topología de red de este tipo de enlaces ha sido la más usada en microondas en los últimos años. Por años e incluso décadas, los operadores de microondas han establecido enlaces punto a punto para extensiones de redes LAN, para conectar sitios remotos con la red telefónica pública y celular. La Figura 1.2 muestra tres enlaces punto a punto entre diferentes dispositivos tanto móviles como fijos.[5]

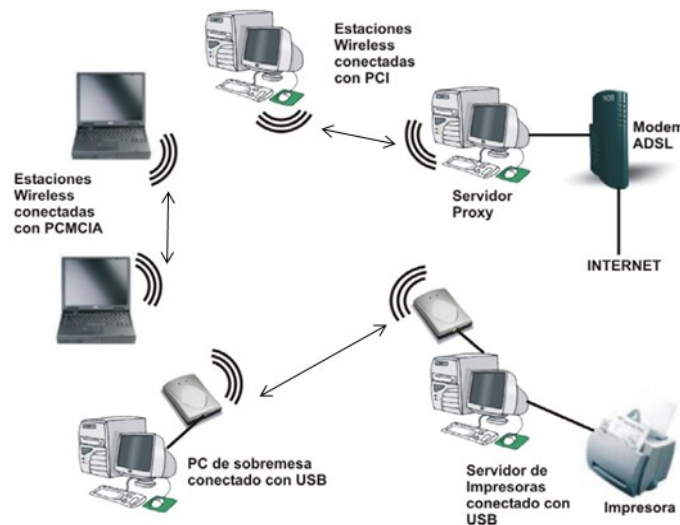


Figura 1.2 Conexiones punto a punto. [7]

Se usa para conectar únicamente dos nodos, en una red como ésta los dispositivos trabajan a la par. Los enlaces que interconectan los nodos de una red punto a punto se pueden clasificar según el sentido de las comunicaciones que transportan.

- *Simplex*: la comunicación se efectúa en un solo sentido.

- *Half-dúplex*: la comunicación se realiza en ambos sentidos, pero en una sola dirección a la vez, solo uno puede transmitir en un momento dado.
- *Full-dúplex*: la comunicación se puede llevar a cabo en ambos sentidos simultáneamente.

Punto a multipunto: cada vez que se tiene varios nodos hablando con único punto de acceso central se trata de una aplicación punto a multipunto. El ejemplo típico de un trazado punto a multipunto es el uso de un punto de acceso inalámbrico que provee conexión a varios computadores portátiles. Los computadores portátiles no se comunican directamente unos con otros, pero deben estar en el rango de cubrimiento del punto de acceso para poder utilizar la red.[5]

Para las redes que utilizan microondas de baja frecuencia (rango entre 1– 8GHz) una arquitectura punto a multipunto es recomendable. Esta configuración permite alcanzar un número mayor de usuarios y disminuir el número de *routers* y *switches* requeridos por la red. Los desarrollos en esta topología generalmente se usan para dar conectividad a zonas completas ya que implica el uso de antenas sectoriales que permiten dar servicio a un sector determinado.[1]

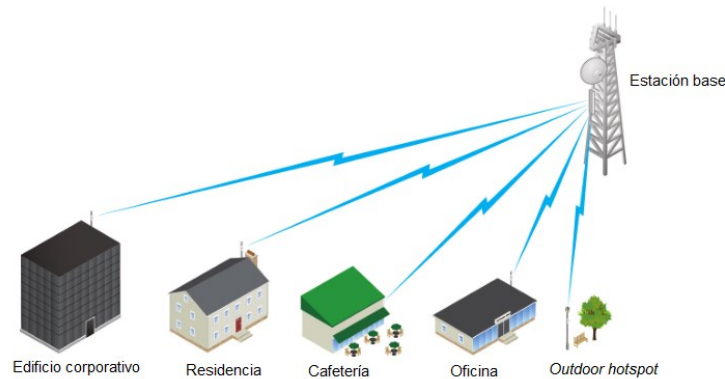


Figura 1.3 Enlace punto multipunto[8]

Multipunto a multipunto: también denominado red ad-hoc o en malla, en una red de este tipo no hay una autoridad central. Cada nodo de la red transporta el tráfico de tantos otros como sea necesario, y todos los nodos se comunican directamente entre sí, el beneficio de esta configuración es que aún si ninguno de los nodos es alcanzable desde el punto de acceso central, igual pueden comunicarse entre sí.[8]

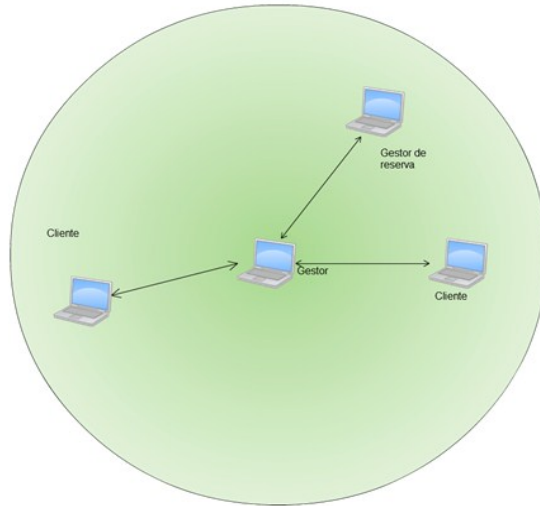


Figura 1.4 Enlaces multipunto multipunto

1.2 Estándar IEEE 802.11.

En general, los protocolos de la rama 802.x definen la tecnología de redes de área local. [5]

El protocolo IEEE 802.11 o WiFi es un estándar de protocolo de comunicaciones del IEEE que define el uso de los dos niveles inferiores de la arquitectura OSI (capa física y de enlace de datos), especificando sus normas de funcionamiento en una WLAN.[6]

La primera versión del estándar 802.11 fue aprobado en 1997 por la IEEE tras varios años de desarrollo y en la que se definían 3 opciones para la capa física (PHY): infrarrojo, FHSS y DSSS, soportando tasas de datos de 1 y 2 Mbps en la banda de 2,4 GHz. [5]

En la Tabla 1.2, se muestran algunas características a nivel de la capa física de los estándares que componen la tecnología. En ella se puede destacar las diferencias de las tasas de datos soportadas, las cuales han ido en aumento hasta llegar a los 600 Mbps con el estándar 802.11n.

Tabla 1.2 Resumen de la capa física del estándar IEEE 802.11.

	802.11	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n
Tecnología	DSSS	DSSS/CKK	OFDM	OFDM	SDM/OFDM
PHY				DSSS/CKK	

Tasa de datos	1,2 Mbps	5,5 - 11 Mbps	6 – 54Mbps	1 – 54 Mbps	6 – 600Mbps
Banda de frecuencia	2,4 GHz	5 GHz	5 GHz	2,4 GHz	2,4 y 5 GHz
Ancho del canal	25 MHZ	20 MHz	20 MHz	25 MHz	20 y 40 MHz

A continuación se describe cómo evolucionó el estándar IEEE 802.11:

IEEE 802.11b

El estándar IEEE 802.11b fue aprobado en 1999, permitiendo una tasa de transmisión máxima de 11 Mbps, utilizando el mismo método de acceso al medio que el 802.11. En la práctica no era posible superar los 6 Mbps con TCP (*Transmission Control Protocol*) y los 7 Mbps con UDP (*User Datagram Protocol*).[5]

Los primeros equipos aparecieron muy rápidamente, ya que era una extensión a una modulación DSSS (*Direct-Sequence Spread Spectrum*) del estándar original. El aumento de velocidad y el reducido costo siguieron un rápido crecimiento de la demanda y oferta.[9]

El protocolo se puede utilizar en tecnologías punto-multipunto o punto-punto, con enlaces con distancias proporcionales a las características de las antenas y potencia utilizada. Además, si existen problemas de calidad de la señal, es posible transmitir a 1, 2, 5 y 11 Mbps utilizando métodos más redundantes de codificación de datos.[9]

El estándar divide el espectro en 14 canales que se traslapan, a una distancia de 5MHz cada uno de ellos. Esto provoca que cada canal interfiera con los dos adyacentes a cada lado, ya que el ancho de banda es 22 MHz, a partir de donde la señal cae 30 dB como mínimo. Es por ello que se recomienda optar por los canales disjuntos (ej. canales 1, 6 u 11), que no representan traslapes especiales, produciéndose interferencias mínimas.[9]

Los canales disponibles en cada país difieren de acuerdo a la reglamentación del mismo. Así, mientras en los Estados Unidos hay 11 canales disponibles en Europa se disponen de 13 y en Japón 14.[9]

IEEE 802.11a

El estándar fue aprobado en 1999. Se basa en el estándar original, operando en la banda de 5 GHz, pero utilizando la técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) de modulación con 52 canales, alcanzando tasas de transmisión de hasta 54 Mbps, que se pueden corresponder con un rendimiento real de 20 Mbps. De forma similar al estándar 802.11b, la tasa se puede reducir a 48, 36, 24, 18, 12, 9, y 6 Mbps. El estándar dispone de 12 canales no traslapados. [5]

Utilizar la banda de 5 GHz permite disponer de menos interferencias, pero condiciona las instalaciones a disponer de línea de vista, además de tener una mayor absorción.

En un primer momento fue utilizado en Estado Unidos y Japón, sin obtener licencia para operar en Europa, que en ese momento optaba por apostar por el estándar Hiperlan, hasta que en 2003 fue admitido.[9]

De las 52 subportadoras, 48 se utilizan para datos y cuatro actúan como pilotos, con una separación de 312.2 KHz. Cada subportadora puede ser BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quaternary Phase Shift Keying*), 16 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) o 64 QAM. La duración del símbolo es de 4 microsegundos, con un período de guarda de 0.8 microsegundos.[9]

Esta tecnología no fue tan adoptada como la basada en 802.11b, ya que tenía un rango menor y estaba limitada en Europa. Hoy en día esta ganado aceptación al existir intervalos duales.

IEEE 802.11g

En junio de 2003 se aprobó el tercer estándar, el 802.11g. Este estándar funciona en la banda de los 2.4GHz, como el 802.11b, pero con una tasa máxima de 54Mbps (y efectiva de 24.7 Mbps). Es compatible con el 802.11b y 802.11b utilizando las mismas frecuencias.[5]

Desafortunadamente, los conflictos con los equipos 802.11b, las interferencias y el hecho de que las frecuencias más altas estén más expuestas a sufrir pérdidas han reducido la efectividad de la tecnología.

El hecho de que hayan aparecido *chips* y equipos tri banda ha favorecido el despliegue de la tecnología. Una característica adicional, llamada SuperG, hace posible duplicar la señal, pero ocasiona conflictos con otros equipos provocando que no sea compatible en muchos casos.

1.2.1 IEEE 802.11n.

El éxito comercial del estándar 802.11g impulsó enormemente el uso de *WiFi* y la necesidad de ampliar las demandas sobre la tecnología. De esta forma, se continuó desarrollando y en el año 2002 se empezó a definir algunas mejoras a nivel PHY/MAC que formarían parte del hoy nuevo estándar 802.11n. [9]

El estándar 802.11n fue ratificado por la organización IEEE el 11 de septiembre de 2009, operando en las bandas de 2.4 y 5 GHz, aunque se espera que opere preferentemente en la segunda debido a que la primera está más ocupada. [9]

Este estándar incorpora un ancho de banda de los canales de 40MHz, la tecnología MIMO, además de otras mejoras a nivel físico y MAC.

Tasas de datos superiores a nivel físico

Las tasas de datos en 802.11n son significativamente mejores sobre las conseguidas por 802.11a y 802.11g, fundamentalmente por el uso de la multiplexación espacial (MIMO) y el uso de canales de 40 MHz. Además de estas mejoras, también se incluyen mejoras opcionales como el uso de intervalo de guarda más pequeño, el cual puede ser utilizado bajo ciertas condiciones de canal; y un nuevo formato de preámbulo llamado preámbulo *Greenfield*. [10]

Mejora de la eficiencia a nivel MAC

Esta eficiencia se logra gracias a la implementación de la agregación de paquetes y mejoras en el protocolo de *Block Ack*. También se incluyen mejoras como el protocolo de dirección inversa que proporciona una mejora de rendimiento bajo ciertos tipos tráficos y la utilización de un espacio inter-trama más pequeño (RIFS). [10]

Robustez

Esta mejora se consigue inherentemente mediante el incremento de la diversidad espacial dado por la utilización de múltiples antenas. Otras opciones que nos brindan robustez son el uso de la codificación STBC (*Space-Time Block Coding*) y un nuevo código de canal LDPC (*Low Density Parity Code*), entre otros más. [10]

Finalmente, debido al gran crecimiento de la utilización de dispositivos móviles, se introduce una nueva técnica de acceso al canal llamado PSMP (*Power-Save Multi-Poll*), la cual permite soportar eficientemente un mayor número de estaciones. [10]

1.2.1.1 Capa física (OFDM).

La capa física del estándar 802.11n se desarrolló basándose en la estructura de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) de 802.11a.

Esta elección se hizo ya que OFDM es mucho más adecuada para entornos de desvanecimiento ante posibles interferencias, debido a que modula el conjunto de datos en las diferentes subportadoras y por tanto sólo se verían afectadas algunas subportadoras, las cuales luego pueden ser recuperadas mediante algún método de corrección de errores.

En laFigura1.5 se muestra una comparación ilustrativa entre ambos tipos de multiplexaciones en la que se puede apreciar como las interferencias pueden afectar solamente a algunas subportadoras que luego se podrían recuperar. Además, la utilización de OFDM resulta imprescindible si se tiene en cuenta que es tolerante con los errores de sincronización de tiempo, muy común en sistemas de intercambio elevadas tasas de datos.

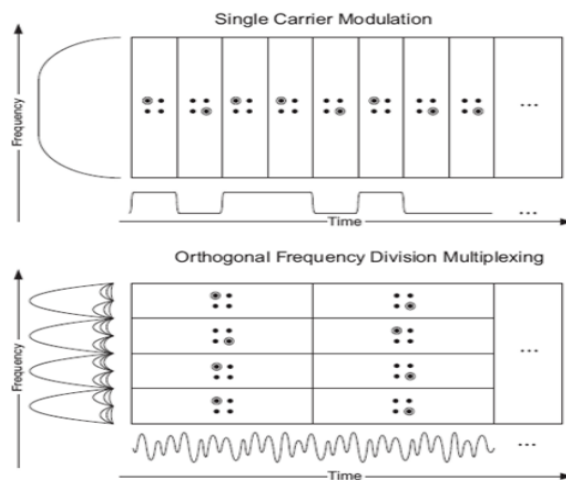


Figura 1.5 Comparación entre las modulaciones: portadora única y OFDM.[10]

Para 802.11a, el tiempo de símbolo es de 4ms (incluyendo los 800ns de intervalo de guarda). Por tanto, para 54 Mbps cada uno de estos símbolos lleva 216 bits de información y 72 bits de corrección de errores repartidos dentro de las 48 subportadoras de datos disponibles. [10]

En 802.11n, se mantiene estos 4ms de tiempo de símbolo pero el número de subportadoras para cada canal de 20 MHz aumenta a 52, incrementando la tasa de datos máxima de 54 a 65 Mbps para una transmisión radio. Dado que 802.11n también permite la utilización de hasta 8 tasas de transmisión distintas y un número de transmisores a 4, se tiene hasta 32 tasas de datos disponibles. [10]

Como se explicará en próximos apartados, utilizando canales de 40 MHz se aumenta el número de subportadoras a 108. [10]

1.2.1.2 Capa física (MIMO,Múltiples Entradas – Múltiples Salidas).

Ha pasado mucho tiempo desde que se realizó la primera transmisión vía radio, y a lo largo de este tiempo todo lo concerniente a comunicaciones inalámbricas ha sufrido una notable evolución. Todas las mejoras introducidas tienen un denominador común, el afán de transmitir mayor cantidad de información, lo más lejos posible, en el menor tiempo, con la mejor calidad y desde el punto de vista económico, con el menor costo.

La utilización de varias antenas para transmisión y recepción en radiocomunicaciones representa uno de los avances más importantes desarrollados dado que permiten aumentar la velocidad de transmisión sin necesidad de incrementar ni la potencia transmitida ni el ancho de banda utilizado. Estos métodos de transmisión dependen más directamente de las características de propagación del lugar donde se encuentran implantados, que los sistemas tradicionales de una entrada y una salida. MIMO representa el corazón del estándar 802.11n, ya que fundamentalmente a través de esta técnica se logran velocidades de hasta 600 Mbps. Estas velocidades se alcanzaron de forma experimental en un laboratorio donde la distancia entre transmisor y receptor era de solo 1 metro y no había ningún tipo de interferencias.[10]

Tradicionalmente, en las comunicaciones radio se utilizaba un sistema SISO (Entrada Simple – Salida Simple) en las que tanto el transmisor como el receptor estaban configuradas con una antena. [10]

En este tipo de sistemas, la cantidad de información que puede ser transportada depende de la cantidad de potencia de señal que excede el ruido en el receptor (SNR). Mientras mayor sea el valor de SNR, mayor será la cantidad de información que podrá llevar la señal y podrá recuperar el receptor. [10]

MIMO describe un sistema compuesto por un transmisor con múltiples antenas que transmite a un receptor el cual también está provisto de múltiples antenas. Este sistema aprovecha fenómenos físicos en la transmisión como la propagación multicamino para incrementar la tasa de transmisión y reducir considerablemente la tasa de transmisión (contraproducentes en un sistema SISO convencional). [11]

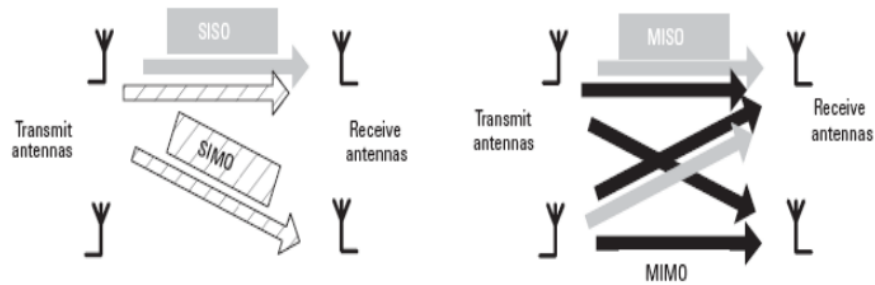


Figura 1.6 Utilización de varias antenas.[11]

Según se observa, la Figura 1.6 muestra varias de las combinaciones que se pueden dar a partir del uso de las antenas en transmisión-recepción. Si la emisión-recepción se da con una sola antena, se denomina SISO (*Simple Input – Simple Output*). Si se tiene una única antena de recepción y varias de emisión se denominará SIMO (*Simple Input – Múltiples Output*). Cuando es a la inversa, es decir, varias antenas de recepción y una sola de emisión se tendrá lo que se denomina MISO (*Múltiples Input – Simple Output*) y finalmente para varias antenas de recepción – emisión está la denominación más conocida como MIMO (*Multiple Input – Multiple Output*).[11]

A continuación se describen algunas técnicas que permiten mejorar el SNR en el receptor utilizando MIMO.

1.2.1.3 Transmit Beamforming.

Esta técnica consiste en enviar diversas señales de radio desfasadas desde múltiples antenas que luego son agregadas en una única señal por el receptor; la Figura 1.7 muestra un ejemplo de esta técnica. [11]

Al transmitir con más de una antena es posible coordinar la señal que se envía desde cada una de ellas, consiguiendo mejorar notablemente la señal recibida.

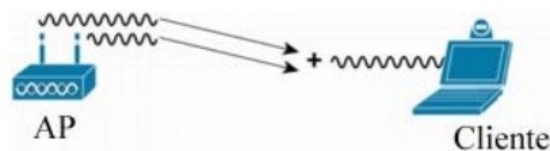


Figura 1.7 Representación del sistema Transmit Beamforming.[11]

Debido a que cada señal es enviada desde una distancia diferente desde cada antena, es probable que cada una de ellas llegue al receptor con una determinada fase. Esta diferencia en fase afecta a la potencia total de la señal en el receptor, pero ajustando

adecuadamente la fase de cada una de las señales en el transmisor, la señal recibida puede aumentarse, incrementando así el SNR. [11]

Para aumentar la señal en el receptor e implementar esta técnica, es necesario que el receptor envíe al transmisor información relacionada con la señal a recibir para que éste pueda sintonizar cada señal que envíe. Esta información no se envía inmediatamente y tiene una validez efímera ya que cualquier movimiento del transmisor o receptor, puede invalidar inmediatamente los parámetros usados. [10]

Esta técnica es útil sólo cuando se transmite a un único receptor, ya que no es posible optimizar la fase de las señales transmitidas cuando se transmite a varios receptores (*broadcast* o *multicast*); siendo especialmente eficaz en entornos donde hay algunos objetos que reflejen la señal y causen pérdidas. [10]

1.2.1.4SDM (*SpatialDivisionMultiplexion*).

Consiste en la multiplexación de una señal de mayor ancho de banda en señales de menor ancho de banda iguales, transmitiéndose desde múltiples antenas. Si estas señales llegan con una correcta separación de tiempo, el receptor será capaz de distinguirlas creando múltiples canales en anchos de banda mínimos.[10]

Como se muestra en laFigura1.8, con MIMO/SDM la tasa de datos del sistema aumenta con el número de flujos de datos independientes; por ello, el número de antenas transmisoras/receptoras debe ser mayor o igual al flujos de datos.

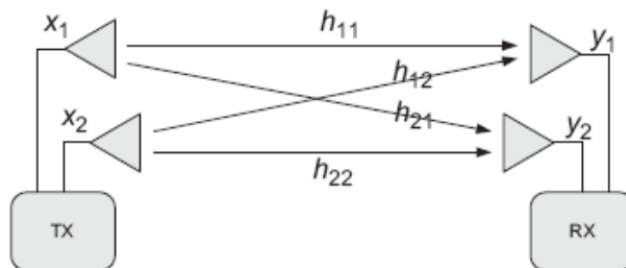


Figura 1.8 Representación del sistema MIMO/SDM.[10]

Cuando una señal viaja por diferentes caminos hacia un único receptor, el tiempo que tarda en llegar a su destino depende de la longitud del camino que recorre. La señal que viaja por el camino más corto llegará primera, seguida de las copias o ecos de las señales ligeramente retrasadas de los caminos más largos. Dado que éstas viajan a la velocidad de la

luz, el tiempo transcurrido entre la primera señal y las siguientes es de sólo nanosegundos; por lo que esta demora tan pequeña puede causar una degradación de la señal en una sola antena, ya que todas las copias pueden interferir con la primera al llegar. [10]

MIMO envía múltiples señales radio al mismo tiempo aprovechando el multicamino. Cada una de estas señales es llamada flujo espacial. Cada flujo espacial es enviado desde su propia antena, usando su propio transmisor. [11]

Debido al espacio entre cada una de las antenas, cada señal sigue ligeramente un camino distinto hacia el receptor (diversidad espacial) El receptor dispone de múltiples antenas, cada una de ellas con su propia radio, las cuales decodifican independientemente las señales recibidas; donde a continuación son combinadas en una sola. [10]

El resultado de esta señal es mucho mejor que el de conseguido por una sola antena o utilizando la técnica de *transmit beamforming*. [10]

Los sistemas MIMO se describen utilizando el número de transmisores y receptores presentes, por ejemplo en la Figura 1.9 se muestra un sistema MIMO: "2X3" (2 transmisores y 3 receptores)

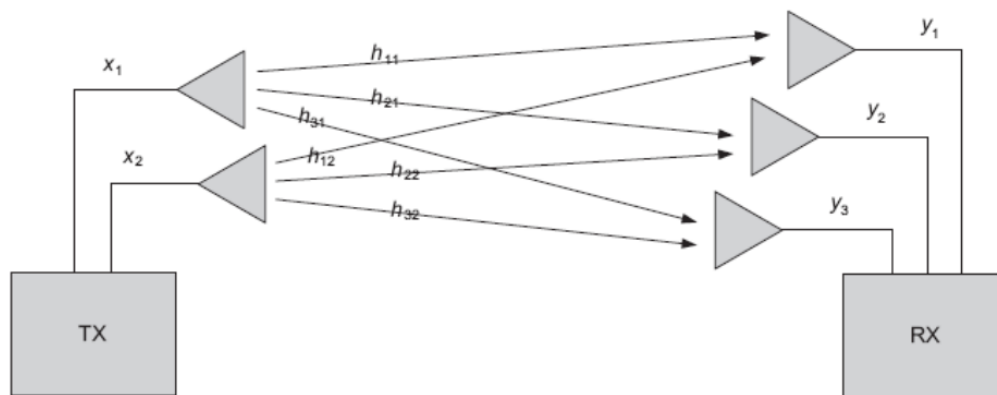


Figura 1.9 Sistema MIMO 2x3.[11]

La ganancia de SNR de los sistemas 2x1 a 2x2 y 3x2 es claramente mayor a la conseguida por cada paso a partir del sistema 3x3 en adelante.

1.2.2 Anchos de banda de canal: 20- 40 MHz.

Además de la introducción de la tecnología MIMO, el nuevo estándar IEEE 802.11n añade una de las mejoras más significativas a nivel radio para alcanzar velocidades de transmisión elevadas, se habla del incremento del ancho de banda de canal a 40 MHz.

El ancho de banda del canal es una medida importante para cuantificar la eficacia de la radio, conocida como eficiencia espectral y medida en bit/Hz.

Dado que 802.11a y 802.11g utilizan el mismo ancho de banda de canal de 20 MHz, se aprovecha una técnica llamada *channel bounding* (canal envolvente) para conseguir utilizar dos canales a la vez, obteniendo un único canal de 40 MHz y velocidades de hasta 108 Mbps. [10]

Cuando se utiliza el canal de 40 MHz, se aprovecha que cada canal de 20 MHz tiene reservados algunas frecuencias al inicio y fin del canal (para evitar interferencias entre canales adyacentes) con el fin de utilizarlas para llevar información, aumentando considerablemente la tasa de datos. [10]

Canal de 40 MHz.

El rango de frecuencias diseñado para 40 MHz abarca sitio para 128 subportadoras, utilizando un espacio entre ellas de 311,5 KHz, el mismo que el utilizado en 20Mhz. [10]

Al inicio y fin del canal, se deja una banda de guarda de 6 y 5 subportadoras nulas, respectivamente (-64 a -58 y 59 a 63). Además, se añaden 3 subportadoras nulas alrededor de la banda base (-1, 0 y 1) para facilitar la implementación en los receptores del *direct down conversion*; sumando así hasta 14 subportadoras nulas (3 más que 20 MHz). [10]

Como se ilustra en laFigura1.10, de estas 114 subportadoras disponibles, se utilizan 6 subportadoras como pilotos (sincronización) con el cual se tendrían finalmente 108 subportadoras para datos, más del doble de las utilizadas en los 20Mhz (52 en 802.11n y 48 de 802.11a).[10]



Figura 1.10 Diseño de subportadoras en el canal de 40 MHz.[10]

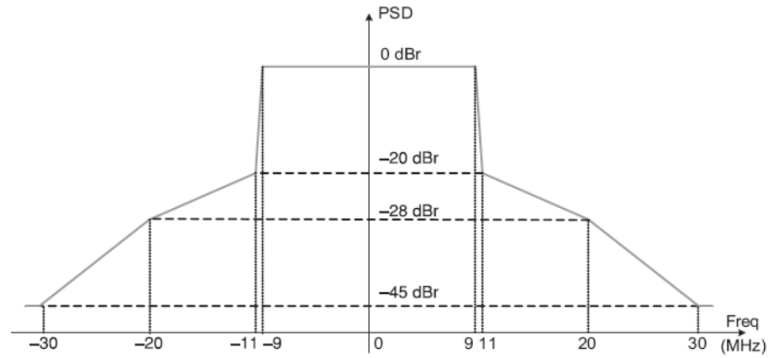


Figura 1.11 Distribución espectral para el canal de 40 MHz.[10]

Con este nuevo diseño de subportadoras para el ancho de banda se hace imprescindible una nueva distribución espectral que se muestra en la Figura 1.11, siendo una de las premisas de su diseño que la interferencia de canal adyacente frente a dispositivos vecinos de 40 MHz, sea la misma que frente a dispositivos de 20 MHz. [11]

Cuando dos dispositivos de 40 y 20 MHz se encuentran en canales adyacentes, el dispositivo de 20 MHz experimenta una mayor interferencia co-canal que frente a si se encontrase con otro dispositivo de 20 MHz. [11]

Como se muestra en la Figura 1.12, la interferencia entre las máscaras de espectro de 40 MHz y 20MHz se produce entre los niveles -20 y -28 dB del espectro de 20 MHz, la cual no puede ser filtrada. En cambio, la interferencia entre 20 MHz, se produce entre los niveles -20 y -45 dB del mismo espectro de 20 MHz.[11]

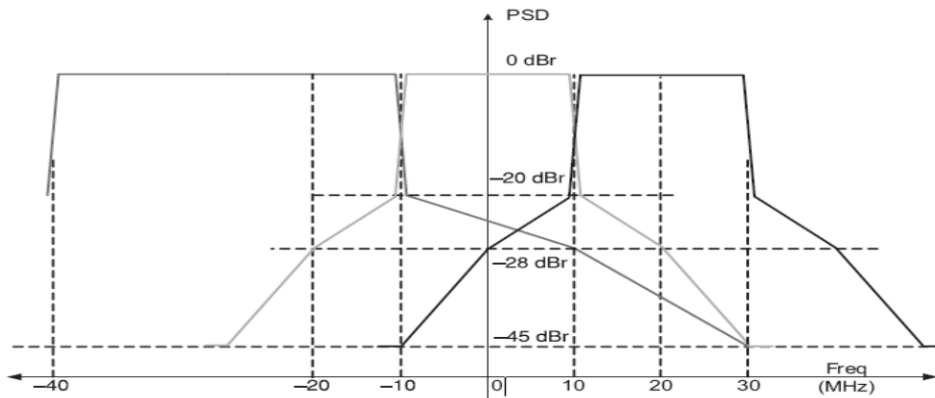


Figura 1.12 Interferencia co – canal entre canales de 20 y 40 MHz.[10]

Canal de 20 MHz.

Como se muestra en la Figura 1.13, una de las mejoras que incorpora 802.11n respecto al canal

de 20 MHz es el aumento del número de subportadoras de datos a 52 (2 subportadoras al inicio y fin del canal). Estas subportadoras de datos ocupan las ubicaciones de -28 a -22, -20 a -8, -7 a -1; 1 a 6, 8 a 20, y 22 a 28, y las subportadoras piloto ocupan el mismo sitio que en 802.11a -21, -7, 7 y 21. [10]

Con el fin de mejorar la interferencia co-canal, se ajustó la máscara espectral de 802.11a hasta los -45 dBr, la cual puede verse en la Figura 1.13.

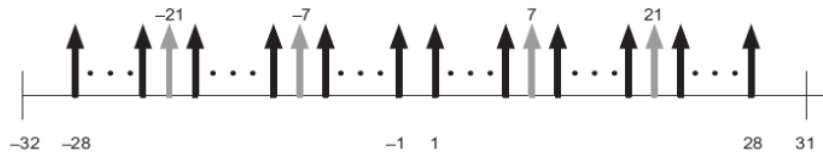


Figura 1.13 Diseño de subportadoras en canal de 20 MHz.[10]

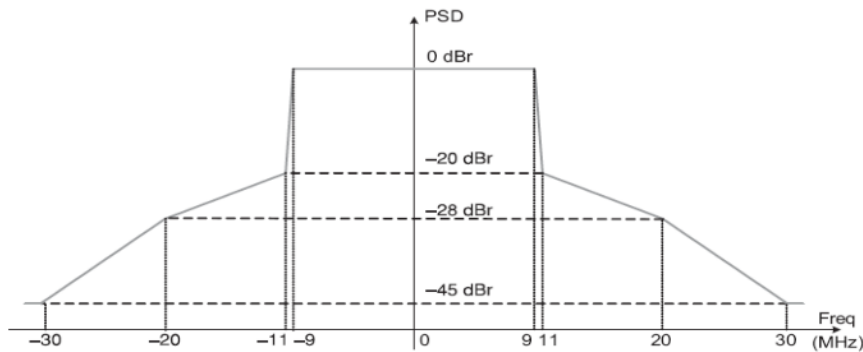


Figura 1.14 Distribución espectral para el canal de 20 MHz.[10]

1.2.3 Operación de los canales de 20 y 40 MHz.

En las bandas de 5 GHz

Para la operación de 20/40 MHz se utilizan dos canales adyacentes de 20 MHz uno de los cuales es designado como canal primario y el otro como canal secundario. [11]

Comparado respecto al canal de 2,4 GHz, estas bandas tienen mayor ancho de banda por lo que los canales de 40 MHz son más fáciles de colocar. Por este motivo, esta banda es la preferida para la operación de los canales de 40 MHz, sobre todo cuando se despliegan una gran cantidad de puntos de acceso. [11]

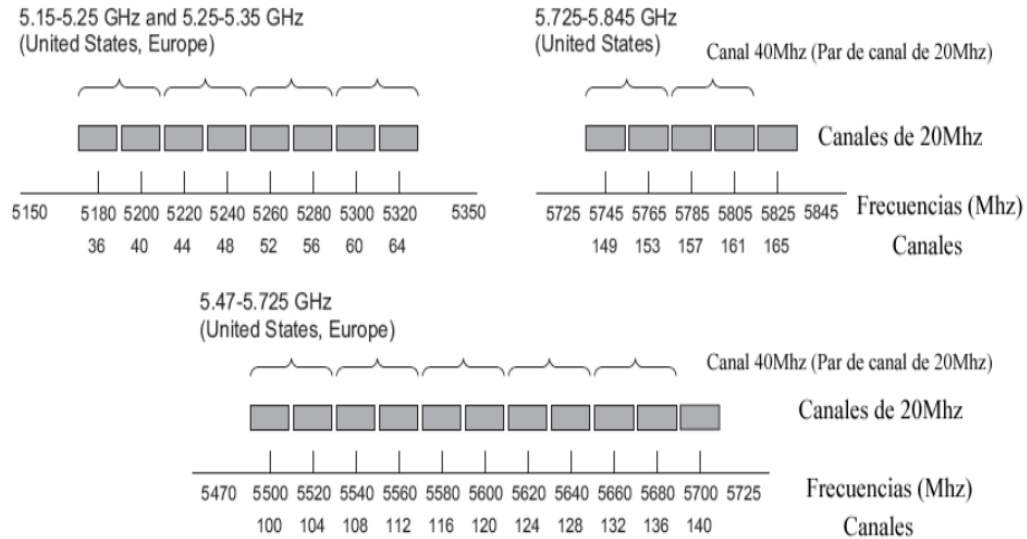


Figura 1.15 Coexistencia en la banda de 5GHz.[10]

En la Figura 1.15 se representa la coexistencia entre los canales de 20 y 40 MHz en la banda de 5 GHz.

En la banda de 2,4 GHz.

La operación en esta banda es más complicada debido a la limitación del espectro disponible, la sobreposición de canales y la operabilidad de los dispositivos 802.11b y 802.11g en esta banda. [10]

La banda de 2,4 GHz está compuesta por canales espaciados entre sí en 5 MHz. La mayor cuestión con la operación de canales de 40 MHz en esta banda es la coexistencia entre BSSs colindantes, en uno o más de estos canales usados. [10]

Para explicar mejor esta situación, en la figura siguiente se muestran opciones de coexistencia entre canales vecinos de 40 y 20 MHz en los canales 1, 6 y 11.[10]

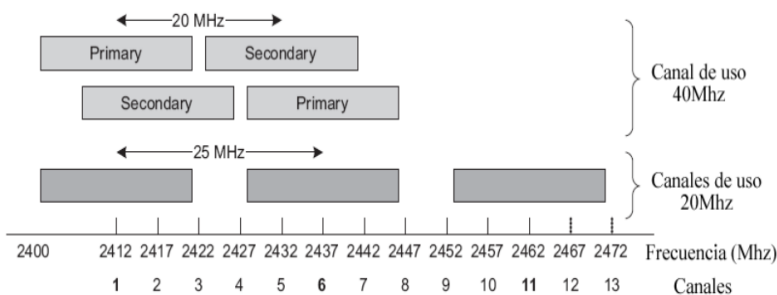


Figura 1.16 Coexistencia en la banda de 2,4GHz.[10]

Si el BSS vecino se encuentra en sólo dos de los canales usados, es posible seleccionar los canales primario y secundario de tal forma que el canal primario coincida con uno de los canales usados, y el secundario ocupe el espectro en los canales no utilizados.

1.2.4 Preámbulo *Greenfield* (GF).

Durante el desarrollo del estándar 802.11n, muchos opinaron que debería trabajarse en un preámbulo más eficiente bajo ciertas condiciones de red. Por esta razón se adoptó un formato de preámbulo sin los campos comunes, de tal forma que no fuese compatible. [11]

Los entornos en los cuales no se requiera una compatibilidad con otros estándares son conocidos como despliegues "*Greenfield*". [11]

Los beneficios de la utilización del preámbulo GF pueden ser considerables en entornos con tasas de datos altas y paquetes pequeños como VoIP.

De cualquier forma, GF está incluido en el estándar 802.11n como un formato de preámbulo opcional, ya que durante su desarrollo, muchos detractores argumentaron que no ofrecía mejoras de eficiencia en redes pequeñas y que supusiese una carga añadida en la autodetección de múltiples tipos de preámbulo. [10]

1.2.5 Intervalo de guarda (*ShortGI*).

El intervalo de guarda que forma parte del símbolo OFDM es utilizado para minimizar la interferencia intersímbolos (ISI). Esta interferencia se da principalmente en entornos multicamino, donde el inicio de un nuevo símbolo llega al receptor antes de que sea entregado el último símbolo; reduciendo el SNR efectivo.[11]

Como se muestra en la Figura 1.17, el intervalo de guarda (GI), es un período fijo entre símbolos que permite la correcta llegada de los símbolos más tardíos; el cual está fijado en 800 ns. [11]

En casos en los cuales no haya una distancia considerable entre transmisor y receptor, 802.11 permite la utilización de un intervalo de guarda de 400 ns. Esto permite la reducción del periodo de símbolo a 3,6 ms, incrementando así un 11% las tasas de datos. [11]

En cualquier caso, la utilización del GI pequeño es sólo seleccionada si se alcanza una tasa de datos elevada con GI.[11]

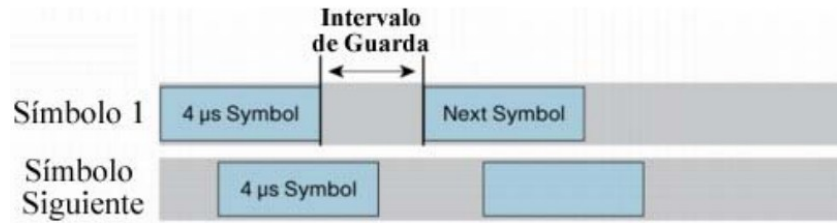


Figura 1.17 Representación del Intervalo de Guarda.[11]

1.2.6 Código de verificación de paridad de baja densidad (LDPC).

Este modo opcional introducido por 802.11n, consiste en una clase especial de códigos lineales de bloque. El término de “baja densidad” hace referencia a que este código de verificación, utiliza muchos 0s y pocos 1s en la matriz de verificación de paridad. [10]

Los pasos iniciales para generar la palabra código incluyen seleccionar su tamaño y determinar el número de ellas. A continuación, se calcula el conjunto de bits acortados y generando los bits de paridad; y si fuese necesario, puntualizar o repetir todo el proceso. [10]

Uno de los pasos clave en esta codificación es el proceso de montaje de los bits útiles en un número entero tanto de símbolos OFDM como palabras código LDPC. Parte de este proceso es determinar cuál de los 3 tamaños de palabra código LDPC usar (648, 1296 o 1944 bits). [10]

Cada palabra código LDPC contiene los bits de información y paridad. El número de bits de información es determinado basándonos en la tasa de código del MCS seleccionado. Por ejemplo, si se utiliza una palabra código de 1944 bits y un MCS con una tasa de codificación de 5/6, el número de bits de información será 1620 y los bits de paridad, 324.[10]

1.2.7 Capa MAC.

Desde el inicio del proceso de la estandarización de 802.11n, se reconoció que el aumento de las tasas de datos a nivel físico, el *overhead* a nivel MAC provocaría que sin mejoras en esta capa, los usuarios se beneficiasen muy poco de las mejoras en la capa física. [11]

La capa MAC provee funciones de control de acceso al medio como la coordinación de acceso direccionamiento, seguridad, etc. que unidas a las mejoras (principalmente QoS), permiten que el rendimiento del estándar aumente considerablemente.[11]

Como se muestra en la Figura 1.18, una de las mejoras fue la de reducir el intervalo entre

tramas para las transmisiones que utilizaban el mecanismo *Block Ack* (BA), ya que el SIFS actual no era necesario para que el receptor pueda reensamblar la señal recibida. [11]

Otras de las mejoras introducidas fue la de concatenar la trama BAR con las tramas de datos, de tal forma que se mejora la eficiencia MAC ligeramente. [10]

Finalmente, se mejoró el mecanismo de fragmentación, haciendo posible reducir el tamaño de la trama BA para poder conseguir confirmar un paquete MSDU (*MAC Service Data Units*) completo y no sus fragmentos. [11]

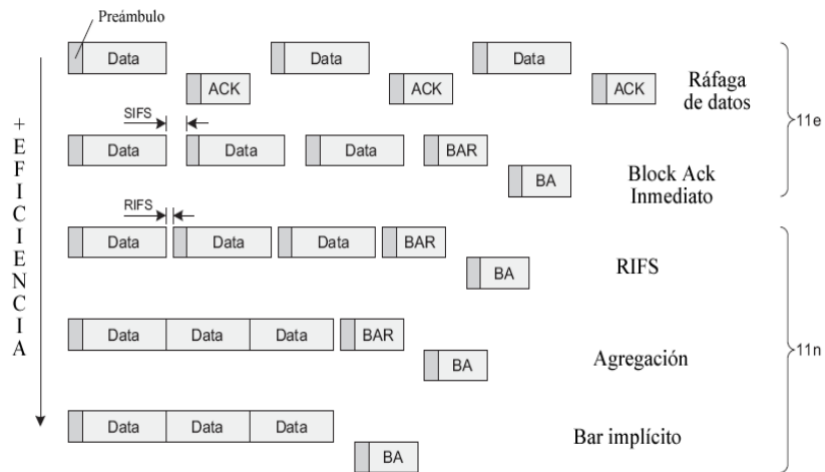


Figura 1.18 Diagrama de mejoras introducidas respecto al estándar 802.11e.[10]

1.2.7.1 Agregación.

Con el fin de reducir el *overhead* asociado con el preámbulo y los campos de la trama MAC, 802.11n introduce la agregación de paquetes. Para ello, se propusieron dos técnicas:

- **A-MSDU (MSDU agregada):** efectuada al inicio de la capa MAC, la cual agrega MSDUs como primer paso en la formación de la MPDU. [10]
- **A-MPDU (MPDU agregada):** efectuada al final de la capa MAC, agrega múltiples MPDUs para formar PSDU que será luego pasado a la capa PHY para formar el *payload* para la transmisión. [10]

1.2.7.2 A-MSDU (MAV Service Data Units agregada).

A-MSDU permite la agregación de múltiples tramas Ethernet con un destino común y las ensambla en una única trama 802.11 para transmitirla.[10]

Este mecanismo es el más efectivo de los dos propuestos en la agregación ya que está basado

en el hecho de que el formato original de la trama es Ethernet, cuya cabecera es más pequeña en comparación a la de 802.11. [10]

Con este mecanismo, los MSDUs recibidos desde la capa LLC y, destinadas al mismo receptor y de la misma categoría de servicio (identificados con el mismo TID), pueden ser acumulados en un único MPDU.[10]

La Figura1.19 muestra el encapsulamiento realizado por A-MSDU, donde la máxima longitud que puede recibir una estación es detallada en la información de Capacidades HT, tomando el valor de 3839 ó 7935 bytes. [10]

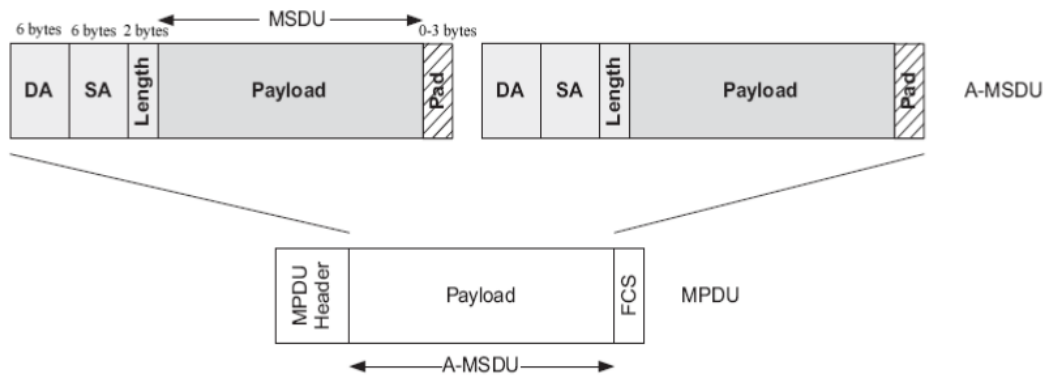


Figura 1.19 Encapsulamiento A-MSDU.[10]

1.2.7.3 A-MPDU (MAC Service Data Units agregada).

Este mecanismo es un poco distinto al A-MSDU, ya que en lugar de coleccionar tramas Ethernet, traduce cada trama Ethernet a formato 802.11 para luego ser recogidas hacia un destino común sin requerir ensamblarlas. [10]

Todas las tramas MPDU son lógicamente agregadas al inicio de la MAC; para ello se antepone a cada una de esas tramas un pequeño delimitador y un campo de *padding*; siendo luego agregadas a la capa física como PSDU para la transmisión como un único PPDU (Figura1.20). [10]

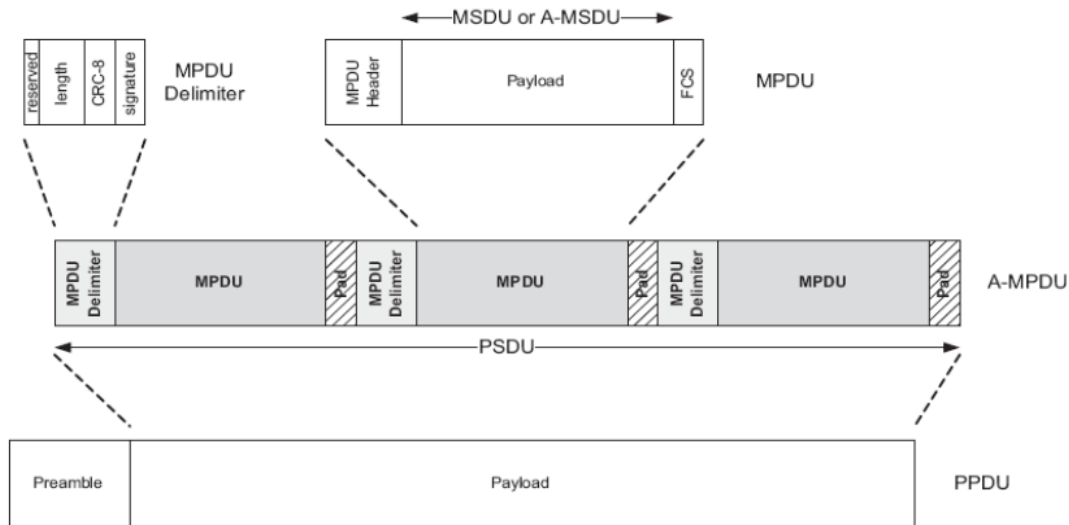


Figura 1.20 Encapsulamiento A-MPDU.[11]

Todas las tramas MPDU en un A-MPDU son enviadas al mismo receptor y una misma Categoría de Servicio (mismo TID). [11]

1.2.7.4 Block Acknowledgement.

Este mecanismo fue introducido en el estándar 802.11e para mejorar la eficiencia, permitiendo la transmisión de un conjunto de tramas de datos que son confirmadas con una única trama BA, en vez de una BA para cada trama de datos transmitida con éxito. [9]

A continuación, se muestran las variantes introducidas en el nuevo estándar con el fin de aprovechar el uso de la agregación y las tasas altas de datos.

BA Inmediato HT.

Este mecanismo supone una modificación importante respecto al original, por lo que se mantiene como un mecanismo separado para mantener la compatibilidad con dispositivos estandarizados. [10]

Policía de Normal ACK en la segregación.

El mecanismo introducido en 802.11n adapta el mecanismo original DATA/ACK a la agregación, por lo que es necesaria la presencia de un control de policía en las tramas de datos QoS en la transmisión agregada. [10]

Si una o más tramas MPDU agregadas tienen el campo *Ack Policy* como Normal ACK, entonces el receptor deberá retornar una trama BA como respuesta al agregado. [10]

El uso de un control de policía Normal ACK para solicitar una trama BA, no elimina la necesidad de la trama BAR, ya que ésta realiza dos funciones esenciales: solicitar una respuesta BA y vaciar las tramas MSDUs en el buffer de re-ordenación mantenidos como incompleto. [10]

Si el emisor no recibe una confirmación ACK de una trama MSDU cuyo "tiempo de vida" haya expirado, entonces ha de enviar una trama BAR que vacíe del buffer de reordenación todas las tramas MSDUs subsecuentes a la trama expirada. [10]

En Figura 1.21 se muestra como la trama "3" no es recibida correctamente, lo que se aplica el mecanismo de reordenación.

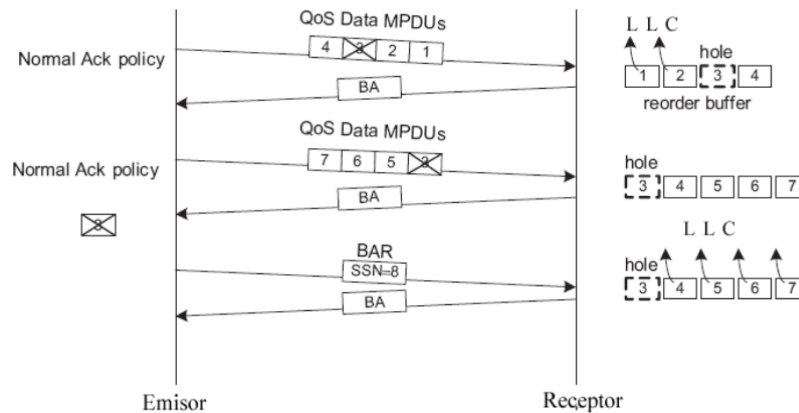


Figura 1.21 Mecanismo de reordenación.[10]

Secuencias TXOP.

A continuación en la Figura 1.22, se muestran unas secuencias utilizadas bajo HT BA inmediato. El TXOP comienza con el intercambio de un RTS/CTS con el fin de brindar mayor protección. [11]

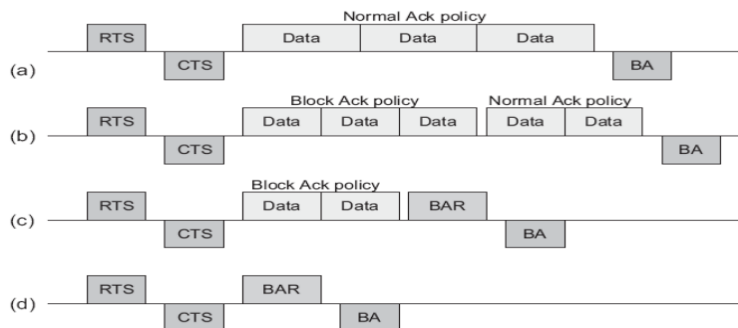


Figura 1.2 Secuencias HT BA Inmediato.[10]

Una trama agregada única es realizada con el parámetro de control de policía ACK como Normal ACK en las tramas MPDUs que la conforman. [10]

- Esta secuencia es similar excepto que 2 transmisiones agregadas son enviadas una detrás de la otra como una ráfaga. Esta secuencia mejora la robustez ya que en el caso de que una trama sea demasiado larga y sujeta a posibles cambios rápidos en las condiciones del canal, haciéndose necesaria la estimación de nuevo canal. Para ello, el primer agregado se envía con control de policía Block ACK, y el segundo como Normal ACK para solicitar un BA [10].
- Esta secuencia es utilizada cuando una trama MSDU es descartada debido a la expiración de su tiempo de vida; por lo que se hace necesaria la trama BAR para liberar todas las demás MSDUs del buffer de reordenación. Este caso, las tramas están disponibles y pueden enviarse antes de la trama BAR; para ello, el agregado debe enviarse con un control de policía BA. [10]
- Ésta secuencia muestra como la trama BAR puede enviarse separada de los datos para conseguir una mayor optimización. [10]

BA retrasado HT.

Este mecanismo es una extensión del protocolo de BA retrasado que se diferencia del estándar en la forma en la que son confirmadas las tramas BA y BAR. [11]

Bajo este mecanismo, las tramas BAR y BA transportan un control de policía Ack para cada trama respectivamente. Este campo es cambiado a 1, indicando que el receptor de la trama no debe retornar una respuesta ACK. [11]

Secuencias TXOP.

Al igual que sucedía con el mecanismo de BA inmediato, el TXOP comienza con el intercambio de un RTS/CTS o DATA/ACK. Este mecanismo permite que el TXOP sea utilizado para confirmar las tramas totalmente que se envían del emisor al receptor. [10]

En la Figura 1.23, se muestran unas secuencias utilizadas bajo HT BA retrasado:

- En esta secuencia, el emisor envía una trama agregada con Ack seguido de una trama BA.
- En esta se muestra como una trama BA puede enviarse junto a las tramas de datos utilizando el protocolo de dirección invertida.

- En la última secuencia, se muestra como reduciendo la robustez se puede enviar las tramas de datos junto con las tramas BAR y BA.

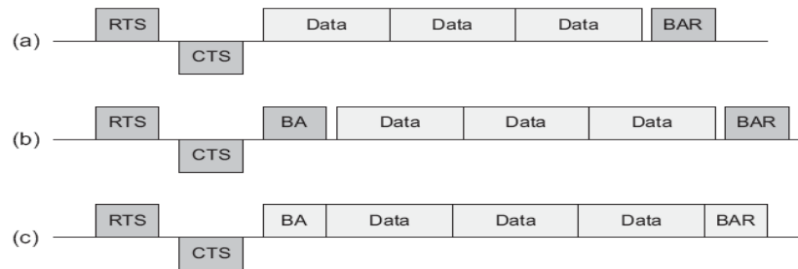


Figura 1.23 Secuencias HT BA retrasado.[11]

1.2.8 Protocolo de dirección inversa.

Muchas de las aplicaciones están pensados en un intercambio de tráfico asimétrico, como por ejemplo FTP o HTTP, ambos sobre el protocolo TCP. En este escenario, se transportan paquetes de datos TCP de gran tamaño desde el emisor al receptor; mientras que en dirección opuesta, se transportan pequeños paquetes ACK. Esto supone que la utilización de TXOPs en una dirección sea mucho mayor que en la dirección opuesta. [10]

A continuación en la Figura 1.24 se puede observar el envío de tramas MSDU utilizando inversa. [10]

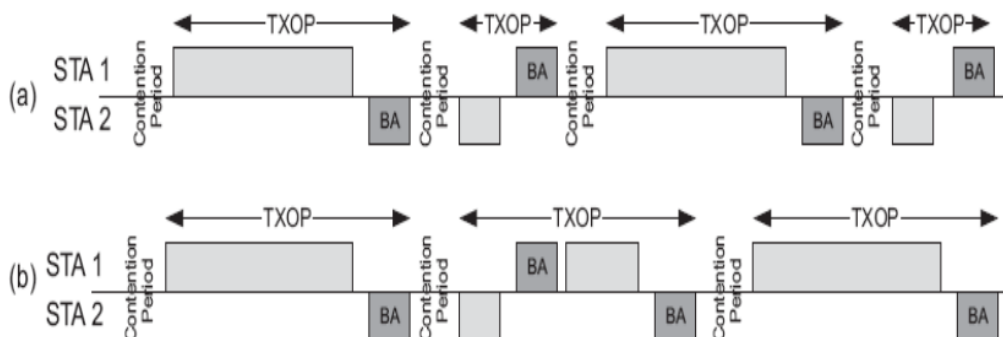


Figura 1.24 TXOP (a) sin y (b) con el protocolo de dirección inversa.[10]

El protocolo de dirección inversa es una característica opcional que permite ceder el resto de la utilización de un TXOP a otra trama. El overhead asociado a periodo de contención y el intercambio RTS/CTS al inicio del TXOP son amortizados con una eficiente utilización del TXOP. [10]

En un EDCA - TXOP, todas las tramas de datos pertenecen a una misma AC tanto en el emisor como el receptor. El TID en las MPDUs indica a que AC pertenecen, por lo que si se transporta un RDG (*Reverse Direction Grant*) el AC será el de mayor prioridad (AC=3). [10]

En un HCCA - TXOP, el inicializador RD (*Reverse Direction*) determina si esta función está limitada o no en función del AC a la que pertenezca. [10]

1.2.9 PMSP (*Power - Save Multi - Poll*).

Esta técnica introducida en este nuevo estándar permite optimizar el acceso al canal de los dispositivos que transmiten y reciben pequeñas cantidades de datos periódicamente y que necesitan mantener inactiva su interface de comunicación con el fin de ahorrar energía. [11]

PMSP provee una pequeña mejora en la utilización del canal para y el ahorro de energía sobre técnicas como el HCCA y el APSD (*Automatic Power Save Delivery*). PMSP utiliza una única trama PMSP para registrar múltiples estaciones en lugar de la trama CF-Poll de HCCA, logrando una ligera mejora en ciertos escenarios. [11]

El acceso al canal es optimizado agrupando las transmisiones de bajada como en una ráfaga y programando las de subida para que se transmitan continuamente una detrás de otra. [11]

PMSP optimiza el consumo de energía a través de la programación del inicio de fase PMSP en el enlace de bajada y subida, de modo que las estaciones puedan desactivar sus receptores o transmisores hasta que sea necesario, respectivamente. [11]

Como se muestra en la Figura 1.25, la secuencia empieza con una trama PMSP que contiene el registro para la próxima transmisión de bajada y subida. Tras recibir esta trama, una estación sólo necesita estar "despierta" un periodo de tiempo PMSP-DTT (*PMSP Download Transmission Time*) y PMSP-UTT (*PMSP Upload Transmission Time*), respectivamente.

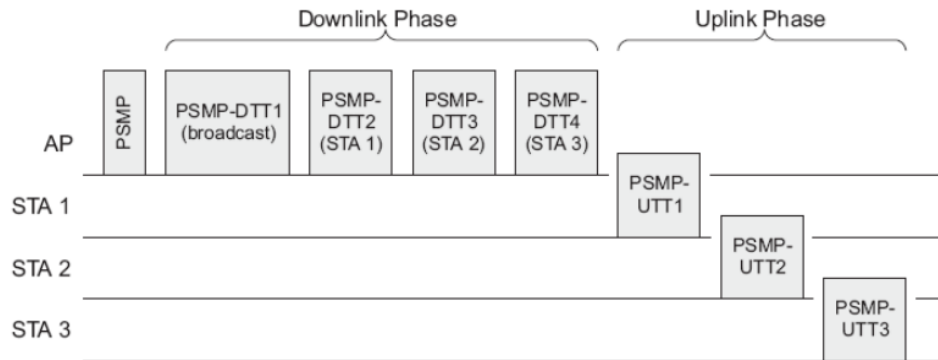


Figura 1.25 Secuencia PMSP.[11]

Durante la fase de bajada, las tramas PPDUs como una ráfaga continua separadas por un intervalo de tiempo SIFS o RIFS. [11]

Un PMSP-DTT puede contener una o más PPDUs, en las cuales las tramas MAC que transportan pueden estar dirigidas a una estación específica. [10]

Una estación que tenga una o más tramas para transmitir, comenzará su transmisión al inicio del PMSP-UTT. Las PMSP-UTT estarán separadas por un intervalo de tiempo SIFS o *UISTime* (utilizado en RIFS y más pequeña que SIFS). [10]

1.3 Nuevos estándares IEEE 802.11.

IEEE 802.11ac

A pesar de la expansión actual de la versión 802.11n, la industria ya trabaja en nuevos productos y dispositivos basados en el protocolo 802.11ac. Este estándar permite velocidades de al menos 1.000 Mbps en la banda de los 5 gigahertz, esa banda al principio restringida a edificios oficiales, como embajadas. Además, el alcance de cobertura es ampliamente superior a otras versiones, de modo que llega hasta un máximo de 90-100 metros mediante el uso de tres antenas internas, suficiente como para cubrir toda el área de una casa de forma aceptable, utilizando dispositivos de la potencia reglamentaria.[12]

Altas velocidades

El nuevo estándar inalámbrico permite velocidades de hasta 1.3Gbps. Con esta nueva tecnología se pueden ver equipos hasta con 8 antenas. Entre los modelos disponibles en el mercado, destacan los modelos **D-Link DIR-865L**, con conectividad *wifi* 802.11a/b/g/n/ac. Un producto similar es el *route rBuffalo WZR-D1800H*, y el de mejor rendimiento **CISCO Linksys**

EA6500. Todos compatibles con el estándar 802.11a/b/g/n y el borrador 2.0 de 802.11ac. Ofrecen una velocidad de hasta 1.950 Mbps mediante el uso de la doble banda en 802.11n (450 Mbps) y 802.11ac (1.300 Mbps). Con precios competitivos con la anterior tecnología. [12]

Aunque la red cableada siga siendo a 1Gbps, no se tendrá cuello de botella ya que Gigabit *Ethernet* es *Full-duplex*, sin embargo, entre *Wireless* es *half-duplex* y las pérdidas por interferencias, rebote de señal etc. nunca se llegará a las velocidades que ofrece la red cableada aunque sí se estará bastante cerca. [12]

Cobertura

Debido a que se utilizará la banda de los 5GHz, tiene menos alcance que la banda de 2.4GHz en las mismas condiciones por un principio físico. Este nuevo estándar incluye Beamforming para transmisión y recepción. [12]

El Beamforming es un tipo de categoría MIMO que consiste en la formación de una onda de señal reforzada mediante el desfase en distintas antenas y es capaz de “superar” obstáculos llegando hasta al cliente por el mejor camino. El Beamforming reconoce los elementos que causan un bajo rendimiento (muros, paredes) e intenta evitarlos, tampoco se puede olvidar que utiliza unas técnicas de detección de errores avanzadas.[12]

Las tecnologías LPDC, (*Low density parity check*) y STBC (*Space-Time Block Codes*) también están presentes en este nuevo estándar para aumentar la eficiencia de la transmisión al máximo y conseguir altas velocidad inalámbricas. Por tanto, se tendrá una cobertura mejorada. [12]

Sólo en la banda de 5GHz.

Trabjará solo en la banda de 5 GHz porque hay menos interferencias con otras redes WiFi, teléfonos inalámbricos y otros equipos como ratones inalámbricos, pero sobre todo, porque el rango de frecuencias es más amplio y por tanto, se podrá usar anchos de canal más grandes para transmitir a la máxima velocidad. En la banda de los 2.4GHz con *three-stream* y un ancho de canal de 40MHz, se ocupa casi la totalidad del rango.[12]

Ancho de canal

Se usará un ancho de canal de 80MHz por cada *Stream*, esto es el doble que el actual 802.11n, se duplica el ancho de canal para aumentar la velocidad inalámbrica. Se utilizará una modulación 256-QAM para incrementar la eficiencia en la transferencia de datos. [12]

Gracias a esta eficiencia en la transferencia, los equipos que usen 802.11ac consumirán menos batería (móviles, *tablets*, *ultrabooks*, ordenadores portátiles etc.).

IEEE 802.11ad

Hoy en día, los 2.4GHz y las bandas inalámbricas de 5 GHz para los estándares 802.11 anteriores están muy congestionadas. También carecen de la capacidad para ofrecer las velocidades para datos extremos requeridos para las aplicaciones empresariales y de los consumidores emergentes. Los nuevos tipos de datos multi-gigabit son necesarios para transmisiones multimedia de alta definición conocidas como 4k y 8k cine (3840 x 2160 y 7680 x 4320 píxeles respectivamente) y el vídeo en tres dimensiones (3D) de *streaming*, deberán tener cabida de una manera diferente.[13]

El nuevo estándar 802.11ad promete comunicaciones a 7 Gbps. No obstante esta tecnología requiere que los dispositivos que vayan a establecer una transferencia han de estar relativamente cerca uno del otro ya que su frecuencia (60GHz) es mucho más alta que las redes WiFi actuales.[13]

Este estándar ha sido concebido para comunicaciones directas a gran velocidad y corto alcance entre equipos como ordenadores portátiles, *smartphones*, *tablets*, televisores... tanto para vídeo en *streaming* en HD como para transferir grandes cantidades de datos de forma inalámbrica. Un ejemplo de sus posibilidades es que lograría transferir una película *Blu-ray* en menos de un segundo entre de un disco duro y un ordenador.[13]

En resumen, el IEEE 802.11ac y 802.11ad proporcionan caudales de datos mucho mayores que sus predecesores pero con diferentes usos potenciales. IEEE 802.11ac es una evolución de la capacidad de conexión anterior. Con esto se crea la "oficina sin cables" la capacidad de competir directamente con los sistemas de cable Gigabit al tiempo que ofrece un mejor diseño y la flexibilidad de conexión. En contraste, IEEE 802.11ad es una nueva solución que proporciona conectividad ad-hoc de corto alcance en apoyo de las tasas extremadamente altas de datos.[13]

En la Tabla 1.3 se realiza una comparación entre los estándares 802.11 n, ac, y ad que aún no está operativo pero será un gran avance en las tecnologías inalámbricas principalmente por las altas velocidades que proveerá.

Tabla 1.3 Comparación entre 802.11 n/ac/ad.

	802.11n	802.11ac	802.11ad
Throughput	600 Mbps	3.2 Gbps	Hasta 7 Gbps
Cobertura	Casa, 70 m en dependencia de las antenas y amplificadores	Casa, 30 m	Habitación, hasta 5m
Banda de frecuencia	2,4 / 5 GHz	5 GHz	2,4 / 5 / 60 GHz
Antenas	4 por 4 MIMO	8 por 8 MIMO	Más de 10 por 10 MIMO
Aplicaciones	Datos, Video	Video	Video sin compresión

CAPITULO 2. PROPUESTA DE RED INALÁMBRICA PARA EL GRUPO EMPRESARIAL CUBANÍQUEL.

2.1 Infraestructura de la red cableada del Grupo empresarial Cubaníquel.

El Grupo cuenta con su propia red de telecomunicaciones en cada una de las localidades que une a casi todas las empresas y dependencias para conformar de esta manera una Red Interempresarial, fundamentalmente soportada sobre fibra óptica monomodo en la localidad de Moa. Esta red, permite gestionar las comunicaciones entre sus respectivas entidades. Prácticamente el 100% del tráfico de datos se transmite por esta vía, sin embargo no cuenta con respaldo redundante para casos de averías.

La fibra óptica está tendida de forma aérea, desde el año 2003, resultando vulnerable a todo tipo de afectaciones, producto de la acción inescrupulosa del hombre, eventos meteorológicos, desgaste físico, etc. En el 2008, el ciclón IKE azotó la región, devastando a su paso todas las redes existentes en el territorio incluyendo la perteneciente a Cubaníquel, ya que esta se apoya en la red de postes de la OBE.

Se orientó por parte de la máxima dirección de la Defensa Civil que se debía trabajar en el mejoramiento de la red para lograr que la misma sea inmune a este tipo de eventos climatológicos que con certeza se van a reiterar con creciente fuerza devastadora debido al cambio climático que sufre todo el planeta.

Actualmente, esta red se encuentra en servicio. No obstante, los niveles de señal en cada uno de sus enlaces no son los deseados, por el elevado número de empalmes en cada tramo, así como la cantidad de golpes que ha sufrido y las altas tensiones mecánicas a las que ha estado sometida.

Resumen de información que se trafica por la red interempresarial:

Servicios telemáticos:

- Correo electrónico e Internet, navegación nacional e internacional, estas aplicaciones constituyen herramientas indispensables para el trabajo sistemático.
- Chat, mensajería instantánea, para el intercambio rápido de informaciones.
- Uso de VLAN, la red de Cubaníquel está diseñada de modo tal que en cualquier punto de esta, sea posible situar una dependencia u oficina de cualquier empresa de las que conforman la Red Interempresarial.

-
- FTP, permite la descarga de ficheros, desde cualquier servidor, ubicado en algún sitio de la red, destinado a este fin.

Aplicaciones:

- Sistema automatizado para la monitorización en tiempo real desde el Despacho Central del Grupo Empresarial, de los niveles de producción de las empresas productoras.
- Sistemas contables y financieros, entre los que se destacan:
 - Inventario
 - iAra ventas
 - iAra comercialización (iAra Nickel)
 - iAra compras, iAra presupuesto, etc.
- Gestión de Recursos Humanos, entre ellos:
 - Sagreh
 - Nómina, etc.
- Videoconferencia (no implementada en la actualidad), esta aplicación permitiría efectuar intercambios, reuniones, etc., en tiempo real, sin necesidad de mover al personal de su puesto de trabajo, muchas veces a un gran número de kilómetros de distancia, reduciendo así el consumo excesivo de combustible.

Servicios de comunicaciones:

- VoIP, a través de la interconexión de las pizarras telefónicas del Grupo (PBX).

Como se ha podido apreciar, existe un gran número de servicios y aplicaciones que hoy resultan prácticamente indispensables para las empresas vinculadas a la producción de níquel y que solo son posible gracias a que la red de voz y datos une a todas las entidades del grupo. Debido a que en la actualidad dicha red no es segura, producto a todas las afectaciones descritas anteriormente, Cubaníquel cuenta con una vulnerabilidad latente en todo momento, al estar propenso a la pérdida total de comunicación, o al menos de un sector de la red, cada vez que se produce una rotura en la fibra óptica. De ahí que resulte indispensable contar con un sistema confiable, que garantice una comunicación ininterrumpida entre cada una de las entidades del níquel.

En la Figura 2.1 se muestra la red del grupo empresarial Cubaníquel, con cada uno de sus enlaces hacia las empresas y sus dependencias. Las líneas en rojo, hacen referencia a la fibra aérea que es la más vulnerable a fallos y las verdes representan la fibra óptica soterrada actual.



Figura 2.1 Estado actual de la red cableada del grupo.

Con el objetivo de enlazar las principales empresas del grupo empresarial para brindar redundancia a la red se ha realizado el estudio y diseño de un radio enlace para su interconexión en caso de que fallase la red cableada. Para ello se han utilizado varias herramientas de trabajo, principalmente el *Google Earth* y el *Radio Mobile*.

2.2 Análisis de las bandas de frecuencia.

El primer criterio a tener en cuenta a la hora del diseño, está relacionado con la banda de frecuencias a utilizar, por lo que habrá que elegir entre los 2.4 y los 5.8 GHz.

La elección entre usar 2.4 GHz o 5.8 GHz depende de varios factores, entre los cuales se encuentran: tipo de enlace inalámbrico (punto a punto o punto a multipunto), interferencia, distancia, línea de vista (*Line of Sight*), etc.

A continuación se muestran las principales ventajas y desventajas de cada banda:

Ventajas de 2.4 GHz:

- Una mejor tolerancia a obstáculos, como árboles u otros pequeños obstáculos, en comparación con 5.8GHz.
- Es más compatible con dispositivos WiFi, como: teléfonos WiFi, computadoras portátiles y cámaras IP inalámbricas. (Esto sólo constituye una ventaja si se desea dar acceso a esta clase de dispositivos, en caso contrario no será una ventaja).

Desventajas de 2.4 GHz:

- Es una banda congestionada; hay mucha interferencia que proviene desde teléfonos inalámbricos, enrutadores WiFi, redes inalámbricas asociadas a diferentes entidades, microondas, etc.
- Tiene una mayor zona de Fresnel lo que se traduce en una menor vulnerabilidad a obstáculos.

Ventajas de 5.8 GHz:

- Existen antenas de mayor ganancia a igual precio o cercano.
- Tiene una menor zona Fresnel por lo que es más vulnerable a interferencias causadas por obstáculos.
- Habitualmente, hay mucha menos interferencia proveniente desde otras fuentes.
- En Cuba, cada uno de los canales que se utilicen, son contratados con la Agencia de Control y Supervisión (cuentan con el derecho de exclusividad del canal).

Desventajas la banda 5.8 GHz:

- Es más intolerante a obstáculos, como árboles o muros, en comparación con la banda 2.4GHz.

Para el *backbone* del grupo se utilizará la banda de 5,8GHz por las ventajas descritas anteriormente para enlaces empresariales. Se utilizará además la banda de 2,4GHz para que se conecten a la red los usuarios móviles desde su misma empresa o desde distintas partes del municipio incluyendo las residencias de estos.

2.3 Diseño del *backbone* inalámbrico.

En la Figura 2.2 se muestran las ubicaciones de las principales empresas del grupo y los lugares donde se colocarán los puntos de acceso. Se escogieron los puntos de la loma de la

Vigía y el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM) porque son éstos los puntos de mayor altitud en la ciudad y que además permitirán visibilidad directa entre cualquier receptor y el transmisor. En los puntos de acceso y en cada una de las empresas se instalarán las estaciones LOBOMETRICS 999M que trabajaran en las bandas frecuencias de 5,8 GHz para el *backbone* de la red y en la de 2,4 GHz para el acceso a usuarios móviles, junto las antenas LCOM HG4958 de patrón sectorial para una mejor utilización de la potencia radiada. A continuación se mencionan las empresas a interconectar.

- Empresa Puerto Moa (EPM).
- Cubaníquel.
- Ceproníquel.
- Combinado Mecánico (EMNI).
- Che Guevara (ECG).
- SERCONI (en el reparto Rolo Monterrey).



Figura 2.2 Ubicación de las empresas vistas con Google Earth.

En la Figura 2.3 se muestran los enlaces de las empresas vistos con el *Google Earth* donde se puede apreciar la ubicación de estas y el resto de la ciudad.



Figura 2.3 Backbone inalámbrico desde el punto de acceso Loma de la Vigía visto con Google Earth.

Como se muestra en la Figura 2.4 son posible todos los enlaces a través del punto de acceso de la loma de la Vigía, no hay obstrucción de ninguno tipo entre el transmisor y cualquiera de los receptores. No fue necesario el uso de repetidores gracias a la elevada potencia del transmisor y las cortas distancias existentes entre transmisor y receptor.

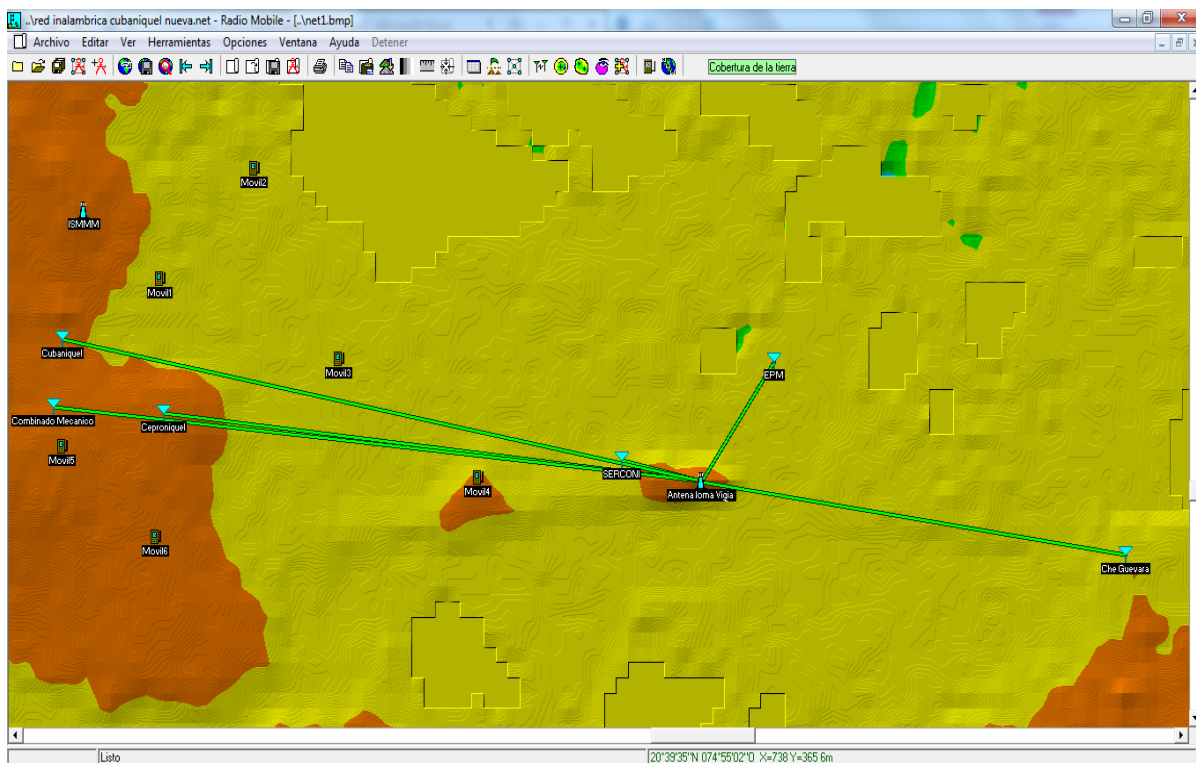


Figura 2.4 Simulación del backbone con Radio Mobile.

Para la simulación se utilizaron dispositivos Lobometrics comercializados en Cuba por la empresa Copextel, en concreto el modelo 999M que alcanza velocidades de hasta 420 Mbps (teóricos) en enlaces de oficina y 3Mbps en enlaces de más de 220 Km. Este dispositivo fue especialmente diseñado para extremas condiciones ambientales y tiene un arreglo lineal de antenas 2*2 de alta potencia con tecnología MIMO. Las especificaciones del sistema se pueden observar en el Anexo 4.

De estos equipos se considera importante destacar las siguientes cualidades:

- Son MULTIBANDA es decir se pueden configurar para operen en las bandas de 2.4GHz o en 5GHz.
- Puede operar bajo el estándar 802.11a/b/g/n (1x1 MIMO como también 2x2 MIMO), una no opción no anula la otra.
- Son auto negociables: pueden conectarse usado con salida PoE Ethernet hasta de 1Gb, pero también puede hacerlo con conexiones 10/100Mbps.
- En el estándar MIMO se puede usar con una sola antena de simple polarización, una de doble polarización o dos antenas de simple polarización.
- Operando en MIMO y con una sola antena (de simple polarización) en 2.4Ghz o en 5Ghz se gestiona una tasa de transferencia total en TCP a 90Mbps y en UDP hasta 120Mbps.
- Igualmente en MIMO y con ambos canales (dos antenas o una antena de doble polarización) en 2.4Ghz o en 5Ghz se gestiona una tasa de transferencia total en TCP a 180Mbps y en UDP hasta 220Mbps.

Se utilizarán antenas sectoriales de LCOM, específicamente el modelo LCOM HG4958 que trabaja en el rango de frecuencia de 5.4 a 5.8 GHz con ganancia de 15-16 dBi y un ángulo de 120 grados. En el caso de los dos puntos de acceso se utilizarán dos antenas que combinadas darán cobertura a un área mayor, aproximadamente de 240 grados.

Las antenas sectoriales son la mezcla de las antenas direccionales y las omnidireccionales. Estas emiten un haz más amplio que una direccional pero no tan amplio como una omnidireccional. La intensidad (alcance) de la antena sectorial es mayor que la omnidireccional pero algo menor que la direccional. Siguiendo con el ejemplo de la luz, una antena sectorial sería como un foco de gran apertura, es decir, con un haz de luz más ancho de lo normal.

Si se quisiera una cobertura de 360° (como una antena omnidireccional) y un largo alcance (como una antena direccional) se deben instalar dos o tres antenas sectoriales de 120° ó 4 antenas sectoriales de 90°. En el caso de este trabajo sólo se necesita cobertura a un área de 240 grados por lo que no es necesaria la colocación de antenas extras para formar un patrón de radiación omnidireccional.

Para la instalación de estos dispositivos se usará la torre existente en la loma de la Vigía que tiene una altura de 25 m y las existentes en el resto de los edificios, que son pequeñas torres de 10 m de altura lo que dará una altura de entre 20 y 25 m, dependiendo de la altura del edificio en que se ubicará. Se ubicaron cuatro antenas de este tipo (dos en cada uno de los puntos de acceso) con ángulos azimutales diferentes para dar cobertura al área deseada sin necesidad de instalar antenas omnidireccionales que son más caras y tienen por lo general menos ganancia que las sectoriales. El patrón de radiación real de estas antenas se muestra en el Anexo 5.

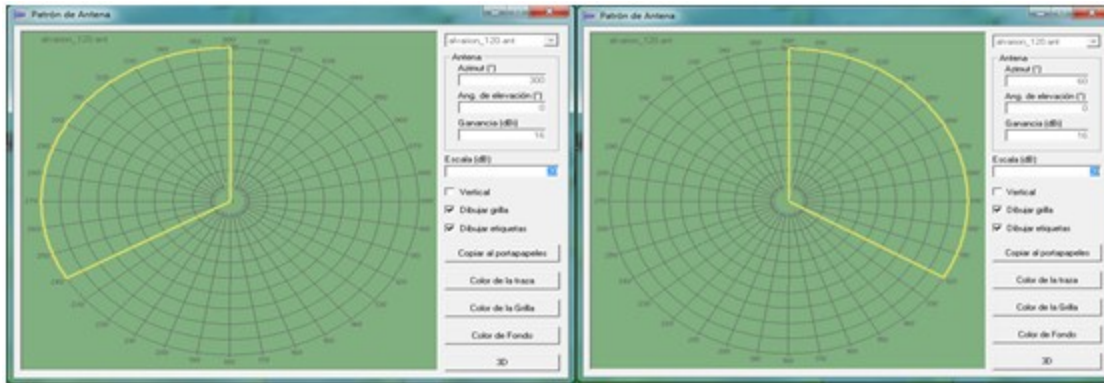


Figura 2.5 Patrones de radiación de la antena sectorial con ángulos azimutales continuos para dar cobertura desde la loma de la Vigía.

Dos antenas con patrón de radiación como los que se muestran en las figuras anteriores serán ubicadas en el punto de acceso de la loma de la Vigía para dar cobertura al área deseada.

Como se muestra en el patrón de radiación de esta antena si se colocara solo una no habría la cobertura necesaria en el territorio pero colocando dos antenas con ángulos continuos se puede lograr la cobertura necesaria en las dos direcciones a la que debe dirigirse el punto de acceso de la loma de la Vigía. En el caso del punto de acceso del ISMMM se logra dirigiendo las antenas en dirección a 160 y 40 grados que brindará cobertura a todo el territorio pues la antena debe mirar en esas dos direcciones. Este patrón es como se muestra a continuación:

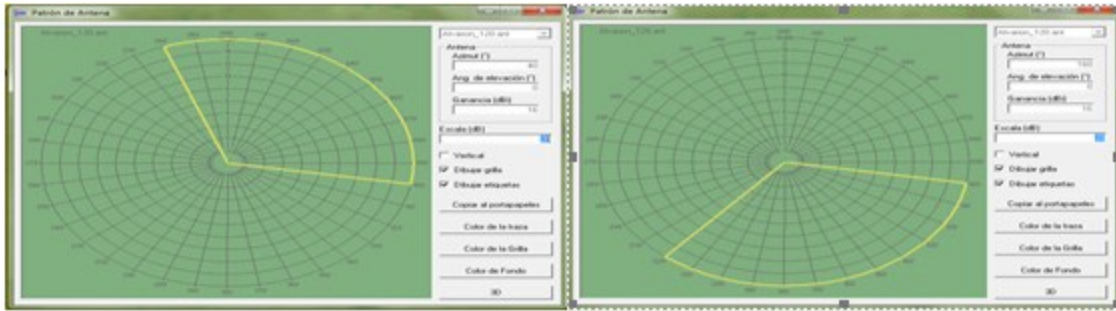


Figura 2.6 Patrones de radiación de la antena sectorial con ángulos azimutales continuos para dar cobertura desde el ISMMM.

Las antenas se instalarán en torres como la mostrada en el Anexo 8 , una en la loma de la Vigía, como ya se dijo, se arrendará un espacio a ETECSA y la otra en el ISMMM de la cual será propietario el grupo. El resto de las antenas se instalarán en las pequeñas torres que tienen los edificios sede de cada empresa del grupo Cubaníquel; serán direccionales para una mejor recepción.

Al realizar el análisis de cobertura utilizando el software Radio Mobile, con las especificaciones de estos dispositivos, se alcanzó el resultado esperado que es enlazar las empresas del grupo y dar cobertura a la mayor parte del territorio de Moa. En el siguiente epígrafe se muestran los resultados.

2.3.1 Resultados de las simulaciones en Radio Mobile.

Para el análisis de la efectividad que puede tener la red propuesta, se utilizarán los perfiles que se forman entre los distintos puntos a enlazar para ver niveles de potencia en los receptores y si existe alguna interferencia del terreno que obstruya la visibilidad directa entre el transmisor y el receptor analizados.

En las figuras que siguen a continuación se mostrarán los perfiles en las tres direcciones distintas entre transmisor y receptor. Se analizarán primero los perfiles existentes entre los receptores en tres empresas y el punto de acceso ubicado en la loma de la Vigía. En este caso, las empresas a analizar serán ECG, EPM y Cubaníquel que representan el enlace más alejado y más cercano en direcciones diferentes. El resto de las empresas se encuentran muy próximas a estas por lo que no serán mostrados los perfiles en este capítulo pero se pueden consultar en los anexos.

Como se observa en la Figura 2.7 el nivel de la señal recibida es de 29.6 dB, que está por encima de los 20 dB exigidos para que el enlace se considere como bueno. Uno de los valores más importantes que es el nivel relativo de potencia en el receptor (Nivel RX en dBm), tiene un valor de -67.4dBm, cuanto menor sea este, mejor calidad tendrá el enlace, lo ideal es que se encuentre entre -40 y -80 dBm. Se muestra además que el peor Fresnel es de 6.6F1 por lo que el enlace está completamente de obstrucciones.

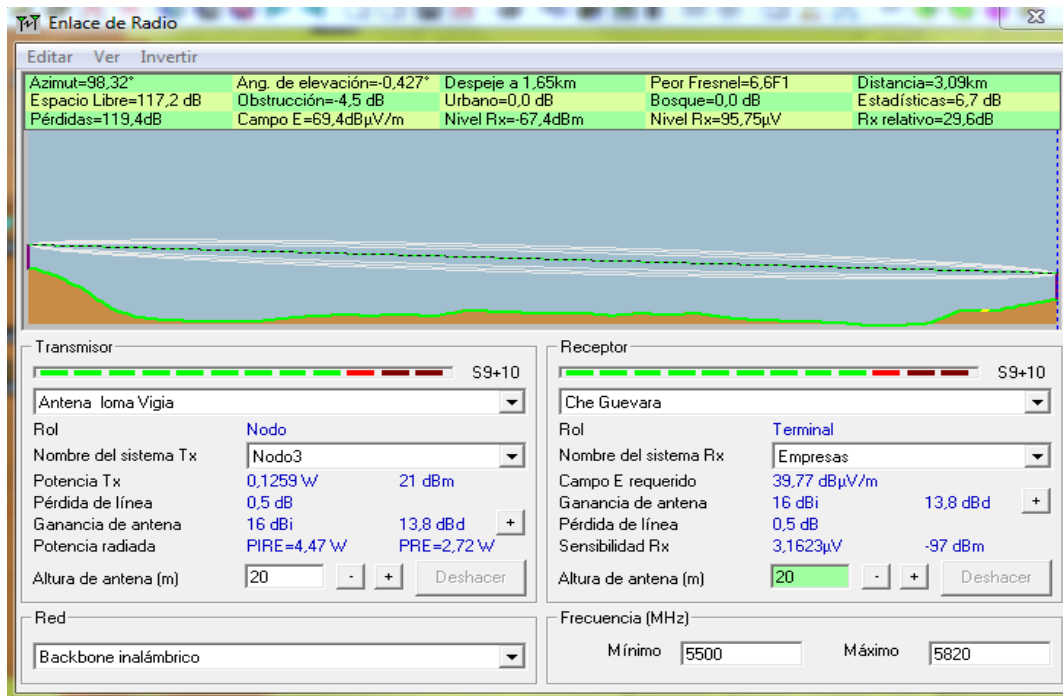


Figura 2.7 Enlace Loma Vigía y ECG.

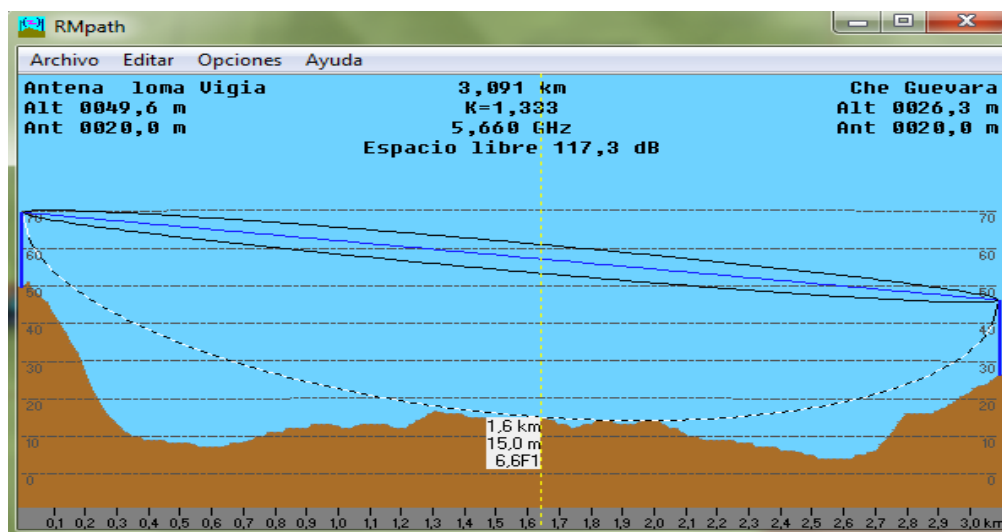


Figura 2.8 Enlace Loma Vigía y ECG en RM Path.

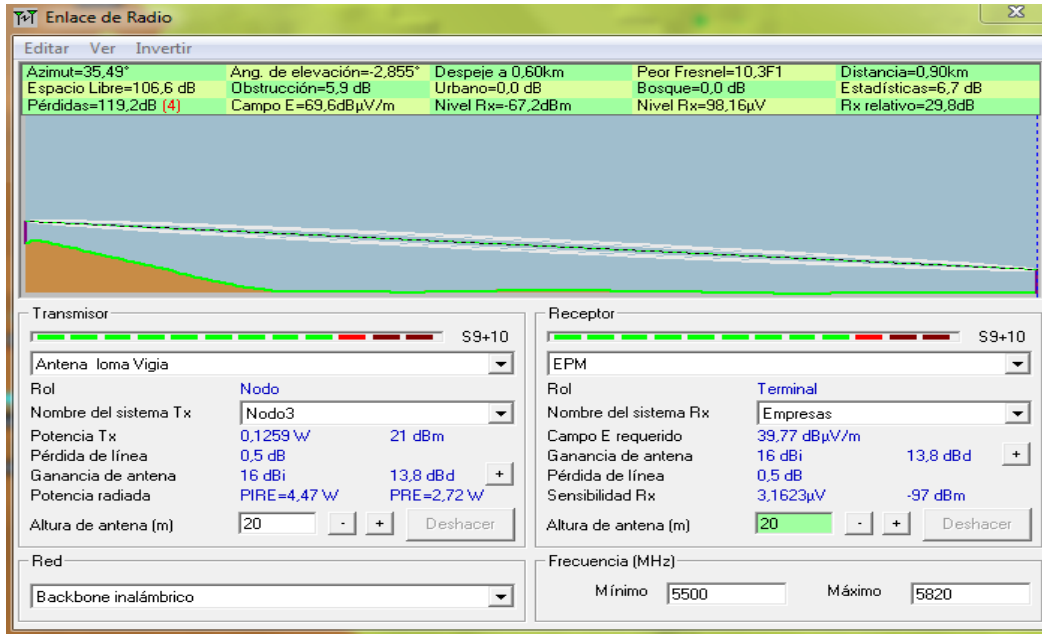


Figura 2.9 Enlace Loma Vigía y EPM.

El perfil mostrado en la Figura 2.9 es el más cercano de todos y se encuentra en la dirección norte a la antena, se puede observar como la señal recibida es de 29,8 dBm y el peor Fresnel es 10.3F1 que nos muestra un completo despeje entre transmisor y receptor.

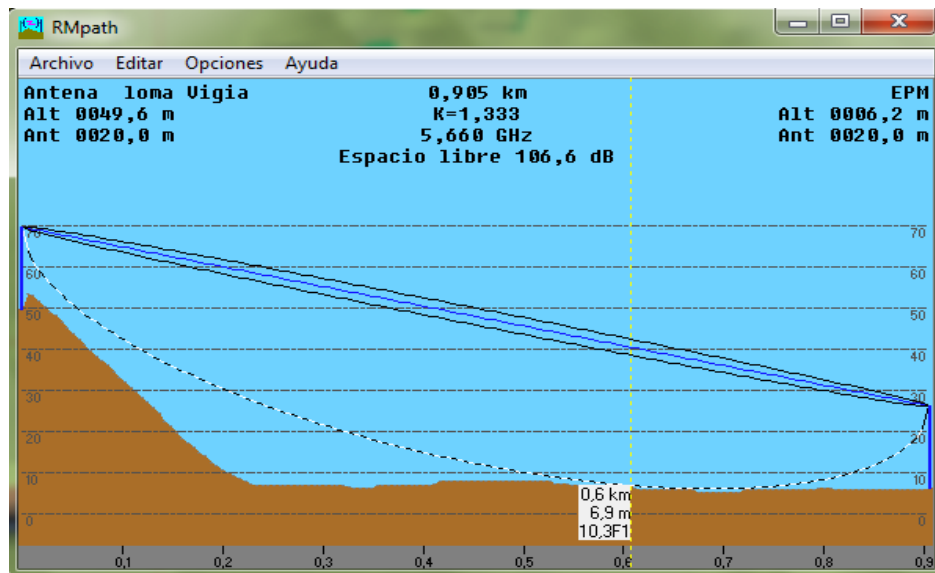


Figura 2.10 Enlace Loma Vigía y EPM en RM Path.

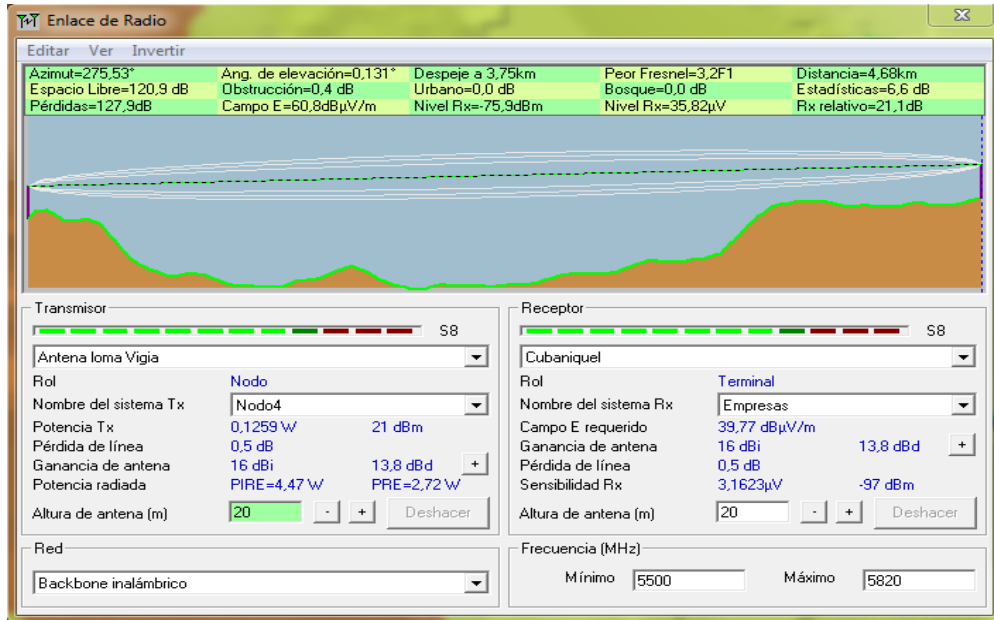


Figura 2.11 Enlace Loma Vigía y Cubaníquel.

Este caso es uno de los más alejados (4,68Km) pero que igual no representa una gran distancia, el nivel relativo de potencia es de -75.9dBm por lo que se considera excelente y la señal recibida es de 21.1dB por lo que se considera bueno también y el peor Fresnel es de 3,2F1.

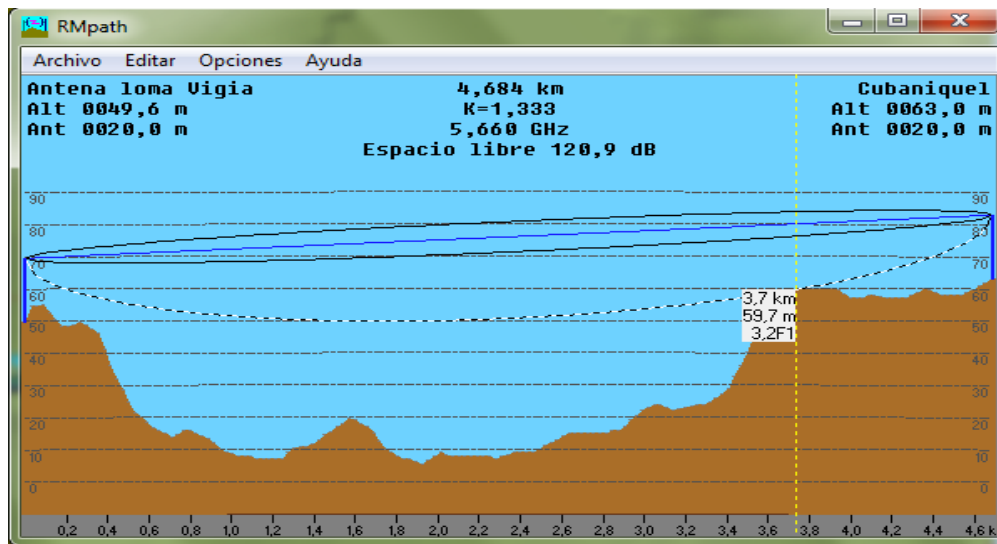


Figura 2.12 Enlace Loma Vigía y Cubaníquel en RM Path.

Los niveles relativos de potencia y peores Fresnel son relacionados en las tablas que se muestran a continuación:

Tabla 2.1 Resumen de los niveles de potencia y peor Fresnel de los enlaces desde el punto de acceso Loma de la Vigía.

Punto de Acceso	Equipo Cliente	5,8 GHz	
		Señal recibida (dBm)	Peor Fresnel (F1)
Loma Vigía	SERCONI	-54.8	3.6
	Che Guevara	-67.4	6.6
	EPM	-67.2	10.3
	EMNI	-75.3	4.7
	Cubaníquel	-75.9	3.2
	Ceproníquel	-73.8	5.7

En la tabla anterior se muestran los resultados obtenidos en la simulación tomando la Loma de la Vigía como centro de la topología punto-multipunto. El punto de acceso colocado en el ISMMM es para brindar una mejor cobertura y para el caso en que falle el punto de acceso de la Vigía no se interrumpa la comunicación.

La Figura 2.13 muestra los enlaces en la ciudad tomando como centro de la topología punto-multipunto el situado en el ISMMM, esto permite observar que cada empresa y usuario se puede conectar a la red en cualquier momento aunque falle uno de los puntos y puede además elegir cuál es el que mejor potencia le brinda. Los resultados son muy similares a los obtenidos con el punto de acceso de la loma de la Vigía, esto muestra que los enlaces serán posibles en todo momento si es con un punto de acceso será con el otro. La instalación de dos puntos permite que la comunicación continúe cuando uno de los dos falle ya sea por algún mantenimiento a algún sector de las torres o por la ocurrencia de algún desastre de gran o mediana magnitud que afecte uno de los sistemas.



Figura 2.13 Backbone inalámbrico desde el punto de acceso ISMMM visto con Google Earth.

En la Figura 2.14 se muestra como son posibles todos los enlaces desde el punto de acceso ubicado en el ISMMM. Los perfiles que forman cada uno de estos enlaces se detallan más adelante para observar el comportamiento de los principales parámetros para estos enlaces.

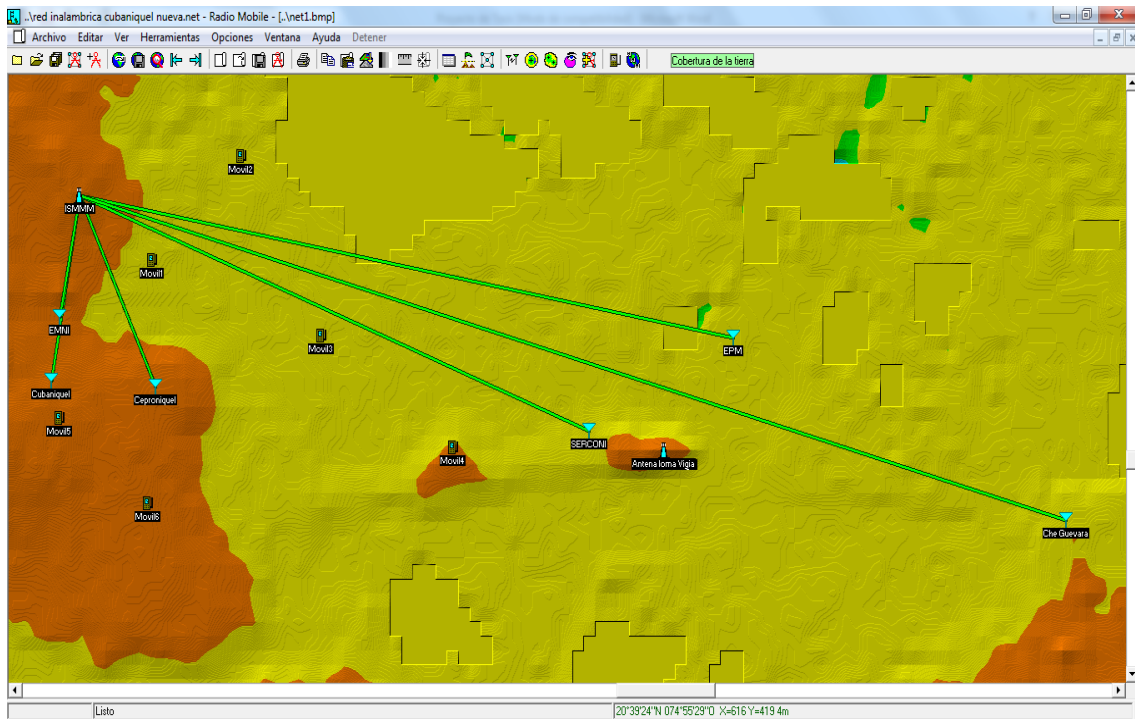


Fig. 2.14 Simulación de los enlaces con el punto de acceso en el ISMMM.

En la tabla que sigue se muestra, al igual que en la anterior, los niveles de potencia relativos en los receptores y peores Fresnel en cada uno de los casos.

Tabla 2.2 Resumen de los niveles de potencia y peor Fresnel de los enlaces desde el punto de acceso ISMMM.

Punto de Acceso	Equipo Cliente	5,8 GHz	
		Señal recibida (dBm)	Peor Fresnel (F1)
ISMMM	SERCONI	-68.8	6.1
	Che Guevara	-68.8	4.4
	EPM	-67.6	4.4
	EMNI	-58.3	4.1
	Cubaníquel	-63.6	7.7
	Ceproníquel	-65.0	10.0

Se ha podido observar que los resultados son muy similares en ambos casos para el *backbone* propuesto, esto significa que la red propuesta tiene redundancia para el caso en que falle uno de los dos puntos por cuestiones planteadas anteriormente. Los perfiles que se forman entre los receptores y este punto de acceso se muestran en los anexos.

2.4 Análisis de la red para usuarios móviles.

Además de las simulaciones entre las empresas del grupo se decidió ubicar varios puntos en la ciudad que representan los usuarios móviles que se podrían conectar desde sus casas u otro punto dando esto como resultado una cobertura total en el municipio. Como todos estos puntos de la ciudad están muy por debajo en cuanto a altitud respecto a la antena de la Loma de la Vigía se obtienen resultados muy similares con todos ellos, aunque se sabe que la potencia de los dispositivos es bien limitada, pero la potencia de transmisión de los radios utilizados es grande para un territorio relativamente pequeño.

En este epígrafe se analizará el comportamiento de la red para la conexión de usuarios móviles tanto en los alrededores de las empresas como en el municipio Moa, con el objetivo de que estos se conecten a red desde cualquier punto de la ciudad. Para este análisis se ubicaron siete puntos considerados móviles en diferentes posiciones en la ciudad para ver cómo se comporta la red en cada uno de los casos.

Para los usuarios móviles se eligió una altura de la antena de 1,5m teniendo en cuenta la altura aproximada de una persona y su respectivo dispositivo. Para estos dispositivos se especificó una ganancia pequeña de sus antenas y que estas son del tipo omnidireccional.

En el caso de las antenas transmisoras que estarán ubicadas en ambos puntos de acceso se utilizó la antena Airmax Sector 2G-15-120 muy parecida a la antena LCON utilizada para el *backbone* pero con la única diferencia de que esta trabaja en el rango de frecuencias de 2,4GHz. Se colocarán de la misma manera que las antenas del *backbone* pues el territorio a cubrir es el mismo solo que en un rango de frecuencias diferente.

En las figuras siguientes se muestran las ubicaciones de los móviles en cuestión más las empresas del grupo vistas desde el *GoogleEarth*.



Figura 2.15 Enlaces inalámbricos desde el punto de acceso Loma de la Vigía vistos con Google Earth.

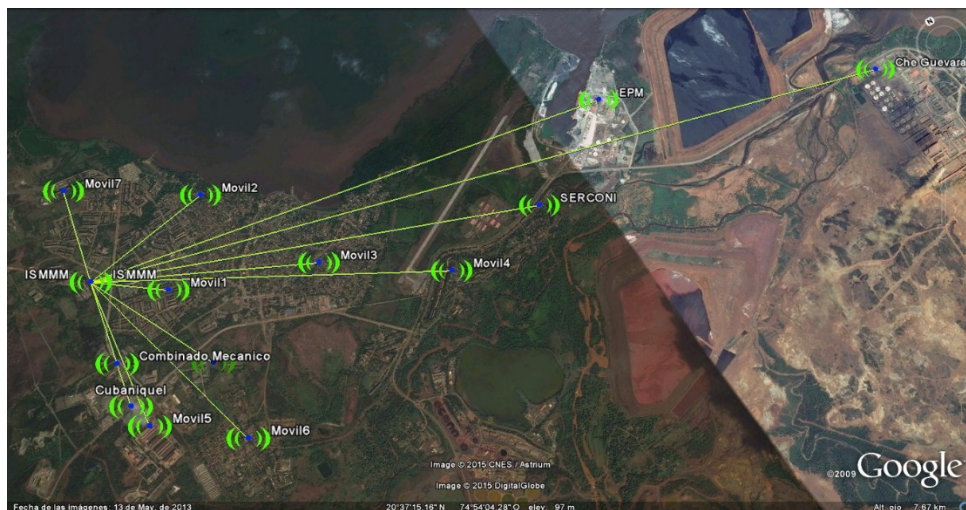


Fig. 2.16 Enlaces inalámbricos desde el punto de acceso ISMMM vistos con Google Earth.

Se puede observar en la Figura. 2.17 como son posibles todos los enlaces con los dispositivos móviles excepto con los ubicados en la zona cercana el Móvil7 pues esta es una zona muy baja que se encuentra, como se puede se puede observar en el mapa de relieve, detrás de una pequeña elevación que impide la visibilidad del móvil con la estación transmisora. A causa de esto el nivel de potencia en el receptor no es el suficiente para garantizar el enlace entre ambos puntos.

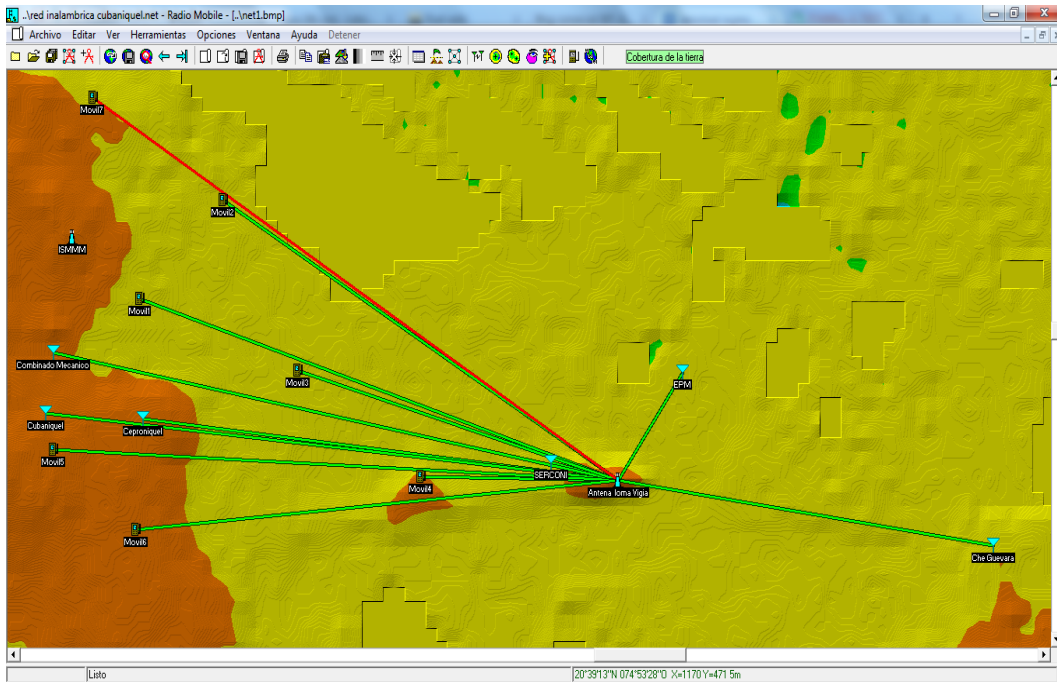


Figura 2.17 Simulación de los enlaces desde loma Vigía.

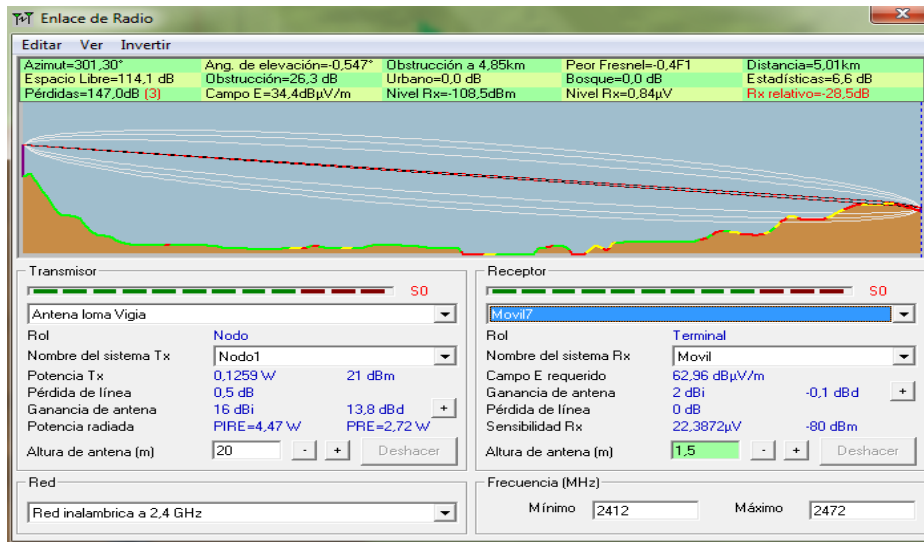


Figura 2.18 Simulación del enlace entre Vigía y Móvil7.

En el caso de este enlace, el nivel relativo de potencia en el receptor $0.84\mu\text{V}$ es mucho menor que el necesario para que este pueda decodificar la señal ($22.39\mu\text{V}$). Esto se resuelve conectando a este usuario con el otro punto de acceso ubicado en la ciudad. En la figura siguiente se puede apreciar como este móvil si tiene cobertura con el punto de acceso del ISMMM.

Se aprecia en la figura anterior como no se puede establecer el enlace entre estos puntos, problema que soluciona conectando este móvil al otro punto de acceso.

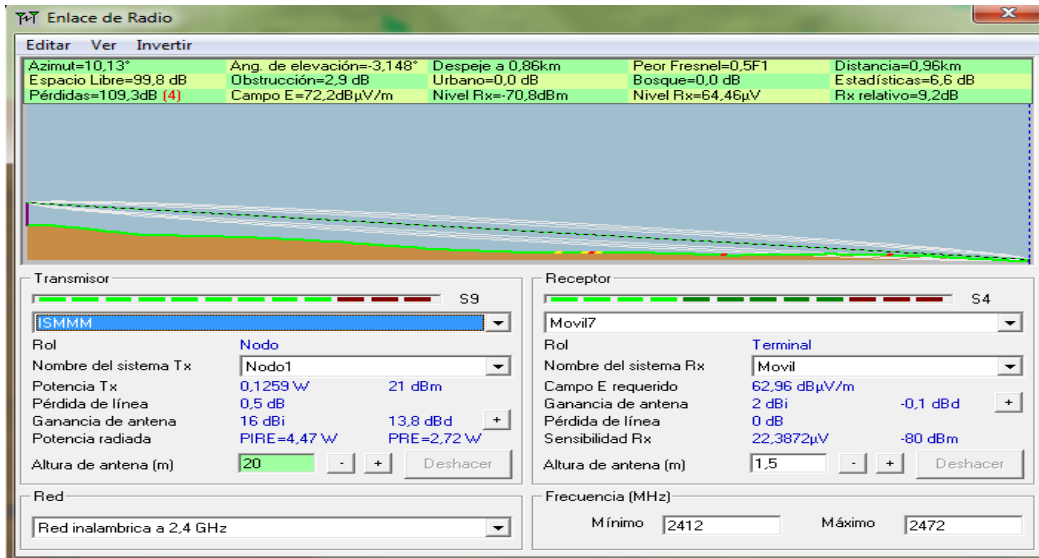


Figura 2.19 Simulación del enlace entre ISMMM y Móvil7.

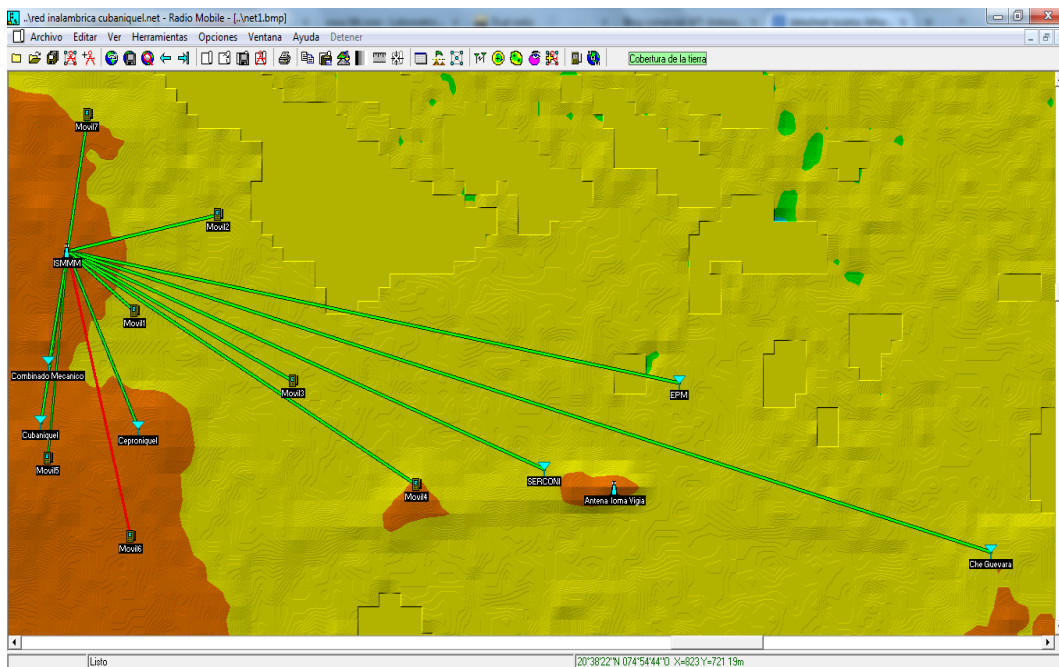


Figura 2.20 Simulación de los enlaces desde el ISMMM.

El perfil entre el punto de acceso ISMMM y Movil6 muestra el nivel relativo de potencia que es de 102.1 dBm por lo que no es posible la conexión pues el área donde está ubicado este está detrás de una pequeña elevación que impide la visibilidad entre transmisor y receptor; los usuarios móviles ubicados en esta zona deberán conectarse al punto de acceso de la Vigía.

Como se aprecia en la figura anterior son posibles casi todos los enlaces excepto el móvil6 que no tiene visibilidad directa con este transmisor pero si tendrá acceso a la red desde el punto de acceso ubicado en la loma de la Vigía; la zona donde se encuentra ubicado este punto es el reparto Armando Mestre que se encuentra por encima del nivel del ISMMM pero por debajo de la loma de la Vigía. Esto nos muestra cómo se dota de redundancia a la red propuesta y se brinda la posibilidad de conectarse desde cualquier punto de la ciudad.

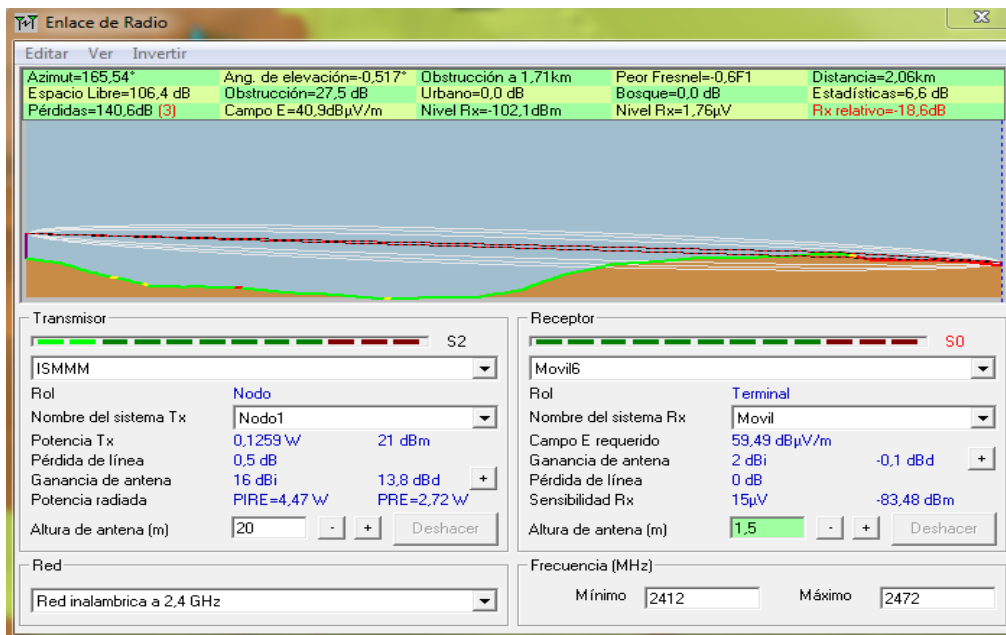


Figura 2.21 Simulación del enlace entre ISMMM y Movil6.

Se puede apreciar en la figura que sigue cómo se ha resuelto el problema de la visibilidad directa entre ambos puntos teniéndose un buen enlace desde este punto de acceso. En este caso se efectúa el enlace pero con poco margen para el desvanecimiento de la señal.

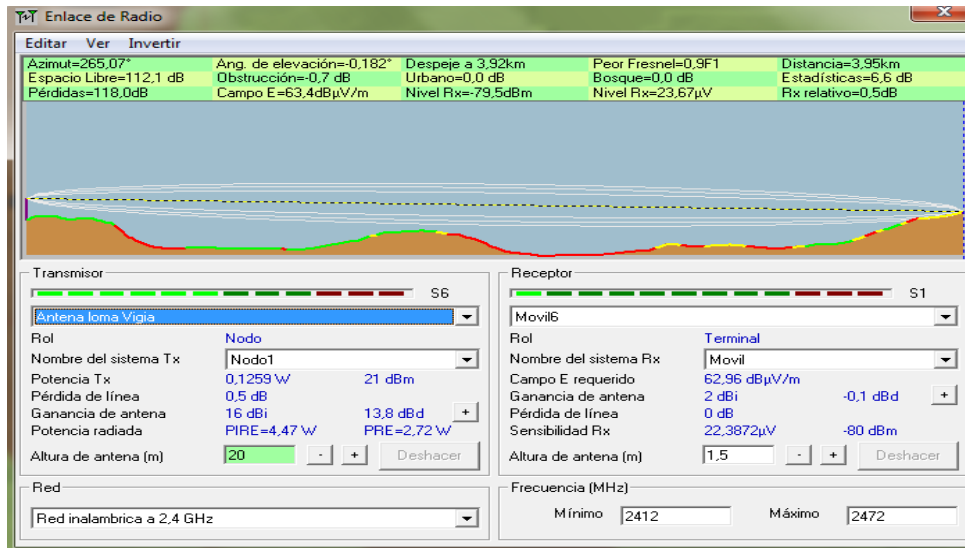


Figura 2.22 Simulación del enlace entre Vigía y Movil6.

En las simulaciones anteriores se aprecia como el territorio de Moa está completamente cubierto por la señal de los puntos de acceso, por lo que se puede acceder a la red en cualquier momento y desde cualquier punto del municipio.

Hasta ahora se han observado los enlaces en la ciudad de Moa desde los dos puntos de acceso; las figuras siguientes nos muestran de una manera más específica la cobertura en toda la ciudad. Se ven claramente como todas las empresas y las posiciones en las que se encuentran los usuarios móviles están bajo la cobertura que brinda el sistema. Desde cualquier punto de la ciudad se podrá acceder a la red.

Al finalizar el análisis de cada uno de los enlaces independientemente se mostrará, según el *software* utilizado, cuál es el territorio al cual da cobertura el sistema para acceder a la red en la banda de 2,4GHz para usuarios móviles.

La Figura 2.23 muestra como el territorio de Moa casi en su totalidad está cubierto por la señal de la red que brinda el punto de acceso ubicado en el ISMMM. Se ve perfectamente además el patrón de radiación de ambas antenas que en este caso es el equivalente a dos antenas sectoriales de 120 grados cada una. El punto en el que no se puede efectuar el enlace con este punto de acceso tiene perfecta cobertura con el punto de acceso de la loma de la Vigía como se muestra a continuación.

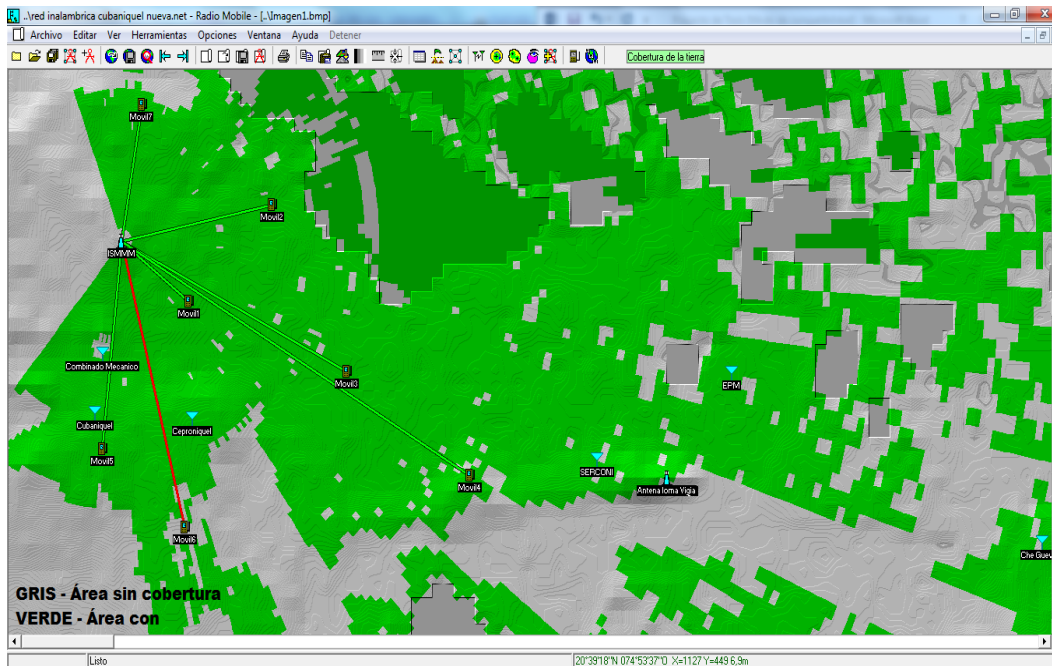


Figura 2.23 Cobertura del punto de acceso ISMMM.

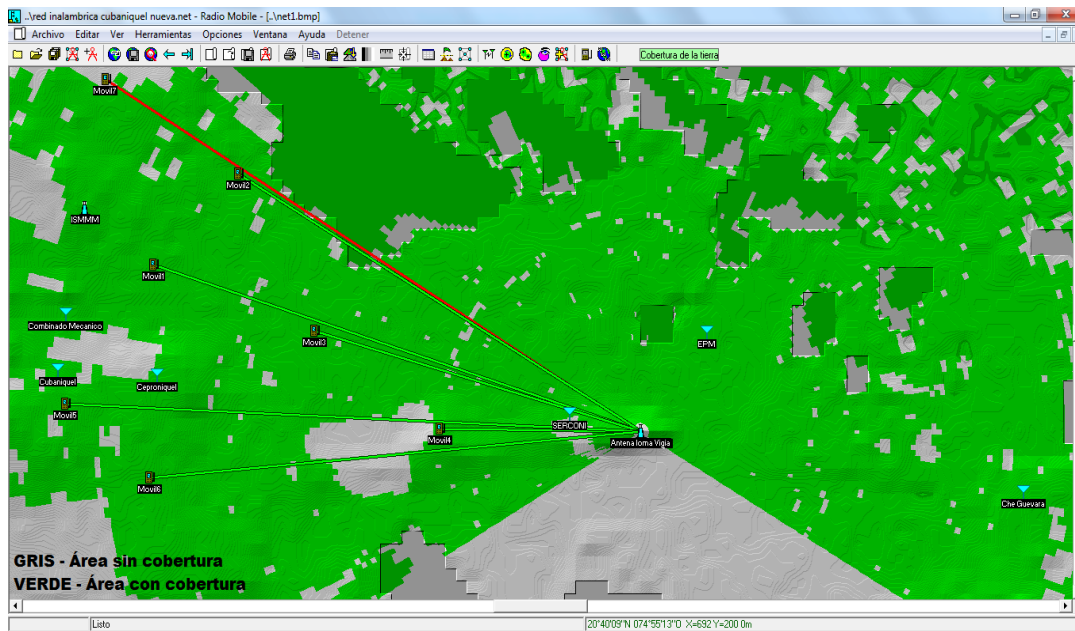


Figura 2.24 Cobertura del punto de acceso loma de la Vigía.

En la figura anterior se puede apreciar cómo se da cobertura al territorio que no tiene LOS con el ISMMM (el territorio que rodea al Móvil5) y además se observa como en los lugares cercanos al Móvil7 no hay cobertura desde este punto, pero si la hay desde el ISMMM.

Estas dos figuras nos dan la medida de cuanto territorio es cubierto por la señal de la red propuesta, que es casi todo el requerido por las empresas del grupo.

Tabla 2.3 Comparación de la red para usuarios móviles.

Equipo Cliente	2.4GHz	
	ISMMM (dBm)	Vigía (dBm)
Móvil1	-59.4	-78.9
Móvil2	-69.9	-74.1
Móvil3	-74.6	-74.0
Móvil4	-77.3	-70.8
Móvil5	-72.3	-81.5
Móvil6	-102.1	-79.5
Móvil7	-70.8	-108.5

Los niveles señalados en negrita son los pertenecientes a los enlaces que no se pueden realizar o son de muy mala calidad. Se aprecia como en el caso que es malo el enlace o no se realiza desde un punto de acceso, la conexión con el otro es buena o muy buena.

2.5 Enlace Moa-Nicaró.

El enlace Moa - Nicaro pertenecerá al *backbone* inalámbrico de la red, aunque este es un enlace de más de 62Km. Para este se utilizarán aparte de la estación Lobometrics 999M, antenas de rejilla que son antenas direccionales para una mejor recepción a esa distancia. Además del punto de acceso ubicado en la loma de la Vigía, se colocará la estación 999M en modo repetidor en la torre Miraflores perteneciente a Radio Cuba y en el municipio montañoso de Sagua de Tánamo para asegurar LOS entre los puntos en que se ubicarán las estaciones. Para este enlace se utiliza también la banda de 5.8GHz.

La figura siguiente muestra la ubicación de los puntos a enlazar y cómo quedarán los radioenlaces entre estos vistos con la herramienta *Google Earth*. Se puede apreciar también como la distancia en línea recta entre Moa y Nicaro es de 65.93Km, distancia que se puede considerar apreciable para el enlace respecto a los demás del *backbone* del grupo.

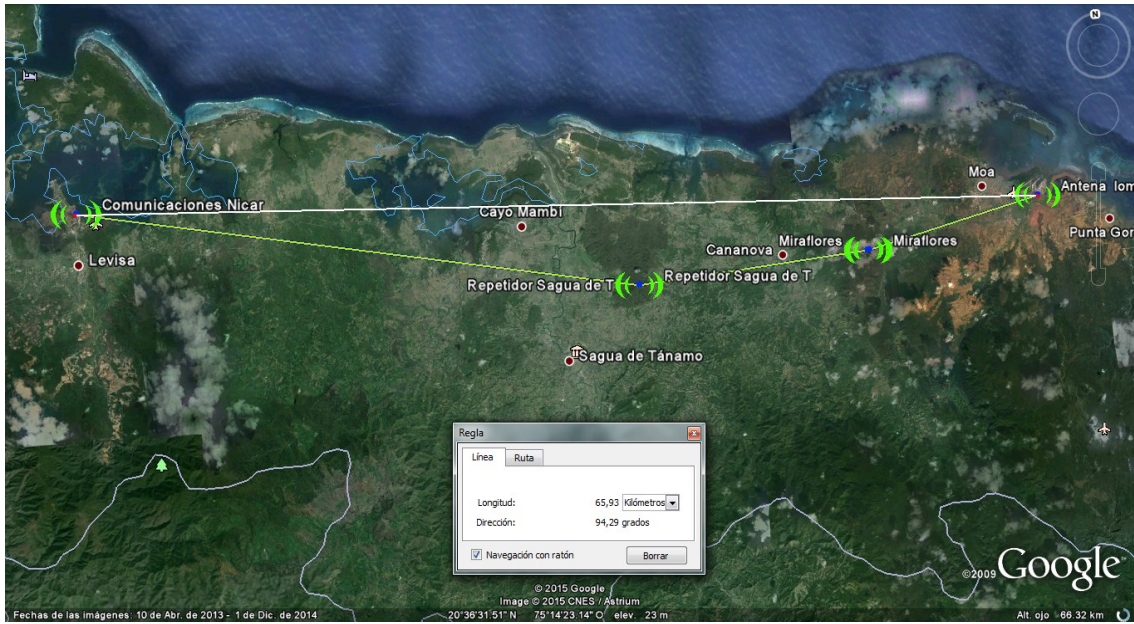


Figura 2.25 Enlace Moa-Nicar visto con Google Earth.

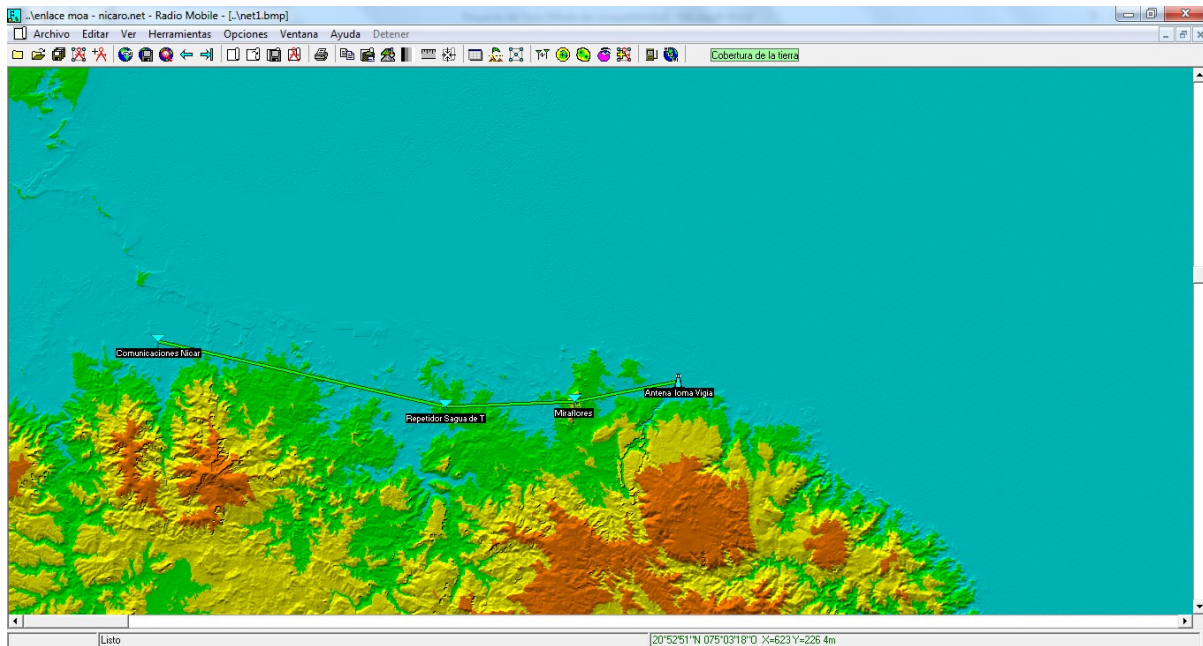


Figura 2.26 Enlace Moa-Nicar visto con Radio Mobile.

La herramienta *Radio Mobile* muestra como son posibles todos los enlaces entre el punto de acceso principal ubicado en la loma de la Vigía y el resto de las estaciones hasta comunicar a este con el centro de comunicaciones en Nicaro; en este municipio se utilizará para la instalación de la antena, y estación, la torre ya existente en la empresa mencionada.



Figura 2.27 Ubicación del repetidor respecto a la torre de Sagua visto con Google Earth.

Para la estación repetidora en Sagua de Tánamo se deberá instalar una torre AT-20 para garantizar LOS entre el repetidor y la estación de Nicaro pues la torre que hay en este municipio se encuentra en una zona que tendría muchos obstáculos para la realización de este radioenlace (Figura 2.31). Se puede observar en esa figura como la línea imaginaria entre ambas estaciones estaría llena de obstáculos que no pueden ser atravesados por la señal, por lo que se debe ubicar la estación repetidora en el lugar que se propone, que es una zona más elevada aunque es más difícil su acceso por carretera debido a las condiciones del terreno.

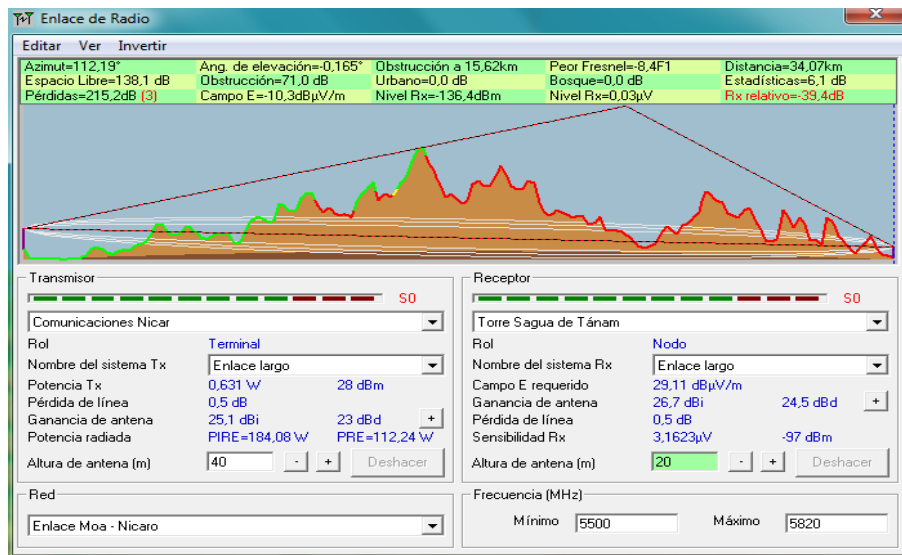


Figura. 2.28 Perfil que se formaría entre Nicaro y la torre de ETECSA en Sagua.

Se puede apreciar en esta figura la imposibilidad de utilizar la torre de ETECSA en Sagua de Tánamo pues hay toda una gama de obstáculos entre el transmisor y receptor lo que trae consigo que el nivel relativo de potencia en el receptor ($0.03\mu\text{V}$) sea mucho menor que el nivel mínimo que necesita la estación 999M ($3.16\mu\text{V}$) para decodificar la señal; para solucionar esto es que se propone otra ubicación la torre en que se instalará esta estación repetidora.

2.5.1 Análisis de los perfiles del enlace.

En este epígrafe se analizarán los perfiles que se forman entre todas las estaciones que pertenecientes al enlace Moa-Nicaró para observar el comportamiento de los parámetros equipamiento utilizado.

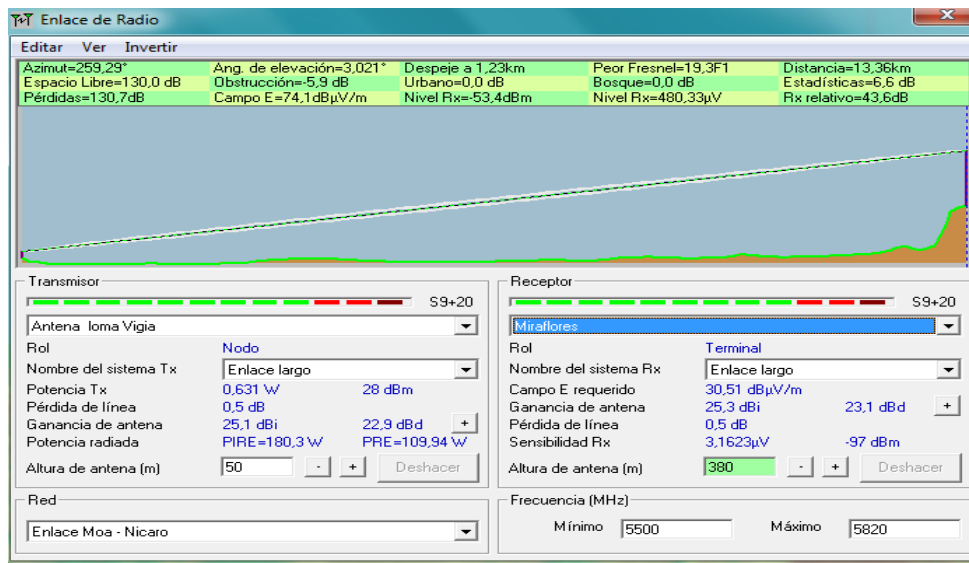


Figura 2.29 Perfil entre Vigia y repetidor Miraflores.

En la figura anterior se muestra el completo despeje de la primera zona de Fresnel para este enlace a una distancia de 13,36Km, el nivel relativo de potencia en el receptor de -53,4dBm lo que deja un amplio margen para el desvanecimiento de la señal por diferentes causas, esto significa que se tiene un enlace de muy buena calidad. A pesar de ser un enlace de mayor distancia que los analizados anteriormente para el *backbone*, se observa como el nivel relativo de potencia en el receptor ($480.33\mu\text{V}$) es superior a los $3\mu\text{V}$ mínimos que necesita el receptor para decodificar la señal.

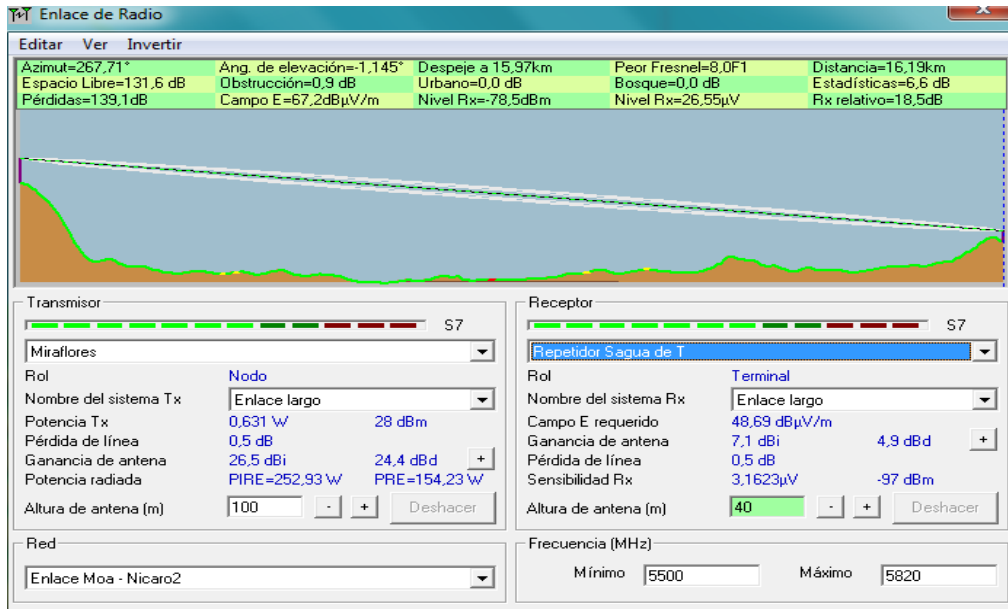


Figura 2.30 Perfil entre repetidor Miraflores y repetidor en Sagua.

En este caso se tiene una distancia un poco mayor que la anterior por lo que los parámetros no tienen la misma calidad que el enlace Vigía-Miraflores pero aun así siguen siendo muy buenos. La primera zona de Fresnel está completamente despejada, el nivel relativo de potencia en el receptor es de -78,5dBm lo que equivale a 26,55μV que también deja un amplio margen para el desvanecimiento de la señal.

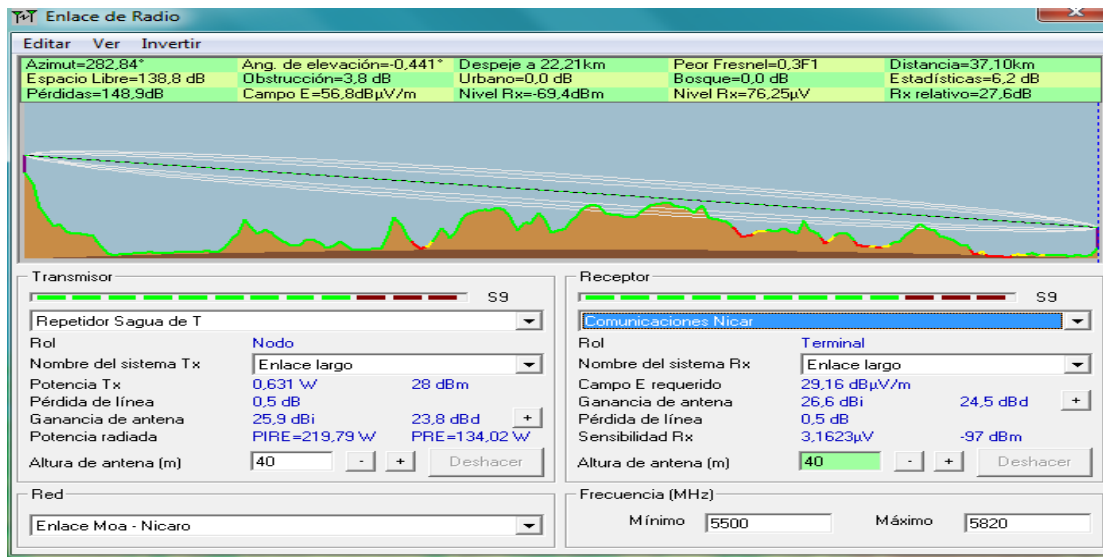


Figura 2.31 Perfil entre repetidor en Sagua y Nicaro.

En este enlace a pesar de ser el más lejano (37,10Km) se tiene un buen nivel de potencia en el receptor, -69,4dBm que equivale a 76,25μV lo que permite decodificar la señal sin problemas.

El peor Fresnel está ubicado a 0,3F1, es el más crítico de los tres enlaces pero permite LOS entre transmisor y receptor.

A continuación se muestra una tabla resumen de las distancias, potencia relativa en receptor y peores Fresnel en cada uno de los enlaces.

Tabla 2.4 Resumen del enlace Moa-Nicaró

Enlace	Distancia (Km)	Nivel relativo de potencia en receptor (dBm)	Peor Fresnel
Vigía-Miraflores	13.36	-56.4	19.3F1
Miraflores-Sagua	16.19	-78.5	8.0F1
Sagua-Nicaró	37.10	-69.4	0.3F1

Para estos enlaces además de la estación Lobometrics 999M se utilizó la antena direccional de rejilla de L-COM modelo HG5827G, se utilizó este tipo de antena porque esta tiene la capacidad de radiar toda la energía en una dirección, por lo que tiene una mayor ganancia.

Esta antena es ideal para sistemas Punto-a-Punto, Punto-a-Multipunto y puentes inalámbricos. Su compacto diseño la hace casi invisible en la mayoría de instalaciones y puede ser instalada en cualquier polarización, horizontal o vertical. Los parámetros y características de esta antena se muestran en el Anexo 6.

2.6 Análisis de costos.

Para el análisis de costos de este proyecto se debe tener en cuenta que se ha estado hablando acerca de la industria niquelífera cubana que ha sido en algunos años el principal renglón económico del país llegando a producir por valor de 2700 millones de dólares anuales. Este es un proyecto que emprenderían en conjunto las empresas que se interconectan en el mismo, es decir la implementación no sería responsabilidad de solo una de ellas sino de todo el grupo.

Tabla 2.5 Tabla resumen de precios.

ITEM	ESPECIFICACIONES	Cantidad	PRECIO CUC	IMPORTE CUC
1	Lobometrics 999M	11	421.00	4631
2	Antena Airmax Sector 2G-15-120	4	173.23	692.92
3	Antenas LCOM HG5827G-C-LCO- 2210	6	109.00	654.00
4	Antenas LCOM HG4958-17DP-090	10	148.00	1480.00
5	<i>Ethernet Surge Suppressor</i>	10	155.00	1550.00
6	65m <i>Outdoor Shielded</i> CAT5 <i>power-over-Ethernet</i> cable	10	240.49	2400.49
7	Torre AT-20 Completa	2	1,756.61	3513.22
8	Cable Coaxial RG -213/8 Baja pérdida	500 metros	1.50	750
9	Sistema de aterramiento	11	205.86	2264.46
Total				17937.6

CONCLUSIONES.

Las redes inalámbricas pueden tener mucho auge en nuestro país debido a la necesidad de movimiento que se requiere en la industria. La tecnología óptica se puede considerar como la más práctica y fácil de implementar pues para la tecnología de radio se deben pedir licencias de uso del espacio.

Al término de los análisis y simulaciones realizados en el presente proyecto se puede concluir que:

- 1- Los dispositivos usados son ideales para el proyecto pues no es necesaria la utilización de repetidores para el *backbone* en el caso de los enlaces dentro de la ciudad de Moay el nivel de señal en los receptores es, en todos los casos, casi el doble del requerido para que un enlace se califique como bueno.
- 2- La red propuesta brinda cobertura a la totalidad del territorio donde están ubicadas las empresas del grupo lo que significa que se dota al grupo empresarial de un enlace redundante de muy buena calidad. Además gracias a la cobertura de la red se podrá acceder a ella desde cualquier punto de la ciudad con dispositivos móviles compatibles con WiFi.
- 3- Existe visibilidad directa entre todos los puntos gracias a la altura de las torres en que están ubicadas las antenas exteriores, por lo que queda libre la primera zona de Fresnel que es uno de los principales requerimientos para este tipo de enlaces.
- 4- Existe muy poca interferencia para el *backbone* proveniente de otras fuentes como dispositivos portátiles pues estos trabajan en la banda de 2,4 GHz que está más congestionada. Además los canales que se utilizarán serán contratados por la Agencia de Control y Supervisión por lo que contará con total exclusividad de estos.
- 5- Para el enlace Moa – Nicaro se decidió no utilizar la torre de ETECSA del municipio Sagua de Tánamo pues esta no provee visibilidad directa entre ambos puntos, lo que se traduce en un nivel de señal en el receptor por debajo del mínimo requerido por este, lo que significa que no alcanza para la decodificación de la señal. Para solucionar esto se decidió ubicar una torre en una elevación cercana que permite la comunicación sin interferencias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Goldsmith A, *Wireless Communication* , 2005.
- [2] Isak S. B., *Outdoor Propagation Prediction and Measurement for WLAN Application*, 2006.
- [3] S. R. Saunders, *Antennas and propagation for wireless communication systems*, 1999.
- [4] Wayne Tomassi, *Sistemas de comunicaciones electronicas*, 2003.
- [5] Andrew S. Tanenbaum, *Redes y Computadoras*, 1997.
- [6] Bates R. J., *Comunicaciones en redes inalamicas*, 1994.
- [7] Ubiquity Networks, *Enlaces punto a punto*, 2014.
- [8] Ubiquity Networks, *Enlaces punto multipunto*, 2014.
- [9] William Stalings, *Pasado, presente y futuro de las redes wireless*, 2011.
- [10] Perahia E. y Stacey R., *Next Generation Wireless Lan: throughput, robustness and reliability in 802.11n*, 2008.
- [11] CISCO, *802.11n: The Next Generation of Wireless Performance*, 2009.
- [12] IEEE, *IEEE aprueba nuevo estandar inalamico*, 2013, Disponible en <http://telefonicamoviles.gio.etsit.upm.es/catedra/2013/01/el-ieee-aprueba-la-directriz-de-802-11ac-de-wifi/>.
- [13] IEEE, *Diferencias entre estandares AC y AD*, 2014, Disponibloe en <http://jrc-technology.com/cual-es-la-diferencia-entre-ieee-802-11ac-y-802-11ad/>+
- [14] Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado, and Pilar Baptista Lucio, *Metodología de la Investigación*. Istepalapa: Mc Graw Hill, 2006.
- [15] Empretel, *Propagacion y enlaces*, 2004.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

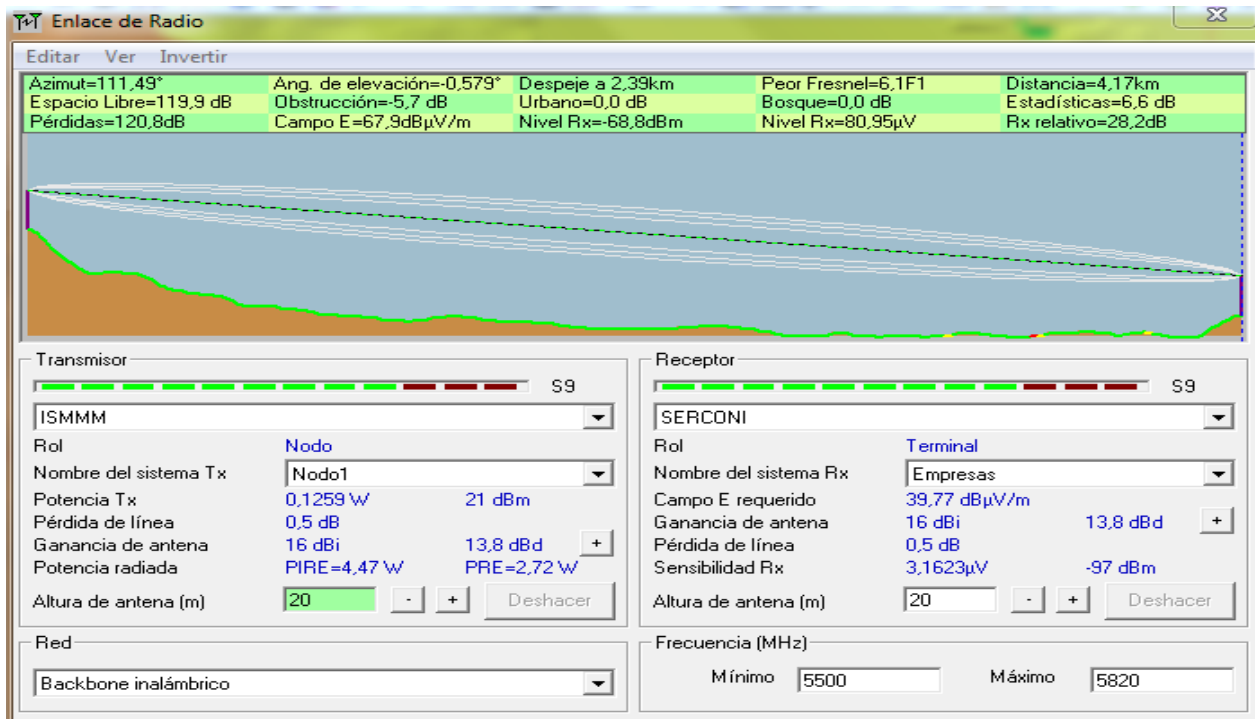
Término	Significado
ACK	Confirmación
A-MPDU	Unidad de Datos de Protocolo MAC agregada
A-MSDU	Unidad de Datos de Servicio MAC agregada
AP	Punto de Acceso
BSS	Conjunto de servicio básico
CP	Período de contención
CW	Ventana de contención
dB	Decibelios
DSSS	Espectro ensanchado por secuencia directa
FSSS	Espectro ensanchado por secuencia directa
GF	Greenfield
GHz	Gigahercios
GI	Intervalo de guarda
HC	Coordinador híbrido
Hz	Hercios
IEEE	Instituto de ingenieros eléctrico y electrónicos
IFS	Espacio intertrama
IP	Protocolo de Internet
KHz	Kilohercios
LDPC	Chequeo de paridad de baja intensidad
LLC	Capa de control de enlace lógico
LOS	Línea de visión
MAC	Control de acceso al medio
MCS	Esquema de modulación y codificación
MPDU	Unidad de datos de protocolo MAC
MSDU	Unidad de datos de servicio MAC
OFDM	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal
OSI	Interconexión de sistemas abiertos
PDU	Unidad de datos de protocolo
PHY	Capa física
PLCP	Procedimiento de convergencia de capa física

PSD	Densidad espectral de potencia
PSDU	Unidad de datos de servicio de protocolo PLPC
PSMP	Ahorro de energía multiencuesta
RTS	Petición para enviar
Rx	Receptor
SDM	Multiplexación por división espacial
SDU	Unidad de datos de servicio
SISO	Entrada única-Salida única
SNR	Relación señal a ruido
SSID	Identificador de servicio conjunto
Tx	Transmisor
TXOP	Oportunidad de transmisión
UDP	Protocolo de uso de datagrama
VoIP	Voz sobre IP
WiFi	Tecnología inalámbrica
WLAN	Red de área local inalámbrica

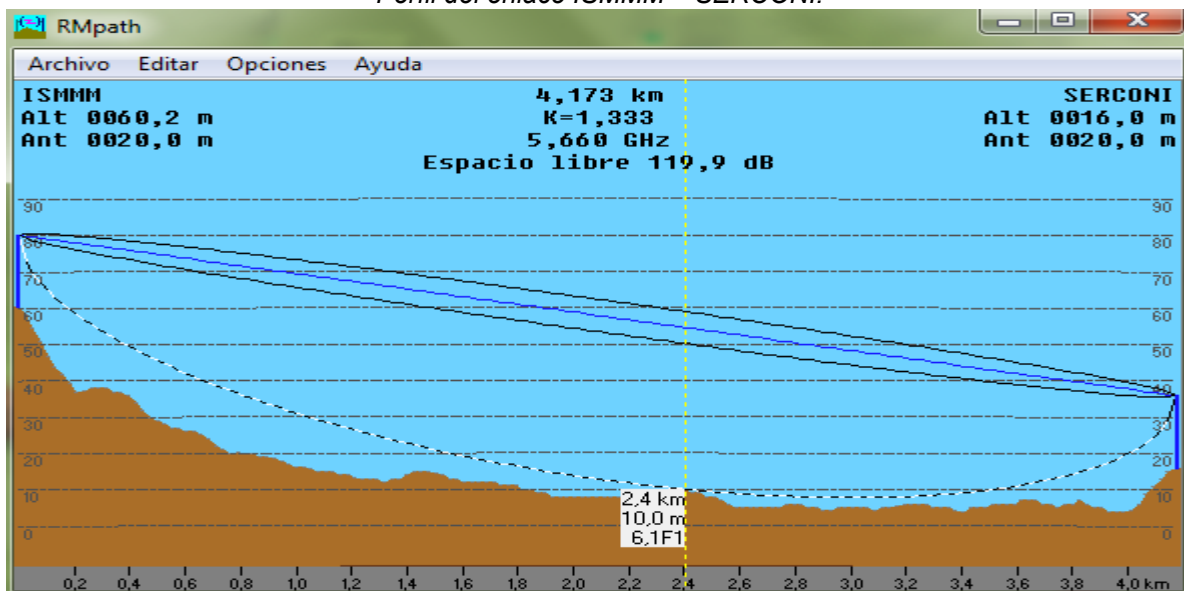
ANEXOS

Resultados de las simulaciones de los enlaces con *Radio Mobile* tomando el punto de acceso del ISMMM.

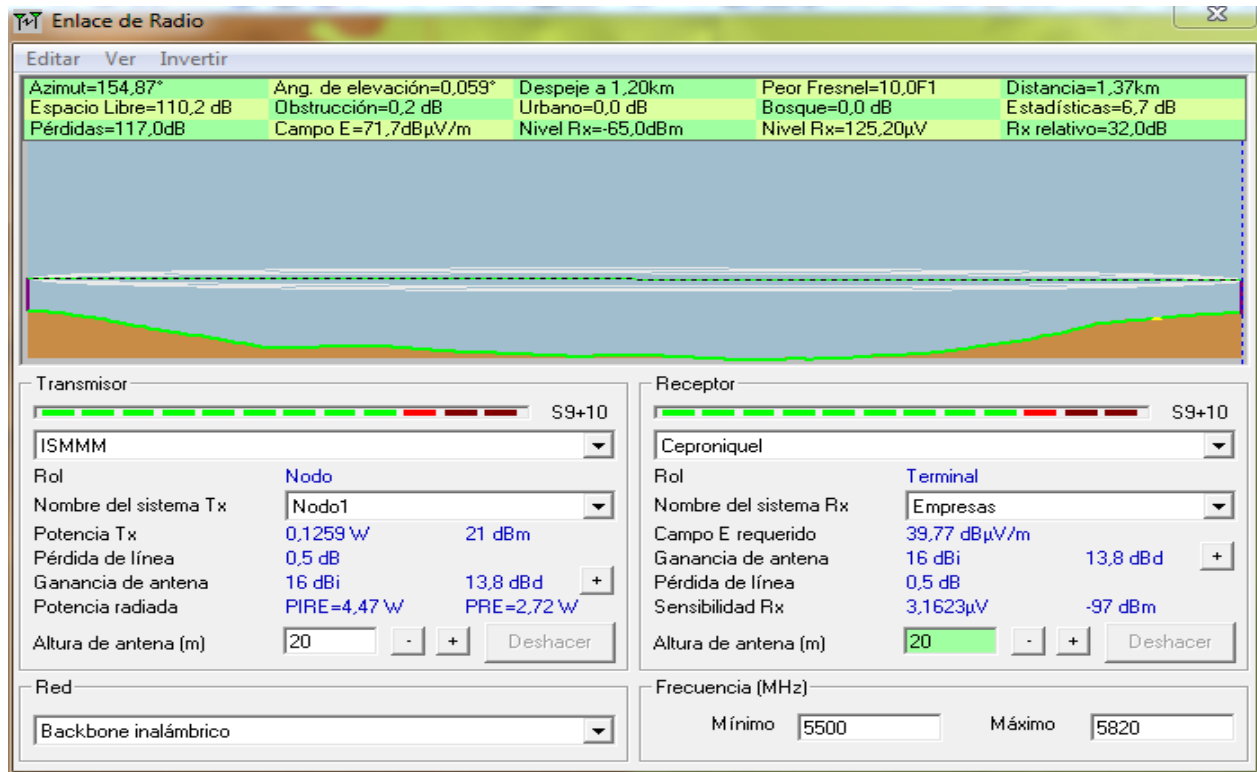
Anexo1: Perfiles del *backbone* inalámbrico.



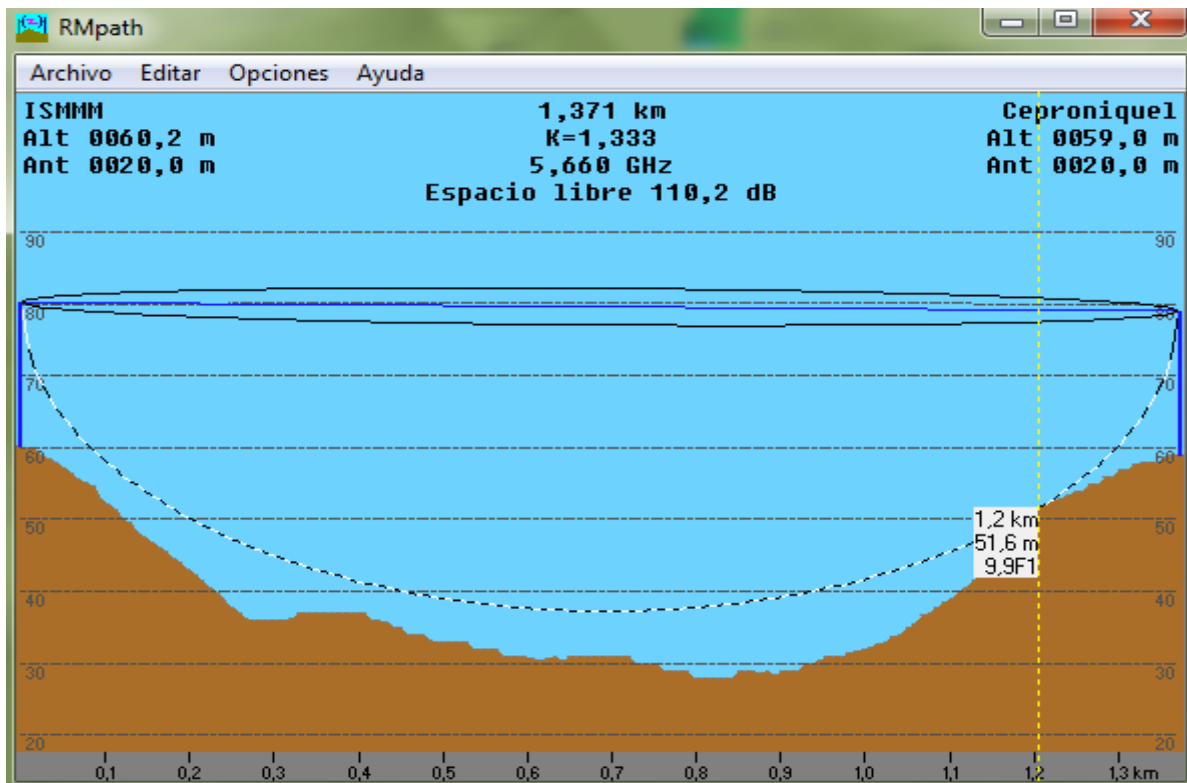
Perfil del enlace ISMMM – SERCONI.



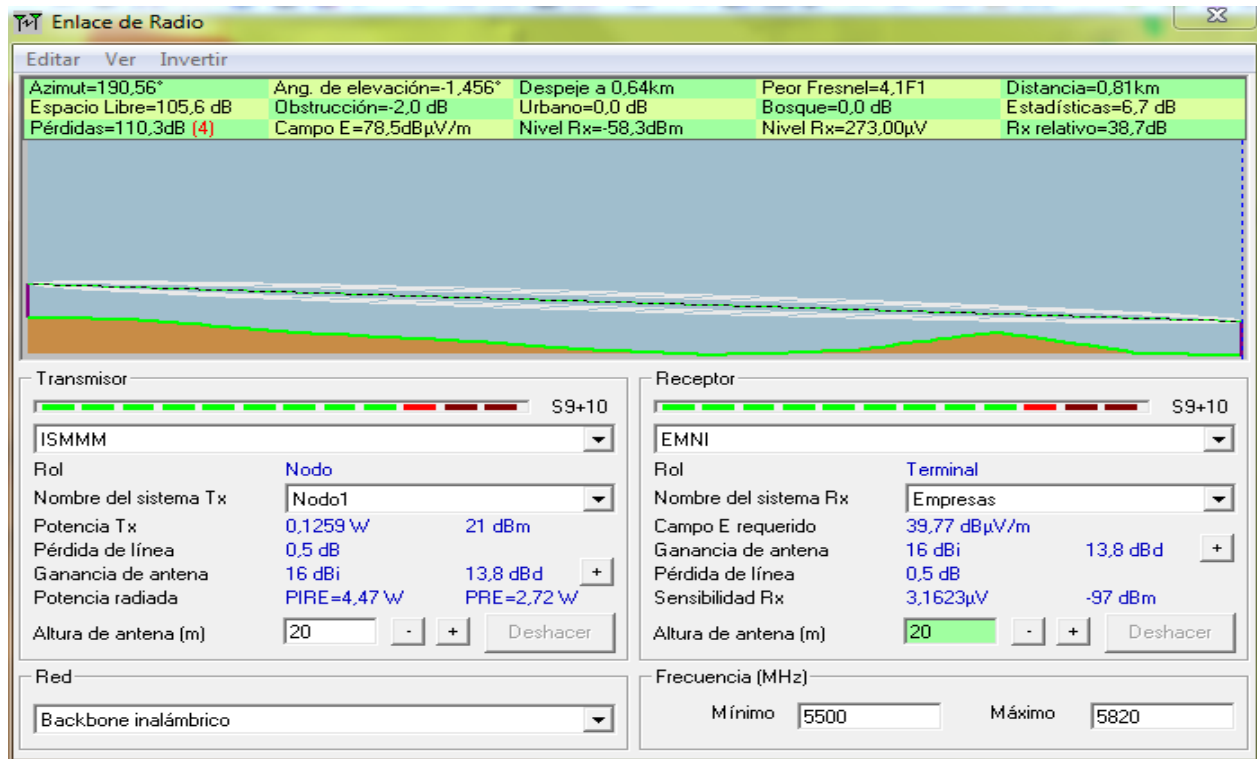
Perfil del enlace ISMMM– SERCONI en RmPath.



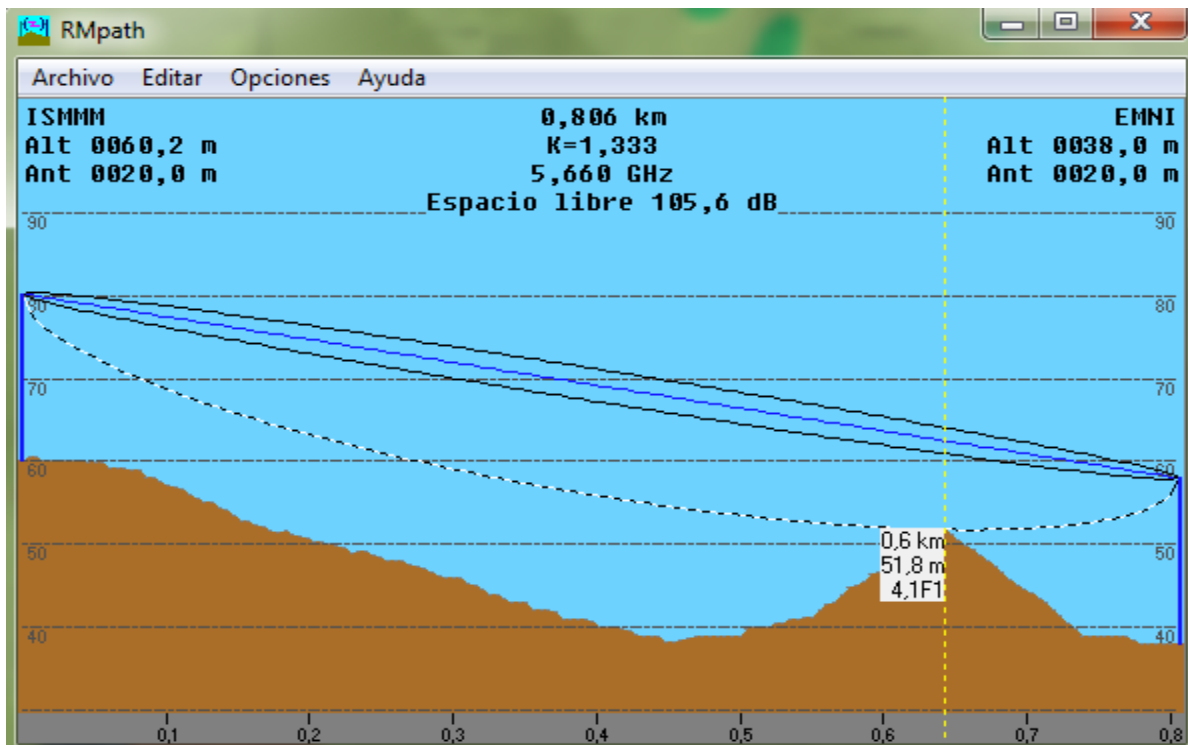
Perfil del enlace ISMMM – Ceproniquel.



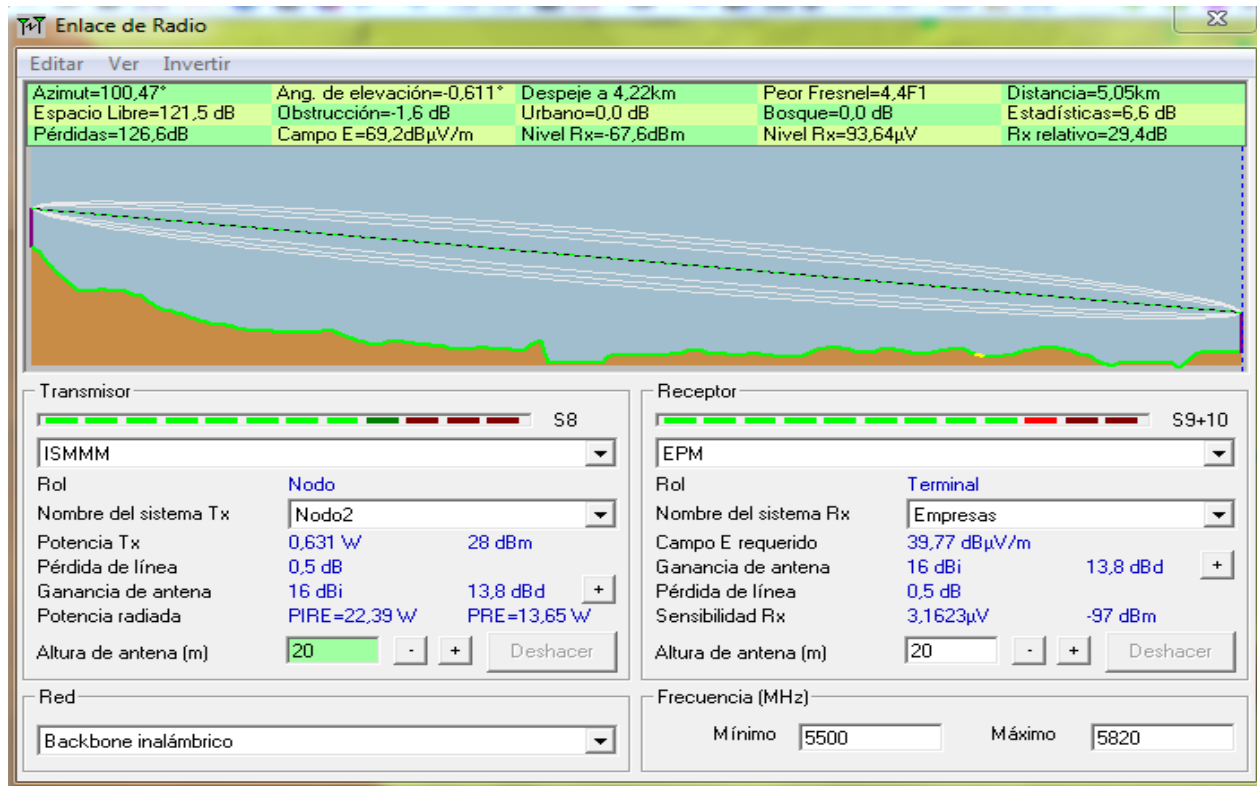
Perfil del enlace ISMMM – Ceproniquel en RmPath.



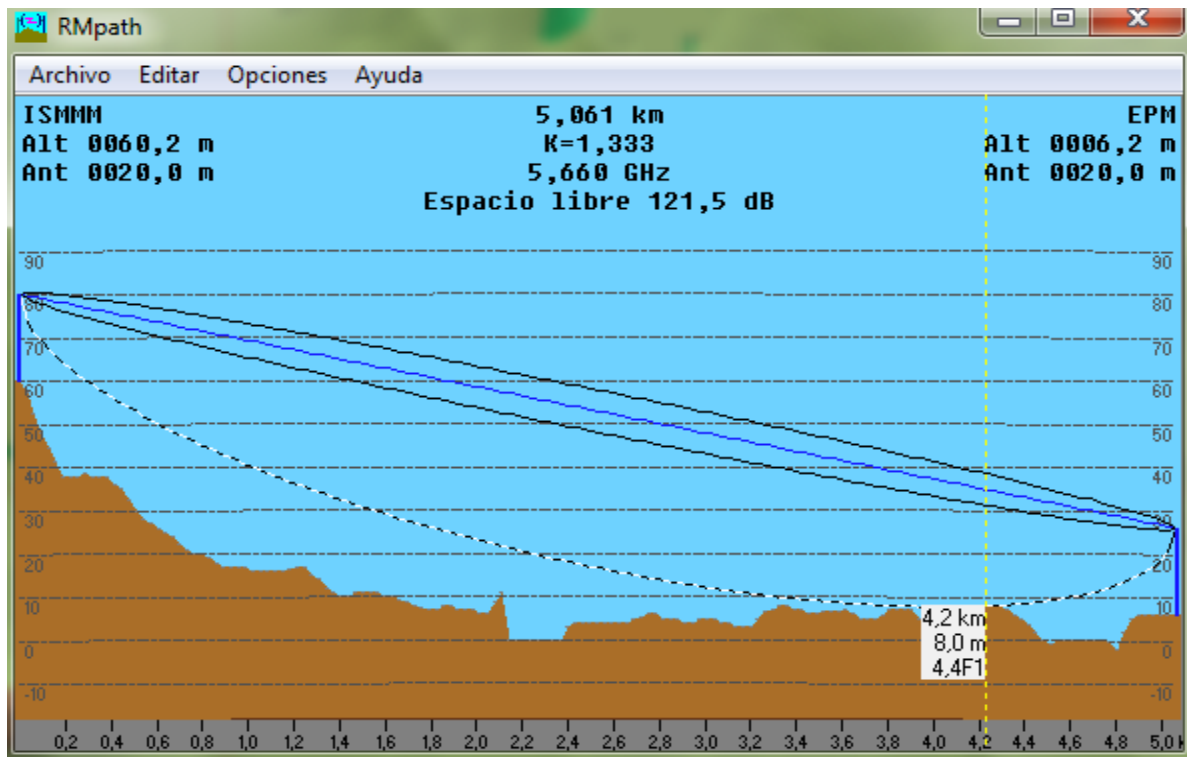
Perfil del enlace ISMMM – EMNI.



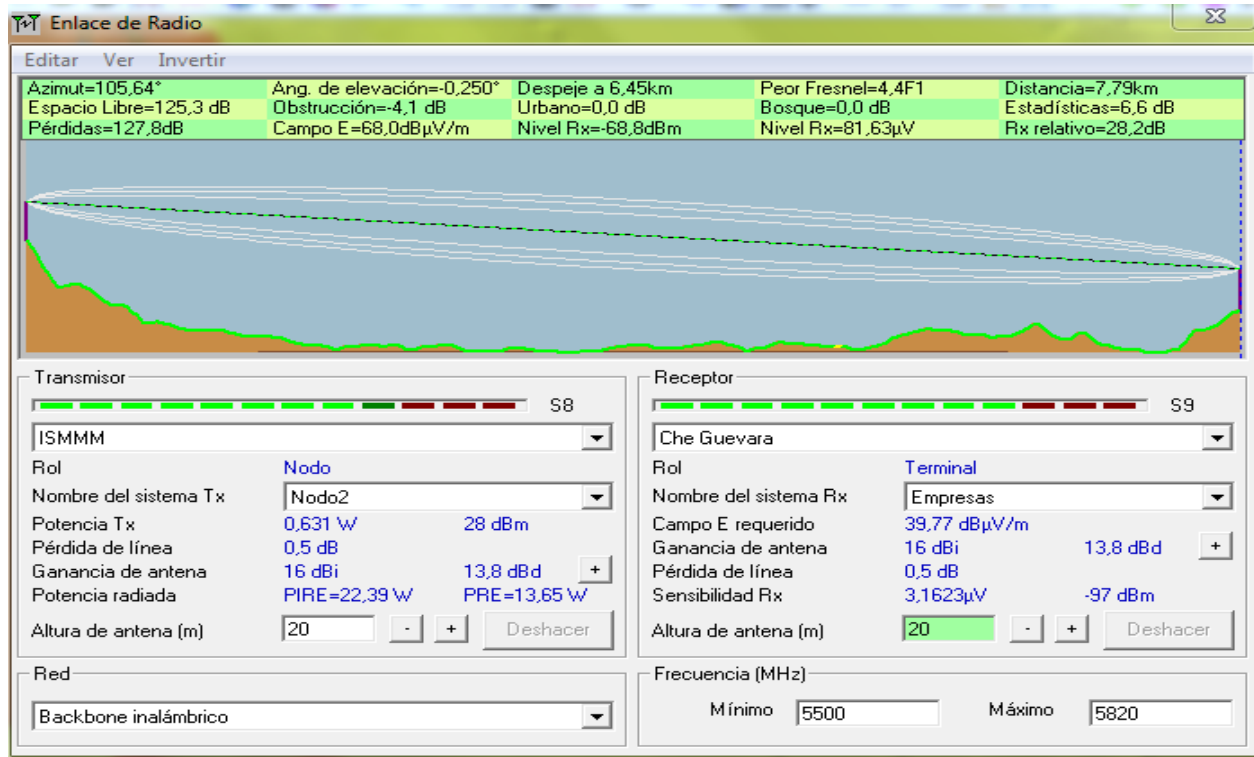
Perfil del enlace ISMMM - EMNI en RmPath.



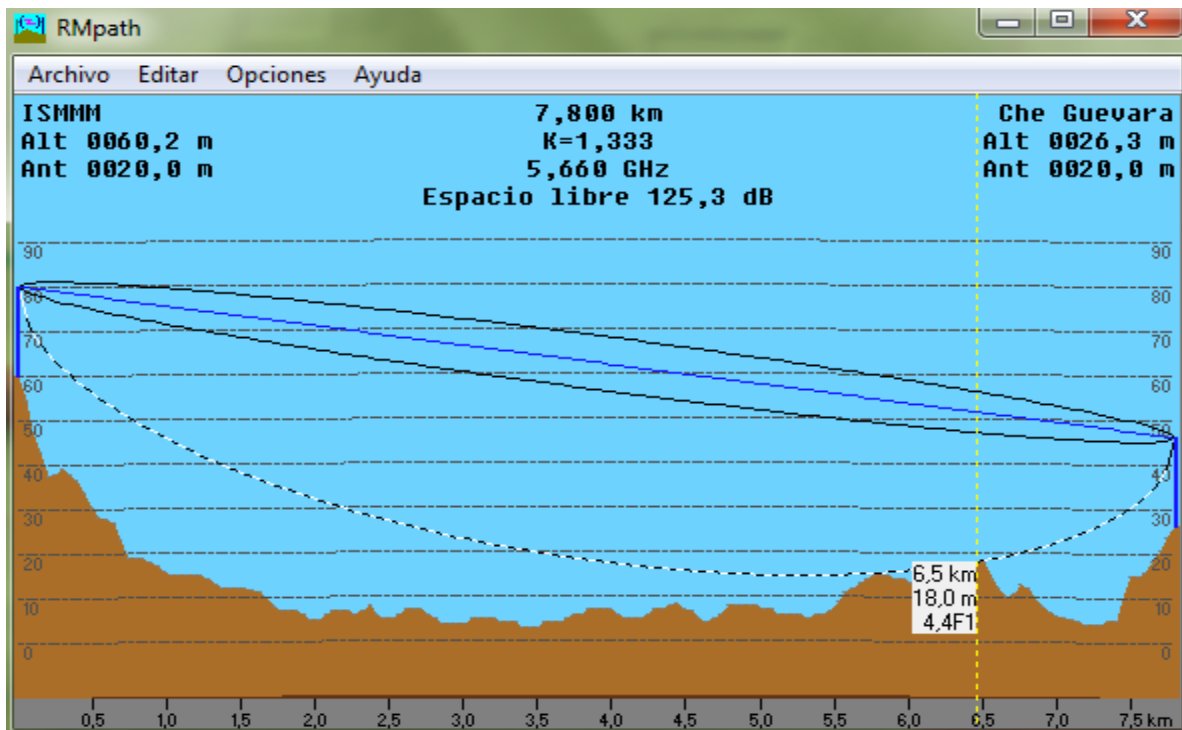
Perfil del enlace ISMMM – EPM.



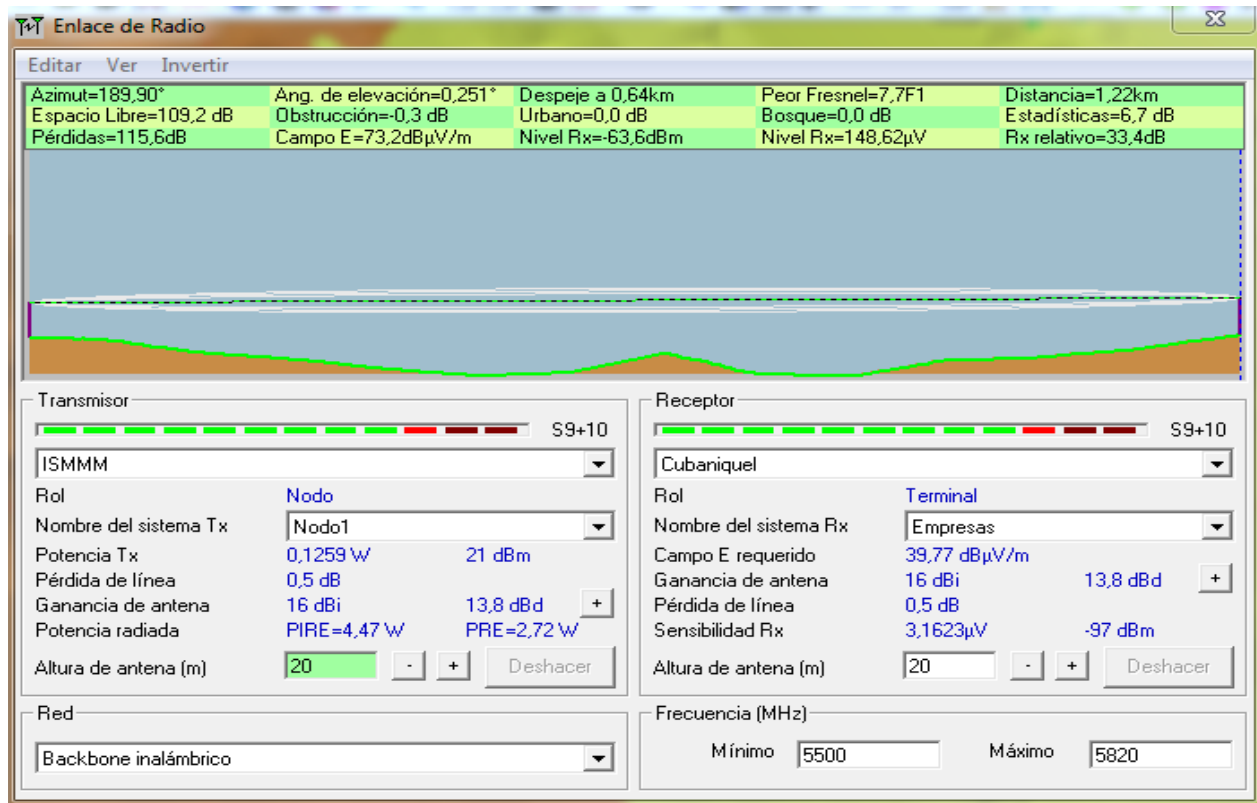
Perfil del enlace ISMMM – EPM en RmPath.



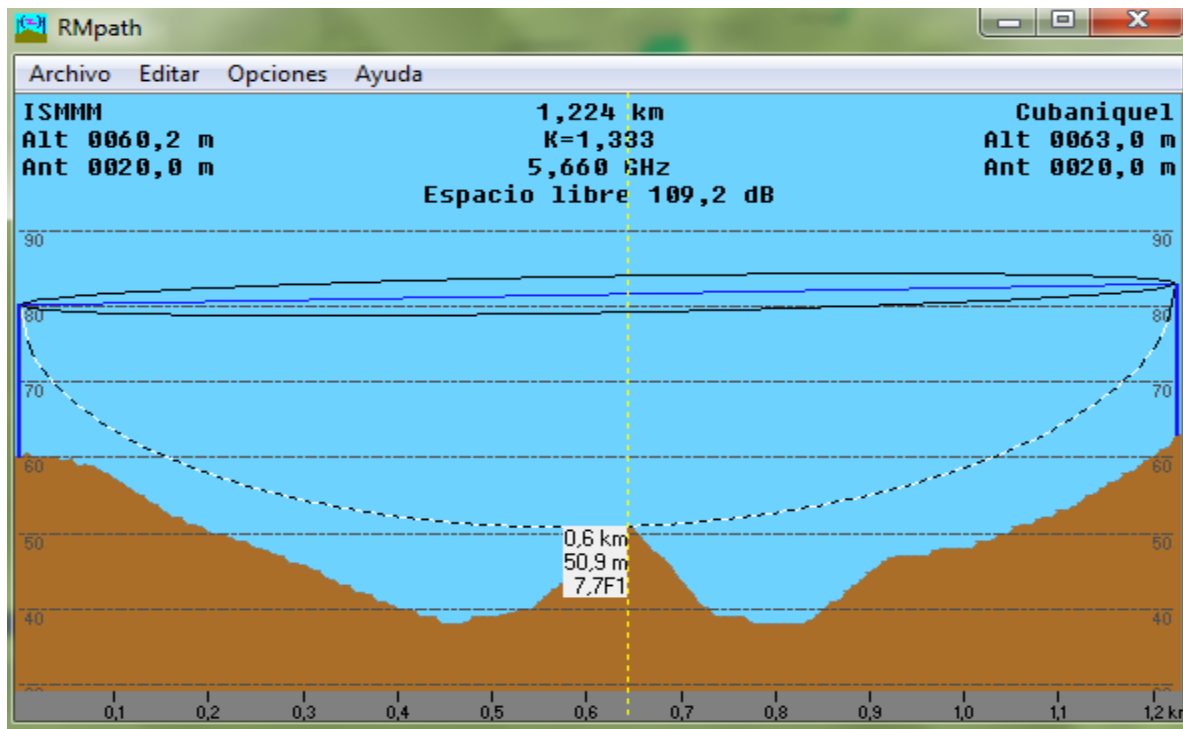
Perfil del enlace ISMMM – ECG.



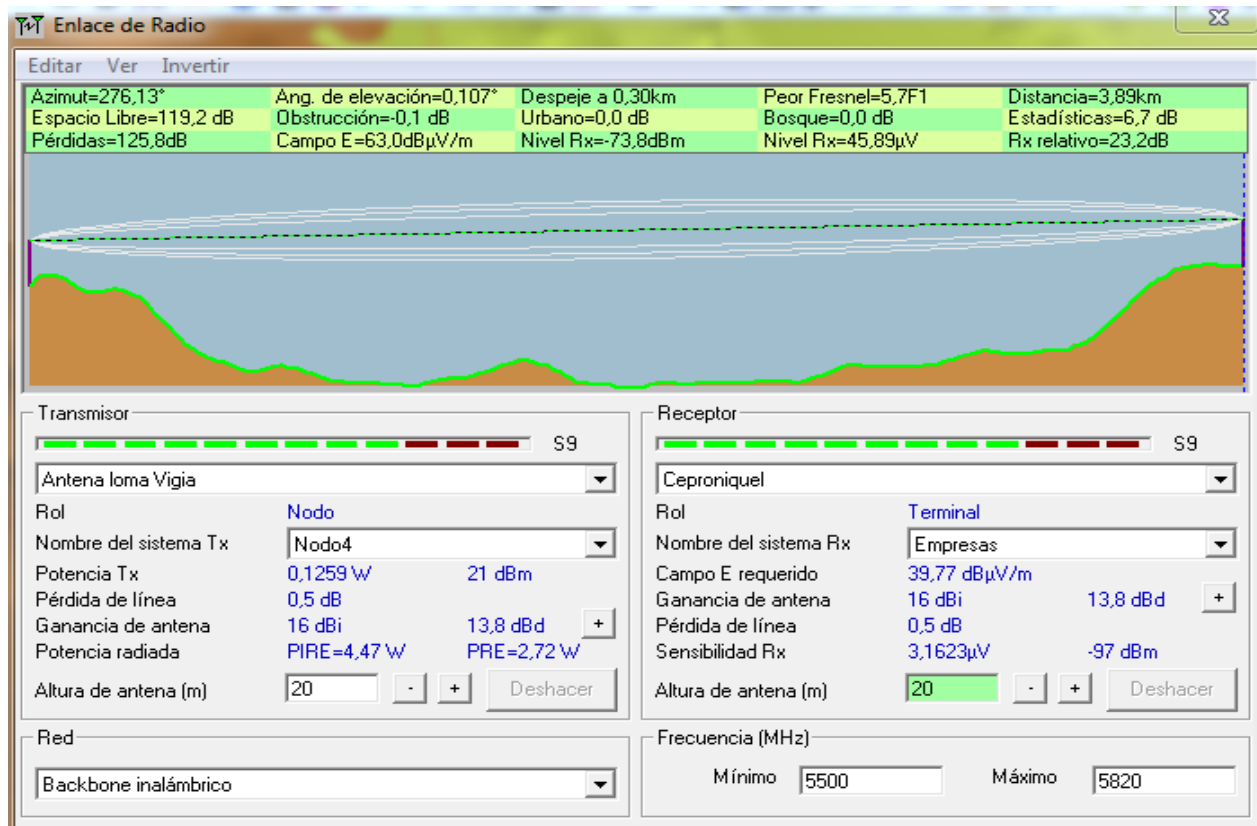
Perfil del enlace ISMMM – ECG en RmPath.



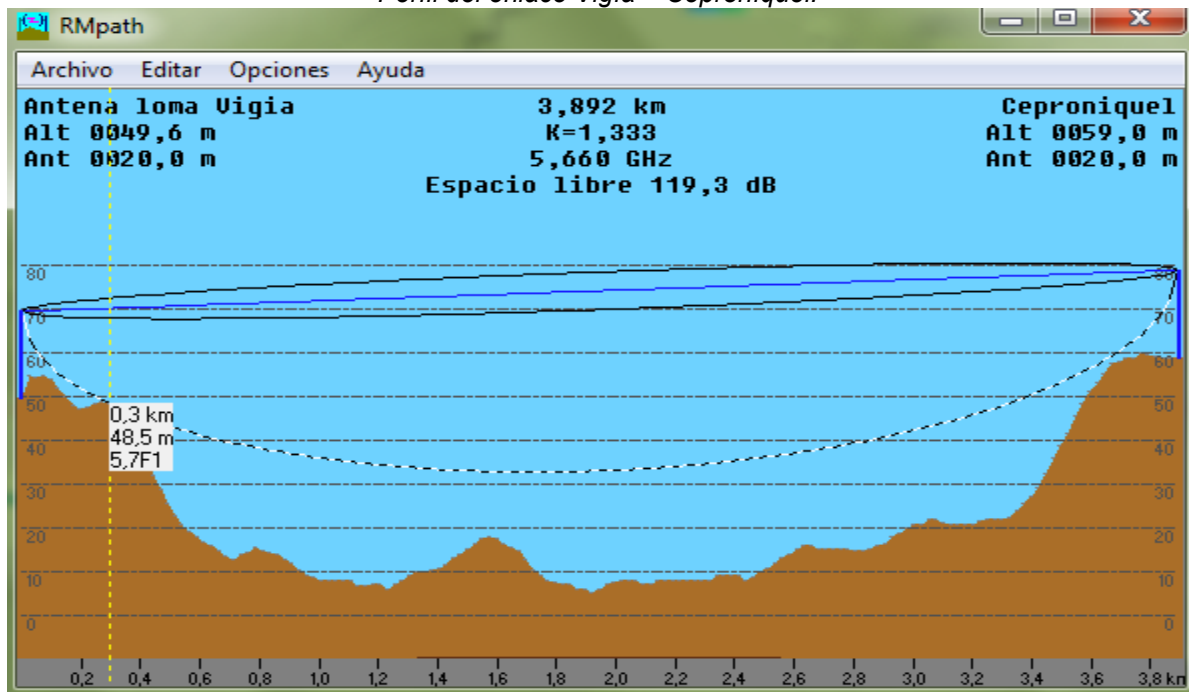
Perfil del enlace ISMMM – Cubaniquel.



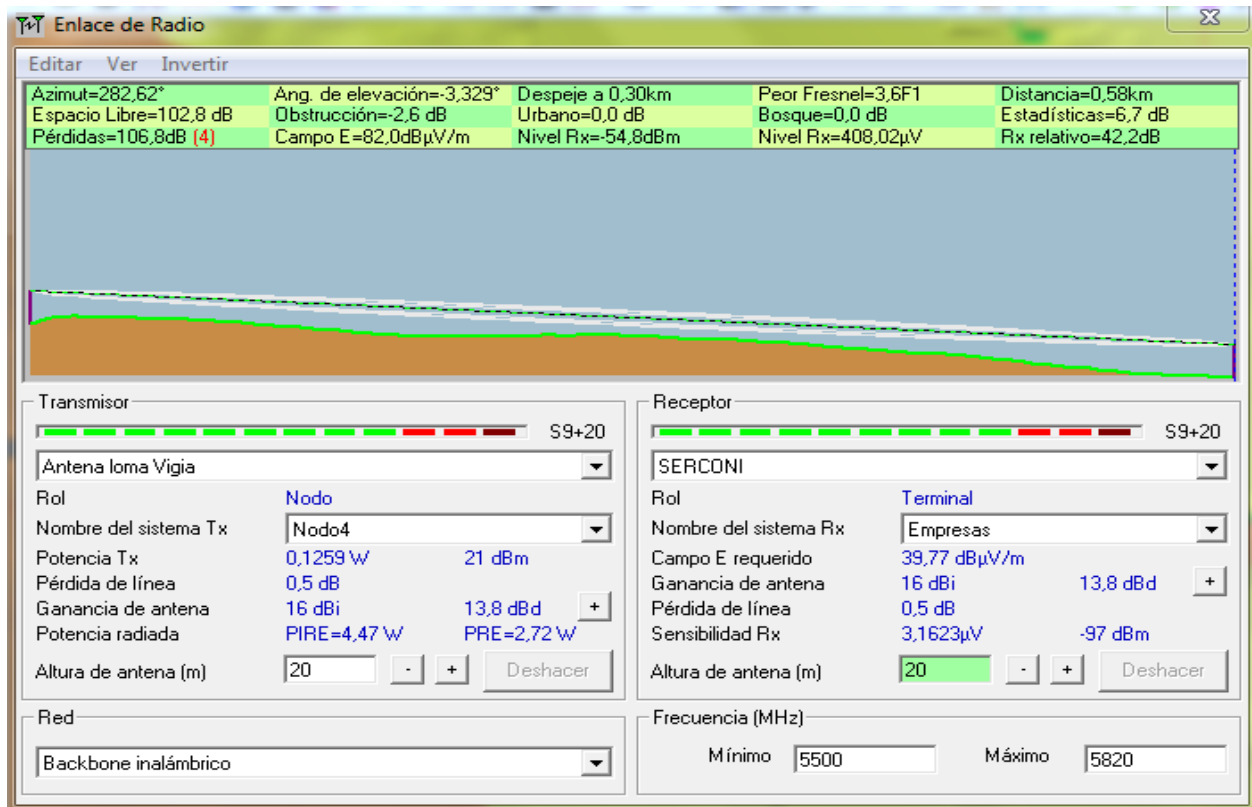
Perfil del enlace ISMMM – Cubaniquel en RmPath.



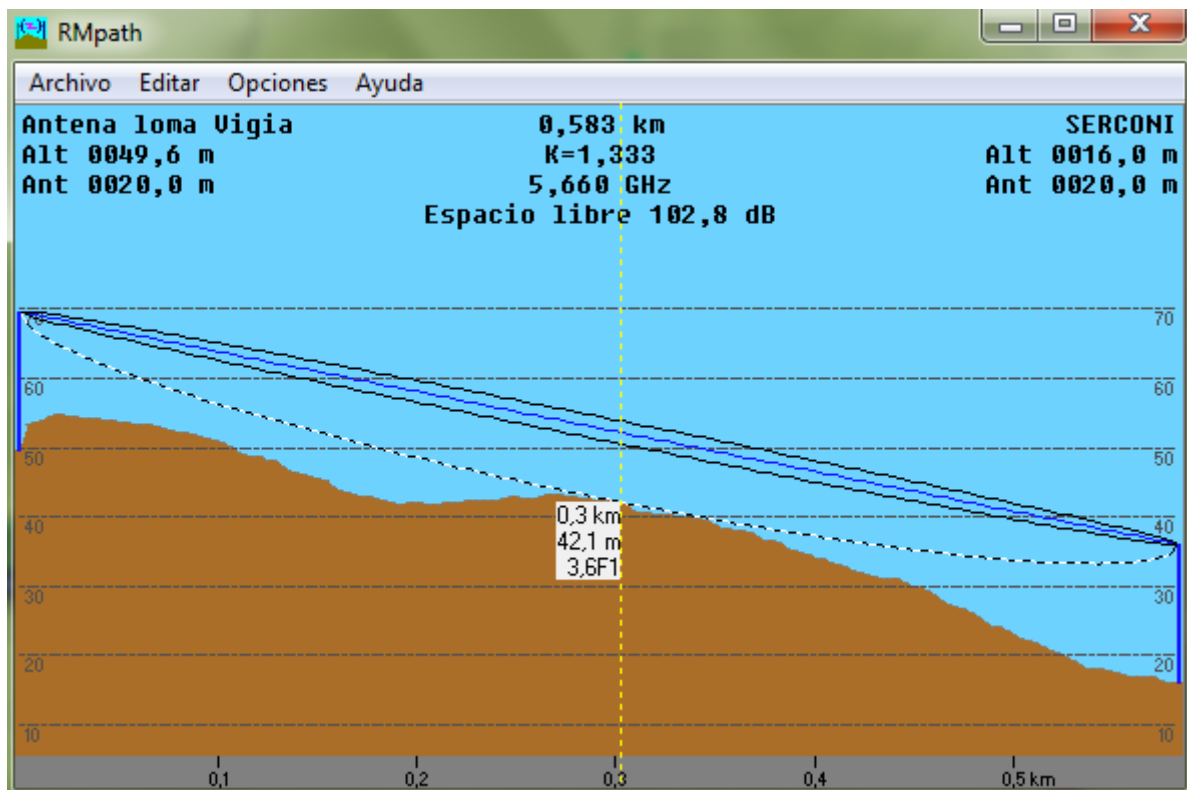
Perfil del enlace Vigía – Ceproniquel.



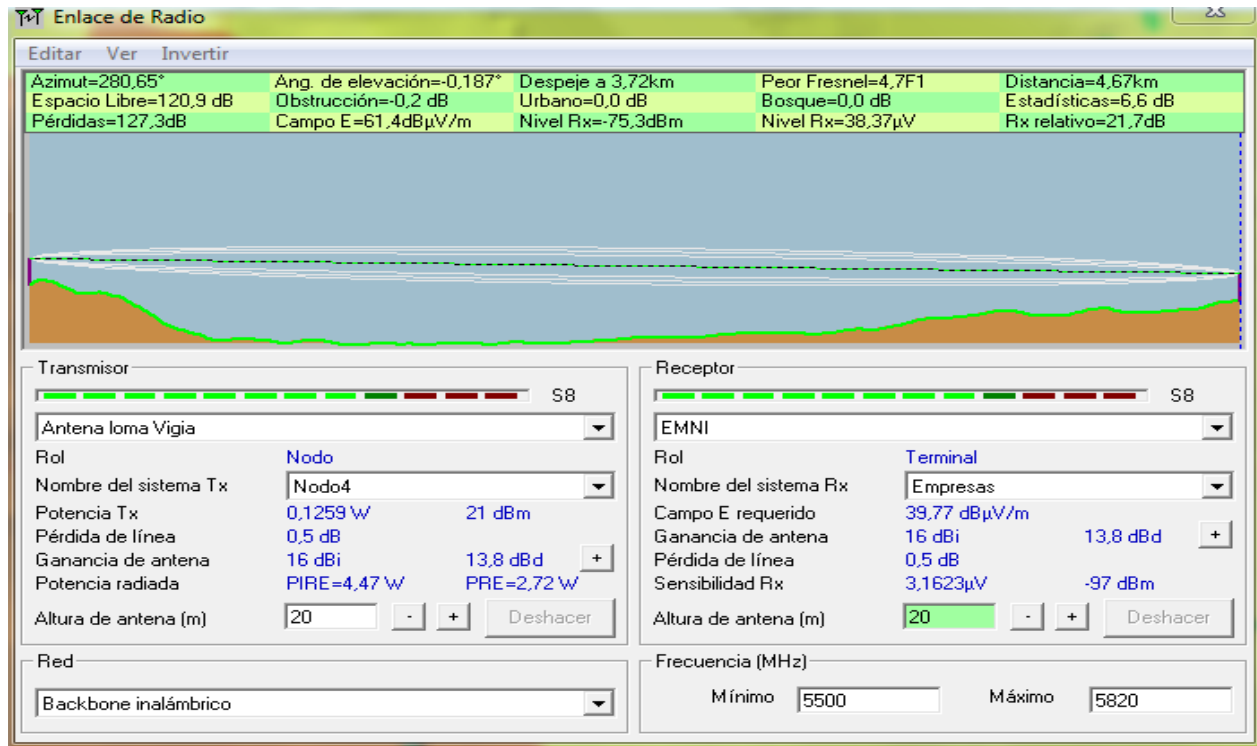
Perfil del enlace Vigía – Ceproniquel en RmPath.



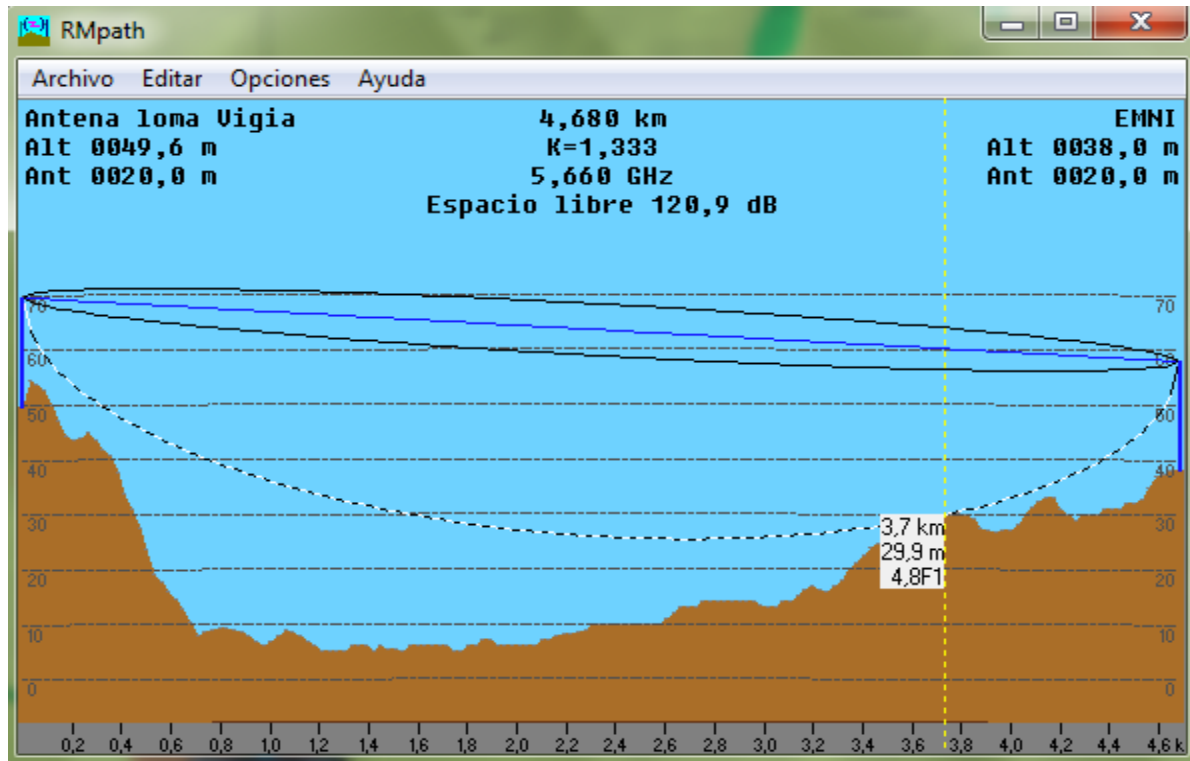
Perfil del enlace Vigia – SERCONI.



Perfil del enlace Vigía – SERCONI en RmPath.

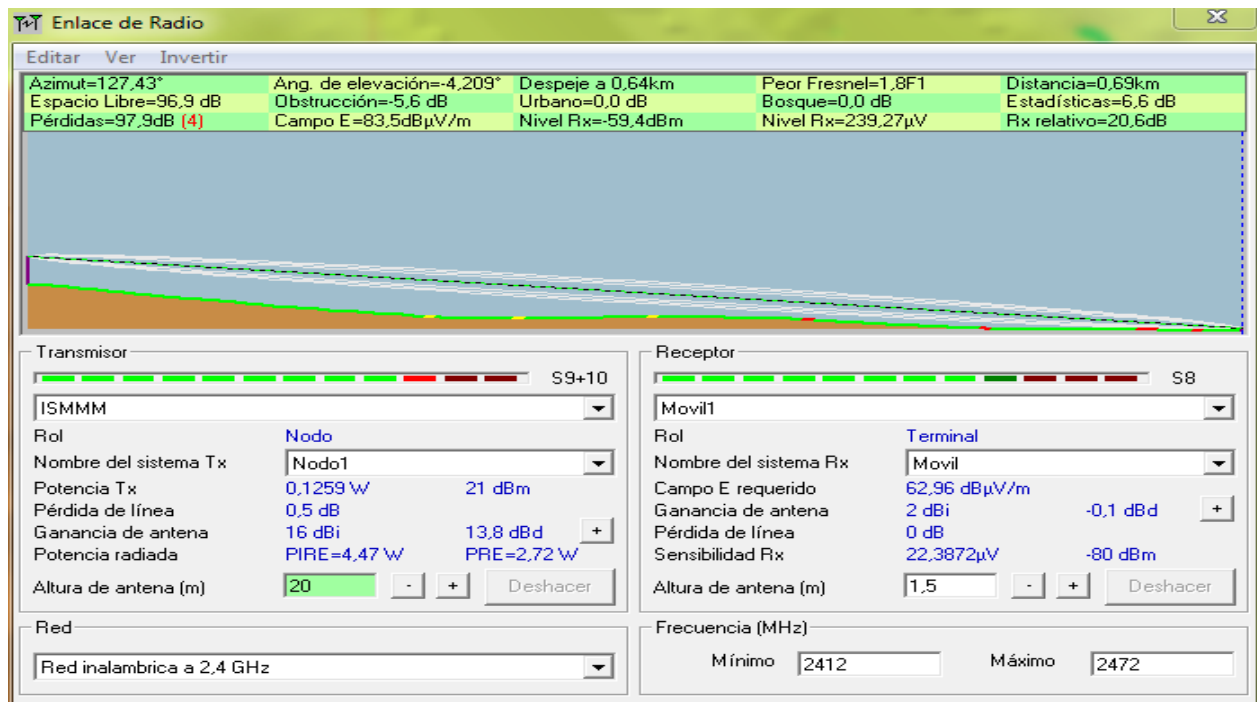


Perfil del enlace Vigía –EMNI.

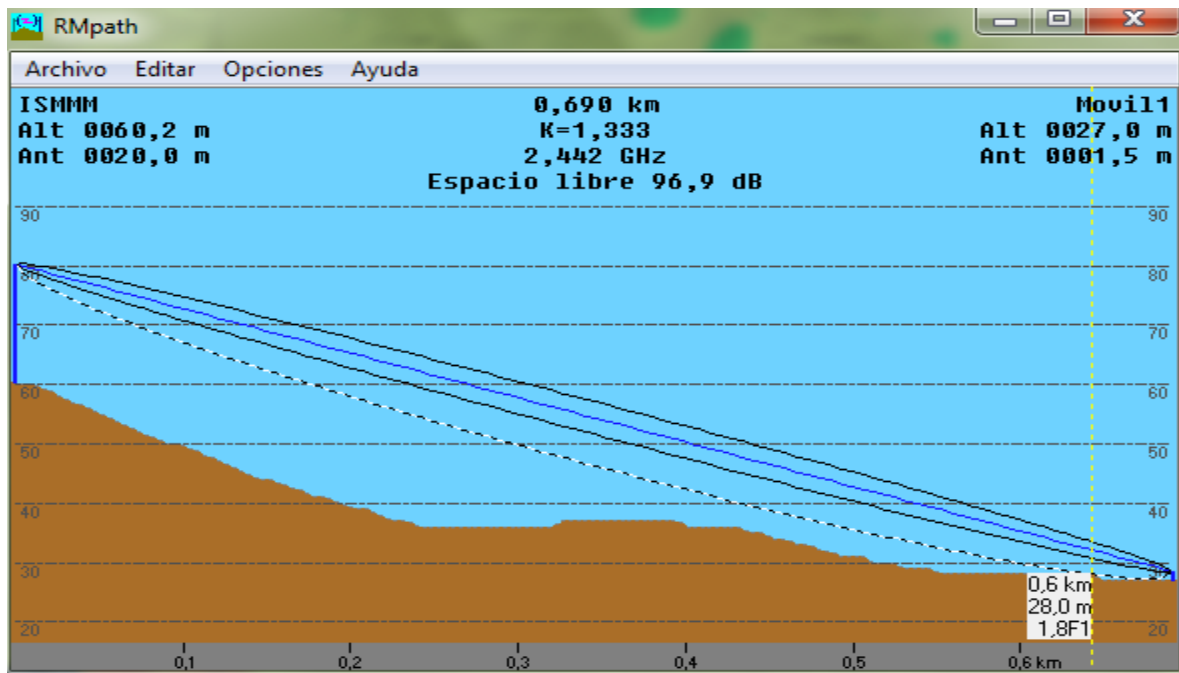


Perfil del enlace Vigía – EMNI en RmPath.

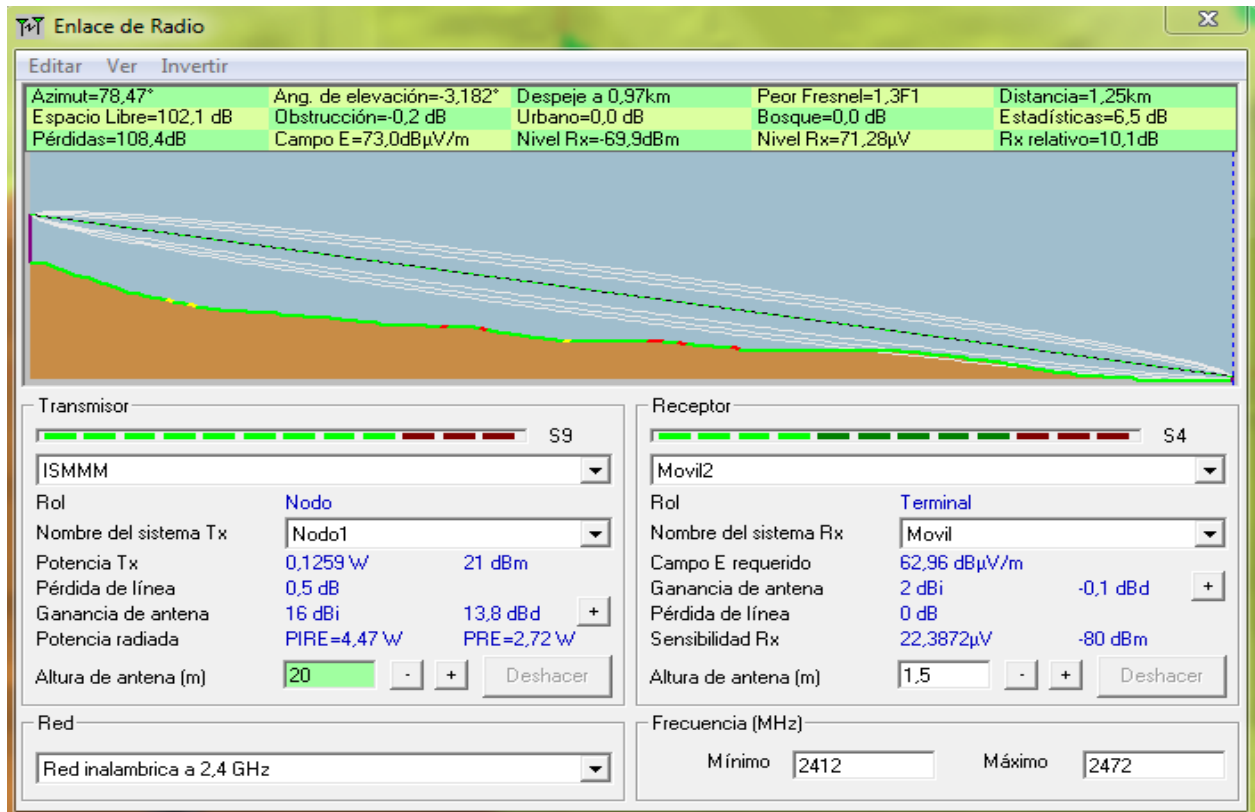
Anexo2: Perfiles de la red para usuarios móviles.



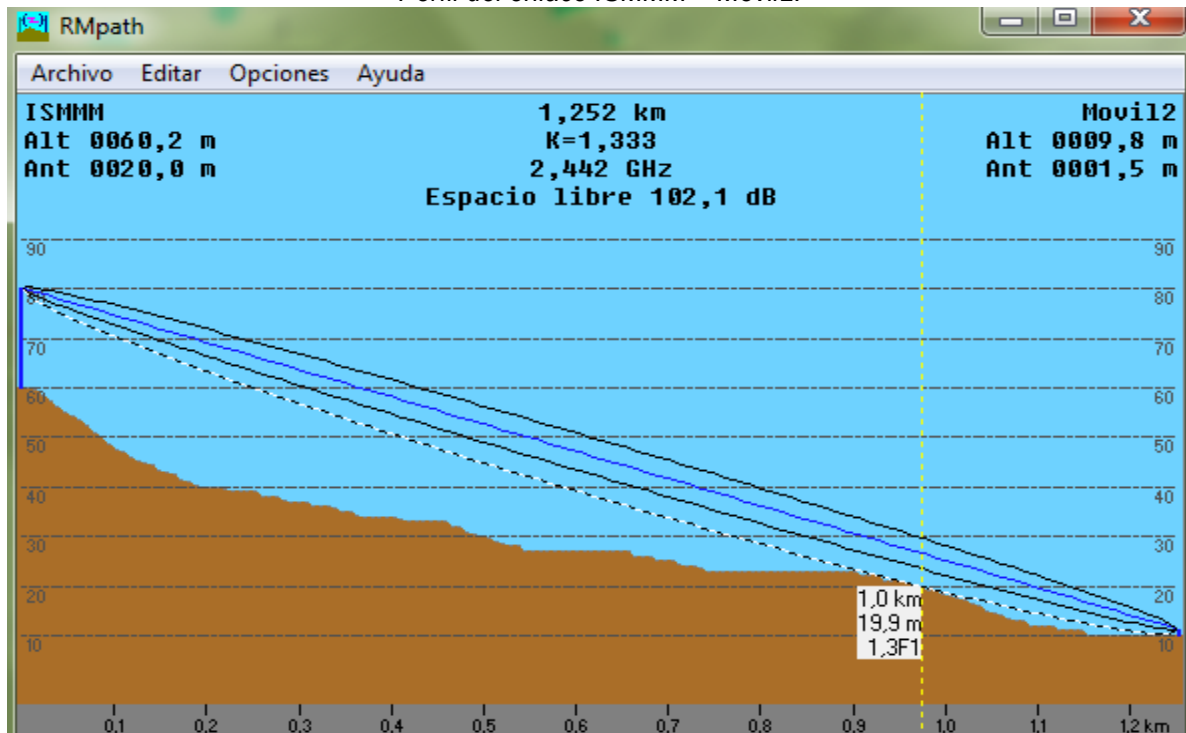
Perfil del enlace ISMMM – Móvil1.



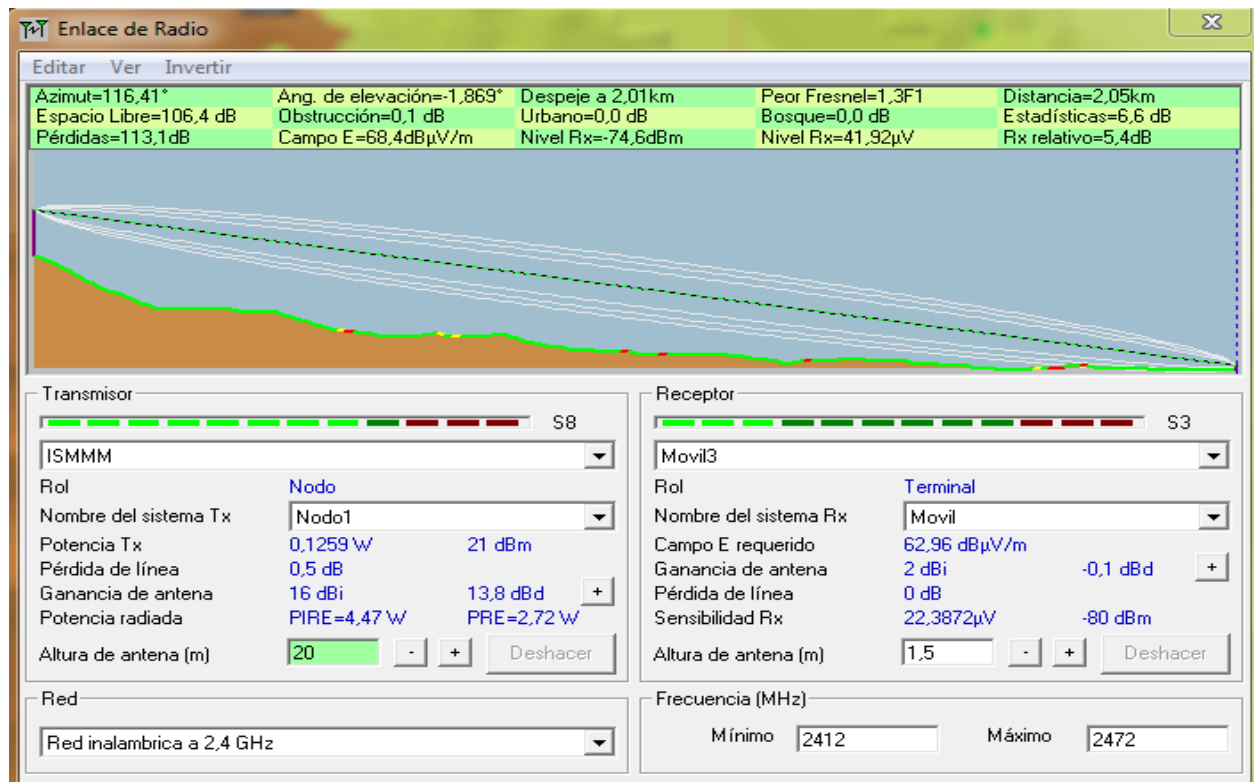
Perfil del enlace ISMMM – Móvil1 en RmPath.



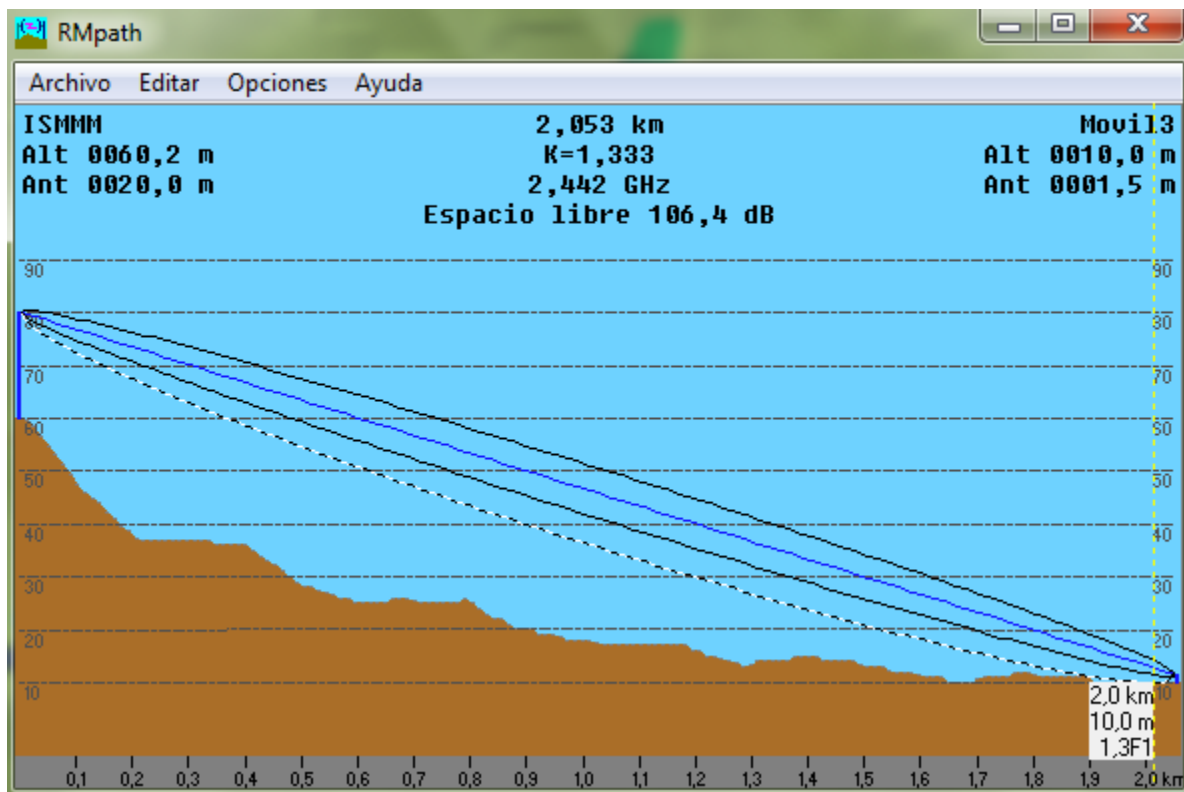
Perfil del enlace ISMMM – Móvil2.



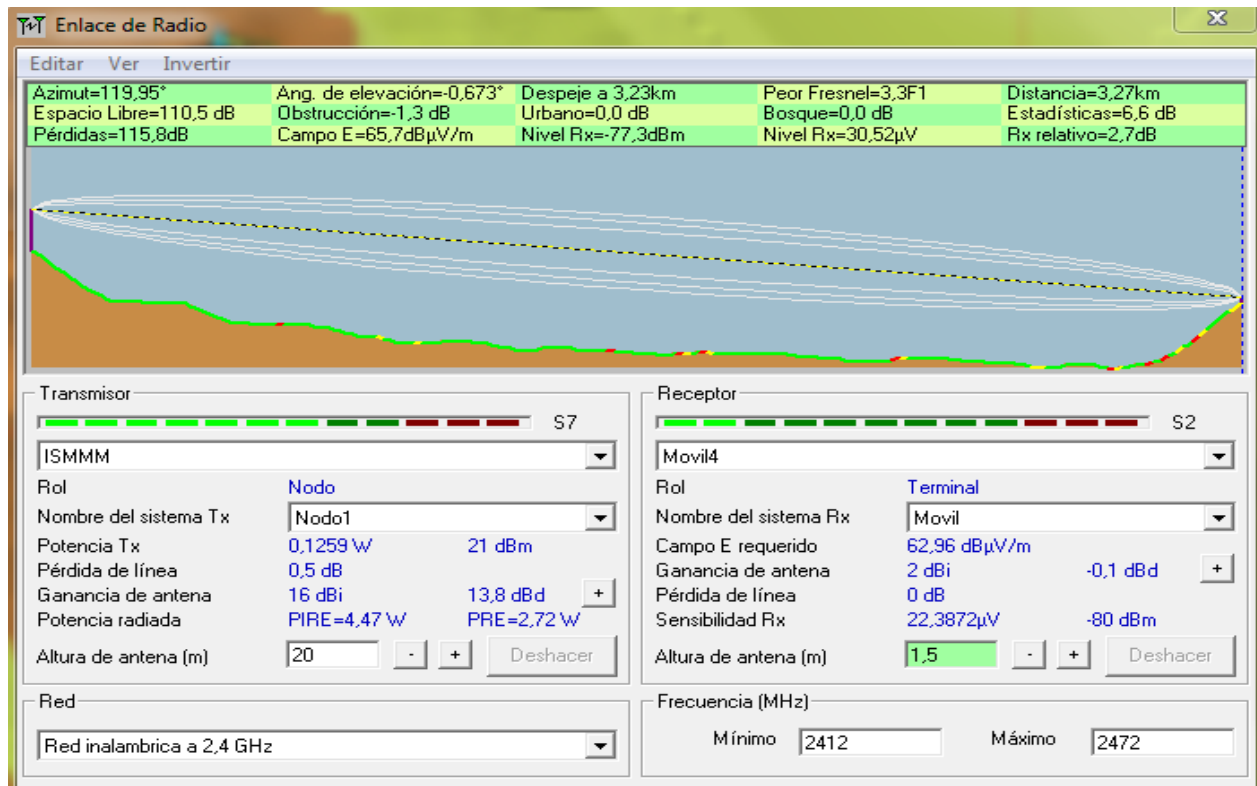
Perfil del enlace ISMMM – Móvil2 en RmPath.



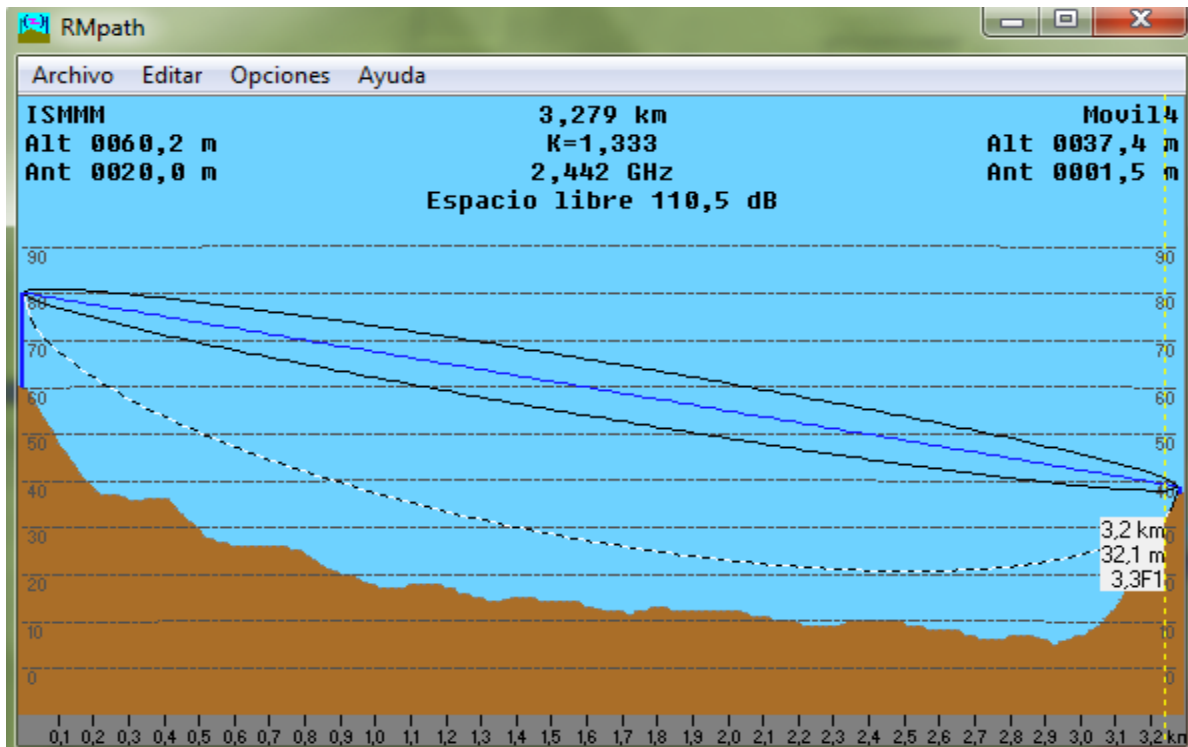
Perfil del enlace ISMMM – Móvil3.



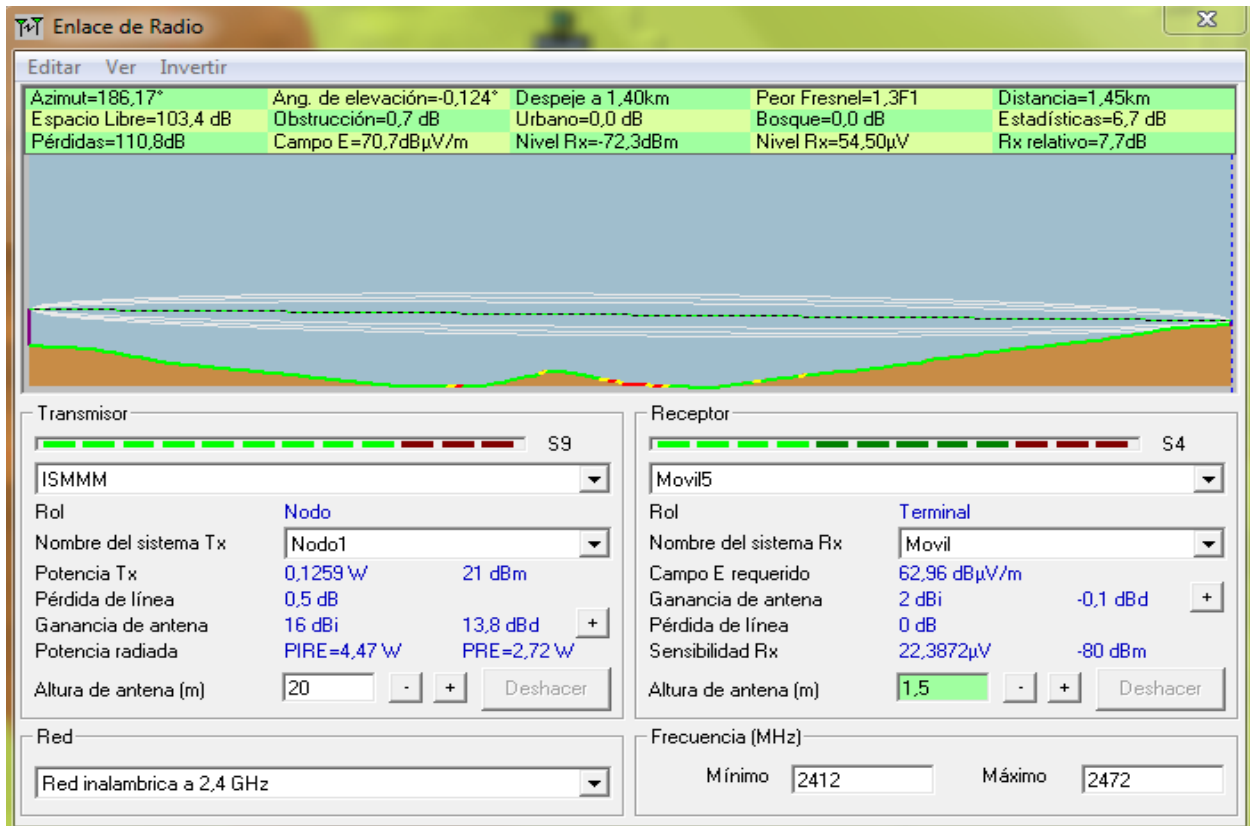
Perfil del enlace ISMMM – Móvil3 en RmPath.



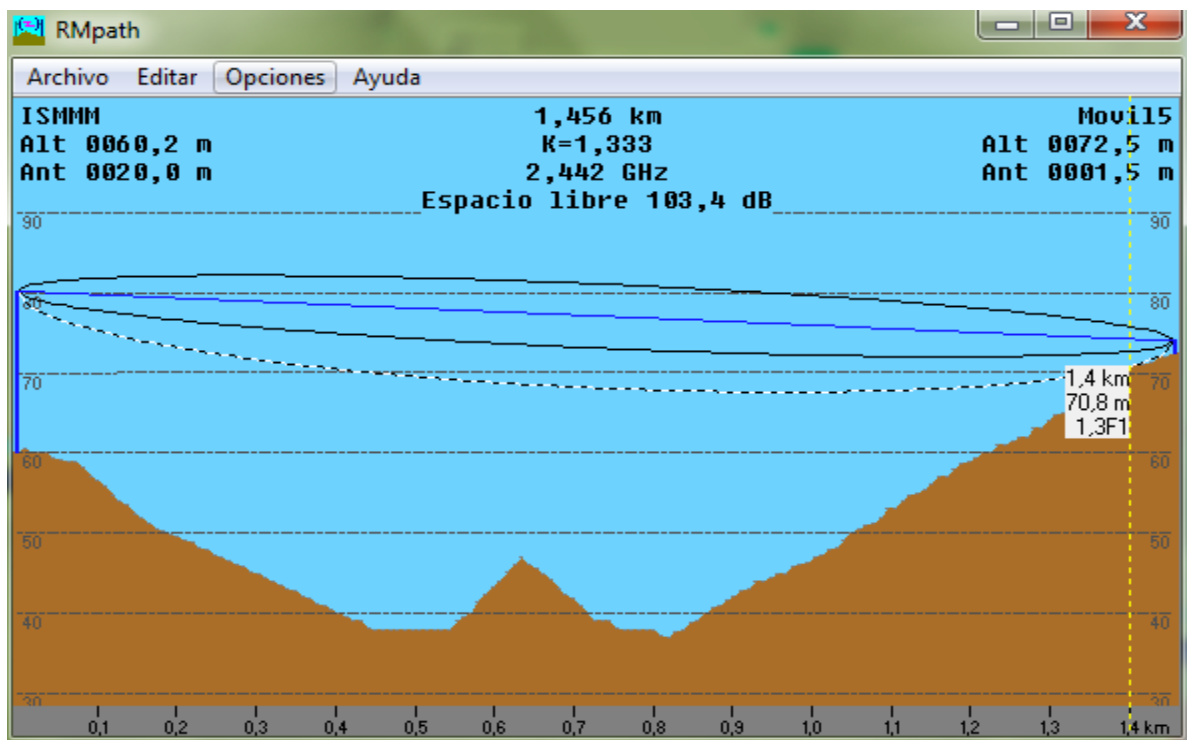
Perfil del enlace ISMMM – Móvil4.



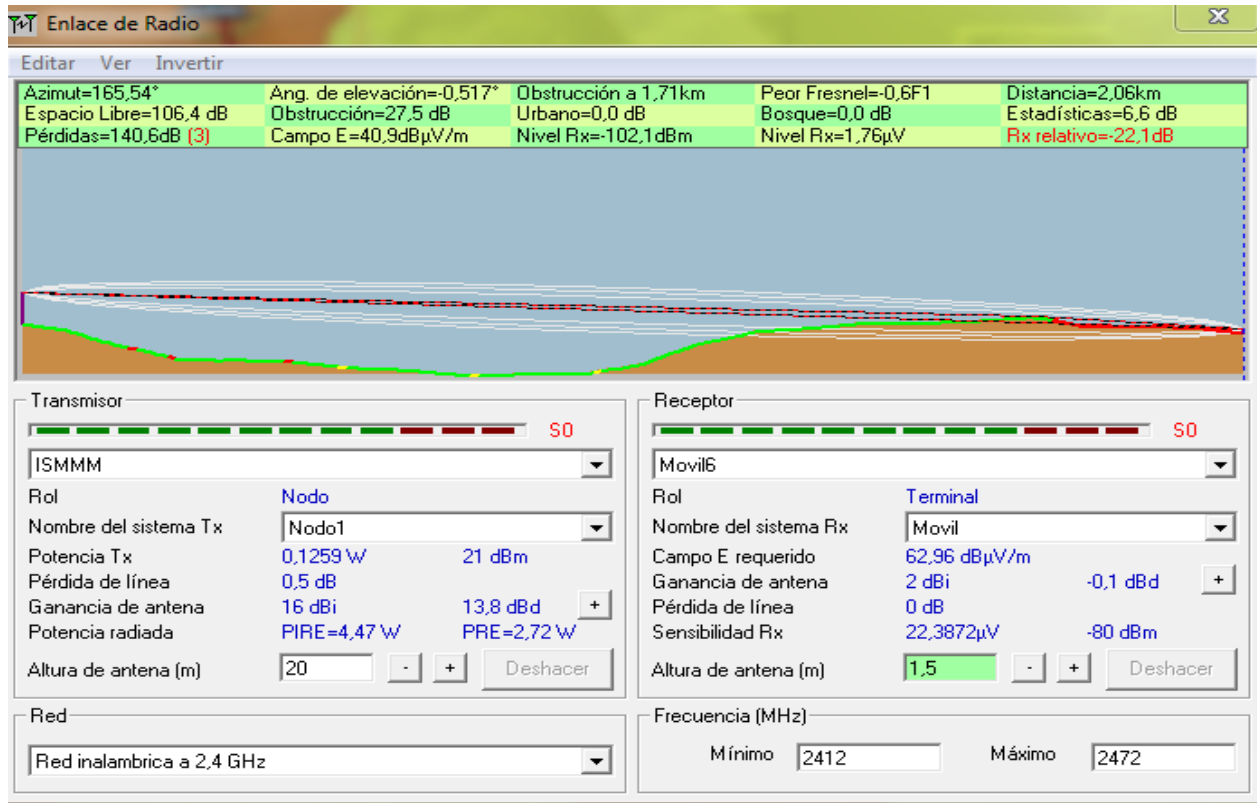
Perfil del enlace ISMMM – Móvil4 en RmPath.



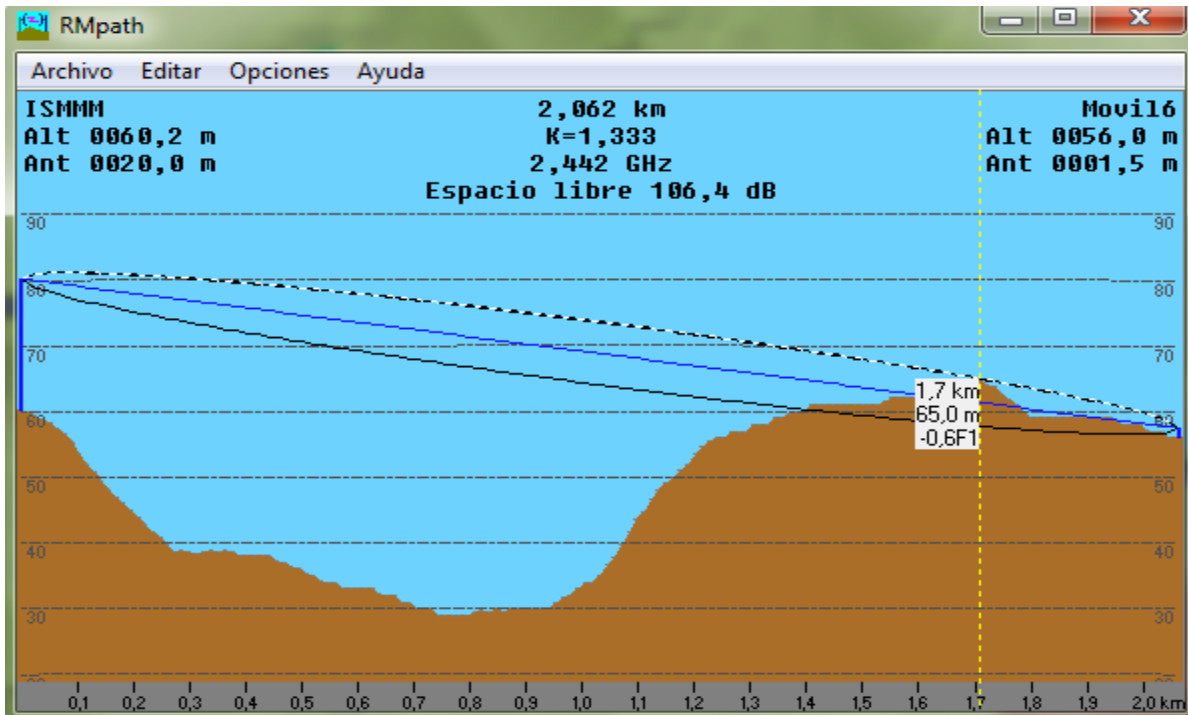
Perfil del enlace ISMMM – Móvil5.



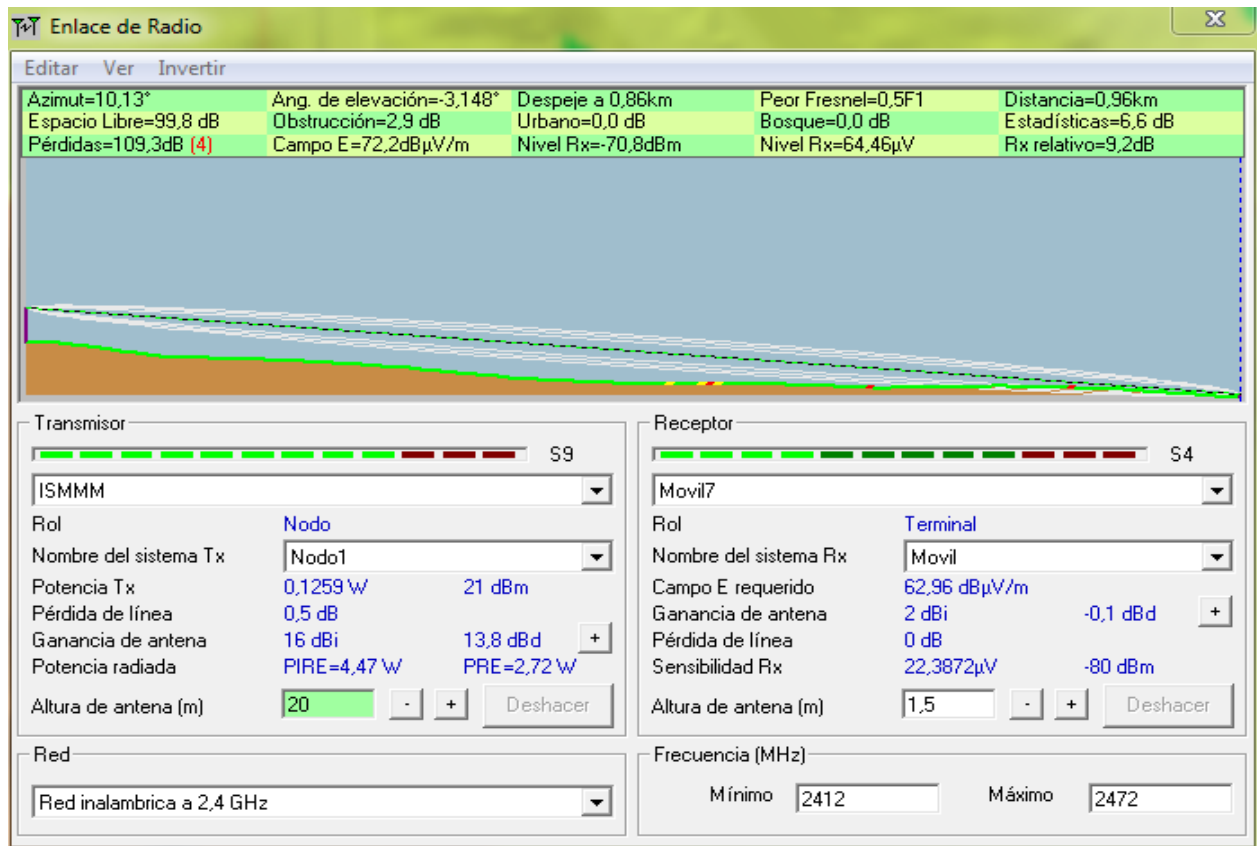
Perfil del enlace ISMMM – Móvil5 en RmPath.



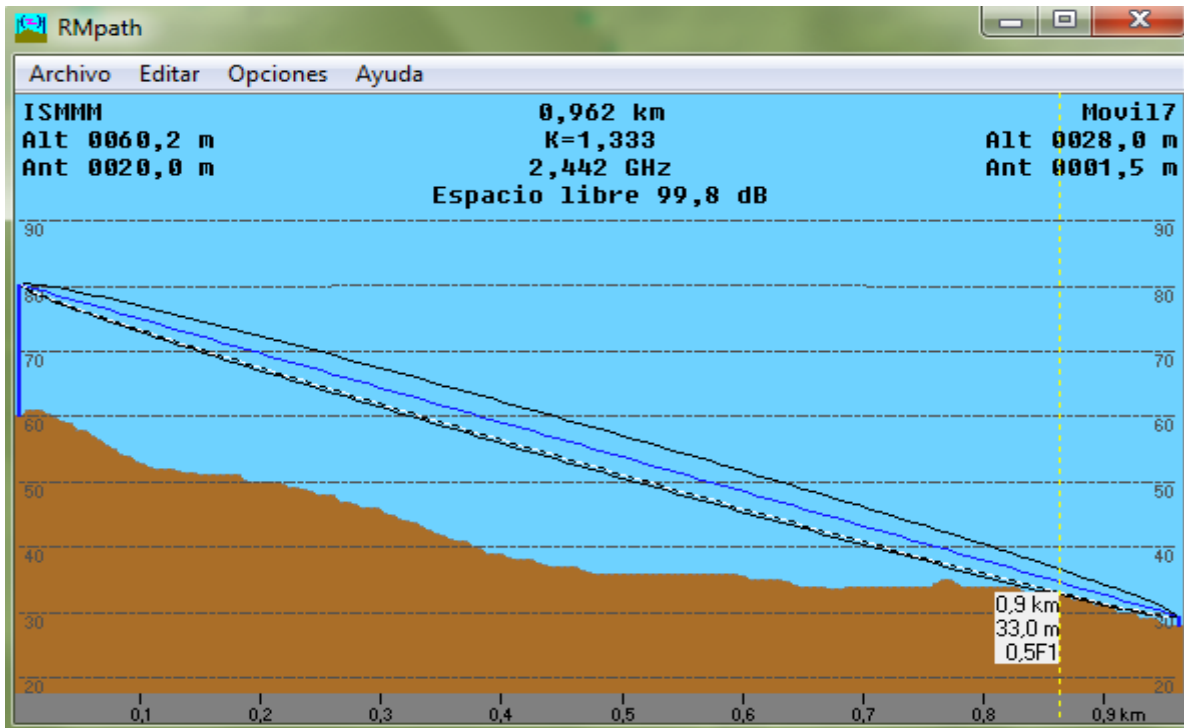
Perfil del enlace ISMMM – Móvil6.



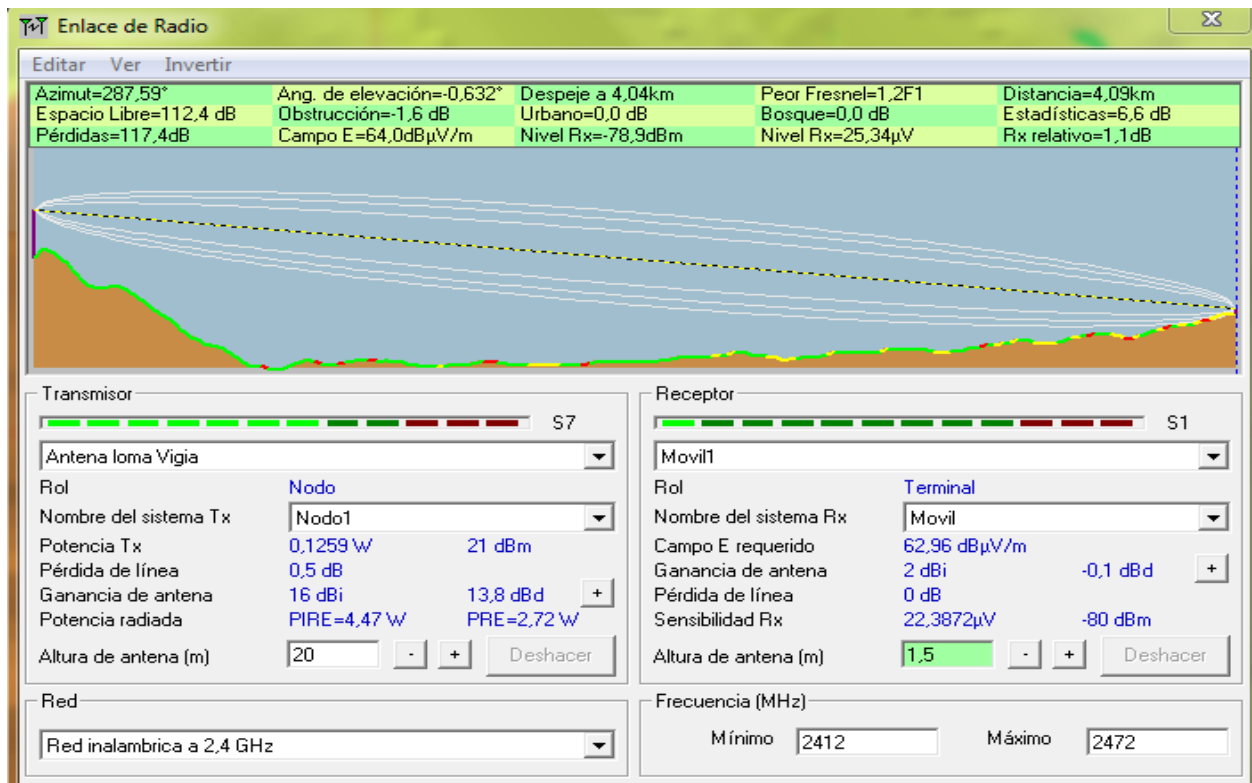
Perfil del enlace ISMMM – Móvil6 en RmPath.



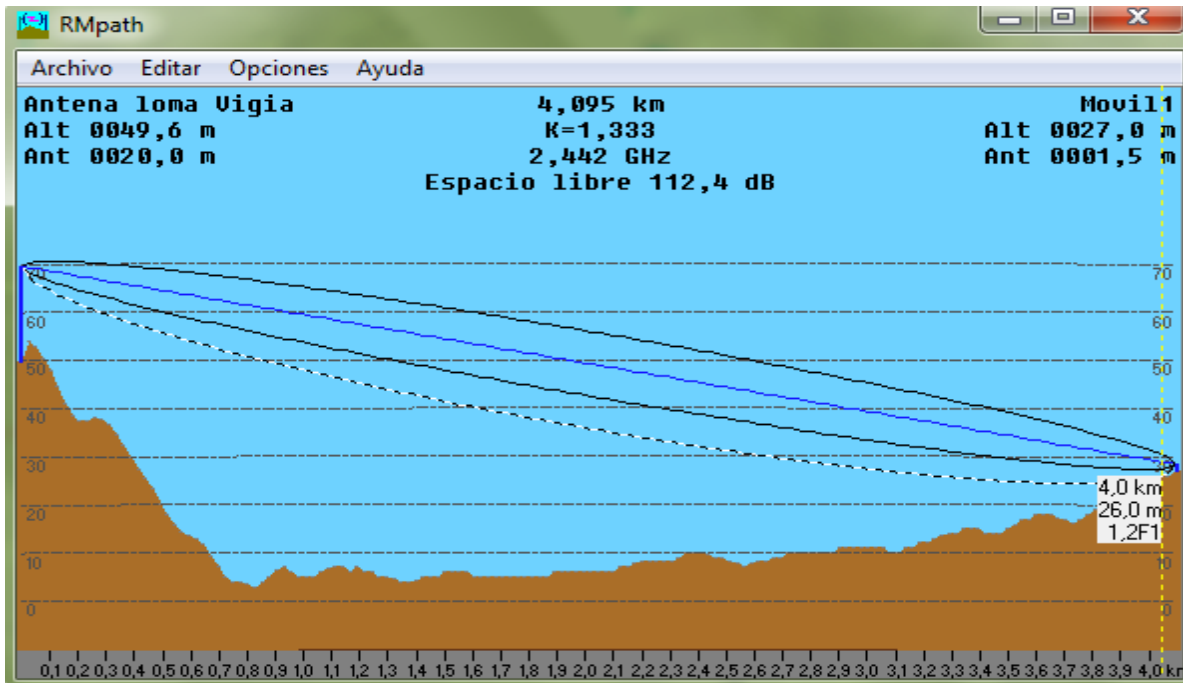
Perfil del enlace ISMMM – Móvil7.



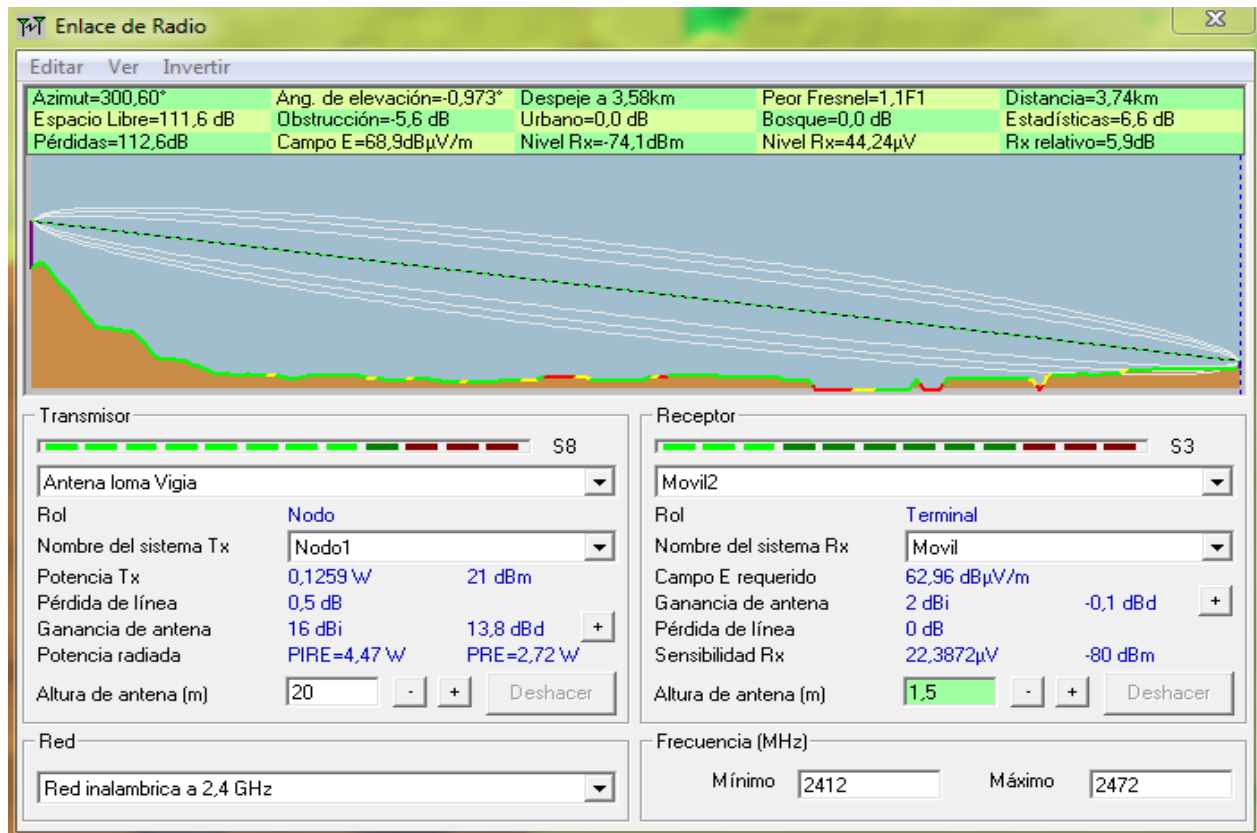
Perfil del enlace ISMMM – Móvil7 en RmPath.



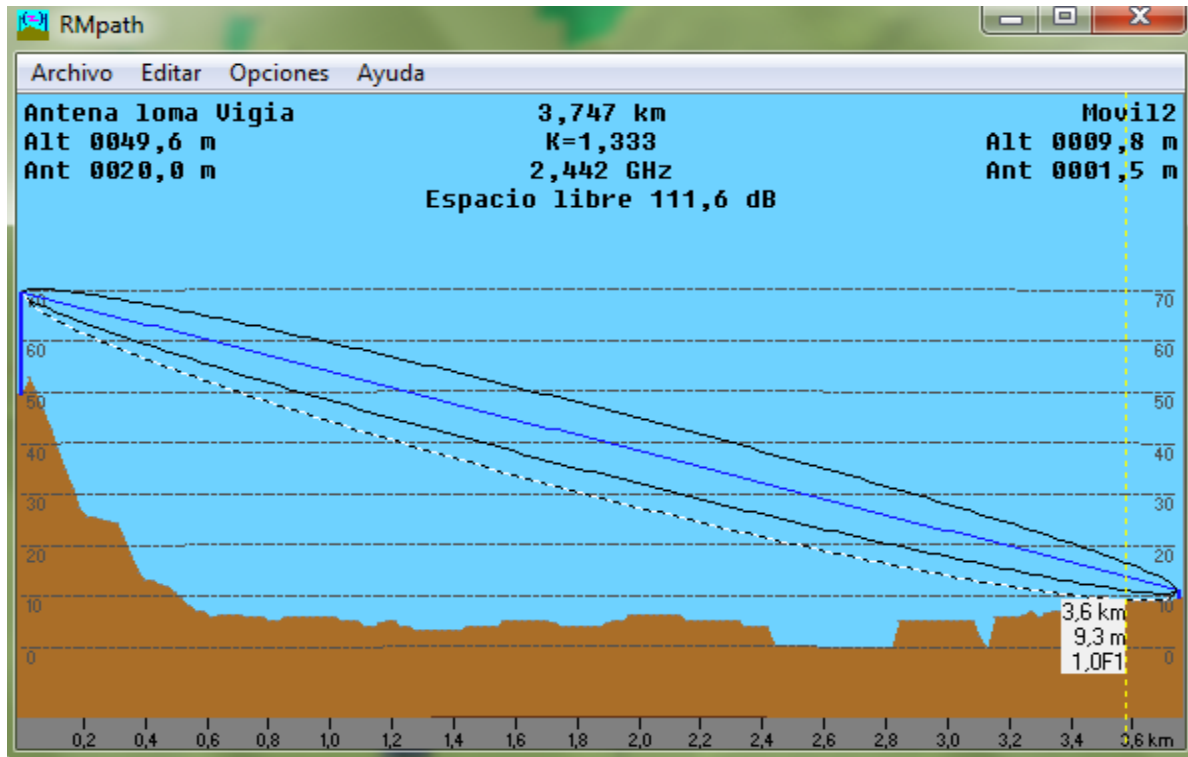
Perfil del enlace Vigía – Móvil1.



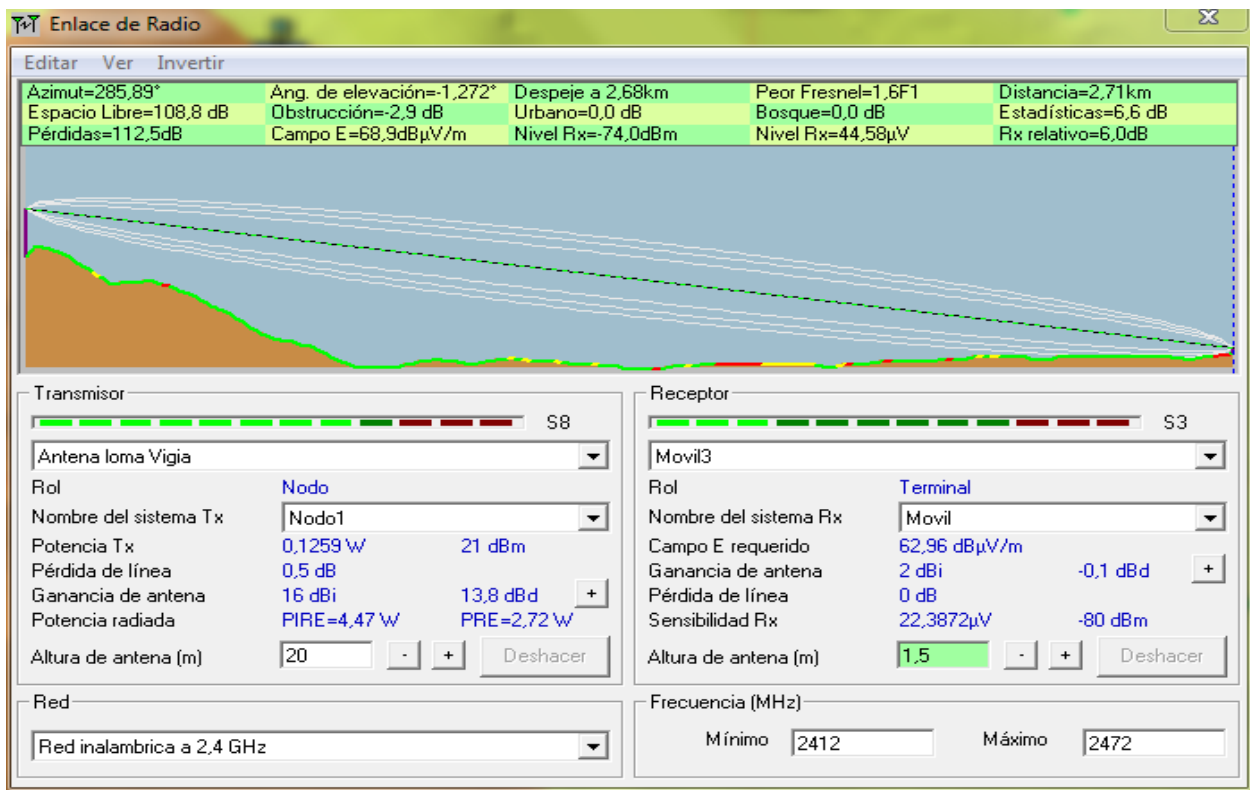
Perfil del enlace Vigía – Móvil1 en RmPath.



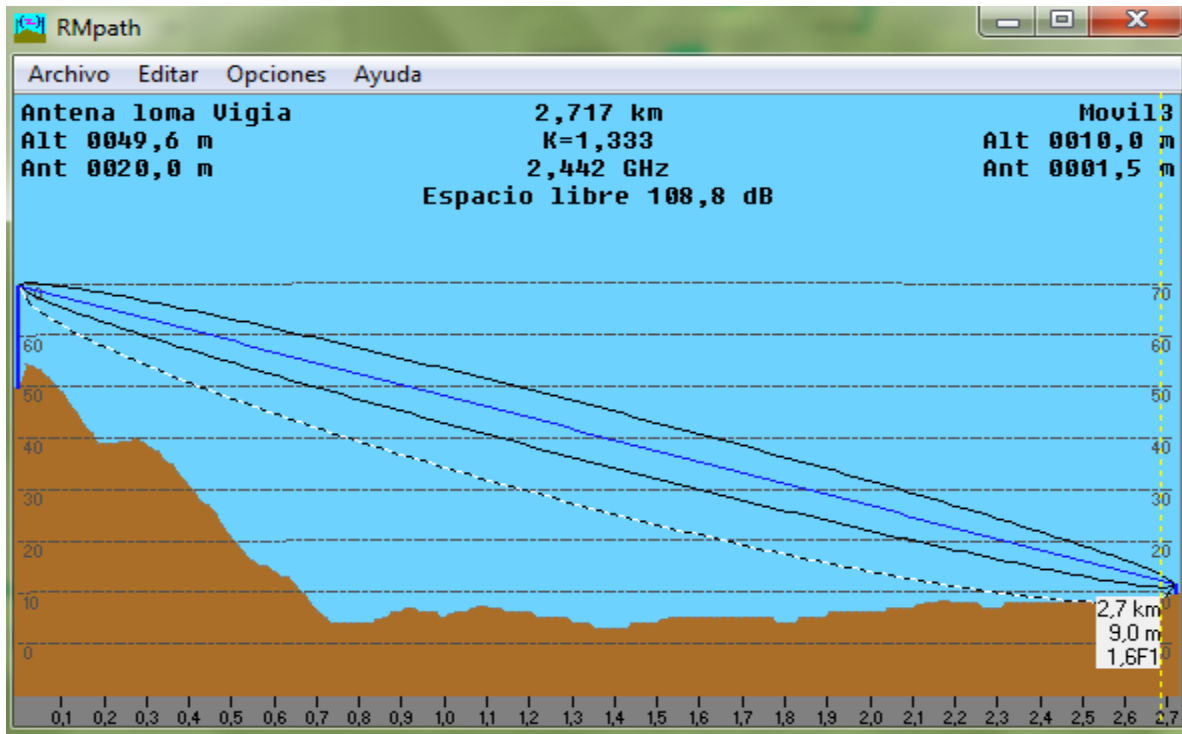
Perfil del enlace Vigía – Móvil2.



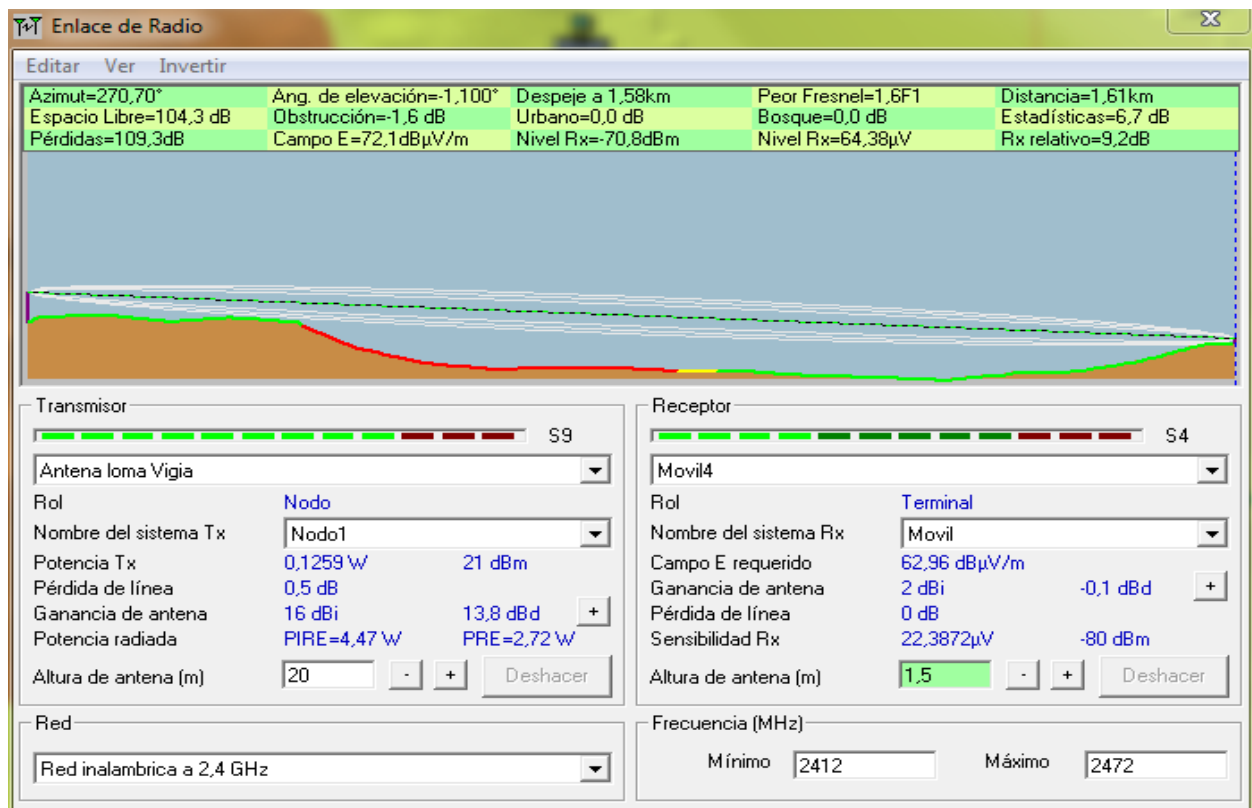
Perfil del enlace Vigía – Móvil2 en RmPath.



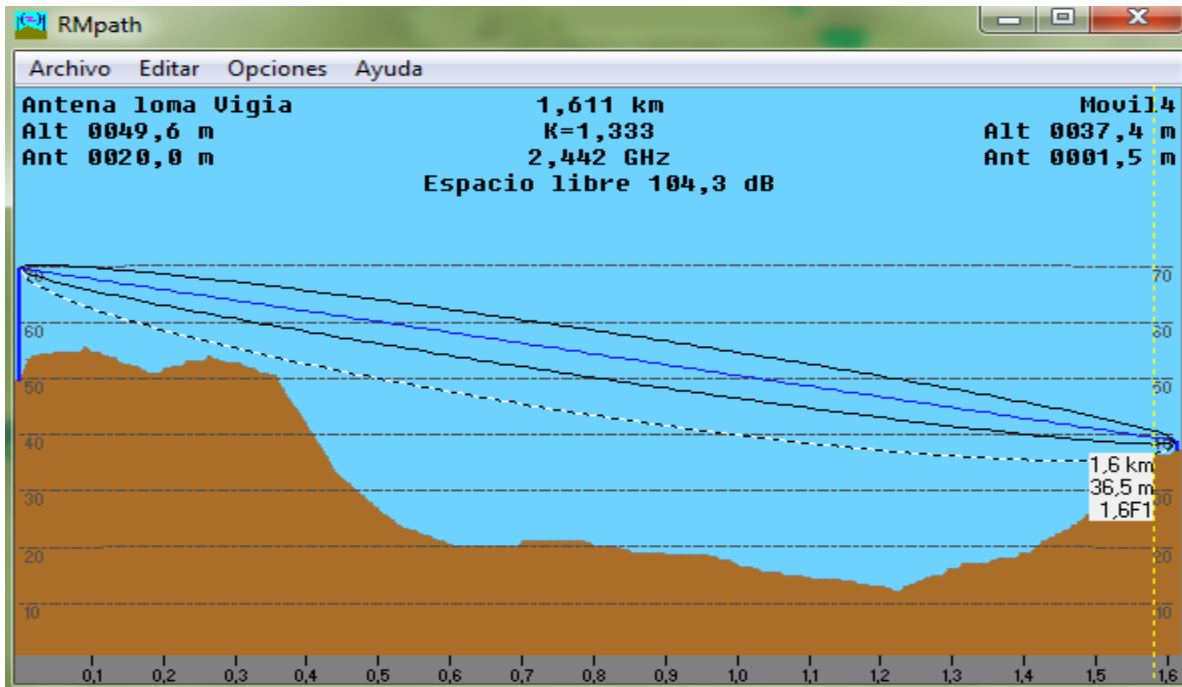
Perfil del enlace Vigía – Móvil3.



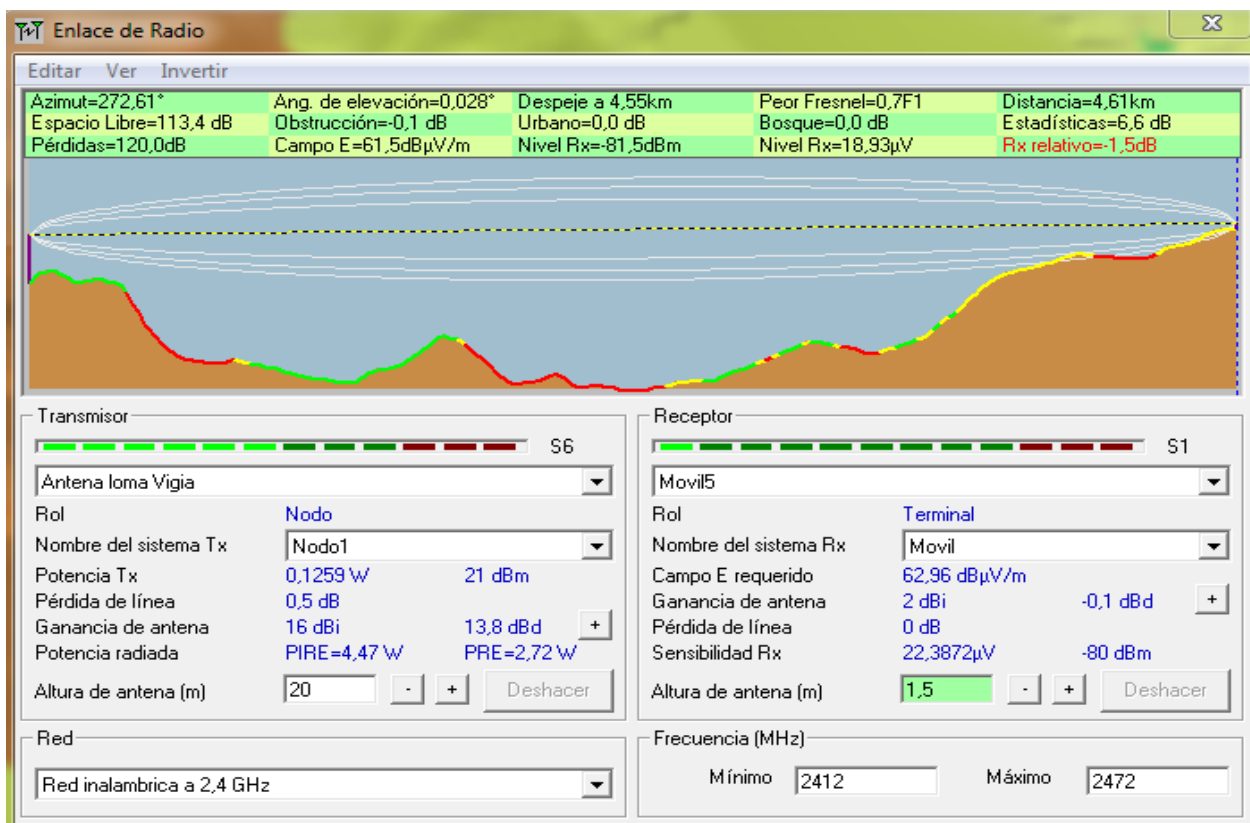
Perfil del enlace Vigía – Móvil3 en RmPath.



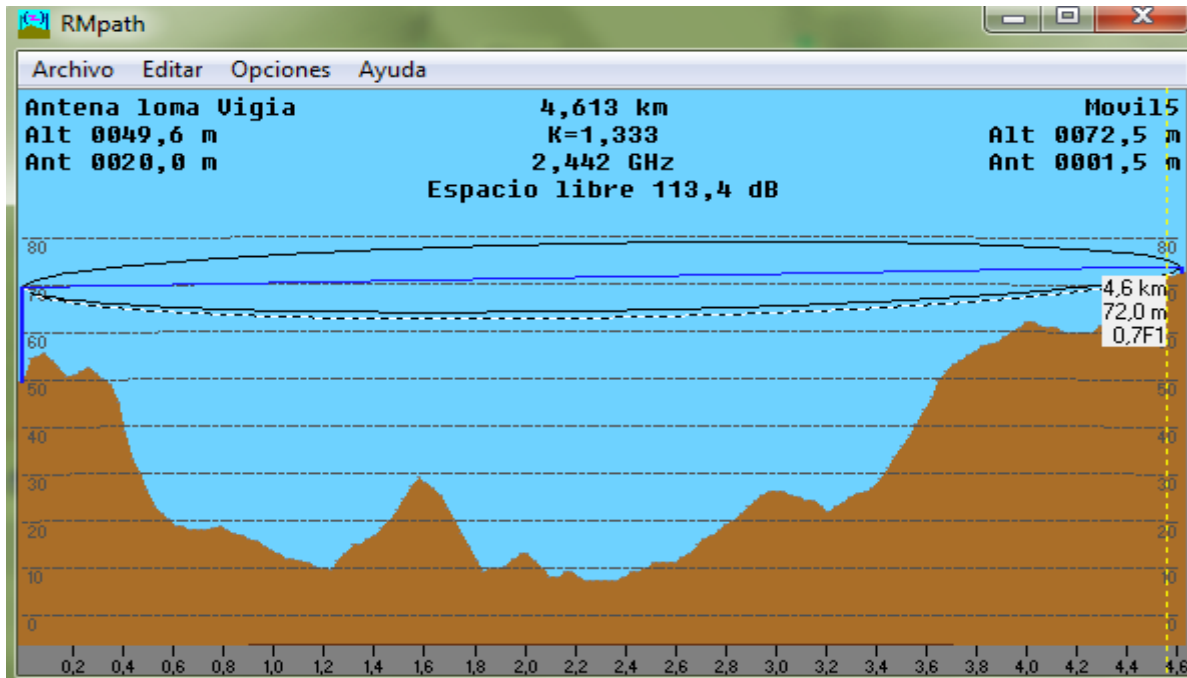
Perfil del enlace Vigía – Móvil4.



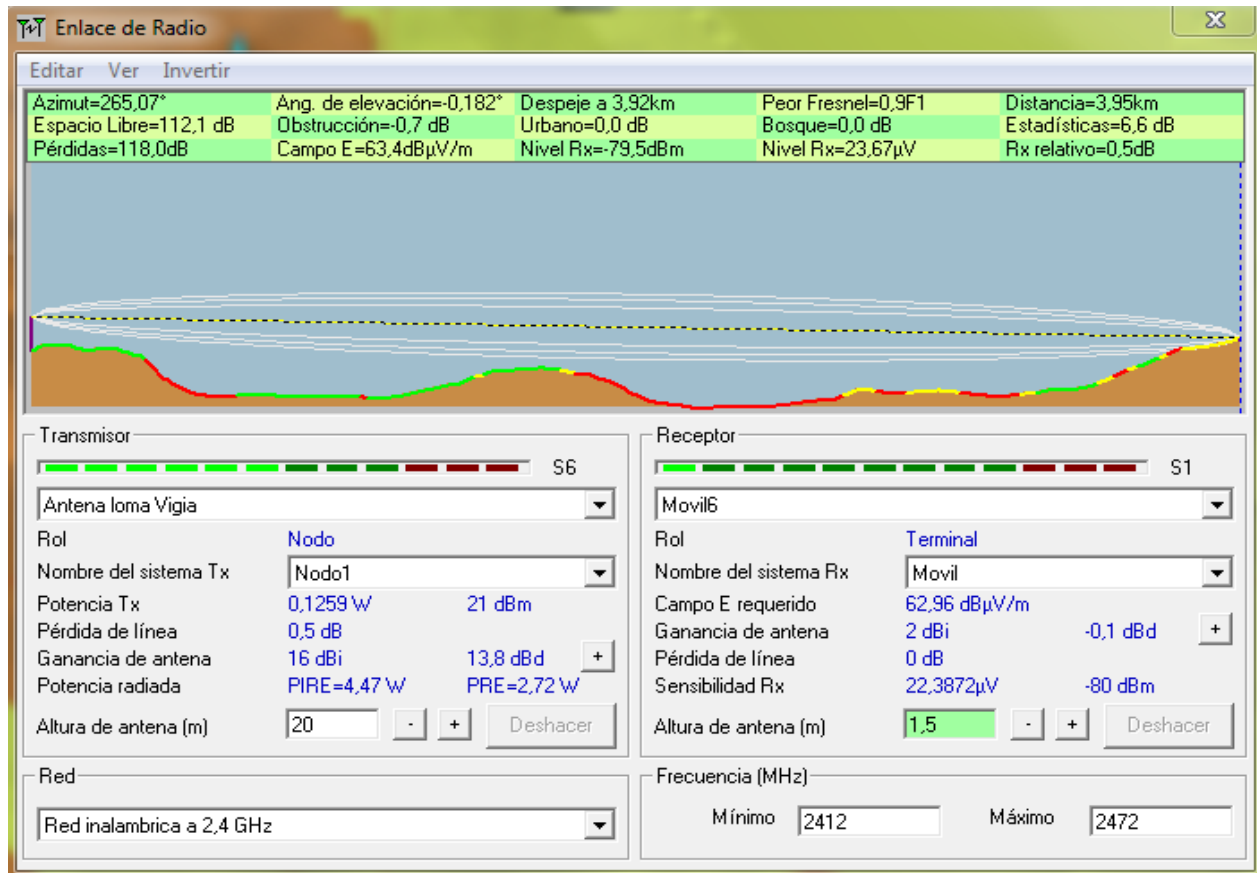
Perfil del enlace Vigía – Móvil4 en RmPath.



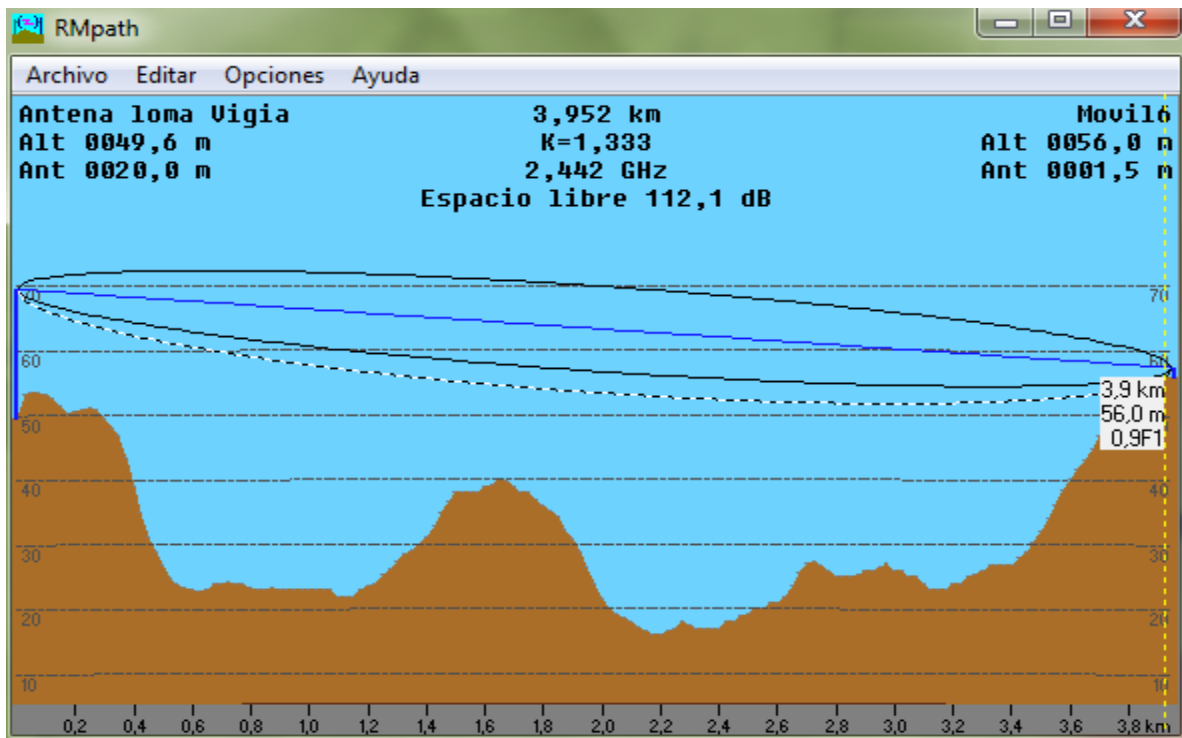
Perfil del enlace Vigía – Móvil5.



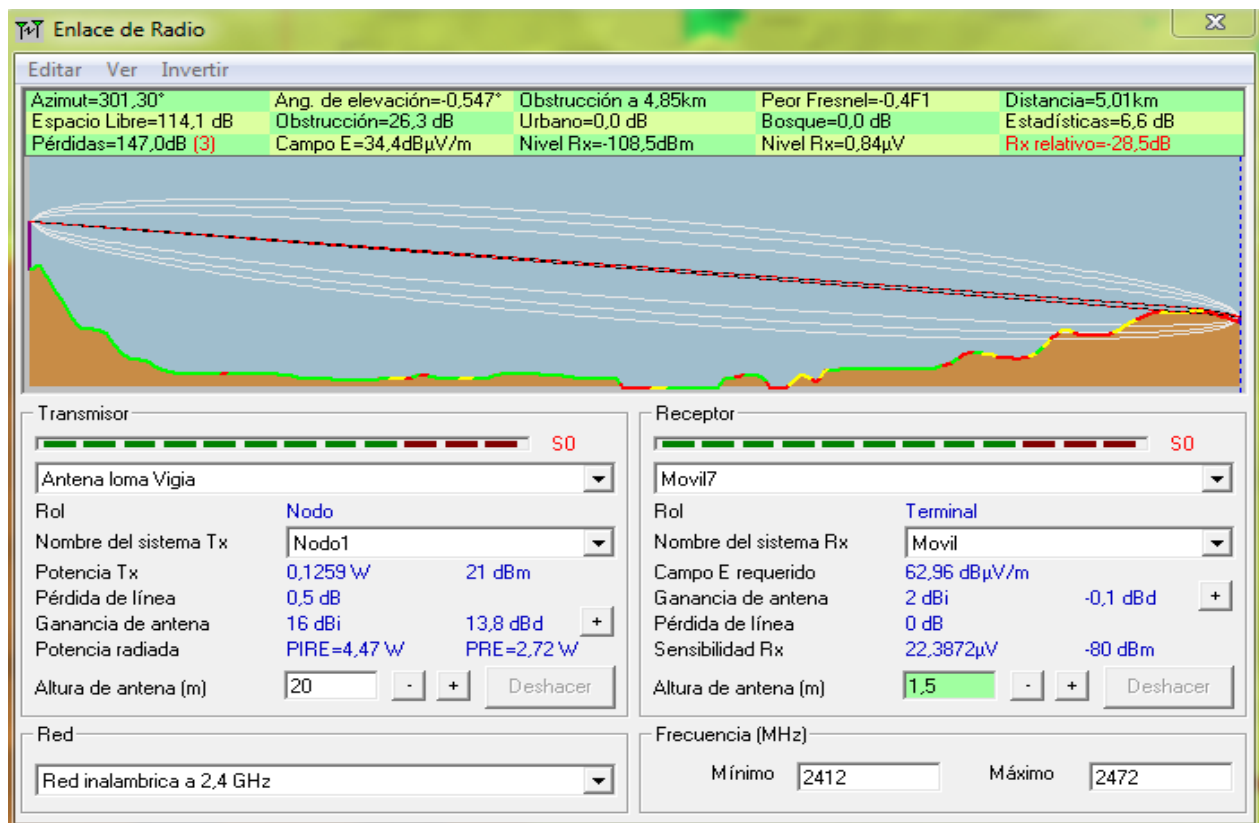
Perfil del enlace Vigía – Móvil5 en RmPath.



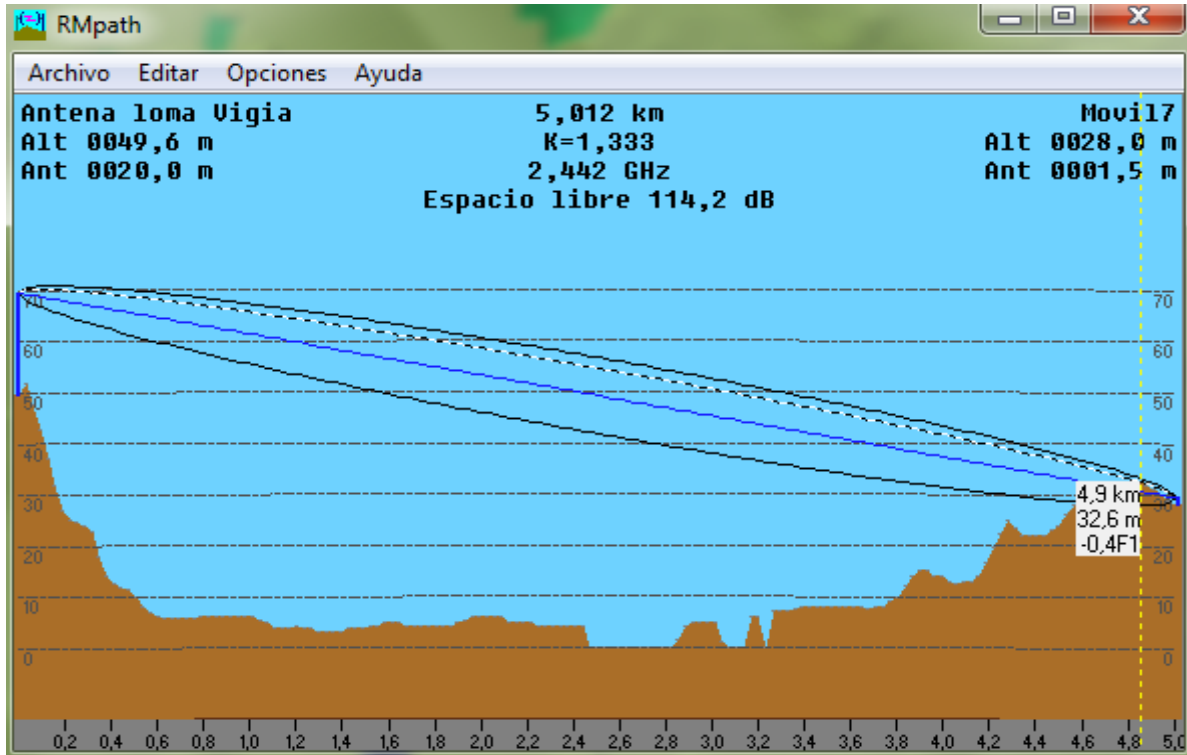
Perfil del enlace Vigía – Móvil6.



Perfil del enlace Vigía – Móvil6 en RmPath.

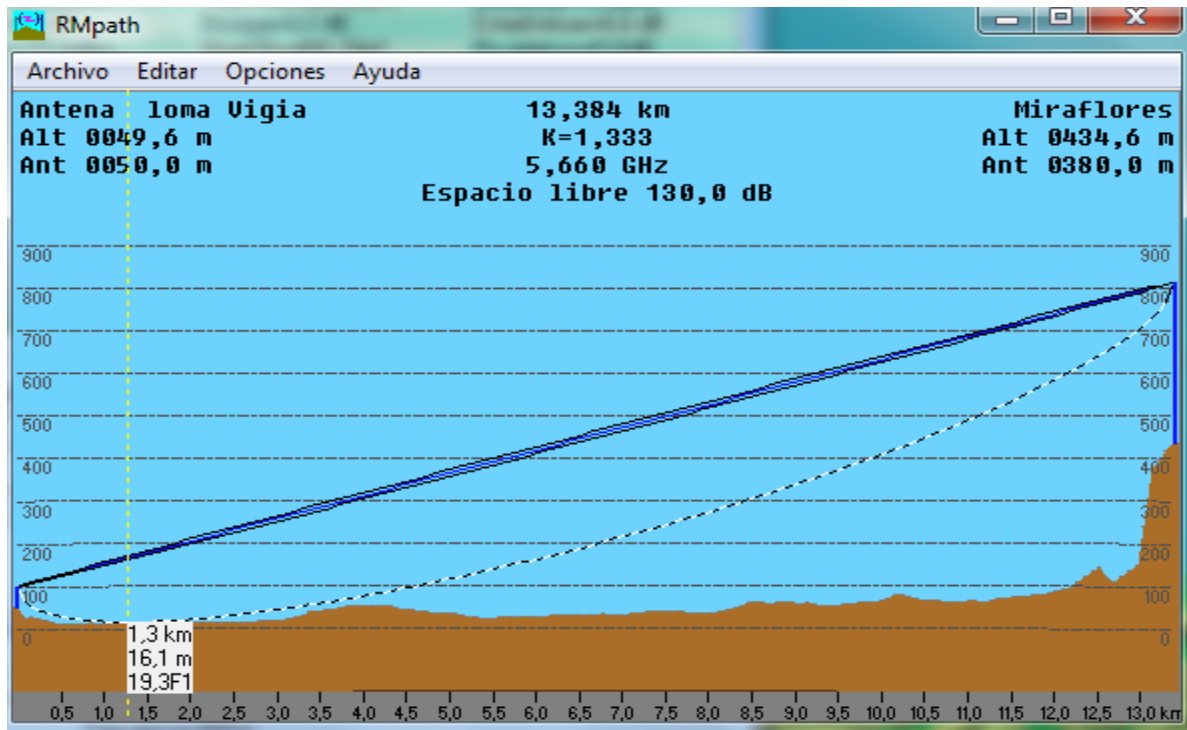


Perfil del enlace Vigía – Móvil7.

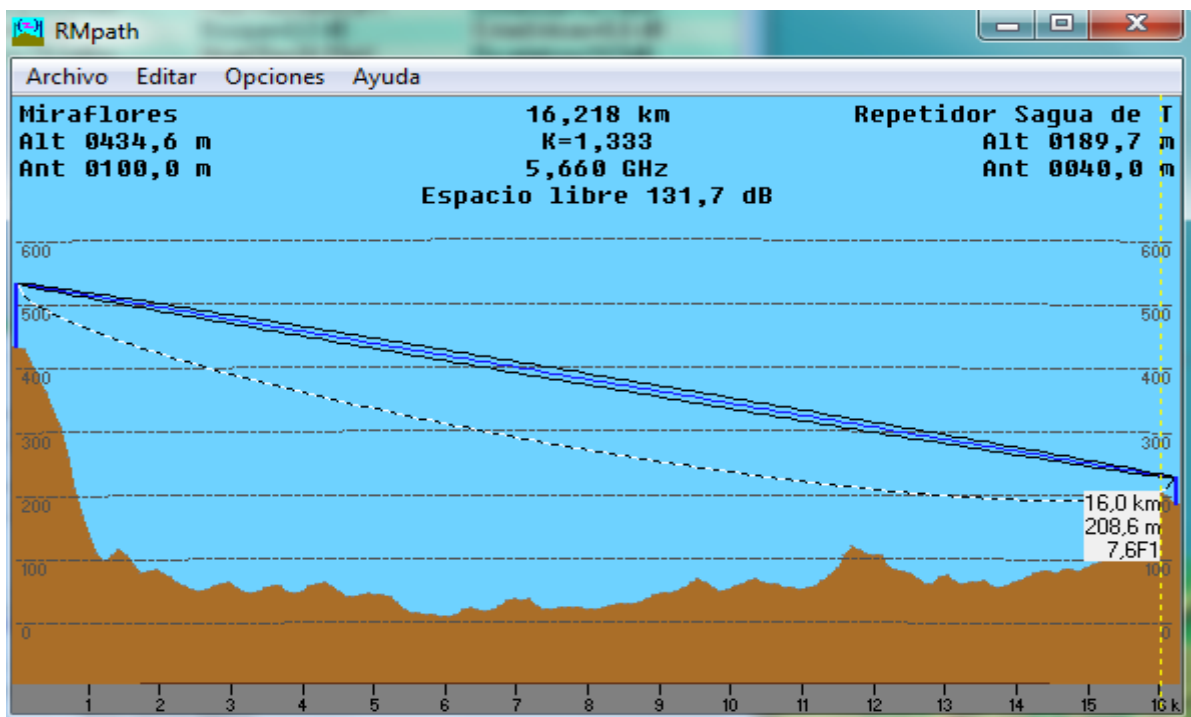


Perfil del enlace Vigía – Móvil7 en RmPath.

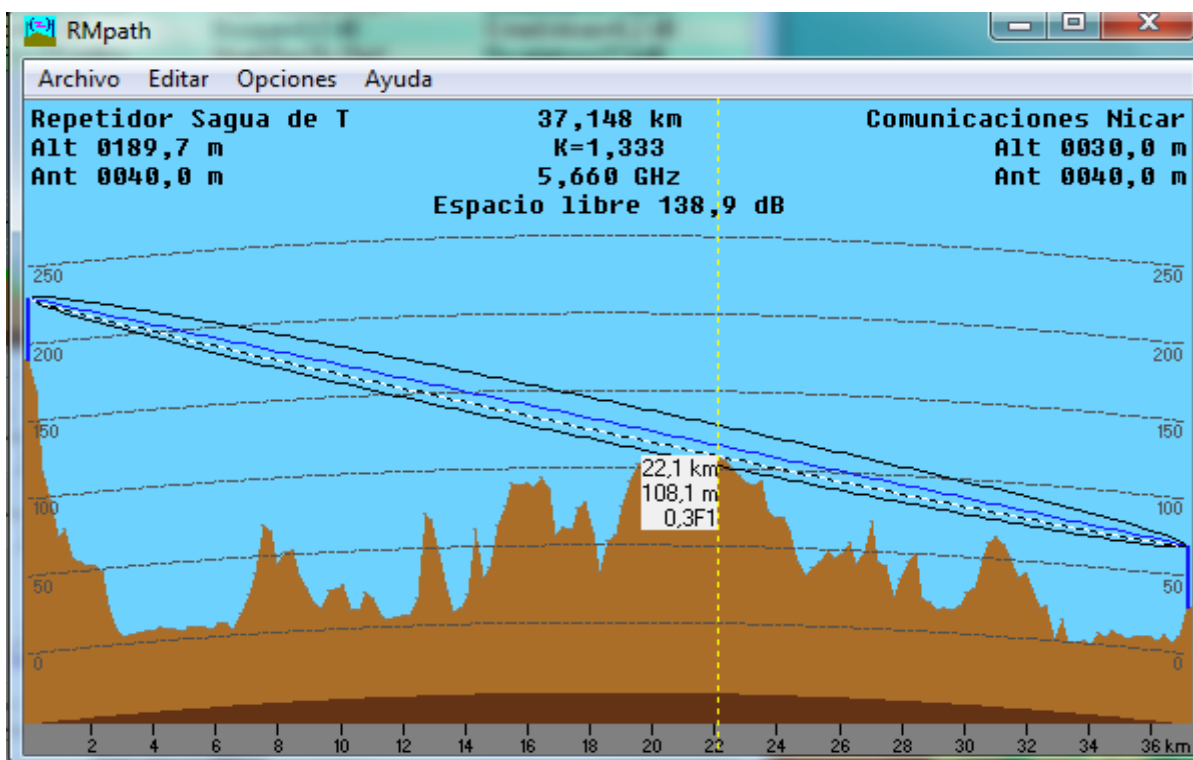
Anexo3: Perfiles del enlace Moa-Nicaró.



Perfil del enlace Vigía – Miraflores en RmPath.



Perfil del enlace Miraflores - Sagua en RmPath.



Perfil del enlace Sagua - Nicaro en RmPath.

Anexo4: Especificaciones de la estación Lobometrics 999M



Radio Lobometrics 999M

Procesador: Intel Atom N330, Dos núcleos 1,6GHz

Memoria: 1 GB DDR2, 533 MHz *onboardmemory*

Interface de red: One 10/100/1000 Mbit/s Realtek RTL 8111C Ethernet port

Frecuencia de operación: Dos radios 2,4GHz – 5,8GHz

Modos de operación: Estación, Punto de acceso, Repetidor

Encriptación: WEP, WPA, WPA2

Velocidad de transmisión inalámbrica: Hasta 300 Mbps

Estándares soportados: 802.11 b/g/n

Potencia de consumo: 15 Watts Máx.

Potencia máxima de salida: 21 dBm en 2,4GHz; 21 dBm en 5,8 GHz;

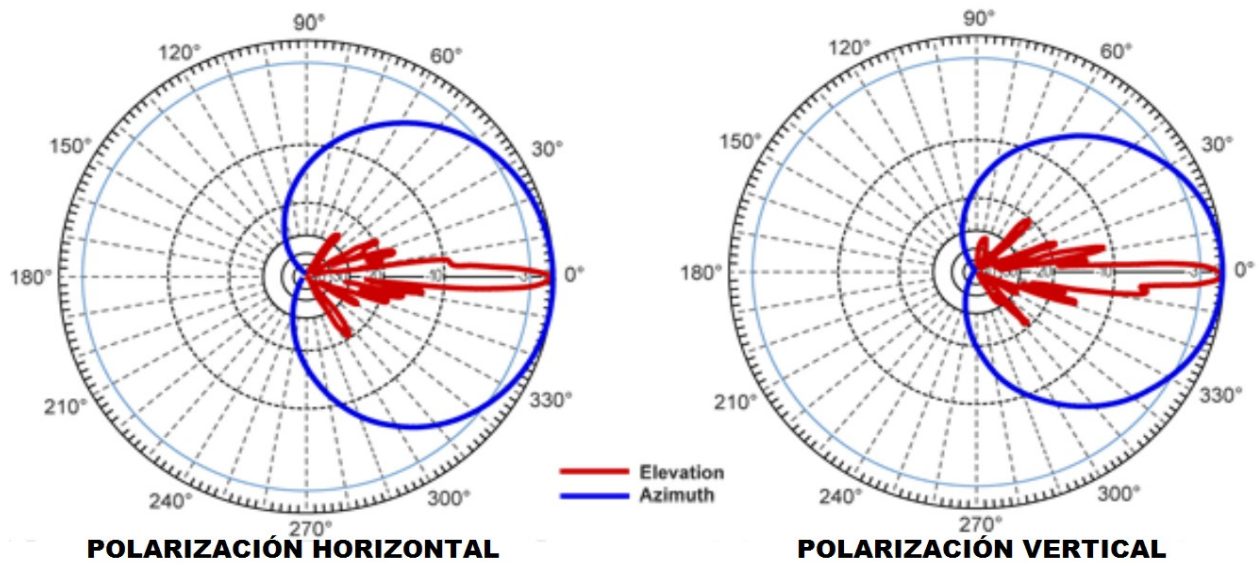
Sensibilidad: -95 dBm en 2,4GHz; -97dBm en 5,8GHz

Conector RF: dos conectores hembra tipo N

Temperatura de operación: -20...+65 C

Humedad de operación: 5 – 95%

Anexo5: Patrón de radiación real de la antena LCOM HG 4958



Patrón de radiación real de la antena sectorial LCOM HG4958.

Anexo6: Características de la antena L-COM HG5827G.



Antena L-COM HG5827G.

Características

- Ganancia de 27dBi
- Rendimiento superior
- Elaborada en aluminio fundido

- Acabado con capa de pintura en polvo con estabilidad de rayos UV
- Operación en cualquier tipo de clima
- Fácil de ensamblar

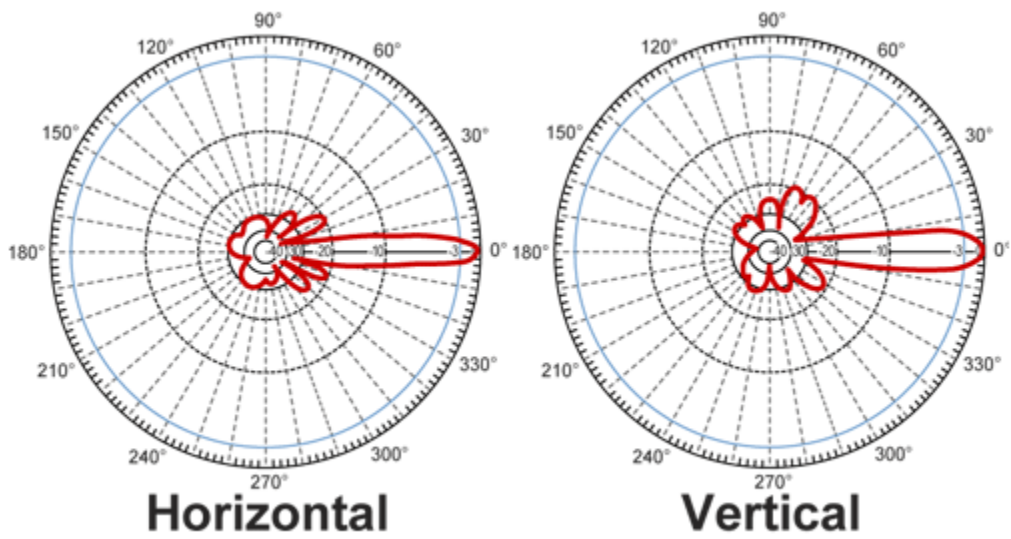
Aplicaciones

- Aplicaciones UNII 5.8GHz
- Aplicaciones ISM 5.8GHz
- Sistemas LAN inalámbricos 5.8GHz
- Aplicaciones direccionales de largo alcance
- Sistemas de Punto-a-Punto y Punto-a-Multipunto
- Puentes inalámbricos
- Aplicaciones de retorno (Backhaul)
- Sistemas de video inalámbricos

Especificaciones

Tabla 2.5 Especificaciones

Frecuencia	5725 - 5850 MHz
Ganancia	27 dBi
Polarización	Horizontal o vertical
Amplitud horizontal	6°
Amplitud vertical	9°
Impedancia	50Ohm
Entrada máx. de energía	100Watts
VSWR	<1.5:1 avg.
Peso	5.3 lbs. (2.4kg)
Dimensiones de la rejilla	15.7"x23.6" (400x600 mm)
Soporte	∅ poste 2" (50.8 mm)
Temperatura de operación	-40°C ~ 85°C / (-40°F ~ 185°F)
Protección contra rayos	CD Corto
Conector	N hembra



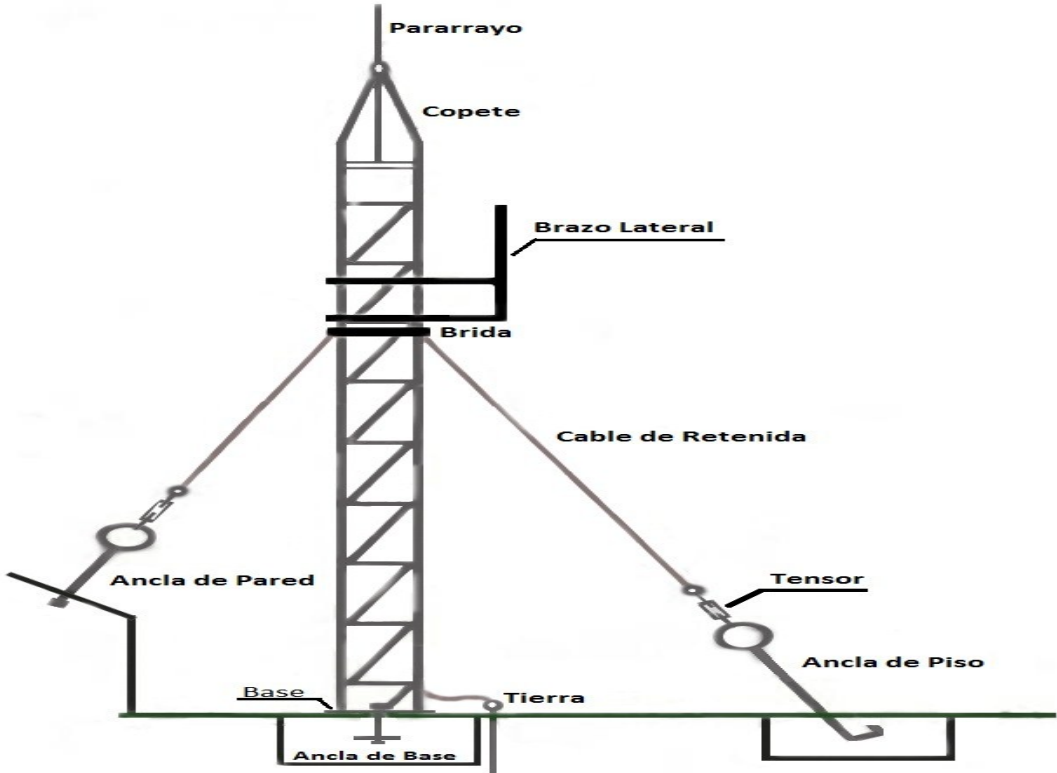
Patrón de radiación de la antena L-COM HG5827G.

Anexo7: Antena sectorial LCOM HG4958



Antena sectorial LCOM HG4958

Anexo8: Torre AT-20



Torre AT-20 para la instalación de los dispositivos.