

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA



Estudio de factibilidad técnica de la implementación de la red inalámbrica hacia Guanacaste para ampliar la cobertura de servicios de “Continex Inalámbricas”

TEC



GRUPO CONTINEX

Proyecto de graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Edgar Gutiérrez Camacho

200114347

CARTAGO, 18 DE AGOSTO DE 2008

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. William Marín Moreno

Profesor lector



Ing. Johan Carvajal Godínez

Profesor lector



Ing. José Faustino Montes de Oca

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 18 de agosto de 2008

Declaratoria de Autenticidad

Hago explícita la declaratoria de autenticidad que la totalidad de la información integrada en el presente anteproyecto es propiedad intelectual de mi persona. Las ideas planteadas por mí son fundamentadas con ayuda de referencias bibliográficas que son indicados debidamente así como la información proporcionada por la empresa para el fortalecimiento del texto expuesto en este anteproyecto.

Por esta declaratoria de autenticidad asumo la responsabilidad ante cualquier anomalía en la propiedad intelectual de cualquier idea explícita planteada en el presente documento.

Cartago, 11 de agosto de 2008



Edgar Gutiérrez Camacho

Cedula: 1 – 1172 – 0769

Resumen

El presente estudio de factibilidad técnica tiene como propósito analizar las condiciones en que se pueden establecer enlaces inalámbricos a largas distancias de máximo 100Km entre dos sitios. Esto con el fin de expandir la cobertura y servicios de datos, voz y video que ofrece la plataforma que tiene en funcionamiento Continex Inalámbricas en la zona central de país, proyectándose específicamente hacia la provincia de Guanacaste.

Para determinar la factibilidad de establecer radioenlaces es importante realizar un diagnóstico de la red que está en funcionamiento mediante análisis del tráfico de paquetes para evaluar las capacidades de la red y determinar el punto de repetición que permita enlazar hacia Guanacaste. Se recopila información para luego ser analizada.

Una vez que se tiene un diagnóstico de la plataforma se hace análisis de costo – beneficio de las tecnologías que están en el mercado actual y que mejor se ajusta a las características de la red.

Luego se realiza una descripción mediante modelos matemáticos que permita calcular los parámetros para establecer enlaces punto a punto para describir los diferentes enlaces que conforman la red de conexión San José – Guanacaste.

Finalmente se propone una topología de enlaces punto a punto para establecer comunicación entre la red del Área Metropolitana y las oficinas de Continex Guanacaste. Además se plantea un bosquejo de los enlaces multipunto con los que los clientes tienen acceso a la red de “Continex Inalámbricas”.

Palabras claves: radioenlaces, frecuencia licenciada, frecuencia libre, atenuación, presupuesto del enlace, UIT-R, red inalámbrica, punto a punto, multipunto, factor K. despejamiento, antenas.

Abstract

The purpose of this technical feasibility research is analyzing the conditions to establish wireless links in long distances like 100Km between two sites. The intentions of this is to increase the coverage and services about data, voice and video that offer the platform working “Continex Inalámbricas” in the Central zone of Costa Rica , offering coverage in the future all around the country.

In order to establish radiolinks it is important to make a diagnosis about the network that is working through analysis of the packets traffic to evaluate the throughput of the network. To make it possible it is necessary to pick up information about every radiolinks and then start the analysis.

When the diagnosis of the platform is done, it will continue with the analysis of cost – benefits of the technologies working in the current market and it seems to the characteristics of the network.

Then it is necessary to apply mathematical concepts to explain how the wireless systems propagate the signals between two sites and which factors affect this communication. Also, it must choose the frequency to transmit and it could be free or licensed frequency.

Finally, it will be proposed a topology designed to establish communication between the Metropolitan Area networking and the Continex Guanacaste offices. Then it will be proposed partial coverage in province of Guanacaste but depends on the projects working in that zone.

Keywords: radiolinks, licensed frequency, free frequency, attenuation, link budget, UIT-R, wireless network, point to point, multipoint., factor K, clearance, antennas

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios y la Virgen por permitirme crecer en mi vida personal y profesional a través de la conclusión de mis estudios, el cual ha sido el sueño de toda mi vida.

A mis padres y hermanos que siempre han sido mi fortaleza, me han brindado apoyo incondicional y ánimo en los buenos y malos momentos por los que he pasado durante este camino lleno de obstáculos.

A las personas que de una u otra forma me han brindado contribución para la finalización de mi carrera profesional, que me acompañaron en esta etapa de la vida de toda persona.

Gracias al Grupo Continex por ser la empresa que me dio la oportunidad de poner en práctica los conocimientos adquiridos de mi carrera universitaria y me brindaron todos los recursos materiales y morales necesarios.

Índice General

Introducción.....	1
Meta y Objetivos.....	2
2.1 Meta.....	2
2.2 Objetivo General.....	2
2.2.1 Objetivos Específicos.....	2
Capítulo 1 . Marco Teórico.....	4
3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar.....	4
3.1.1 Constitución de los Nodos o puntos de repetición.....	4
3.2 Descripción de los principios electrónicos para la comunicación de radioenlaces.....	7
3.2.1 Elementos para establecer enlaces de radio.....	7
3.2.1.1 Presupuesto del enlace (Balance de potencias).....	7
3.2.1.2 Pérdidas de propagación en el espacio libre.....	9
3.2.1.3 Potencia nominal de recepción de señal.....	10
3.2.1.4 Zonas de Fresnel.....	11
3.2.1.5 Pérdidas por atenuación debido a la lluvia.....	13
3.2.1.6 Cálculo del factor K.....	15
3.2.1.7 Cálculo de curvatura C de la Tierra.....	16
3.2.1.8 Cálculo de las antenas.....	17
Capítulo 2 . Procedimiento metodológico.....	18
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	18
4.2 Procedimiento de la solución.....	18
4.2.1 Diagnóstico de la plataforma en funcionamiento.....	18
4.2.2 Análisis de costo – beneficio de tecnologías inalámbricas.....	19
4.2.3 Descripción del modelo matemático de los radioenlaces.....	19
4.2.4 Banda de frecuencia a utilizar y visitas de campo a los sitios.....	19
4.2.5 Topología para brindar cobertura en Guanacaste.....	20
Capítulo 3 . Resultados Experimentales.....	21
5.1 Estado de la red inalámbrica en el Área Metropolitana.....	21
5.1.1 Comportamiento del Nodo Cartago (Gurdián).....	21
5.1.2 Comportamiento del Nodo Alajuelita.....	22
5.1.3 Comportamiento del Nodo Heredia.....	24
5.1.4 Comportamiento del Nodo Escazú (Abra).....	25
5.1.4 Comportamiento del Nodo Alajuela.....	27
5.1.5 Comportamiento del Nodo RedCom (Principal).....	28
5.2 Tecnologías inalámbricas de conexión punto a punto.....	30
5.2.1 Equipos punto a punto que operan con frecuencias libres.....	30
5.2.1 Equipos punto a punto que operan con frecuencias licenciadas.....	33
5.3 Tecnologías inalámbricas de conexión punto a multipunto.....	34
5.4 Uso de frecuencia libre versus frecuencia licenciada.....	36
5.5 Tecnología punto a punto a utilizar.....	37
5.5.1 Presupuestos de los enlaces punto a punto.....	37
5.5.1.1 Tecnología PTP600 de Motorola®.....	38
5.5.1.2 Tecnologías Terabridge y GigaLink de Proxim.....	39
5.5.1.3 Tecnología RedConnex AN80i de RedLine.....	40

5.5.1.4 Tecnología P5055M-EXT-US de Trango BroadBand.....	40
5.6 Cálculo y perfiles de los enlaces punto a punto	41
5.6.1 Enlace Nodo Heredia y Cerro Berlín.....	42
5.6.1.1 Pérdidas de propagación en el espacio libre.....	43
5.6.1.2 Atenuación total debido a la lluvia	44
5.6.1.3 Presupuesto del enlace	46
5.6.1.4 Potencia nominal de recepción de señal	47
5.6.1.5 Radio de la primera zona de Fresnel.....	48
5.6.2 Enlace entre Cerro Berlín – Cerro Bellavista Azul.....	50
5.6.3 Enlace entre Cerro Bellavista Azul – Cerro Hermosa	52
5.6.4 Enlace entre Cerro Bellavista Azul – Liberia	53
5.6.5 Enlace entre Cerro Hermosa – Liberia.....	54
5.6.6 Enlace entre Cerro Bellavista Azul – Cerro Vicente	55
5.7 Topología propuesta para brindar cobertura en Guanacaste.....	60
Capítulo 4 . Análisis de Resultados	64
6.1 Diagnóstico de la Red inalámbrica del Área Metropolitana.....	64
6.2 Costo – beneficio de tecnologías inalámbricas.....	66
6.3 Frecuencia de transmisión.....	67
6.4 Topología propuesta para ofrecer cobertura en Guanacaste.....	68
Capítulo 5 . Conclusiones y recomendaciones.....	70
7.1 Conclusiones.....	70
7.2 Recomendaciones.....	71
Bibliografía	72
Apéndices.....	75
A.1 Glosario.....	75
A.2 Cálculos de enlaces punto a punto	77
A.2.1 Parámetros para el enlace Cerro Berlín – Cerro Bellavista Azul.....	77
A.2.1.1 Pérdidas de propagación en el espacio libre.....	77
A.2.1.2 Atenuación total debido a la lluvia.....	77
A.2.1.3 Presupuesto del enlace	77
A.2.1.4 Potencia nominal de recepción de señal.....	78
A.2.2 Parámetros para el enlace Cerro Bellavista Azul – Liberia	78
A.2.2.1 Pérdidas de propagación en el espacio libre.....	78
A.2.2.2 Atenuación específica debido a la lluvia.....	78
A.2.2.3 Presupuesto del enlace	79
A.2.2.4 Potencia nominal de recepción de señal.....	79
A.2.2.5 Radio de la primera zona de Fresnel.....	79
A.2.3 Parámetros para el enlace Cerro Bellavista Azul – Cerro Hermosa	79
A.2.3.1 Pérdidas de propagación en el espacio libre.....	79
A.2.3.2 Atenuación específica debido a la lluvia.....	80
A.2.3.3 Presupuesto del enlace	80
A.2.3.4 Potencia nominal de recepción de señal.....	81
A.2.3.5 Radio de la primera zona de Fresnel.....	81
A.2.4 Parámetros para el enlace Cerro Bellavista Azul - Cerro Vicente.....	81
A.2.4.1 Pérdidas de propagación en el espacio libre.....	81
A.2.4.2 Atenuación específica debido a la lluvia.....	81
A.2.4.3 Presupuesto del enlace	82
A.2.4.4 Potencia nominal de recepción de señal.....	82

A.2.4.5 Radio de la primera zona de Fresnel.....	82
A.2.5 Parámetros para el enlace Cerro Hermosa - Liberia	83
A.2.5.1 Pérdidas de propagación en el espacio libre.	83
A.2.5.2 Atenuación específica debido a la lluvia	83
A.2.5.3 Presupuesto del enlace	83
A.2.5.4 Potencia nominal de recepción de señal	84
A.2.5.5 Radio de la primera zona de Fresnel.....	84
A.3 Anchos de banda estimado de los perfiles PTP	85
A.4 Perfiles para enlaces punto a multipunto	86
A.4 Coordenadas geográficas de los sitios analizados	87
Anexos	88
ANEXO 1. Distribución y uso de frecuencias según el Plan de Distribución de Frecuencias.	88
Anexo 2. Constantes de polarización vertical y horizontal según la recomendación de la UIT-R 838-3	89
Anexo 3. Intensidad de lluvia [mm/h] de acuerdo con la recomendación P.837-1 de la UIT-R.....	90

Índice de Figuras

Figura 3.1. Diagrama de la topología de Continex Inalámbricas en el Área Metropolitana.	4
Figura 3.2. Torre metálica donde se fijan los equipos inalámbricos.	5
Figura 3.3. Dispositivo sincronizador de los puntos de acceso.	5
Figura 3.4. Representación de un conjunto de puntos de acceso.	6
Figura 3.5. Dispositivo encargado de establecer enlace punto a punto.	6
Figura 3.6. Dispositivo encargado de enlazar el cliente con el clúster.	7
Figura 3.7. Dispositivo encargado de establecer comunicación entre los equipos.	7
Figura 3.12. Relación entre las pérdidas en el espacio libre y la distancia, según una frecuencia transmitida.[3]	8
Figura 3.13. Pérdidas de propagación en el espacio libre para $f = 5.8\text{GHz}$	10
Figura 3.14. Esquema de potencias que intervienen desde el transmisor hasta el receptor.	11
Tomada de Canopy System UserGuide issue1, pag. 132. [16]	11
Figura 3.15. Primera Zona de Fresnel.	12
Figura 3.15. Relación entre superficie real y superficie equivalente de la tierra.	16
Figura 5.1. Ancho de banda comprometido en el Nodo Gurdían de marzo a junio de 2008.	22
Figura 5.2. Ancho de banda real consumido en el Nodo Gurdían de marzo a junio de 2008.	22
Figura 5.3. Ancho de banda comprometido en el Nodo Alajuelita de marzo a junio de 2008.	23
Figura 5.4 Ancho de banda real consumido en el Nodo Alajuelita de marzo a junio de 2008.	23
Figura 5.5. Ancho de banda comprometido en el Nodo Heredia de marzo a junio de 2008.	24
Figura 5.6 Ancho de banda real consumido en el Nodo Heredia de marzo a junio de 2008.	25
Figura 5.7. Ancho de banda comprometido en el Nodo Escazú de marzo a junio de 2008.	26
Figura 5.8. Ancho de banda real consumido en el Nodo Escazú de marzo a junio de 2008.	26
Figura 5.9. Ancho de banda comprometido en el Nodo Alajuela de marzo a junio de 2008.	27
Figura 5.10. Ancho de banda real consumido en el Nodo Alajuela de marzo a junio de 2008.	28
Figura 5.11. Ancho de banda comprometido en el Nodo RedCom de marzo a junio de 2008.	29
Figura 5.12. Ancho de banda real consumido en el Nodo RedCom de marzo a junio de 2008.	29
Figura 5.13. Relación entre el ancho de banda analógico del canal y los subcanales.	31
Figura 5.14. Estimación del enlace con Link Planner entre Cerro Berlín – Nodo Heredia.	49
Figura 5.15. Estimación del enlace con RadioMobile entre Cerro Berlín – Nodo Heredia.	50
Figura 5.16. Estimación del enlace con Link Planner entre Cerro Berlín – Cerro Bellavista Azul.	51
Figura 5.17. Estimación del enlace con RadioMobile entre Cerro Berlín – Cerro Bellavista Azul.	51
Figura 5.18. Estimación del enlace con Link Planner entre Cerro Bellavista Azul – Cerro Hermosa.	52
Figura 5.19. Estimación del enlace con RadioMobile entre Cerro Bellavista Azul – Cerro Hermosa.	52
Figura 5.20. Estimación del enlace con Link Planner entre Cerro Bellavista – Liberia.	53
Figura 5.21. Estimación del enlace con RadioMobile entre Cerro Bellavista Azul – Liberia.	53

Figura 5.22. Estimación del enlace con Link Planner entre Cerro Hermosa – Liberia.....	54
Figura 5.23. Estimación del enlace con RadioMobile entre Cerro Hermosa – Liberia.....	55
Figura 5.24. Estimación del enlace con Link Planner entre Cerro Bellavista Azul - Cerro Vicente.....	56
Figura 5.25. Estimación del enlace con RadioMobile entre Cerro Bellavista Azul - Cerro Vicente.....	56
Figura 5.26. Vista Digital de GoogleEarth ® de la topología de red punto a punto hacia Guanacaste.....	60
Figura 5.27. Topología punto a punto propuesta de la red inalámbrica en Guanacaste.....	61
Figura 5.28. Topología punto multipunto para ofrecer cobertura parcial en Guanacaste.....	63
Figura A.3.1. Cálculo de perfiles PTP con Link Planner, de Motorola ®.....	85
Imagen tomada del programa LinkPlanner de Motorola ®.....	85
Figura A.4.1. Perfil del relieve entre Cerro Bellavista Azul – Nicoya.....	86
Figura A.4.2. Perfil del relieve entre Comunidad – Tanque Agua.....	86
Figura A.4.3. Perfil del relieve entre Cerro Hermosa – Ocotol Montealegre.....	86
Figura A.4.4. Perfil del relieve entre Cerro Hermosa – Playa Hermosa.....	86

Índice de Tablas

Tabla 1. Cuadro comparativo de tecnologías BH para enlaces PTP, con frecuencias libres.	31
Tabla 2. Comparación de tecnologías BH punto a punto con frecuencias licenciadas.	34
Tabla 3. Cuadro comparativo de tecnologías punto a multipunto.....	35
Tabla 4. Presupuesto del enlace ptp con tecnología Motorola ®. [13]	39
Tabla 5. Presupuesto del enlace ptp con tecnología TeraBridge de Proxim. [19].....	39
Tabla 6. Presupuesto del enlace ptp con tecnología RedLine. [23]	40
Tabla 7. Presupuesto del enlace ptp con tecnología Trango BroadBand. [24]	41
Tabla 8. Pérdidas de propagación en el espacio libre para cada enlace, para una frecuencia de 5.8GHz.....	43
Tabla 9. Atenuación total debido a la lluvia para los enlaces.	45
Tabla 10. Presupuesto de enlace para Nodo Heredia - Cerro Berlín.....	46
Tabla 11. Balance de potencias para cada uno de los enlaces.	46
Tabla 12. Nivel de recepción de la señal recibida para cada enlace.	47
Tabla 13. Radio de despeje de la primera zona de Fresnel para cada enlace, para $f = 5.8\text{GHz}$	48
Tabla 14. Resumen de Enlaces PTP hacia Guanacaste.....	59
Tabla 15. Presupuesto de enlace para Cerro Bellavista Azul - Liberia.....	79
Tabla 16. Presupuesto de enlace para Cerro Bellavista Azul - Cerros Hermosa	80
Tabla 17. Presupuesto de enlace para Cerro Bellavista Azul - Cerro Vicente.....	82
Tabla 18. Presupuesto de enlace para Cerro Hermosa Liberia	84
Tabla 19. Coordenadas geográficas de los sitios analizados.....	87
Tabla 20. Plan de distribución de frecuencias superior a 2GHz según la legislación costarricense.[5]	88
Tabla 21. Constantes de polarización horizontal y vertical según la UIT-R P-838-3	89

Introducción

Actualmente en Continex Inalámbricas (antes conocida como Redcomtechnologies) tiene en funcionamiento una tecnología en la plataforma inalámbrica conocida como Canopy de Motorola ® en el Área Metropolitana la cual opera en la banda de frecuencias de 5GHz. El ancho de banda de cada enlace punto a punto es de 20Mbps, mientras que en los multipuntos 14Mbps. Ésta misma plataforma tienen implementada en las oficinas de Continex en Guanacaste con la cual se ofrece solo servicios básicos como conexión a Internet.

Por otra parte el incremento de usuarios que adquieren los servicios de Continex inalámbricas en Guanacaste hace que las oficinas que operan en dicho lugar no tengan la capacidad de ofrecer cobertura a todos los usuarios. Por ello es necesario ampliar la cobertura mediante instalación de torres con equipos punto a punto y multipunto ubicados estratégicamente para cubrir la demanda de los clientes. Asimismo se requiere comunicar la red del Área Metropolitana con las oficinas en Guanacaste con el fin de monitorear todos los suscriptores en forma remota desde un sitio central como es las oficinas centrales en San José.

Además de ampliar la cobertura, Continex Inalámbricas pretende pasar de ser una empresa de conexión a Internet a ofrecer servicios de datos, voz y video; es decir, ser una red que tenga la capacidad de brindar servicios de datos, telefonía, videoconferencias a los clientes para establecer comunicación con clientes de la zona central hacia Guanacaste.

Sin embargo para implementar una red inalámbrica que comunique la red del Área Metropolitana con las oficinas en Guanacaste, y a la vez brinde cobertura a los clientes, se desconoce cuáles son los elementos para implementar la red que tenga la capacidad de transportar datos, voz y video y permita definir la tecnología que más se ajusta a las características de Continex Inalámbricas.

Por lo tanto en el presente proyecto se realiza un estudio de factibilidad técnica con el fin de diagnosticar el punto de inicio de la red del área central, definir la tecnología adecuada para implementar, así como proponer la topología con la que se pueda enlazar las redes de la zona Metropolitana y Guanacaste y plantear enlaces multipunto para brindar acceso a esta red a clientes de la zona.

Meta y Objetivos

2.1 Meta

Determinar la factibilidad para establecer comunicación de la red de Continex Inalámbricas desde el Área Metropolitana hacia las oficinas ubicadas en la provincia de Guanacaste así como definir la tecnología adecuada con la que implementarán los enlaces a Guanacaste y también brindar acceso a esta red a clientes en la zona.

2.2 Objetivo General

Hacer un estudio de factibilidad técnica para establecer conectividad inalámbrica hacia Guanacaste partiendo desde un Nodo de la red central, con el fin de enlazar ambas redes y dar cobertura a los clientes de la zona. Además se define la tecnología que se debe utilizar, los parámetros de los enlaces de cada punto de repetición así como las características de transmisión que estén reguladas por normas y estándares internacionales y nacionales.

2.2.1 Objetivos Específicos

2.2.1.1 Determinar el estado de la red inalámbrica Metropolitana con pruebas de anchos de banda de los enlaces para determinar cuál es el punto de repetición que presenta condiciones aptas para iniciar el enlace punto a punto hacia Guanacaste.

2.2.1.2 Recomendar la tecnología necesaria para implementar enlaces punto a punto mediante un análisis de costo – beneficio y capacidades de los equipos.

2.2.1.3 Recomendar la tecnología necesaria para implementar enlaces multipunto mediante un análisis de costo – beneficio y capacidades de los equipos.

2.2.1.4 Plantear un modelo matemático que permita describir los diferentes enlaces que conforman la red de conexión San José – Guanacaste con el fin de verificar el debido funcionamiento.

2.2.1.5 Proponer la topología de la red inalámbrica punto a punto para establecer conectividad hacia las oficinas de Guanacaste, con el fin de definir la ubicación y distancia de los puntos de repetición y parámetros de transmisión de los enlaces.

2.2.1.6 Proponer la topología de la red inalámbrica multipunto en Guanacaste para ofrecer acceso a esta red a los clientes, ubicando nodos en puntos comercialmente estratégicos.

Capítulo 1 . Marco Teórico

3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar

Los sistemas de comunicación inalámbricos presentan diferentes topologías: anillo, malla, estrella, punto a punto y punto a multipunto. Estas dos últimas topologías son las más relevantes para el presente estudio de factibilidad.

Para establecer enlaces punto a punto y punto a multipunto se requiere tomar en cuenta una serie de elementos para llevar a cabo dicha comunicación; desde el terreno a instalar una estación base hasta parámetros de transmisión de cada enlace con factores que no pueden dejarse de analizar a la hora de realizar estos enlaces. Por ello a continuación se describirá los principales dispositivos que hacen posible enlaces inalámbricos a largas distancias y también acceso a lo que se conoce como ultima milla.

3.1.1 Constitución de los Nodos o puntos de repetición

La constitución de los nodos y su interconexión es la que se muestra en la figura 3.1. En el cual se presentan elementos como torres, equipos sincronizadores, puntos de acceso entre otros elementos. Esta topología es por ejemplo la que conforma la red del área Metropolitana de Continex Inalámbricas.

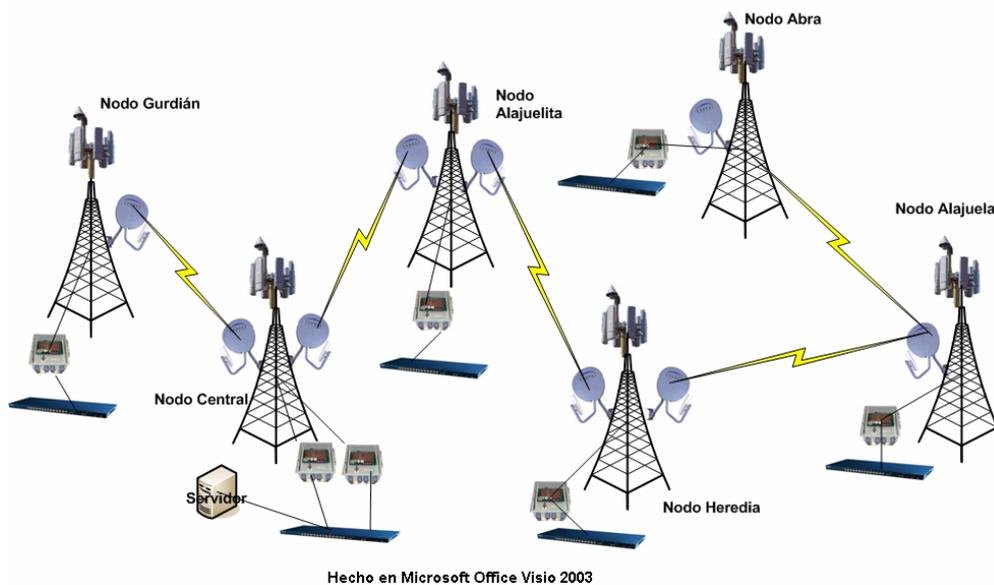


Figura 3.1. Diagrama de la topología de Continex Inalámbricas en el Área Metropolitana.

Fuente: Obtenido de *Topologia_Inalambrica_Canopy_Redcom*, Grupo Continex.

Las torres metálicas que se muestran en la figura 3.2 son fundamentales; sin embargo, a la hora de la instalación se debe seleccionar el sitio con mucha cautela ya que factores como la disponibilidad de establecer línea de vista (LOS), alquiler o concesión de terrenos pueden perjudicar la factibilidad de los enlaces ya sean punto a punto o multipunto.

Otro punto a tomar en cuenta es qué tan contaminado está el espectro de frecuencia así como el piso de ruido presente en el sitio, ya que esto produce interferencias en los equipos, problemas de sincronización entre un usuario final y el conjunto de puntos de acceso. En cuanto al piso de ruido se entiende como las emisiones de radiofrecuencia que producen interferencias y esto afecta directamente la disponibilidad del enlace.

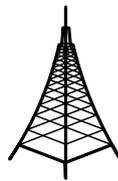


Figura 3.2. Torre metálica donde se fijan los equipos inalámbricos.

Fuente: Obtenido de *Topologia_Inalambrica_Canopy_Redcom*, Grupo Continex.

El módulo de manejo del clúster mejor conocido como Micro se muestra en la figura 3.3, es el encargado de proporcionar alimentación eléctrica al conjunto de puntos de acceso, sincronización a través de GPS (Sistema de Posicionamiento Global, por sus siglas en inglés). En otras palabras el Micro es punto central de conectividad en el cual se pueden conectar hasta 8 módulos, ya sean puntos de acceso (AP), BackHaul maestro (BHM), BackHaul esclavo (HBS) y una conexión Ethernet. [13]



Figura 3.3. Dispositivo sincronizador de los puntos de acceso.

Fuente: Obtenido de *Topologia_Inalambrica_Canopy_Redcom*, Grupo Continex.

La comunicación entre el nodo principal y el cliente va a depender de la cobertura del punto de repetición. Es por ello que se instala lo que se conoce como clúster. En una

torre se instala un conjunto de seis AP con el fin de abarcar la totalidad de cobertura a los alrededores. Bajo esta configuración en la plataforma Canopy de Motorola ® se tiene la particularidad que cada AP tiene un ángulo de recepción y transmisión de 60° por sector, por lo que los 6 AP cubren finalmente los 360° de cobertura. Sin embargo la distribución de frecuencia en el clúster no puede definirse al azar ya que se pueden presentar problemas de interferencia. Por eso como se explicará más adelante la distribución que se definió en la red inalámbrica de Continex Inalámbricas es como la que se muestra en la figura 3.9.



Figura 3.4. Representación de un conjunto de puntos de acceso.

Fuente: Obtenido de *Topologia_Inalambrica_Canopy_Redcom*, Grupo Continex.

Para permitir comunicación entre nodos sin la necesidad de cables de por medio que abarquen largas distancias, es que se utiliza el BH. Este dispositivo logra establecer conectividad a distancias de hasta 200Km. Es por ello que los BH proporcionan conectividad punto a punto mediante ondas de radiofrecuencia. Además requieren ser configurados como maestro o esclavo según las circunstancias del enlace. Claro que para sincronizar un enlace punto a punto es más accesible ajustar el BH que esté configurado como esclavo que el maestro porque el esclavo solo depende de la sincronización que le envía el maestro en cambio el maestro tiene funciones especiales de comunicación.



Figura 3.5. Dispositivo encargado de establecer enlace punto a punto.

Fuente: Obtenido de *Topologia_Inalambrica_Canopy_Redcom*, Grupo Continex.

En la última milla de la red inalámbrica es necesario que el cliente logre tener conectividad con el punto de repetición. Es por ello que del lado del cliente se requiere una unidad suscriptor que se encarga de registrarse en la red mediante la comunicación con uno de los AP del clúster. Ésta unidad es conocida como equipo local del cliente (CPE, *Customer Premises Equipment* por sus siglas en inglés) que extiende la red o los servicios de comunicación de Internet a través del AP.



Figura 3.6. Dispositivo encargado de enlazar el cliente con el clúster.

Fuente: Obtenido de *Topologia_Inalambrica_Canopy_Redcom*, Grupo Continex.

El conmutador o mejor conocido como switch es un dispositivo que permite tener acceso a los AP, BH, Micro y SM. Los switches utilizados en la plataforma son de la marca Zyxel y corresponden a los modelos ES-2024 y ES-4024.



Figura 3.7. Dispositivo encargado de establecer comunicación entre los equipos.

Fuente: Obtenido de *Topologia_Inalambrica_Canopy_Redcom*, Grupo Continex.

3.2 Descripción de los principios electrónicos para la comunicación de radioenlaces

3.2.1 Elementos para establecer enlaces de radio

Para establecer enlaces inalámbricos primero se debe realizar un análisis de potencias en los elementos que intervienen; se examinan los niveles de potencia del equipo transmisor así como sus pérdidas en los cables y conectores. De igual manera se toman en cuenta los mismos parámetros del lado del receptor y el nivel de pérdidas debido a la propagación en el espacio libre. Con esto se puede tener una estimación solamente de los parámetros que entregan los equipos con sus respectivas pérdidas sin tomar en cuenta el relieve y los obstáculos que podrían presentarse en la trayectoria de la propagación de la señal de radiofrecuencia. [22]

3.2.1.1 Presupuesto del enlace (Balance de potencias)

Una forma de estimar la viabilidad de un enlace punto a punto teniendo como premisa la distancia, frecuencia y potencias de los equipos es realizando un presupuesto del enlace. Es recomendable utilizarlo en la fase previa a la instalación de los puntos de

repetición, claro está que luego se deben realizar ajustes de manera que se pueda aproximar a la realidad [2]. Si se realiza una sumatoria de la potencia del transmisor, con el nivel de sensibilidad del receptor, las ganancias de las antenas transmisora y receptora; a esto se le restan las pérdidas de los cables y las perdidas en el espacio libre, se puede obtener el margen con el que se inicia el diseño del enlace. Por el contrario, si el margen resultante es negativo significa que definitivamente el enlace no se puede llevar a cabo bajo la distancia propuesta y la frecuencia requerida junto con los demás parámetros.

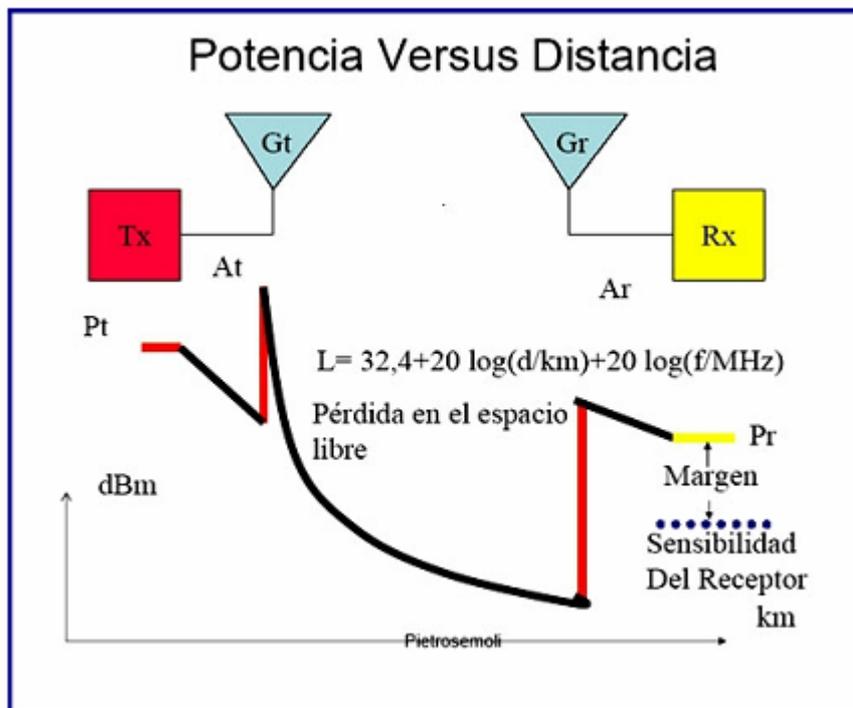


Figura 3.12. Relación entre las pérdidas en el espacio libre y la distancia, según una frecuencia transmitida.[3]

Existe una estrecha relación entre la potencia con la que se desea trabajar en un enlace y la distancia entre ambos puntos. En la figura 3.12 se puede entender mejor como están relacionados los parámetros. Cuando la señal sale del equipo transmisor y pasa por los cables y conectores que están acoplados a la antena presenta una leve atenuación lineal conforme se aumenta la distancia del cable. No obstante, cuando la señal de radiofrecuencia se propaga a través de la antena en el espacio libre, se va atenuando conforme aumenta la distancia de manera logarítmica. El momento en que la señal de RF es recibida en el otro extremo del enlace, la señal es amplificada por la antena receptora y nuevamente cuando viaja por el cable y los conectores presenta una pequeña atenuación

que finalmente la onda de radio llega a tener una magnitud tal que el equipo receptor permite mantener un nivel de sensibilidad. La ecuación 3.1 permite determinar si el enlace deseado es factible o no.

$$\text{Margen - Sensibilidad}_{\text{Rx}} = P_{\text{tx}} - \text{Perd}_{\text{cableTx}} + G_{\text{ant-tx}} - \text{FSL} - \text{Perd}_{\text{cableRx}} + G_{\text{ant-Rx}} - P_{\text{adic}} \quad (3.1)$$

3.2.1.2 Pérdidas de propagación en el espacio libre

Un aspecto importante en el diseño de enlaces son las pérdidas de propagación en el espacio libre, ya que es el punto del enlace donde se pierde la mayor parte de la potencia de la señal de la onda electromagnética. Este parámetro indica cómo se disminuye la señal en el espacio debido a que irradia en todas direcciones y no todas las ondas llegan directamente a la antena receptora, debido a la expansión dentro de una superficie esférica.

También conocido como *Free Space Loss*, las pérdidas de propagación en el espacio libre están en función de la distancia y la frecuencia de transmisión. Para comprender mejor el concepto se puede empezar a partir de la propagación de una onda libre en un canal de radio, en el cual se puede describir mediante la siguiente ecuación:

$$L_0 = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (3.2)$$

Donde λ , es la longitud de onda y se puede reescribir como $\lambda = c/f$, así pues se obtiene:

$$L_0 = \left(\frac{4\pi d f_c}{c} \right)^2 \quad (3.3)$$

Donde d es la distancia, f_c es la frecuencia y $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ es la velocidad de la luz; reacomodando la ecuación entonces quedaría como se muestra a continuación:

$$L_0 = \left(\frac{4\pi d f_c \times 1 \times 10^9}{3 \times 10^8} \right)^2 \quad (3.4)$$

Si se aplican logaritmo a ambos lados a la ecuación (3.4) se obtiene lo siguiente:

$$L_0 = 20 \log \left(\frac{4\pi \times 10}{3} \right) + 20 \log(f_c) + 20 \log(d) \quad (3.5)$$

$$= 10 \log \left(\frac{4\pi d f_c \times 1 \times 10^9}{3 \times 10^8} \right)^2 \quad (3.6)$$

$$L_0 = 32.4 + 20 \log(f_c) + 20 \log(d) \quad (3.7)$$

Finalmente, la ecuación (3.7) muestra más claramente la relación entre las pérdidas de propagación en el espacio libre L_0 (dBm) y la distancia d (Km) a una frecuencia f (MHz) específica. Entonces se puede decir que la pérdida de la ruta incrementa a razón de 20dB/década, así que a la vez se dobla la distancia, pero se pierden 6dB en el espacio bajo condiciones de espacio libre [8]. En la figura 3.13 se puede observar cómo se atenúa la señal conforme aumenta la distancia de los enlaces.

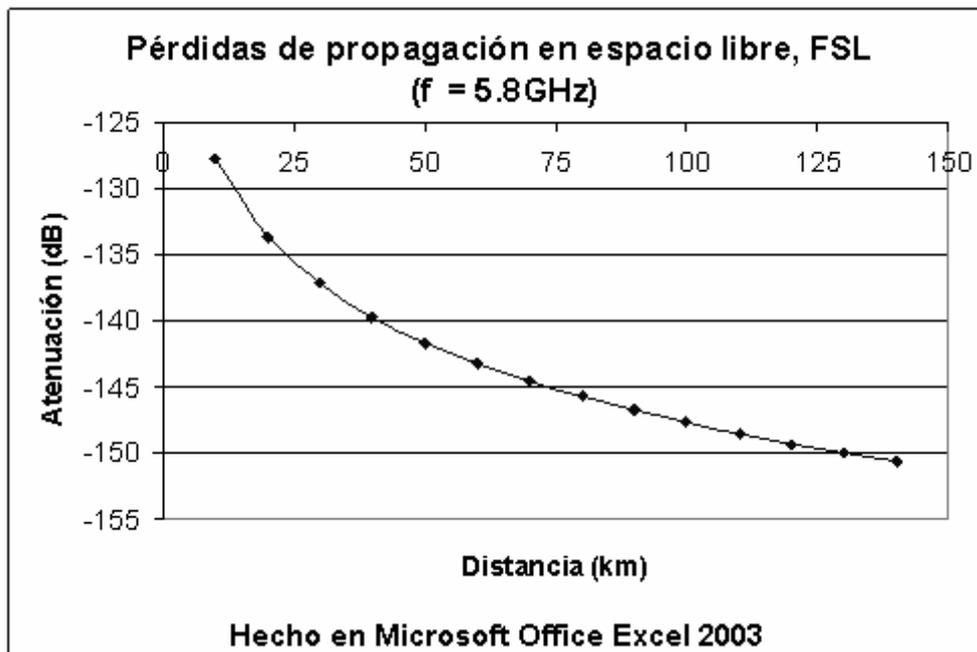


Figura 3.13. Pérdidas de propagación en el espacio libre para $f = 5.8\text{GHz}$.

3.2.1.3 Potencia nominal de recepción de señal

La sensibilidad de un receptor es un parámetro que se le debe prestar atención en los radioenlaces, ya que indica cuán débil puede ser la señal recibida y por lo tanto hasta a donde puede ser procesada por el equipo receptor. Normalmente se expresa en dBm a una velocidad de transferencia dada por ejemplo, -83 @ 20Mbps. Cuanto menor sea el nivel de

sensibilidad, mejor es la recepción de radio. El nivel de potencia de recepción se puede obtener mediante la sumatoria de potencias que intervienen desde el lado del transmisor hasta el receptor, menos las pérdidas que hay de por medio.

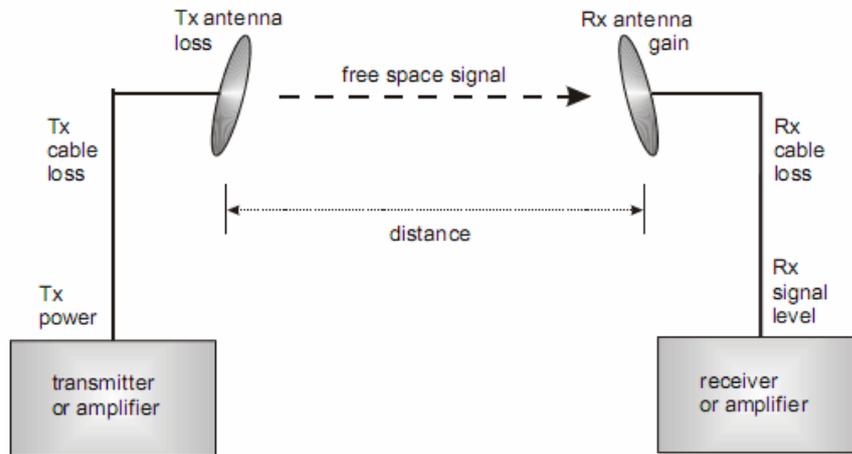


Figura 3.14. Esquema de potencias que intervienen desde el transmisor hasta el receptor.
Tomada de Canopy System UserGuide issue1, pag. 132. [16]

La figura 3.14 muestra un esquema con las potencias del transmisor, las pérdidas de los cables, ganancia de las antenas, las mismas potencias en el receptor y finalmente las pérdidas de propagación del espacio libre. Entonces el nivel de recepción de la señal que se propaga en el espacio se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$P_{Rx} \text{ [dBw]} = \text{Tx power} - \text{Tx cable loss} + \text{Tx antenna gain} - \text{free space path loss} + \text{Rx antenna gain} - \text{Rx cable loss} \quad (3.8)$$

La ecuación 3.8 es confiable bajo la premisa que no hay objetos que obstruyan la señal transmitida y que hay línea de vista establecida entre ambos puntos de conexión.

3.2.1.4 Zonas de Fresnel

Otro aspecto importante en el diseño de enlaces inalámbricos es lo que se conoce como Zonas de Fresnel. Para comprender mejor este concepto tenemos que partir de varios principios. Primero se parte del principio de Huygens suponiendo que la señal que sale del

transmisor se propaga en el espacio hacia el receptor, y estas señales tienen cada punto de ondas primarias un frente u obstrucción que dan origen a fuentes de ondas secundarias el cual produce así una onda plana o esférica que vuelve a reconstruirse. [10] De manera que cuando una señal pasa por un obstáculo, ésta produce ondas secundarias que pueden producir pérdidas.

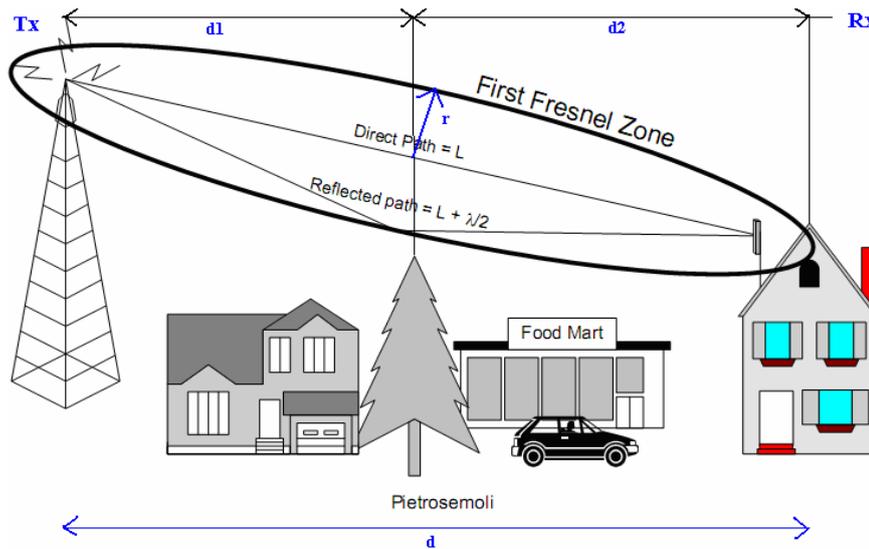


Figura 3.15. Primera Zona de Fresnel.

Basado en el documento “Diseño de RadioEnlaces” [17]

Ahora bien, supongamos que se tiene un escenario como el que se muestra en la figura 3.15, en donde se tienen dos antenas isotrópicas separadas una distancia d . A una distancia $d1$ se halla un obstáculo del transmisor, mientras que a una distancia $d2$ se halla el obstáculo con respecto del receptor. Calculando el radio r de la primera zona de Fresnel se puede mostrar que la relación matemática que describe dicho radio es el que se muestra en la siguiente ecuación matemática:

$$r = 17.32 \cdot \sqrt{\left(\frac{d1 \cdot d2}{d \cdot f}\right)} \tag{3.9}$$

donde:

- r: radio de la primera zona de Fresnel. [m]
- d: distancia del transmisor al receptor. [km]
- d1: distancia al obstáculo desde el trasmisor. [km]
- d2: distancia al obstáculo desde el receptor. [km]
- f: frecuencia [GHz]

De modo que las zonas de Fresnel se pueden interpretar como elipsoides, y en este caso de análisis la primera zona de Fresnel permite determinar la condición de visibilidad de las antenas. Así pues si dentro de la primera zona de Fresnel no hay obstáculos presentes, se puede decir que la trayectoria de la señal que viaja en el espacio no está obstruida y no presentará pérdidas apreciables por este efecto. [18]

Para que el enlace sea satisfactorio, basta con tener el 60% del radio de la primera zona de Fresnel despejada. Existen casos en que las obstrucciones son críticas y producen difracciones lo que debilita significativamente la potencia de la señal. Se pueden presentar situaciones en que las señales de RF pueden tener curvas hacia arriba lo que se recomienda aumentar la altura de las torres. En largas distancias la curvatura de la Tierra juega un papel muy importante en las zonas de Fresnel ya que introducen alturas adicionales a las que se les debe agregar a la antena. [2]

3.2.1.5 Pérdidas por atenuación debido a la lluvia

Las pérdidas por atenuación debido a la lluvia afectan los sistemas de transmisión inalámbricos. En zonas donde la lluvia es torrencial, ésta perturba la propagación de las señales de radiofrecuencia. Sin embargo este efecto se aprecia con mayor intensidad para frecuencias superiores a 5GHz.

De acuerdo con las recomendaciones de la UIT-R, la atenuación total debido a la lluvia se puede obtener de la siguiente forma [12]:

$$A_R = \gamma_R \cdot d_{eff} \quad (3.10)$$

donde:

A_R : atenuación total debido a la lluvia [dB].

γ_R : atenuación específica [dB/Km].

d_{eff} : longitud efectiva del enlace [Km].

Para la atenuación específica debido a la lluvia, según la recomendación de la UIT-R P-838-3 [29] γ_R (dB/Km) se obtiene a partir de la intensidad de la lluvia R (mm/h) mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma_R = k \cdot R^\alpha \quad (3.11)$$

donde k y α son coeficientes que están en función de la frecuencia (en GHz) para el rango de 1GHz a 1000GHz. Las constantes k y α se obtienen mediante el ajuste de las curvas a los coeficientes que se representan en las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{k_H + k_V + (k_H - k_V) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau}{2} \quad (3.12)$$

$$\alpha = \frac{k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau}{2k} \quad (3.13)$$

donde k_H , k_V y α_H , α_V coeficientes de polarización vertical y horizontal; θ es el ángulo de elevación del trayecto y τ es el ángulo de inclinación de la polarización con respecto a la horizontal.

Para obtener la longitud efectiva del enlace se calcula de la siguiente manera:

$$d_{eff} = d \cdot r \quad (3.14)$$

donde:

d_{eff} : distancia efectiva del enlace [Km].

d : distancia real del enlace [Km]

r : factor de reducción

En cuanto al factor de reducción r , se obtiene a partir de la intensidad de lluvia al 0.01%, mediante la siguiente fórmula:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad (3.15)$$

donde el factor d_0 se relaciona con la intensidad de lluvia de la siguiente manera:

$$d_0 = 35 \cdot e^{-0.015 \cdot R_{0.01\%}} \quad (3.16)$$

Por el momento solo se plantea la forma de obtener la atenuación debido a la lluvia a partir de valores de intensidad de lluvia conocidos. Este tipo de atenuaciones afectan ligeramente más a las polarizaciones horizontales que a las verticales debido al rozamiento producido por las gotas en las caídas de éstas. [12]

3.2.1.6 Cálculo del factor K

En el diseño de enlaces a largas distancias es importante tomar en cuenta la curvatura que presenta la Tierra; esto porque puede interferir en el establecimiento de la línea de vista entre ambos puntos de repetición. Por ello es necesario tener visibilidad entre ambos puntos para poder evaluar los niveles de recepción de la señal que están asociados con condiciones aleatorias como las atmosféricas.

Cuando el enlace tiene condiciones atmosféricas adversas, la propagación de las ondas se ven afectadas y por lo tanto disminuye la fuerza de la señal. Es por ello que las condiciones meteorológicas modifican la trayectoria de tendencia rectilínea y producen curvaturas. [4]

Una de las condiciones del medio en que se va a establecer un enlace inalámbrico es la curvatura de la Tierra o bien, lo que se conoce como el radio ficticio de la Tierra. Este radio *efectivo* es típico según la zona geográfica. Normalmente en condiciones donde no se tienen suficientes datos para determinarlo se asume como $K = 4/3$, sin embargo se puede determinar mediante la ecuación 3.17 como se muestra a continuación:

$$K = \frac{1}{1 + R_o \cdot \frac{\delta n}{\delta h}} \quad 3.17$$

Donde:

K: factor k.

R_o: Radio real de la Tierra (6370Km).

$\frac{\delta n}{\delta h}$: Coincide de refracción específico de cada región.

Como se puede observar, el coincide de refracción es de acuerdo con la zona geográfica e inclusive la época del año, sin embargo este valor se puede obtener según la recomendación de la UIT ITU-R I.718-2.

Ahora el radio efectivo de la Tierra se calcula en la siguiente ecuación:

$$R_e = K \cdot R_0 \tag{3.18}$$

Donde:

R_e : Radio efectivo de la Tierra.

K : Factor K .

R_0 : Radio real de la Tierra (6370Km).

3.2.1.7 Cálculo de curvatura C de la Tierra

La curvatura “ C ” de la Tierra es una relación que se obtiene del objeto que interfiere en la trayectoria de la señal en donde existe un obstáculo que interfiere, tal como se muestra en la figura 3.15. Este concepto también se conoce como protuberancia de la Tierra. Está determinada por el inverso del factor k y está determinada por la siguiente ecuación:

$$C = \frac{4 \cdot d_1 \cdot d_2}{51K} \tag{3.19}$$

Donde:

C : curvatura de la Tierra, en metros.

D_1 : distancia desde el transmisor hasta el obstáculo en metros.

D_2 : distancia desde el obstáculo hasta el receptor en metros.

K : factor k .

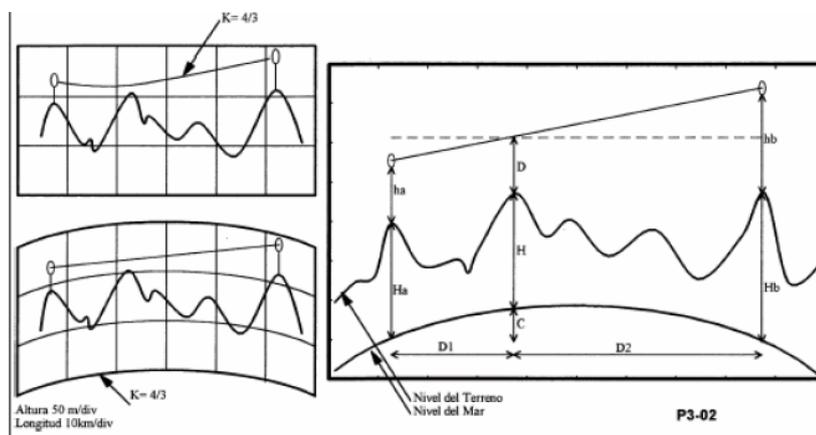


Figura 3.15. Relación entre superficie real y superficie equivalente de la tierra.

Tomado de Propagacion y Campo Recibido. [30]

En la figura 3.15 se muestra el efecto cuando se tienen condiciones en que no afectan la curvatura de la Tierra ni la altura de las antenas en la comunicación de dos radioenlaces. Por otro lado, cuando se tienen largas distancias y la curvatura de la Tierra interfiere en la propagación de las ondas, el rayo que se transmite describe una curva que según el factor de radio efectivo va a tener curva cóncava hacia abajo o hacia arriba según sea el caso y por lo tanto es que se puede interpretar un radio equivalente de la Tierra.

3.2.1.8 Cálculo de las antenas

Otro aspecto importante en el diseño de radioenlaces es el cálculo de las antenas. Para calcular este valor, se realiza con base en la figura 3.15 donde se debe tener en cuenta el valor del despejamiento “ D ”, en donde se trata de la separación entre el rayo de unión entre antenas y el obstáculo; en el cual es una fracción de la primera zona de Fresnel, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$D = 0.6F_1 \quad 3.20$$

Ahora bien, según la figura 3.15, para realizar el cálculo de las antenas existen diversos criterios. Uno de ellos es seleccionar el caso crítico $K = 4/3$ y $D/F = 1$ o $K = 0.8$ y $D/F = 0.6$. en caso que no se conocen datos suficientes para realizar los cálculos.

Como se puede observar en la figura 3.15, h_a y h_b con las alturas de las antenas a averiguar. Para determinarlas se puede lograr mediante las siguientes relaciones matemáticas:

$$H1 = H_a + h_a \quad 3.21.$$

$$H2 = H_b + h_b. \quad 3.22$$

$$H3 = C + H + D. \quad 3.23$$

$D1$ Y $D2$ son las distancias de los obstáculos A y B.

$$(H3 - H1).D2 = (H2 - H3).D1 \quad 3.23$$

Sustituyendo los valores de la ecuación 3.23 es como se obtiene finalmente la altura de las antenas, tomando en cuenta si éstas están sobre algún edificio.

Capítulo 2 . Procedimiento metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

En el desarrollo del estudio de factibilidad técnica para establecer comunicación entre la red de la Zona Metropolitana y las oficinas de Guanacaste se requiere recopilar todo tipo de información relacionada con el problema existente.

Se tiene conocimiento que Continex Inalámbricas día a día adquiere nuevos clientes en los diferentes sitios del país. Sin embargo, existe un auge muy importante en adquisición de clientes en la zona de Guanacaste. Agregado a esta situación los clientes en la actualidad solicitan no solo servicios de conexión a Internet para el tráfico de datos, sino también ahora tienen la necesidad de transmitir paquetes de voz y video, pero la falta de cobertura hacia la zona de Guanacaste impide que se puedan brindar tales servicios.

Es entonces que Continex requiere un análisis para determinar qué tipo de red inalámbrica debe tener la capacidad de enlazar la red de la Zona Metropolitana con la de Guanacaste y que pueda brindar cobertura, al menos parcial, en la zona; además que permita ofrecer los diferentes servicios de datos, voz y video.

Entonces el problema existente es la falta de cobertura de la red inalámbrica de Continex hacia la zona de Guanacaste debido al incremento de nuevos clientes.

4.2 Procedimiento de la solución

4.2.1 Diagnóstico de la plataforma en funcionamiento

Para determinar si es factible implementar una red inalámbrica hacia Guanacaste desde la Zona Metropolitana, es necesario realizar un diagnóstico de la plataforma que tiene en funcionamiento la empresa Continex Inalámbricas. Para ello se realizan mediciones de los paquetes que pasan por los nodos principales de la red. Por ejemplo se analiza los niveles de anchos de banda durante un muestreo de marzo a junio de 2008. De

ahí se determinará si los enlaces se encuentran saturados para evaluar la posibilidad de escoger el punto de partida hacia Guanacaste así como la adquisición de nuevos clientes.

4.2.2 Análisis de costo – beneficio de tecnologías inalámbricas

Luego de conocer el estado de la plataforma, se tiene un panorama más amplio de cómo se comporta la red en condiciones similares si se utiliza la tecnología Canopy de Motorola ®. Ahora bien, con base en dicha información se investigan las tecnologías que están en el mercado actual y se realizará análisis de los parámetros de transmisión más importantes así como un análisis de costo – beneficio. Con estos análisis se selecciona el equipo que mejor se ajusta a las características de los enlaces que se requieren para establecer los enlaces punto a punto y multipunto.

4.2.3 Descripción del modelo matemático de los radioenlaces

Para establecer el correcto funcionamiento de los enlaces de radiofrecuencia se hace uso de expresiones matemáticas que permitan dimensionar los enlaces; es decir realizar los cálculos necesarios para optimizar el establecimiento de cada uno de los enlaces que conformen la red inalámbrica. Claro está que los radioenlaces presentan un sin número de factores que pueden afectar o favorecer la comunicación entre dos puntos de repetición, por ello se enfocará la investigación, las condiciones necesarias para establecer al menos línea de vista (LOS), balance de potencias, factores que atenúan la propagación de la señal entre otros.

4.2.4 Banda de frecuencia a utilizar y visitas de campo a los sitios

La banda de frecuencia en la que se transmiten juega un papel importante. Por eso se analizará el tipo de frecuencia y la banda, tomando en cuenta aspectos como el costo económico, el espectro de frecuencia en el que estarán los equipos instalados. Además se realizaran visitas de campo a los sitios propuestos con el fin de verificar que presenten condiciones para establecer enlaces.

4.2.5 Topología para brindar cobertura en Guanacaste

En el diseño de la topología de red se requiere utilizar el programa GoogleEarth ® propietario de Google con el fin de investigar diferentes sitios que presenten condiciones aptas desde el punto de vista geográfico. Luego es necesario hacer uso de herramientas especializadas en la estimación de perfiles de enlaces inalámbricos como el Link Planner propietario de Motorola ® [14] y el RadioMobile [7].

Con la tecnología adecuada y los parámetros de transmisión definidos se realizan los cálculos matemáticos que permitan indicar las condiciones en que se establezcan los enlaces inalámbricos y se contrastan con los resultados obtenidos de los programas antes mencionados para finalmente realizar un bosquejo de los enlaces punto a punto y multipunto con la que se propone establecer conexión con la red San José – Guanacaste, así como brindar acceso a la red a los clientes en la zona.

Capítulo 3 . Resultados Experimentales

5.1 Estado de la red inalámbrica en el Área Metropolitana

En la topología de la red de Continex Inalámbricas se realizaron pruebas del tráfico de los paquetes de transmitidos y recibidos con el fin de determinar el estado de la misma. Con la ayuda de la herramienta SolarWinds, se logró monitorear del desempeño de la red, mediante la adquisición de muestras de 3 meses, desde marzo hasta junio del 2008. En las siguientes secciones se mostrarán los resultados del tráfico de la red, en los cuales se analizarán mediante gráficas de ancho de banda comprometido y ancho de banda real consumido para determinar los nodos que están saturados o por el contrario determinar los nodos que se pueden agregar más clientes y además que estén en las capacidades para agregar más enlaces punto a punto.

5.1.1 Comportamiento del Nodo Cartago (Gurdián)

Para determinar el estado del nodo ubicado en Cartago, se tomaron muestras de los paquetes transmitidos y recibidos durante los meses de marzo, abril, mayo y junio. Luego de obtener dicha información se procedió a graficarlas. En la figura 5.2 se muestra el ancho de banda real consumido de los puntos de acceso (también conocidos como AP) y del BH que comunica Gurdián con RedCom. Como se puede observar en la figura 5.2 tiene tres AP en el cual el número 145 es el que está consumiendo más ancho de banda de los tres, sin llegar a las máximas capacidades ya que el máximo ancho de banda real es de 6.2Mbps. Además se puede apreciar que en el BH que comunica Gurdián con RedCom el ancho de banda real transmitidos más recibidos tiene un máximo de 1.4Mbps lo cual indica que está muy por debajo de su tope máximo, ya que el rendimiento real del BH es de 14Mbps, 7Mbps de bajada y 7Mbps de subida por lo que el BH está utilizando un 20% de su límite máximo.

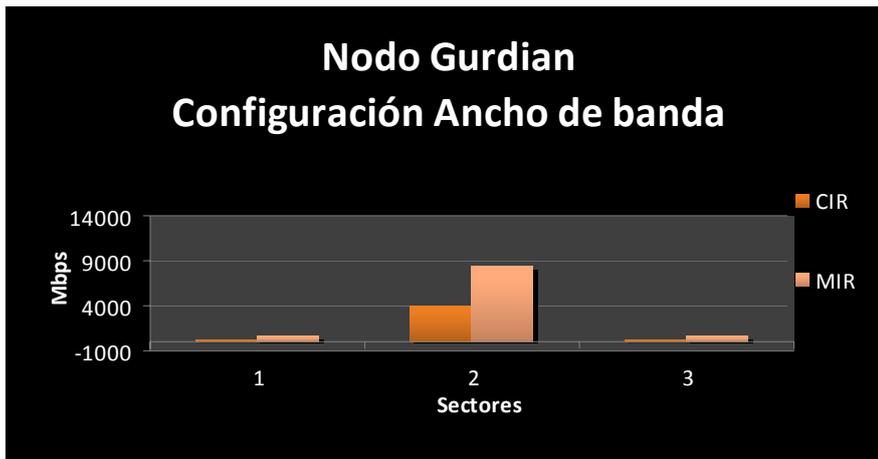


Figura 5.1. Ancho de banda comprometido en el Nodo Gurdían de marzo a junio de 2008.

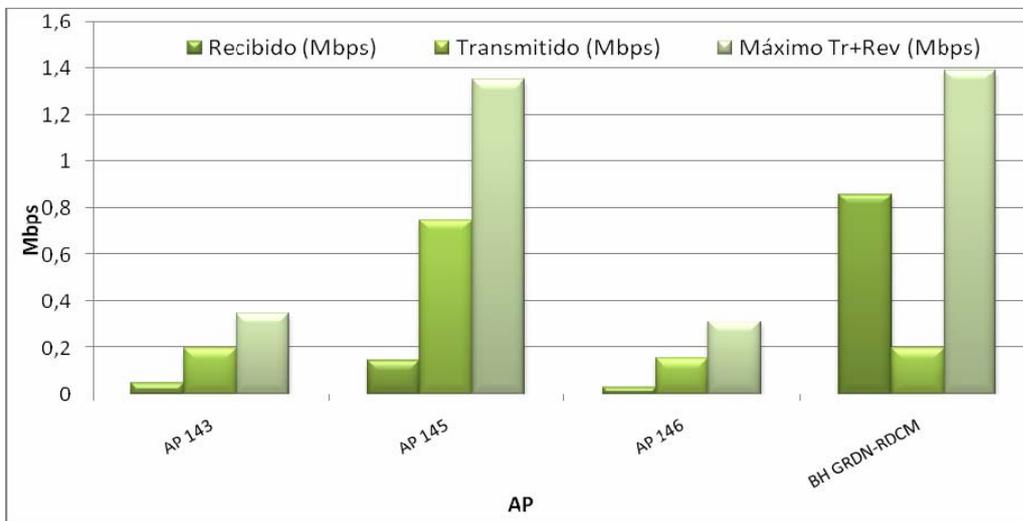


Figura 5.2. Ancho de banda real consumido en el Nodo Gurdían de marzo a junio de 2008.

Por otra parte se muestra en la figura 5.1 el ancho de banda comprometido a los clientes. De los tres sectores el que se muestra más cerca de los límites es el sector 2 donde el ancho de banda comprometido es de 4Mbps mientras que el máximo que puede soportar el AP es 6.2Mbps.

5.1.2 Comportamiento del Nodo Alajuelita

En el nodo de Alajuelita se realizaron las muestras del tráfico de los paquetes transmitidos y recibidos. Luego se graficaron tal como se muestra en las figuras 5.3 y 5.4

en donde se observa que se tienen instalados 3 sectores y dos enlaces punto a punto: el que comunica Alajuelita con Heredia y Alajuelita con RedCom el nodo principal.

De acuerdo con los datos obtenidos, se tiene el AP32 que está alcanzando aproximadamente 4.5Mbps en donde sus capacidades máximas es de 6.2Mbps, es decir está utilizando el 72.5% de lo que puede consumir. En el caso de los BH el comportamiento de los equipos muestra que los enlaces principales están llegando a los límites ya que en el BH que comunica Alajuelita con Heredia tiene un ancho de banda de total por encima de los 5.32Mbps lo que significa que está operando al 76% de sus capacidades; en el caso del BH de Alajuelita con RedCom se muestra un ancho de banda real utilizado de 5.8Mbps lo que muestra un porcentaje de utilización de 82.86%.

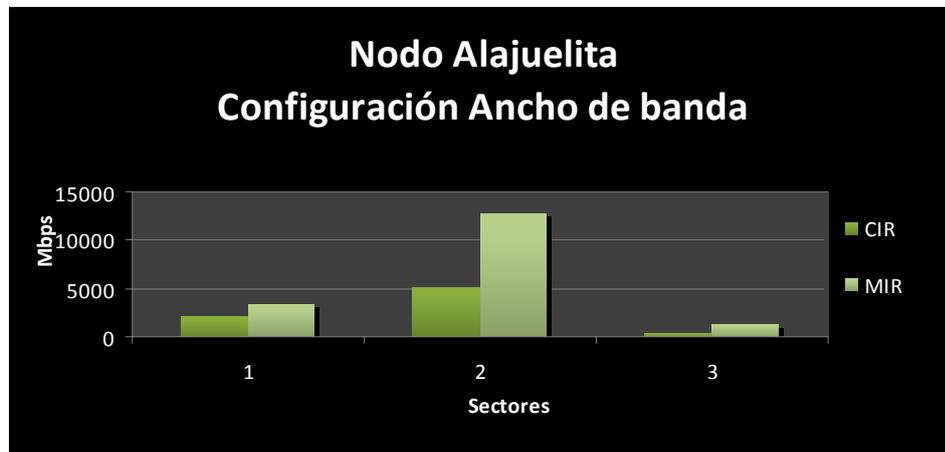


Figura 5.3. Ancho de banda comprometido en el Nodo Alajuelita de marzo a junio de 2008.

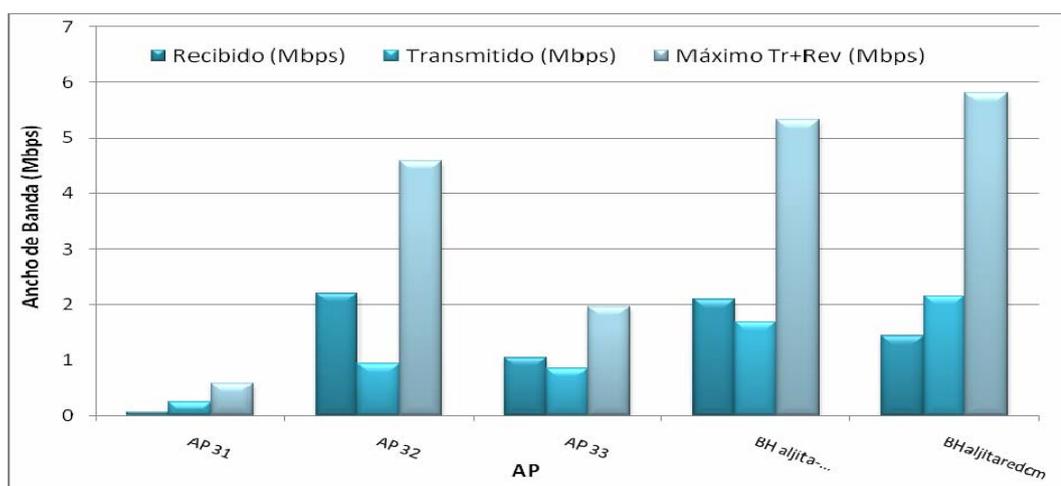


Figura 5.4 Ancho de banda real consumido en el Nodo Alajuelita de marzo a junio de 2008.

El ancho de banda comprometido por el lado de los enlaces y los clientes se puede decir que los sectores 1 y 3 están liberados mientras que por el sector 2 presenta un punto importante a tomar en cuenta ya que la tasa de transferencia comprometida (CIR, *committed information rate* por sus siglas en inglés) es de 5Mbps, llegando a su capacidad nominal de 7Mbps y por consiguiente representa un 70.4%.

5.1.3 Comportamiento del Nodo Heredia

Para determinar el comportamiento del nodo de Heredia se utilizaron las muestras realizadas en los meses de marzo a junio de 2008. Las gráficas obtenidas son las que se muestran en las figuras 5.5 y 5.6 en donde se puede decir que existen 4 sitios sectores en funcionamiento y dos enlaces punto a punto que comunican los nodos de Heredia con Alajuela y Heredia con Alajuelita. Como se puede ver en la figura 5.6 los 4 AP están utilizando menos de 1Mbps lo que significa que están utilizando menos del 16% de las capacidades de los equipos. Por otro lado, el consumo de ancho de banda real de los BH muestra que están alcanzando los valores máximos ya que están alcanzando 4.8Mbps y 4.9Mbps mientras que el máximo es de 7Mbps.

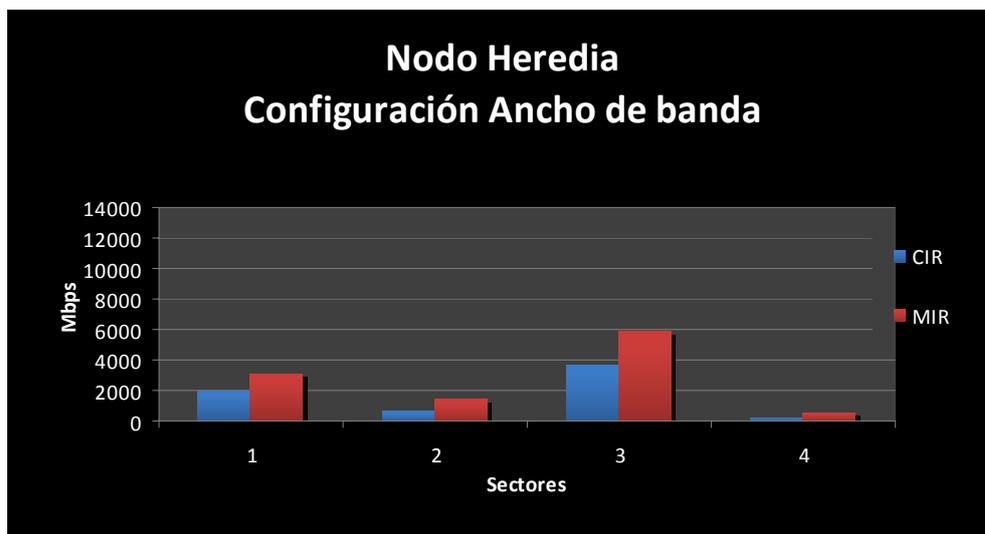


Figura 5.5. Ancho de banda comprometido en el Nodo Heredia de marzo a junio de 2008.

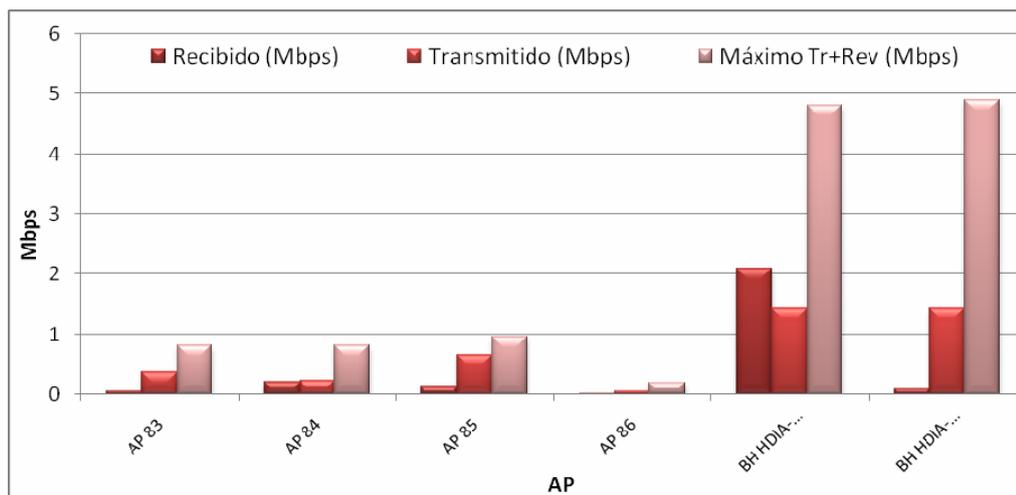


Figura 5.6 Ancho de banda real consumido en el Nodo Heredia de marzo a junio de 2008.

En el nodo de Heredia se muestra según la figura 5.5 que se tienen sectores donde se pueden agregar más usuarios ya que por ejemplo en el sector 4 los valores del CIR y MIR son bajos, es decir menores que 1Mbps. En general se tienen sectores que se pueden agregar más clientes según lo mostrado en las tasas de transferencias comprometidas en la figura 5.5.

5.1.4 Comportamiento del Nodo Escazú (Abra)

De acuerdo con la información recopilada, para el nodo de Escazú se obtuvieron 3 sectores instalados en dicho nodo más 2 enlaces punto a punto, el que comunica Escazú con Turrúcares y Escazú con Alajuela. En cuanto al ancho de banda real consumido se puede apreciar con la ayuda de la figura 5.8 que el AP51 presenta condiciones para incrementar el número de usuarios, al igual que el sector52. En cuanto a los enlaces punto a punto se puede observar el enlace Escazú – Turrúcares es el que presenta el menor tráfico de los dos BH. El otro BH está en la mitad del consumo del ancho de banda real lo que significa que no presenta saturación en los enlaces.

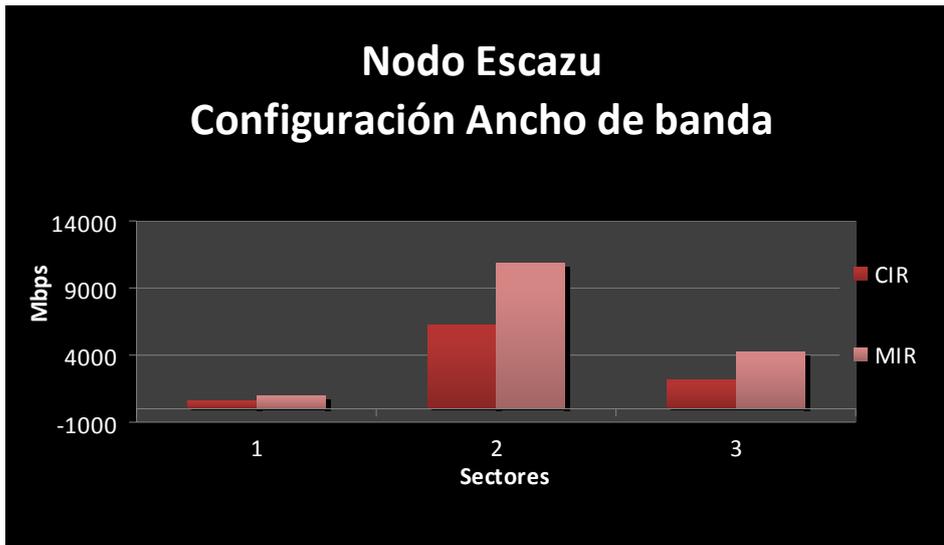


Figura 5.7. Ancho de banda comprometido en el Nodo Escazú de marzo a junio de 2008.

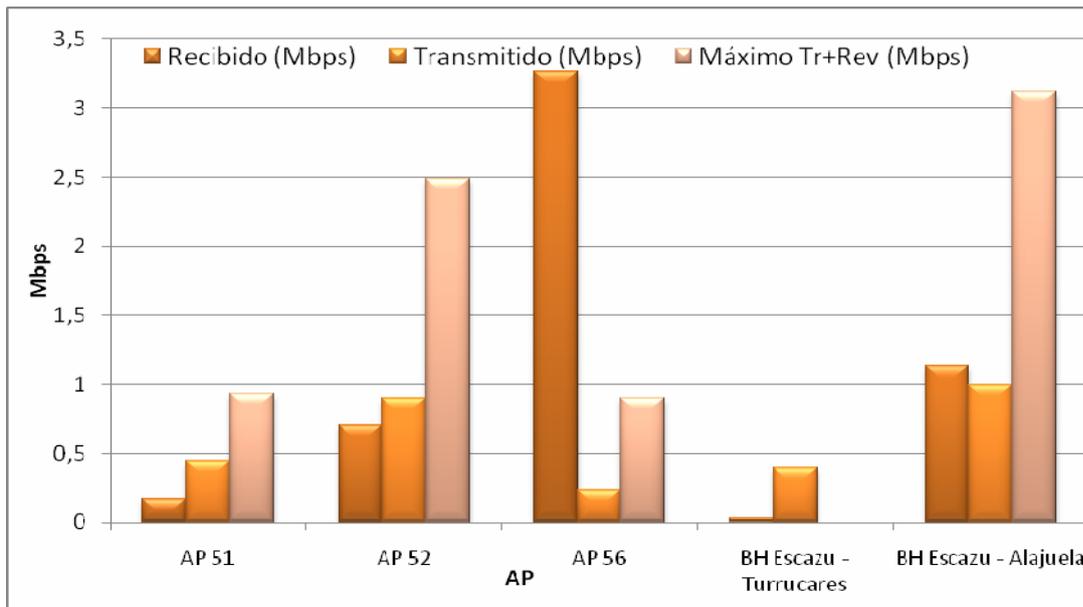


Figura 5.8. Ancho de banda real consumido en el Nodo Escazú de marzo a junio de 2008.

En el ancho de banda comprometido para el nodo de Escazú se puede observar que de acuerdo con la figura 5.7, el sector 2 es el que presenta niveles de saturación ya que la tasa de transferencia comprometida es de 6Mbps llegando así a utilizar todo el ancho de banda en dicho sector. Por el contrario en los otros dos sectores se tienen niveles por debajo de 2Mbps lo que significa que se pueden aumentar la cantidad de usuarios en los sectores 1 y 3.

5.1.4 Comportamiento del Nodo Alajuela

Uno de los puntos más importantes es el Nodo Alajuela. Con la ayuda de las gráficas de las figuras 5.9 y 5.10 es que se puede determinar que la cantidad de sectores instalados es de 3, mientras que existen dos enlaces punto a punto a saber: el primero es el que comunica Alajuela con Heredia y Nodo Alajuela con Escazú.

En la figura 5.10 se muestra como el AP113 presenta un consumo de 1.5Mbps lo que significa que está utilizando un 24% del ancho de banda que puede entregar por lo tanto se puede agregar más usuarios a dicho equipo. En el AP114, está mostrando un ancho de banda real de paquetes transmitidos más recibidos de 4.21Mbps; es decir un 68% de lo que puede brindar. Caso contrario al AP 113 sucede con el AP115 ya que está utilizando el doble de ancho de banda lo que significa que no tendría la misma flexibilidad de agregar usuarios como sí se podría hacer en el AP113.

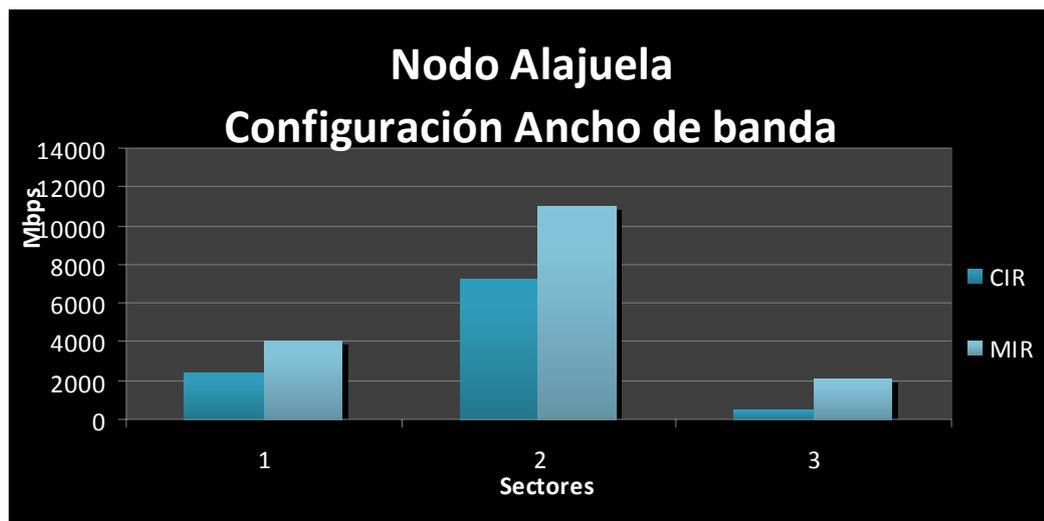


Figura 5.9. Ancho de banda comprometido en el Nodo Alajuela de marzo a junio de 2008.

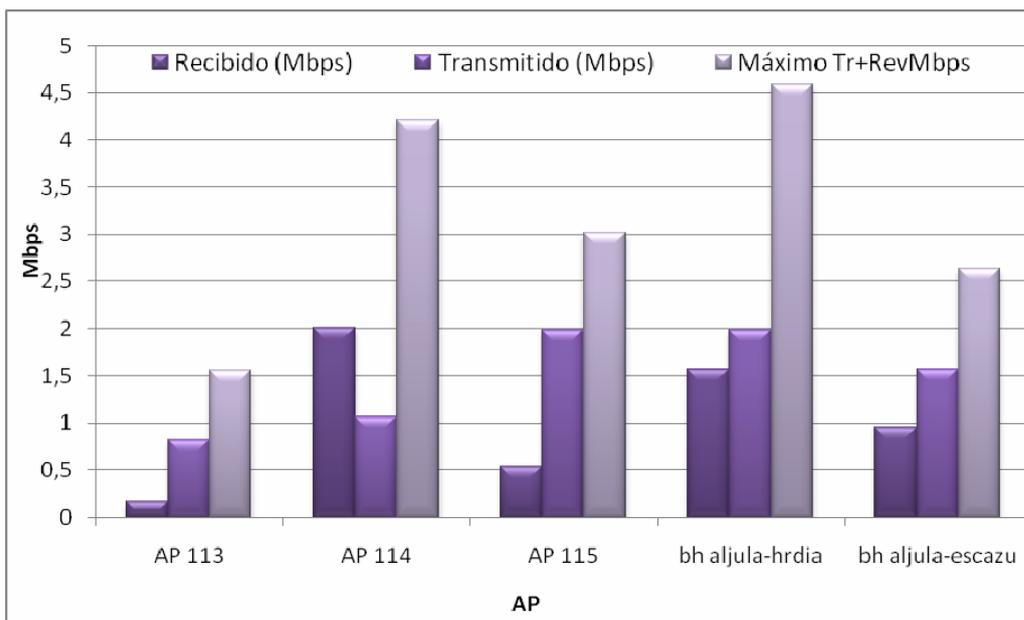


Figura 5.10. Ancho de banda real consumido en el Nodo Alajuela de marzo a junio de 2008.

El estado de los BH en el nodo de Alajuela indica la figura 5.10 que tiene el enlace con Heredia a un 65% de la utilización del equipo mientras el otro que comunica con Escazú presenta un ancho de banda real de 37% dando como resultado que tiene la posibilidad de agregar una cantidad limitada de usuarios al punto de repetición de Alajuela.

Con respecto al ancho de banda comprometido se puede decir que con los tres sectores que se han adquirido, el que presenta mayor configuración del CIR y está más cerca de su capacidad de operación es el sector 2 con un CIR de 7.2Mbps; mientras que en el sector 3 es el que tiene el menor CIR con 512Kbps lo que indica que se pueden agregar usuarios en su mayoría a este sector.

5.1.5 Comportamiento del Nodo RedCom (Principal)

El nodo RedCom es el punto principal de la red inalámbrica. Como se mencionó en los capítulos anteriores, este nodo está ubicado en las oficinas de Continex Inalámbricas en San José y como se puede ver en las figuras 5.11 y 5.12 es el nodo que tiene más sectores instalados en un mismo nodo con un total de 6. A pesar de tener la mayor cantidad de AP la casi todos tienen un ancho de banda real de utilización menor a 1.5Mbps a excepción del AP que tiene un ancho de banda real menor que 3.5Mbps; es decir el 50% de la utilización

total de dicho equipo. En el BH que comunica el sitio principal con Gurdían tiene un ancho de banda real de 1.41Mbps de tráfico transmitido más recibido en la muestra que se realizó de marzo a junio de 2008. El enlace de RedCom que comunica con Alajuelita por su parte presenta un consumo de 4.64Mbps de ancho de banda real lo cual hacer ver que utiliza el 66% del total que puede entregar dicho BH.

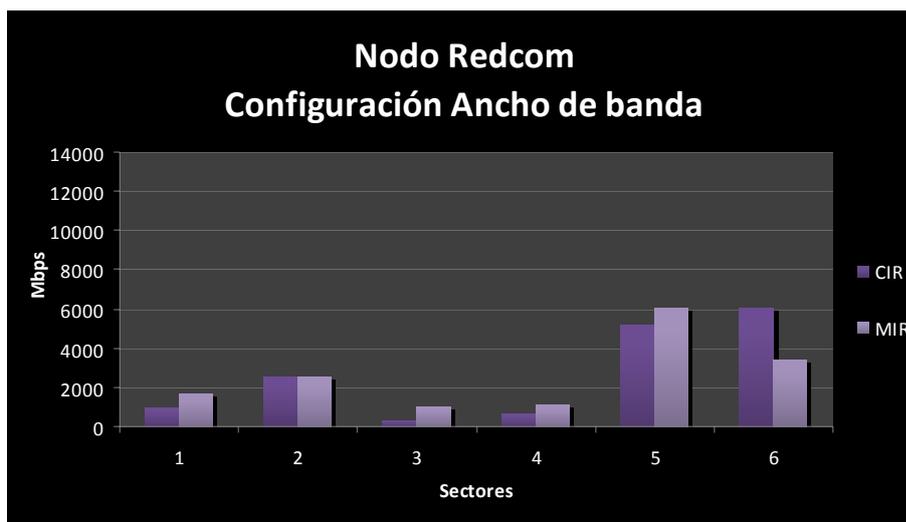


Figura 5.11. Ancho de banda comprometido en el Nodo RedCom de marzo a junio de 2008.

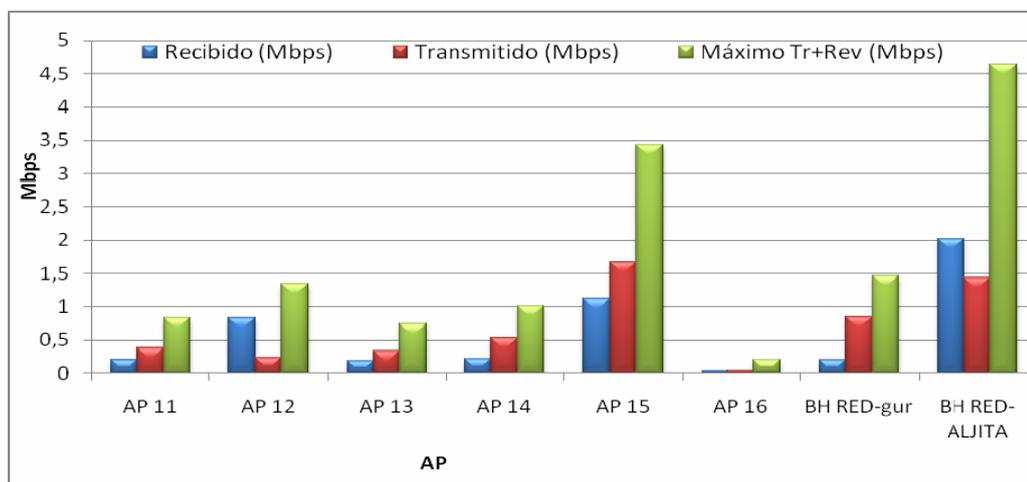


Figura 5.12. Ancho de banda real consumido en el Nodo RedCom de marzo a junio de 2008.

Con respecto al ancho de banda que se compromete ofrecer al cliente, se tiene que los sectores donde están más limitados son sectores 5 y 6 donde cada uno tienen un CIR de 5.1Mbps y 6Mbps configurados, respectivamente. En cuanto a los otros sectores se puede decir que tienen CIR menores a los 2.5Mbps lo que hace ver que se pueden adquirir usuarios a la red inalámbrica sin tener problemas de saturación de los enlaces.

5.2 Tecnologías inalámbricas de conexión punto a punto

Para establecer una red inalámbrica en el cual se van a transmitir a largas distancias, por ejemplo 100Km, es importante analizar entre otros factores los costos de instalación y operación de las tecnologías que se van a implementar. Se debe tomar en cuenta la ubicación geográfica de los nodos ya que entre menor sea la cantidad de enlaces, menor serán los costos operativos ya que para la instalación de cada torre se deben evaluar el alquiler o concesión de terrenos para la colocación de las antenas; la accesibilidad del terreno, la disponibilidad de alimentación eléctrica para los equipos porque el espacio físico puede tener todas las condiciones aptas pero si no se tiene presente este aspecto va a representar en problema que de paso podría echar atrás la implementación del mismo.

El enfoque que se realizará en la selección de la tecnología adecuada para establecer enlaces es mediante el uso de equipos punto a punto y punto a multipunto con frecuencias libres y frecuencias licenciadas con el fin de proponer posteriormente una topología para tener comunicación entre la red del Área Metropolitana y las oficinas de Continex en Guanacaste y cobertura parcial en dicha provincia.

5.2.1 Equipos punto a punto que operan con frecuencias libres

En la investigación de tecnologías que operan con frecuencias libres se destacó 5 de los equipos más sobresalientes. Estos dispositivos son los que se pueden apreciar en la tabla 1.

Tabla 1. Cuadro comparativo de tecnologías BH para enlaces PTP, con frecuencias libres.

Tecnología	Rango de alcance (km)	Tamaño del canal (MHz)	Banda de frecuencia (GHz)	Ancho de banda (Mbps)	Costo económico (dólares)
GigaBeam 5.8 series ptp	NLOS: 48	36	5.470 – 5.875	108	–
Motorola ® PTP58600 y PTP54600	LOS: 200 nLOS: 40 NLOS: 10	30	5.725 – 5.850 5.470 – 5.725	300	\$15995*
Proxim Terabridge 5845	LOS: 64	16	5.725–5825	90**	\$9307
RedLine RedCONNEX AN-80i	LOS: 80	40	5.725 – 5.850 5.470 – 5.725	90	\$1610
Trango broadband wireless P5055M-EXT-US	72	20	5725 – 5850	45	\$1965

Nota: los precios no incluye costos de envío a Costa Rica.

* Modelo BP5830BHC15-2CC. BH Enlace Conectorizado. El precio es por enlace.

** Full Dúplex, o sea en cada dirección se tiene ancho de banda de 45Mbps.

*** GigaBeam soporta QoS, IP ToS; Trango BroadBand soporta QoS

Con los datos técnicos de los equipos PTP se resumieron en la tabla 1 los aspectos más relevantes para contrastar entre las tecnologías. En el rango de alcance de los equipos, se puede apreciar que los equipos PTP600 de la marca Motorola ® presenta el mayor alcance de hasta 200Km (ideales) en línea de vista, mas aun con la posibilidad de establecer un enlace de 40Km, si se tiene casi línea de vista [13]. Este parámetro ayuda a disminuir costos ya que a mayores distancias, menor va a ser la cantidad de los enlaces.

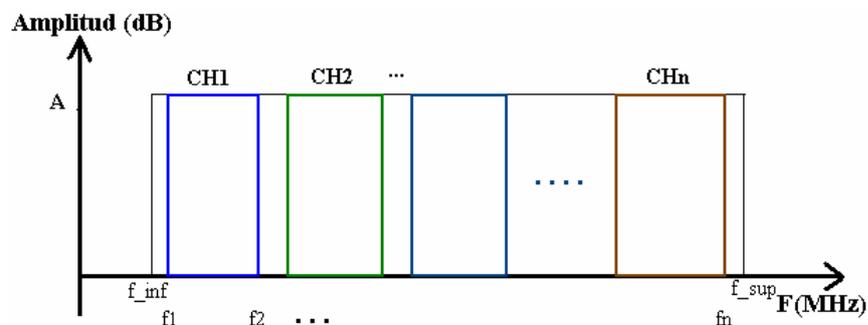


Figura 5.13. Relación entre el ancho de banda analógico del canal y los subcanales.

Otro parámetro de transmisión importante es el tamaño del canal, ya que según sea este valor, así será la cantidad de equipos que se puedan conectar; en este caso depende del número de enlaces PTP que se pueden realizar dentro de una banda de frecuencias específicas. Como se puede ver en la figura 5.13, la cantidad de canales va a depender de la banda de frecuencia con la que se tiene a disposición. Se puede relacionar con la siguiente ecuación:

$$\#canales = \frac{f_{sup} - f_{inf} - 5MHz}{ancho_de_canal} \quad (5.1)$$

Donde la f_{sup} y f_{inf} son la frecuencia superior e inferior, respectivamente, de la banda de transmisión, menos un margen de seguridad de 5MHz dividido entre el tamaño del canal. De este modo, tomando la parte entera de la ecuación 5.1, como se puede determinar la cantidad máxima de equipos que se podría conectar en una misma banda de frecuencias para las tecnologías presentes en la tabla 1.

Con la ecuación 5.1 podemos decir cuántos canales se tienen a disposición para conectar equipos; en este caso los enlaces PTP lo que se puede estimar de 2 – 4 equipos PTP en una misma banda de frecuencia. Por eso es que de acuerdo con la tabla 1, la tecnología que tiene el punto más alto en este aspecto va a depender de si se realiza enlaces redundantes.

En cuanto al ancho de banda, en términos de bits por segundo, la tecnología PTP600 de Motorola ® es la que supera a todas las demás con un ancho de banda de 300Mbps. Claro está mencionar que Costa Rica es considerada uno de los sitios tropicales con los cambios atmosféricos más inestables del mundo, produciendo que las condiciones atmosféricas mas interferencias y obstrucciones en las trayectorias, hace que el ancho de banda que indican los fabricantes no siempre pueda lograrse a cabalidad.

Evaluando los parámetros antes mencionados se llega finalmente a determinar que hay una estrecha relación entre los costos que implican la adquisición de un equipo u otro con el beneficio que este ofrece; ya que la menor cantidad de saltos entre enlaces disminuye los costos de operación y mantenimiento y por otro lado, al tener equipos con

los anchos de banda lo suficientemente capaces como para mantener grandes demandas de los usuarios, produce que se mantenga una red estable y a su vez que sea escalable.

Es por ello que para mantener enlaces inalámbricos punto a punto, según las tecnologías evaluadas en la tabla 1 que operan con frecuencias libres, se puede decir que la tecnología que mejor se ajusta a las características de la plataforma de red inalámbrica de Continex Inalámbricas es la tecnología PTP600 de la marca Motorola ® por los rangos de alcance de hasta 200Km en las que se puede llegar a establecer enlaces con línea de vista, el ancho de banda que ofrece de hasta 300Mbps y la posibilidad de mantener hasta 4 enlaces punto a punto según la ecuación 5.1..

5.2.1 Equipos punto a punto que operan con frecuencias licenciadas

Otra alternativa con la que operan los equipos punto a punto son los BH que trabajan con frecuencias licenciadas según, lo establecido en el plan de distribución de frecuencias del departamento del Ministerio de Gobernación, Control Nacional de Radio [5]. Se encontraron más tecnologías que ofrecen BH operando a frecuencias licenciadas. Para la tecnología que se debe escoger para futuras implementaciones, es necesario retomar las características que la plataforma que opera actualmente.

Como se puede observar en la tabla 2, los rangos de frecuencia son diferentes unos de otros. Esto es importante porque entre más alta sea la banda de frecuencia de operación menos interferencia existe. Por ejemplo la marca Proxim ofrecen equipos que operan a frecuencias licenciadas de 71 – 76GHz, sin embargo la distancia que cubre es de 8Km, lo cual indica que es insuficiente como para establecer la menor cantidad de enlaces hacia Guanacaste.

La marca Motorola ® con su nueva serie de productos PTP 25600 y PTP 4.9 series ofrece nuevamente equipos con rangos de alcance de hasta 200Km, anchos de banda de 300Mbps. Por otra parte la marca Trango BroadBand ofrece soluciones muy competentes a varias bandas de frecuencias. Tal es el caso de la banda de frecuencia de 23GHz el cual tiene un ancho de banda de 620Mbps con un rango de alcance de 65Km. Esto significa que para efectos de establecer los enlaces hacia la Zona de Guanacaste, tanto la marca Motorola ® como Trango BroadBand están en la capacidad de establecer enlaces con anchos de banda robustos como para que sean escalables a futuro.

Tabla 2. Comparación de tecnologías BH punto a punto con frecuencias licenciadas.

Tecnología		Rango de alcance (km)	Tamaño del canal (MHz)	Rango frecuencia (GHz)	Ancho de banda (Mbps)	Costo económico (dólares)
Exalt Comm.	EX-4.9r/ EX-4.9r-c	10	20	4940 – 4990	55	\$14900
GigaBeam	4.9 series ptp	NLOS: 35	40	4940 – 4990	1.5 – 108*	–
Motorola ®	ptp 49600 series	200	10	4940 – 4990	35	11995
	ptp 25600 series	200	5 – 30	2496 – 2690	300	\$15995
Proxim	GigaLink 7451e-AC	8	–	71 – 76	1250	\$33238
Trango BroadBand Wireless	TrangoLink Giga 6GHz	65	30	Band 1A: 5935 - 6044 Band 1B: 6187 – 6296 Band 2A: 6054 - 6162 Band 2B: 6306 - 6414	330	\$10500
	TrangoLink Giga 11GHz	65	40	Band 1A: 10715 - 10945 Band 2A: 10955 - 11185 Band 1B: 11215 - 11.445 Band 2B 11445 - 11.685	480	\$9500
	TrangoLink Giga 18GHz **	65	80	Band 1 17700-18140 Band 2 19265 - 19700	622	\$9500
	TrangoLink Giga 23GHz	65	80	Band 2A 21800 - 22395 Band 2B 23000 - 23595	620	\$9500

* Ancho de banda seleccionable por medio de software.

** Según una modificación al reglamento Plan de Distribución de Frecuencias en Costa Rica, la banda de frecuencia 17.7GHz – 19.7GHz se atribuye como de uso compartido (frecuencia libre). Art 131, inciso 6 publicado en La Gaceta el 28 de junio de 2004. [6]

Prioridad de tráfico: GigaBeam: QoS, IP TOS; Trango BroadBand: QoS

5.3 Tecnologías inalámbricas de conexión punto a multipunto

La tecnología punto multipunto es la parte de los enlaces donde se tiene conexión con los clientes o suscriptores (conocido como CPE, *Customer Premises Equipment* en inglés). También conocido como la última milla (*Last Mile* en inglés), este tramo de los

enlaces inalámbricos es donde el estándar de comunicación Wimax ha tenido un enorme auge en sus productos. Es por ello que en la tabla 3 se muestran tres tecnologías que se basan en dicho estándar. La tecnología Airspan tiene varios rangos de alcance, tamaño del canal ajustable vía software, y ancho de banda según las condiciones en el sitio. Motorola® presenta dos soluciones que operan en la banda de frecuencia de 2GHz y 5.8GHz el cual MotoWi4 funciona con el estándar Wimax con ancho de banda de 12Mbps y los puntos de acceso de hasta 14Mbps.

Tabla 3. Cuadro comparativo de tecnologías punto a multipunto.

Tecnología		Rango de alcance (km)	Tamaño del canal (MHz)	Rango frecuencia (MHz)	Prioridad de tráfico	Ancho de banda (Mbps)	Costo económico (dólares)
Airspan (Wimax)	AS4020	Urbano: 2 – 5 Suburbano: 5 – 10 Rural: 15 – 50	3, 3.5, 6, 7, 12, 14	900 – 4000	- 802.1p - ToS - QoS	1.8, 5.7, 8.5	-
Motorola®	MotoWi4 WAP 400	CPEI: 5* CPEO: 20**	5, 7, 10	2300 – 2400 2495 – 2690 3400 – 3600	- QoS - IP Tos - 802.1Q - 802.1p	12	-
	5701AP AES	LOS: 3.2	20	5725 – 5850	–	14	\$1595
Proxim (Wimax)	MP.11 2454-R	32	-	2400 – 2483	- QoS - IP ToS - 802.1p tag	1.5 – 54 ***	\$1590
	MP.11 5054 –R- LR	32	-	5725 – 5850		1.5 – 54 ***	\$1590
Trango Broad Band	M2400S	LOS: 40 ****	10	2400 – 2483	–	5	\$1687
	Access 5830	28.8	-	5725 – 5850	–	10	\$1243

*Conectado con una unidad suscriptor para interiores (Indoor Subscriber Unit).

** Conectado con una unidad suscriptor para exteriores (Outdoor Subscriber Unit).

*** Ancho de banda variable desde 1.5, 2.25, 3, 4.5, 6, 9, 12, 16, 36, 48, 56Mbps (*signaling rate*, velocidad de señalización).

**** Utilizando una antena de malla en el lado de una unidad suscriptor (SU).

Otra de las tecnologías que funciona con el estándar Wimax es Proxim el cual tiene dos puntos de acceso que operan a distintas frecuencias. La diferencia entre los dos equipos es únicamente el rango de frecuencias, pero lo demás mantiene iguales características en el cual tiene anchos de banda ajustable vía software. La tecnología Trango BroadBand tiene dos soluciones para la última milla en donde a pesar de que se sacrifica el ancho de banda, se tiene rangos de alcance de hasta 40Km.

Finalmente una característica muy relevante es la prioridad del tráfico, ya que se desea que la futura red inalámbrica hacia Guanacaste tenga las capacidades de transmitir paquetes de voz IP y video por lo que los equipos que se instalen en la implementación tengan diferentes mecanismos de darles prioridad al tráfico de la red. Es por ello la importancia de tener puntos de acceso que tengan el mayor ancho de banda, rangos de alcance al menos de 15Km, con prioridad de tráfico para brindar el mayor rendimiento al usuario final. Estas características son la que mejor se recomiendan para el uso de los puntos de acceso de la marca Proxim ya que de acuerdo con lo mostrado en la tabla 2, se observa que tiene rangos de alcance medios de 32Km, prioridad de tráfico, velocidad de transferencia de datos de hasta 54Mbps y además que está bajo los estándares de Wimax 802.16e y con precios que inclusive están por debajo de otras marcas que no ofrecen calidad de servicio (QoS) ni Tipo de servicio (ToS), por poner un ejemplo.

5.4 Uso de frecuencia libre versus frecuencia licenciada

El uso de frecuencias libre o frecuencias licenciadas en los enlaces de radiocomunicación punto a punto o multipunto, tienen diversos temas importantes según sean los alcances de la empresa proveedora de servicios. En el [anexo1](#) se muestra un resumen de las frecuencias que para efectos de transmisión inalámbrica son de interés. Dicho resumen se basa en el Plan de Distribución de Frecuencias [5].

En cuanto al uso de frecuencias libres se puede decir que presentan la desventaja que son frecuencias de uso compartido; es decir, en un mismo sitio o punto geográfico varios proveedores de servicio de conexión inalámbrico puede utilizar la misma banda de frecuencia para transmitir el cual está propenso a sufrir interferencias. La ventaja que se tiene al usar este tipo de frecuencias es que no se necesita concesión para transmitir según la banda y lo estipulado en los artículos del 36 al 41 del Plan de Distribución de Frecuencias [5]. Por ejemplo, si se tiene BH punto a punto Motorola ® ptp600 y se transmite en la banda 5725MHz – 5850MHz se estaría transmitiendo en frecuencia libre y como lo estipula el artículo 37 “... y con una potencia máxima de 2Watts”.

Por otra parte se tiene la frecuencia licenciada. Presenta una ventaja muy importante con respecto a la frecuencia libre ya que al adquirir una de este tipo no se puede tener interferencias causada por otros equipos porque sino incurrirán en sanciones. El punto débil de usar este tipo de frecuencias es adquirir una concesión y esto tiene un costo económico asociado. Este monto económico está determinado de acuerdo a la banda de frecuencia en el espectro radioeléctrico que se concesione. Sin embargo según se consultó en Control Nacional de Radio, en estos momentos no se tienen frecuencias licenciadas disponibles mayores a 2GHz debido a que ya están concesionadas y junto a esto se está a la espera para la resolución sobre el resultado de la Ley de Apertura de Telecomunicaciones que está en proceso de aprobación para que el Instituto Costarricense de Electricidad ceda frecuencias que están clasificadas como licenciadas.

Debido a la carencia de disponibilidad de frecuencias licenciadas en Costa Rica actualmente, no se puede adquirir una, por lo que en estos momentos solo se puede optar por implementar a futuro la red inalámbrica hacia Guanacaste con frecuencia libre; sin embargo, en el momento en que se realice la apertura de frecuencias licenciadas sería más adecuado utilizar frecuencias licenciadas ya que se evitan interferencias por parte de equipos que deseen transmitir dentro del rango o sitio que estén las antenas instaladas.

5.5 Tecnología punto a punto a utilizar

Parte importante en el diseño de radioenlaces es la tecnología punto a punto de los nodos, ya que de acuerdo con la instalación de las radio bases, así van a funcionar correctamente o no. Por lo tanto, partiendo de uno de los principios de la teoría de radioenlaces, es como se va a seleccionar la tecnología para realizar los demás cálculos matemáticos a la hora de dimensionar el enlace.

5.5.1 Presupuestos de los enlaces punto a punto

De acuerdo con las estimaciones que se pueden realizar sobre el presupuesto de un enlace utilizando la ecuación matemática 3.1, es como a continuación se calculará la factibilidad de establecer el enlace que tiene mayor distancia en el presente estudio de factibilidad técnica para implementar la red hacia Guanacaste.

Para obtener el presupuesto de los enlaces primero se debe calcular el valor de las pérdidas de propagación en el espacio libre ya que ésta es una referencia fundamental de la ingeniería radioeléctrica, según lo establece la recomendación de la UIT-R P-525-2 [27]. Para eso se va a tomar a una banda de frecuencia de 5800MHz. En cuanto a la distancia se tomará una distancia de al menos 100Km, ya que este valor podría ser una distancia de unos de los posibles enlaces de radio. Utilizando la ecuación 3.7 dicho valor se tiene de la siguiente manera:

$$L_0 = 32.4 + 20 \log\left(\frac{5800MHz}{MHz}\right) + 20 \log\left(\frac{100Km}{Km}\right)$$

$$L_0 = 147.71dB$$

Una vez que se tiene las pérdidas de propagación en el espacio libre, se procede a calcular el presupuesto de los enlaces con la ayuda de las hojas de datos de los fabricantes de las diferentes tecnologías

5.5.1.1 Tecnología PTP600 de Motorola ®

El presupuesto del enlace como se mencionó en los capítulos anteriores es un balance de potencias desde el transmisor al receptor. Como se muestra en la tabla 4 están involucradas tanto las ganancias como las pérdidas y el resultado final es el margen el cual nos indica si el enlace es viable o no. En este caso el margen obtenido es de 36.55dB lo cual nos indica que el radioenlace podría funcionar correctamente si existe línea de vista entre ambos puntos y no existiera otro tipo de interferencia, operando a una distancia de 100Km y a frecuencia libre de 5.8GHz [22]. En el caso de frecuencia licenciada, operando en la banda de 2.5GHz el cálculo muestra un margen de 16.1dB dando por entendido que también es factible un enlace con esta banda de frecuencia.

Para el balance de potencias, se asume que se utilizan longitudes de cables de 40 metros marca Belden con una atenuación de 4dB/pies. En este caso la atenuación de los cables es de 5.25dB a una frecuencia de 5.8GHz, tal como se muestra en las hojas de datos de los cables.

Tabla 4. Presupuesto del enlace ptp con tecnología Motorola ®. [13]

Característica	Valor	Unidades
Potencia del transmisor:	27	dBm
Pérdidas adicionales en transmisión (cables):	5.25	dB
Ganancia de la antena transmisora:	37.5	dB _i
Pérdidas básicas de propagación en espacio libre:	146.64	dB
Pérdidas adicionales de propagación:	3.809	dB
Ganancia de la antena receptora:	37.5	dB _i
Pérdidas adicionales en recepción (cables):	5.25	dB
Sensibilidad del receptor:	-86	dBm
Margen resultante:	27.05	dB

5.5.1.2 Tecnologías Terabridge y GigaLink de Proxim

Con los datos suministrados de las hojas técnicas se tomaron los parámetros de las potencias de transmisión y recepción de los equipos, más las pérdidas y finalmente en la tabla 5 se muestra en balance de potencias donde el presupuesto del posible enlace dio un valor de -18.58dB lo que indica que el enlace no podrá funcionar correctamente bajo la distancia y frecuencia dada. En el caso del equipo GigaLink que opera en frecuencia licenciada de 71 – 76GHz el margen del enlace da un resultado de 16.73dB asumiendo una sensibilidad del receptor de -80dBm, indicando que ésta tecnología operando a frecuencia licenciada sí es capaz de establecer comunicación entre dos nodos separados a una distancia de 100Km. Se asume que se utilizan longitudes de cables de 40 metros marca Belden con una atenuación de 4dB/pies. En este caso la atenuación de los cables es de 5.25dB a una frecuencia de 5.8GHz, tal como se muestra en las hojas de datos de los cables.

Tabla 5. Presupuesto del enlace ptp con tecnología TeraBridge de Proxim. [19]

Característica	Valor	Unidades
Potencia del transmisor:	14	dBm
Pérdidas adicionales en transmisión (cables):	5.25	dB
Ganancia de la antena transmisora:	20	dB _i
Pérdidas básicas de propagación en espacio libre:	147.71	dB
Pérdidas adicionales de propagación:	3.809	dB
Ganancia de la antena receptora:	20	dB _i
Pérdidas adicionales en recepción (cables):	5.25	dB
Sensibilidad del receptor:	-80	dBm
Margen resultante:	-28.08	dB

5.5.1.3 Tecnología RedConnex AN80i de RedLine

Los equipos de la marca RedLine que se investigó se obtuvieron los parámetros de las hojas técnicas y finalmente se calculó el presupuesto del enlace donde se obtuvo un margen negativo de -14.52dB, lo cual significa que no sería posible establecer comunicación entre dos puntos a una distancia de 100Km transmitiendo a una frecuencia de 5.8GHz. Se asume que se utilizan longitudes de cables de 40 metros marca Belden con una atenuación de 4dB/pies. En este caso la atenuación de los cables es de 5.25dB a una frecuencia de 5.8GHz, tal como se muestra en las hojas de datos de los cables.

Tabla 6. Presupuesto del enlace ptp con tecnología RedLine. [23]

Característica	Valor	Unidades
Potencia del transmisor:	18	dBm
Pérdidas adicionales en transmisión (cables):	5.25	dB
Ganancia de la antena transmisora:	20	DBi
Pérdidas básicas de propagación en espacio libre:	147.71	dB
Pérdidas adicionales de propagación:	0.5	dB
Ganancia de la antena receptora:	20	dB
Pérdidas adicionales en recepción (cables):	5.25	dB
Sensibilidad del receptor:	-80	dBm
Margen resultante:	-24.02	dB

5.5.1.4 Tecnología P5055M-EXT-US de Trango BroadBand

La tecnología Trango BroadBand, se utilizaron las hojas de datos para realizar el presupuesto del enlace mediante el balance de potencias. Como se muestra en la tabla 7, el resultado del presupuesto dio un margen de -22.52dB. Este margen de factibilidad indica que un enlace de 100Km de distancia a una frecuencia de 5.8GHz no podría establecerse, ya que al menos en la práctica un valor para que se establezca el funcionamiento correcto se requiere de al menos un margen de 5dB – 6dB, aunque este valor es muy dependiente de la distancia, frecuencia y el tipo de sistema. [22]

Para las diferentes frecuencias licenciadas que ofrece la tecnología Trango BroadBand se calculó el margen para 6GHz y 23GHz (ver tabla2) dando como resultado 39.7dB y 15.83dB, respectivamente, lo cual indica que operando en estos rangos de frecuencias sería muy factible establecer enlaces a larga distancia. Se asume que se utilizan longitudes de cables de 40 metros marca Belden con una atenuación de 4dB/pies. En este

caso la atenuación de los cables es de 5.25dB a una frecuencia de 5.8GHz, tal como se muestra en las hojas de datos de los cables.

Tabla 7. Presupuesto del enlace ptp con tecnología Trango BroadBand. [24]

Característica	Valor	Unidades
Potencia del transmisor:	17	dBm
Pérdidas adicionales en transmisión (cables):	5.25	dB
Ganancia de la antena transmisora:	20	dB
Pérdidas básicas de propagación en espacio libre:	147.71	dB
Pérdidas adicionales de propagación:	3.809	dB
Ganancia de la antena receptora:	20	dB
Pérdidas adicionales en recepción (cables):	5.25	dB
Sensibilidad del receptor:	-73	dBm
Margen resultante:	-32.02	dB

En los presupuestos de los enlaces calculados anteriormente se determinó que la única tecnología que logró mantener un margen positivo a frecuencias libres fue PTP600 de Motorola ®; mientras que para frecuencias licenciadas Motorola ®, Proxim y Trango BroadBand presentaron márgenes viables para establecer enlaces a largas distancias. Sin embargo debido a la escasez de frecuencias licenciadas disponibles para concesionar una, es que actualmente solo con Motorola ® y las soluciones PTP600 se dispondría a utilizar para establecer los enlaces a Guanacaste.

5.6 Cálculo y perfiles de los enlaces punto a punto

Antes de estimar los lugares geográficos para realizar los enlaces punto a punto, se ha seleccionado la tecnología PTP600 de Motorola ® para los cálculos de los perfiles. Es por ello que a continuación se realizarán los cálculos de dichos perfiles con los parámetros de transmisión de los equipos PTP600 con el fin de estimar la factibilidad de utilizar dichos equipos en los diferentes puntos terrenales

Para la ubicación geográfica se recurrió al programa GoogleEarth ® propietario de Google. Esta herramienta se utilizó ya que funciona como un sistema de información geográfica digital; en el cual permite visualizar imágenes del relieve de Costa Rica, tales como montañas, edificios, ciudades, etc. Se capturó imágenes como la de topología de los nodos en la Zona metropolitana, tal como se muestra en la figura 3.1; en cual permitió evaluar sitios en los que intervienen factores como la accesibilidad a montañas ya que se

puede definir un punto muy alto para evitar problemas de interferencias o reflexiones indeseadas pero cuando se hace la visita al sitio se presenta que puede ser imposible el acceso o solo con vehículos doble tracción y equipo de escalar para llegar al posible punto. Otro factor que ayuda a tomar en cuenta con el GoogleEarth ® es la posibilidad de lugares donde exista energía eléctrica para la alimentación de las torres, ya que se debe prever estos inconvenientes.

El programa RadioMobile [7] es una herramienta complementaria ya que funciona a partir de mapas digitales de relieve con los que se cargan en dicho programa; permite predecir de manera teórica el establecimiento de puntos de repetición con visualización de los enlaces; es decir, RadioMobile funciona como un simulador de radioenlaces en el cual se le cargan perfiles de enlaces punto a punto [2]. Además se utiliza la herramienta Link Planner propietario de Motorola ® para estimar de una manera más precisa los radioenlaces, en el cual se digitan las coordenadas geográficas y luego se recibe por parte de Motorola ® con un perfil que luego es cargado dicho software. También se realizaron visitas a los puntos que a continuación se proponen como lugares para instalar los nodos ya que si se proponen sitios que luego son reservas o zonas protegidas o no existe acceso ni electricidad por poner algunos ejemplos, no tendría sentido disponer de enlaces con zonas no aptas para las torres.

5.6.1 Enlace Nodo Heredia y Cerro Berlín.

Uno de los enlaces donde se tiene las condiciones para establecer conexión es el Nodo de Heredia con Cerro Berlín localizado en San Ramón. La ubicación de las coordenadas geográficas se obtuvo con la ayuda del GoogleEarth ®. Luego se tabularon en el programa RadioMobile con el fin de evaluar la factibilidad técnica para determinar si presentaba condiciones para establecer comunicación entre ambos puntos ya que muestra el relieve que hay de por medio entre ambos puntos, claro sin tomar en cuenta los edificios u obstáculos que no son contemplados en los programas o mapas del relieve terrestre. También se utilizó el Link Planner, una herramienta de Motorola ® en el cual le permite indicar gráficamente la primera zona de Fresnel, el relieve que hay entre ambos sitios y ancho de banda real estimada, el tipo de modulación, etc. A continuación se presentan los cálculos matemáticos que permiten estimar la factibilidad de establecer enlaces punto

apunto; para este perfil de Nodo Heredia – Cerro Berlín se realizan detalladamente y para los posteriores enlaces se omite el desarrollo. No obstante los cálculos se pueden apreciar en la sección de apéndices.

5.6.1.1 Pérdidas de propagación en el espacio libre.

Como se analizó en el marco teórico, las pérdidas de propagación en el espacio libre son las mayores atenuaciones que se presentan en la trayectoria de la señal en el espacio. Por lo tanto para ejemplificar este efecto de atenuación en los radioenlaces, se utilizará la ecuación 3.7 donde la distancia a utilizar es la que existe entre Nodo Heredia y Cerro Berlín, a una frecuencia de 5.8GHz según la banda de frecuencia de los equipos PTP600 de Motorola ®. A continuación el valor de las pérdidas de propagación en el espacio libre es el siguiente:

$$L_0 = 32.4 + 20 \log(5800MHz) + 20 \log(42.73Km)$$

$$L_0 = 140.32dB$$

Ahora bien, de esta misma forma es como se calculan estas mismas pérdidas para los otros enlaces; por lo que a continuación en la tabla 8 se resumen los diferentes valores.

Tabla 8. Pérdidas de propagación en el espacio libre para cada enlace, para una frecuencia de 5.8GHz.

Nombre del Enlace	Distancia del enlace (Km)	Pérdidas de propagación en el espacio libre (dB)
Enlace Cerro Bellavista Azul – Colono Cerro Vicente	106.2	148.23
Enlace Berlín Casa Lino – Cerro Bellavista Azul	88.4	146.64
Enlace Cerro Bellavista Azul – Hermosa2	81.1	145.89
Enlace Cerro Bella Vista Azul – Liberia Coopemep	77.9	145.54
Enlace Arenal Sabalito – Colono Cerro Vicente	75.5	145.27
Enlace Cerro Bellavista Azul – Arenal Sabalito	74.1	145.1
Enlace Liberia Coopemep – Arenal Sabalito	47.8	141.3

Enlace Berlín Casa Lino – Nodo Heredia	42.7	140.32
Enlace Cerro Bellavista Azul – Nicoya ICE	29.2	137.02
Enlace Hermosa2 – Liberia Coopemep	26	136.01

5.6.1.2 Atenuación total debido a la lluvia

Para frecuencia de 5.5GHz se realizarán los siguientes cálculos debido a que en la recomendación de la UIT [29] las tablas de las constantes de polarización horizontal y vertical no están presentes para la frecuencia de 5.8GHz. Respecto a las ecuaciones explicadas en la sección 3.2.1.5 del marco teórico y con las constantes de polarización que se muestran en el anexo 2 y las ecuaciones 3.12 y 3.13 se obtiene los siguientes valores:

$$k = 0.0003334 \quad \alpha = 1.6081628$$

La intensidad de lluvia promedio al 0.01% de tiempo se obtuvo mediante la gráfica del anexo3, el cual es el siguiente valor

$$R = 145\text{mm/h}$$

Con la ecuación 3.11, la atenuación específica debido a la lluvia tiene un valor de:

$$\gamma_R = 0.0003334 \cdot 145^{1.6081628}$$

$$\gamma_R = 0.9972\text{dB} / \text{Km}$$

Para calcular el factor de reducción, primero se calcula el factor 1/d0 que se asocia con la intensidad de lluvia del 0.01% como nivel de referencia, utilizando la ecuación 3.16 se obtiene el siguiente cálculo:

$$d_0 = 35 \cdot e^{-0.015 \cdot 145}$$

$$d_0 = 3.976\text{Km}$$

Para este enlace entre Nodo Heredia y Cerro Berlín, la distancia es de 42.72km, por lo que al usar la ecuación 3.15 se obtiene lo siguiente:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{42.72}{3.976}}$$

$$r = 0.0852Km$$

La distancia efectiva según la ecuación 3.14 da un valor de:

$$d_{eff} = 42.72 \cdot 0.1184$$

$$d_{eff} = 3.636Km$$

Finalmente la atenuación total debido a la lluvia para el enlace Nodo Heredia – Cerro Berlín se calcula con la ecuación 3.10 de la siguiente manera:

$$A_R = 0.9972 \frac{dB}{Km} \cdot 3.636Km$$

$$A_R = 3.626dB$$

El cálculo de la atenuación total debido a la lluvia para todos los enlaces se resume en la tabla 9, como se muestra a continuación:

Tabla 9. Atenuación total debido a la lluvia para los enlaces.

Nombre del Enlace	Distancia del enlace (Km)	Longitud efectiva del enlace (Km)	Atenuación total debido a la lluvia (dB)
Enlace Cerro Bellavista Azul – Colono Cerro Vicente	106.2	3.833	3.963
Enlace Berlín Casa Lino – Cerro Bellavista Azul	88.4	3.812	3.809
Enlace Cerro Bellavista Azul – Hermosa2	81.1	3.790	3.689
Enlace Cerro Bella Vista Azul – Liberia Coopemep	77.9	3.783	3.655
Enlace Arenal Sabalito –Colono	75.5	3.777	3.648

Cerro Vicente			
Enlace Cerro Bellavista Azul – Arenal Sabalito	74.1	3.773	3.646
Enlace Liberia Coopemep – Arenal Sabalito	47.8	3.671	3.635
Enlace Berlín Casa Lino – Nodo Heredia	42.7	3.637	3.626
Enlace Cerro Bellavista Azul – Nicoya ICE	29.2	3.499	3.489
Enlace Hermosa2 – Liberia Coopemep	26	3.448	3.474

5.6.1.3 Presupuesto del enlace

Según la ecuación 3.1 el presupuesto del enlace entre Nodo Heredia y Cerro Berlín es el siguiente:

Tabla 10. Presupuesto de enlace para Nodo Heredia - Cerro Berlín

Característica	Valor	Unidades
Potencia del transmisor:	27	dBm
Pérdidas adicionales en transmisión (cables):	5.25	dB
Ganancia de la antena transmisora:	37.5	dB
Pérdidas básicas de propagación en espacio libre:	140.32	dB
Pérdidas adicionales de propagación:	3.626	dB
Ganancia de la antena receptora:	37.5	dB
Pérdidas adicionales en recepción (cables):	5.25	dB
Sensibilidad del receptor:	-86	dBm
Margen resultante:	33.55	dB

Resumiendo el presupuesto de cada uno de los enlaces se pueden observar en la tabla 11 como se muestra a continuación:

Tabla 11. Balance de potencias para cada uno de los enlaces.

Nombre del Enlace	Distancia del enlace (Km)	Presupuesto del enlace (dB)
Enlace Cerro Bellavista Azul – Colono Cerro Vicente	106.2	25.3
Enlace Berlín Casa Lino – Cerro Bellavista Azul	88.4	27.05
Enlace Cerro Bellavista Azul –Hermosa2	81.1	27.91
Enlace Cerro Bella Vista Azul –Liberia Coopemep	77.9	28.31
Enlace Arenal Sabalito –Colono Cerro Vicente	75.5	12.58
Enlace Cerro Bellavista Azul – Arenal Sabalito	74.1	12.75

Enlace Liberia Coopemep – Arenal Sabalito	47.8	16.83
Enlace Berlín Casa Lino – Nodo Heredia	42.7	33.55
Enlace Cerro Bellavista Azul – Nicoya ICE	29.2	20.99
Enlace Hermosa2 – Liberia Coopemep	26	20.76

5.6.1.4 Potencia nominal de recepción de señal

Como se analizó en la sección 3.2.1.3 del marco teórico, el nivel de recepción de la señal que se transmite nos indica qué tan débil puede llegar la señal hasta el receptor. Por los que utilizando la ecuación 3.8 se obtiene el siguiente nivel de recepción de señal para el caso del Nodo Heredia – Cerro Berlín:

$$P_{Rx} [dBw] = 27dB - 0.5dB + 37.5dBi - 140.32dB + 37.5dBi - 0.5dB$$

$$P_{Rx} [dBw] = -39.32dB-W$$

Realizando el mismo cálculo para los otros enlaces, se determinó que el nivel de recepción de señal es el que se muestra en la tabla 12 que se muestra a continuación:

Tabla 12. Nivel de recepción de la señal recibida para cada enlace.

Nombre del Enlace	Distancia del enlace (Km)	Ganancia de la antena, Tx, Rx (dBi)	Nivel de recepción (dBw)
Enlace Cerro Bellavista Azul – Colono Cerro Vicente	106.2	37.5	-47.24
Enlace Berlín Casa Lino – Cerro Bellavista Azul	88.4	37.5	-45.64
Enlace Cerro Bellavista Azul – Hermosa2	81.1	37.5	-43.90
Enlace Cerro Bella Vista Azul –Liberia Coopemep	77.9	37.5	-44.54
Enlace Arenal Sabalito –Colono Cerro Vicente	75.5	29.5	-60.27
Enlace Cerro Bellavista Azul – Arenal Sabalito	74.1	29.5	-60.1

Enlace Liberia Coopemep – Arenal Sabalito	47.8	29.5	-56.03
Enlace Berlín Casa Lino – Nodo Heredia	42.7	37.5	-39.32
Enlace Cerro Bellavista Azul – Nicoya ICE	29.2	29.5	-52.02
Enlace Hermosa2 – Liberia Coopemep	26	29.5	-51.58

5.6.1.5 Radio de la primera zona de Fresnel

Como se mencionó en el marco teórico, el radio de zona de Fresnel indica los elipsoides en el espacio que debe permanecer libre de obstáculos el enlace para que se logre establecer satisfactoriamente, en especial basta con que la primera zona de Fresnel se mantenga despejada. De manera que aplicando la ecuación 3.9 y haciendo uso de las figuras 5.14 y 5.15 se puede obtener el radio de la primera zona de Fresnel, tal y como se muestra a continuación en la tabla 13:

Tabla 13. Radio de despeje de la primera zona de Fresnel para cada enlace, para $f = 5.8\text{GHz}$.

Nombre del Enlace	Distancia del enlace (Km)	Distancia D1 (Km)	Distancia D2 (Km)	Radio de la primera zona de Fresnel (mts)
Enlace Cerro Bellavista Azul – Colono Cerro Vicente	106.2	70.10	36.22	35.14
Enlace Berlín Casa Lino – Cerro Bellavista Azul	88.4	44.27	44.27	33.86
Enlace Cerro Bellavista Azul – Hermosa2	81.16	79.14	2.02	10.093
Enlace Cerro Bella Vista Azul – Liberia Coopemep	77.94	67.14	10.80	21.93
Enlace Arenal Sabalito –Colono Cerro Vicente	75.5	37.75	37.75	31.24
Enlace Cerro Bellavista Azul – Arenal Sabalito	74.1	37.05	37.05	30.95
Enlace Liberia Coopemep – Arenal Sabalito	47.8	6.29	41.51	16.808

Enlace Berlín Casa Lino – Nodo Heredia	42.73	21.36	21.36	23.506
Enlace Cerro Bellavista Azul – Nicoya ICE	29.2	23.21	5.99	15.692
Enlace Hermosa2 – Liberia Coopemep	26.06	20.11	5.95	15.41

Como se puede observar en la tabla 13, algunos enlaces las distancias d1 y d2 son iguales asumiendo que existe un obstáculo en la mitad de la trayectoria entre el sitio local y el sitio remoto.

Luego de realizar los cálculos del enlace Nodo Heredia – Cerro Berlín ahora se estima el perfil mediante el Link Planner y RadioMobile el cual presentan el relieve que existe en la trayectoria de ambos sitios, sin embargo no muestra los edificios ni arboles.

En la figura 5.14 se muestra el resultado del relieve que atraviesa el enlace de Nodo Heredia con Cerro Berlín. Además se observa que existe línea de vista. De acuerdo con lo observado en la figura 5.15, la distancia entre ambos puntos es de 42.73Km. Utilizando la ecuación 3.7 las pérdidas de propagación en el espacio libre para este enlace son de 140.32dB.

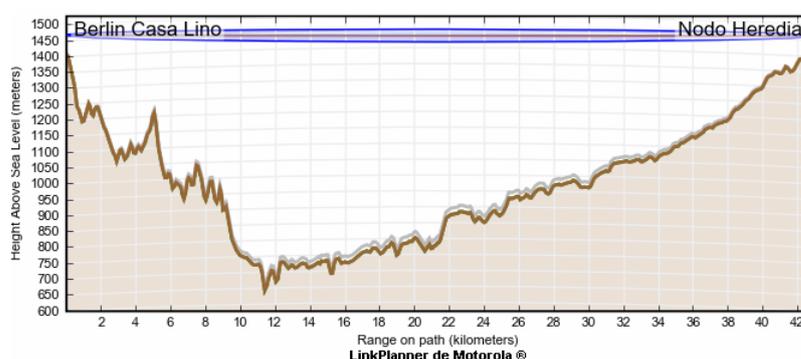


Figura 5.14. Estimación del enlace con Link Planner entre Cerro Berlín – Nodo Heredia.

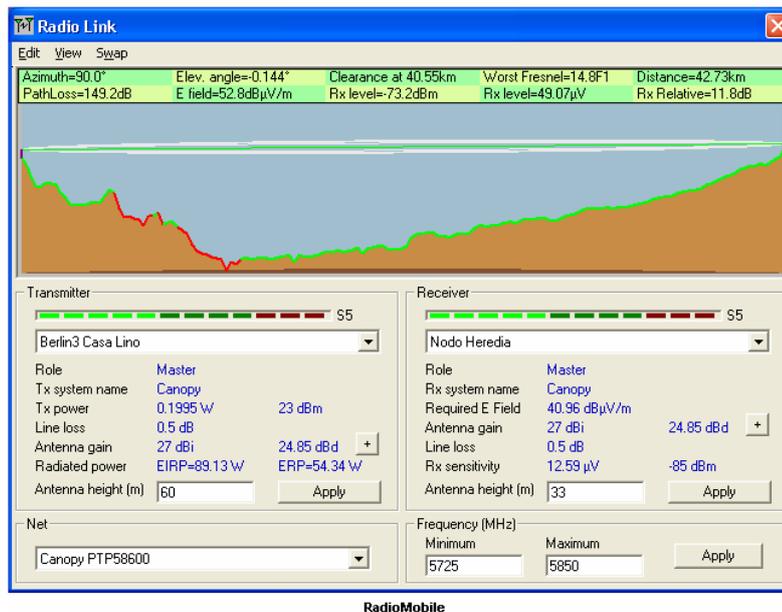


Figura 5.15. Estimación del enlace con RadioMobile entre Cerro Berlín – Nodo Heredia.

Otro parámetro para el establecimiento de este enlace es el nivel de recepción de la señal, en este caso según los cálculos obtenidos en la sección de [apéndices A.2.1.4](#) la recepción de la señal es de -39.27dB. El radio de la primera zona de Fresnel para este caso es nulo debido a que no hay obstáculos que interfieran en la trayectoria de la señal, tal como se observa en las figuras 5.14 y 5.15. En cuanto al rendimiento de ancho de banda se realizaron cálculos con la ayuda del Link Planner de Motorola ® y utilizando equipos PTP600 de dicha marca con antenas que tiene ganancias de 37.5dBi se espera tener un ancho de banda promedio de 214.99Mbps en este enlace que comunica el Nodo Heredia y Cerro Berlín, según se muestra en la tabla 8.

5.6.2 Enlace entre Cerro Berlín – Cerro Bellavista Azul

El enlace entre Cerro Berlín en San Ramón y Cerro Bellavista Azul ubicado en Nandayure, Guanacaste presenta condiciones aptas para establecer comunicación punto a punto. Como se puede apreciar en la figura 5.17 la distancia entre ambos puntos es de 88.4Km. Las pérdidas de propagación en el espacio libre en este caso son de 146.64dB.

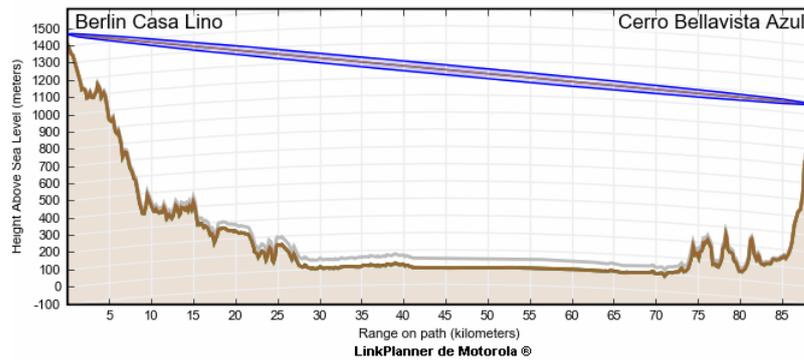


Figura 5.16. Estimación del enlace con Link Planner entre Cerro Berlín – Cerro Bellavista Azul.

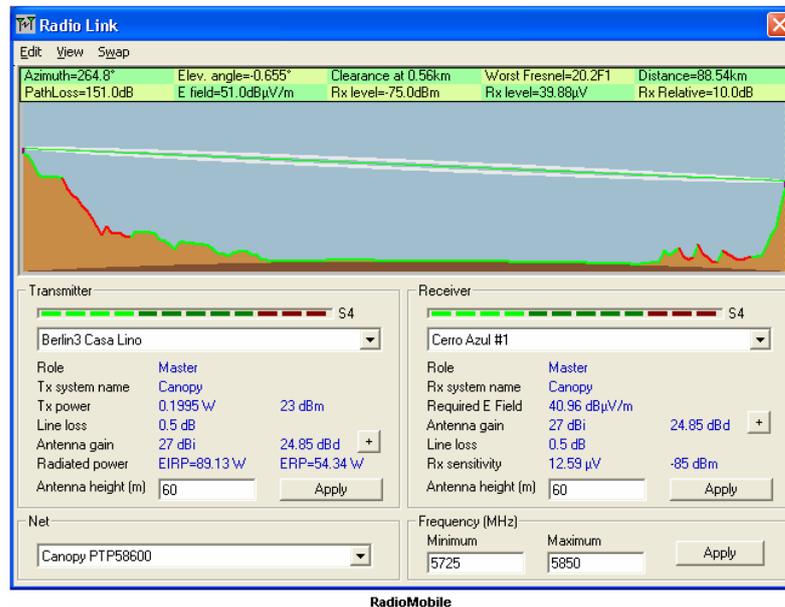


Figura 5.17. Estimación del enlace con RadioMobile entre Cerro Berlín – Cerro Bellavista Azul.

En cuanto a la atenuación total debido a la lluvia se obtuvo valor de 3. 809dB. Por otra parte, el presupuesto del enlace para comunicar Cerro Berlín con Cerro Bellavista Azul es de 36.55dB, mientras que el nivel de recepción esperado de la señal transmitida es de -45.64dB. En cuanto a la zona de Fresnel en este enlace no existen obstáculos que interfiera la señal transmitida por lo que el radio de Fresnel es nulo. En cuanto al promedio del ancho de banda esperado para este enlace según se muestra en la sección A3 de los apéndices, bajo las condiciones dadas el ancho de banda estimado es de 152.02Mbps.

5.6.3 Enlace entre Cerro Bellavista Azul – Cerro Hermosa

El punto principal en la zona de Guanacaste es el Cerro Bellavista Azul el cual permite brindar comunicación a los principales puntos de la zona. Este punto presenta condiciones aptas para establecer cobertura. Por eso otro enlace punto a punto que se tiene estimado es el de Cerro Bellavista Azul con Cerro Hermosa. Para este enlace se tiene calculado pérdidas de propagación en el espacio libre de 145.90dB, mientras que en el caso de la atenuación total debido a la lluvia es de 3.6898dB. Por otra parte el balance de potencias para este enlace es de 37.41dB utilizando la tecnología PTP600 de Motorola ®. Además con la ayuda de la figura 5.18 y 5.19 se puede ver que el enlace tiene condiciones de línea de vista lo que facilita la comunicación entre ambos puntos; esto agregando que la distancia es de 81.1Km entre ambos puntos. El nivel de recepción de la señal para este enlace es de -43.9dB.

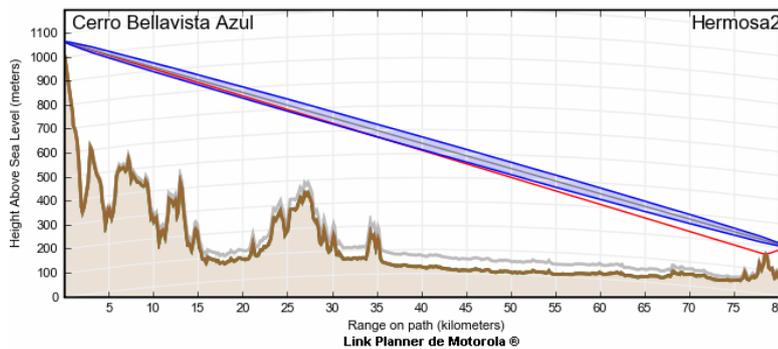


Figura 5.18. Estimación del enlace con Link Planner entre Cerro Bellavista Azul – Cerro Hermosa.

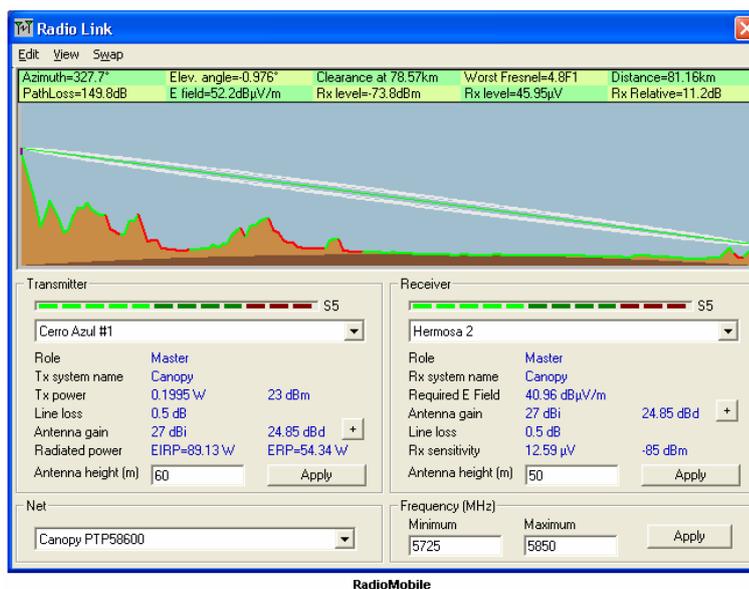


Figura 5.19. Estimación del enlace con RadioMobile entre Cerro Bellavista Azul – Cerro Hermosa.

Por otra parte con la ayuda de la figura 5.19 se logró determinar el radio de la primera zona de Fresnel el cual se calculó en la sección A.2.4.5 de los apéndices y se obtuvo un radio de 10.09m. El ancho de banda estimado es de 162.02Mbps según se calculó con la herramienta Link Planner de Motorola ®.

5.6.4 Enlace entre Cerro Bellavista Azul – Liberia

Otro de los enlaces que tiene como punto de partida es Cerro Bellavista Azul con Liberia Centro. Según la figura 5.21 se tiene una distancia de 77.94Km entre ambos sitios. La atenuación debido a la propagación del espacio libre es de 145.54dB. La atenuación debido a la lluvia para este enlace esta determinado en 3.655dB.

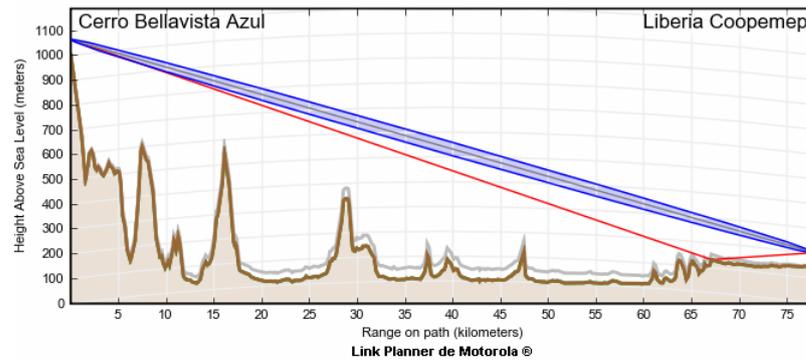


Figura 5.20. Estimación del enlace con Link Planner entre Cerro Bellavista – Liberia.

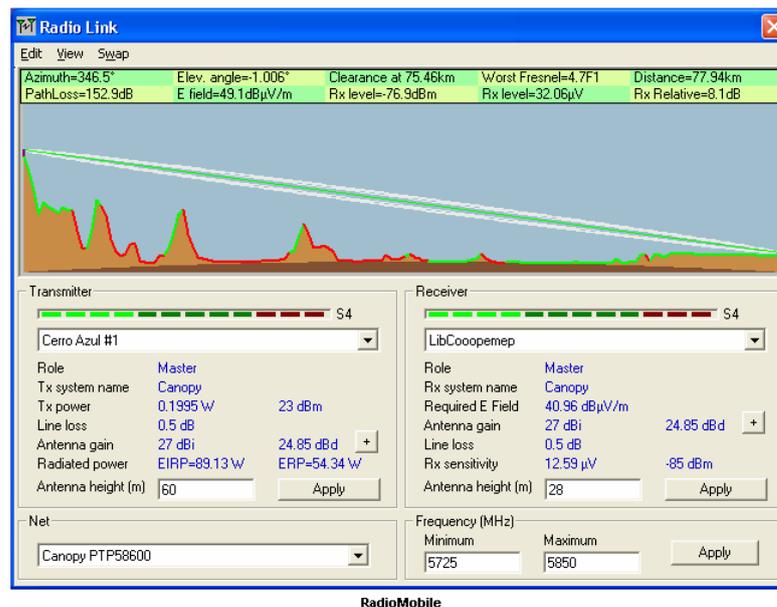


Figura 5.21. Estimación del enlace con RadioMobile entre Cerro Bellavista Azul – Liberia.

El presupuesto del balance de potencias que se tiene estimado según las condiciones del enlace es de 37.81dB, mientras que el nivel de recepción de la señal es de -44.54dB. Con la ayuda de la figura 5.20 se logró determinar las distancias del obstáculo para obtener el radio de la primera zona de Fresnel, el cual se obtuvo un radio de 21.93m según los cálculos de los apéndices A2.3.5. Además de este radio de la zona de Fresnel, también se puede observar de las figuras 5.20 y 5.21 presentan línea de vista entre ambos puntos. El valor final esperado del ancho de banda es de 167.03Mbps para este enlace punto a punto, utilizando equipos PTP600 de Motorola ®.

5.6.5 Enlace entre Cerro Hermosa – Liberia.

El enlace entre Cerro Hermosa y Liberia presentan condiciones aptas para establecer enlace punto a punto. Tiene como características particular que ya están estimados cada uno de los sitios con respecto a Cerro Bellavista Azul pero es con el fin de establecer redundancia de enlace entre los puntos involucrados. Presenta perdidas de propagación en el espacio libre de 136.34dB, el efecto de la atenuación debido a la lluvia presenta pérdidas de 3.976dB. En cuanto al presupuesto del enlace se tiene un balance de potencias de 30.26dB.

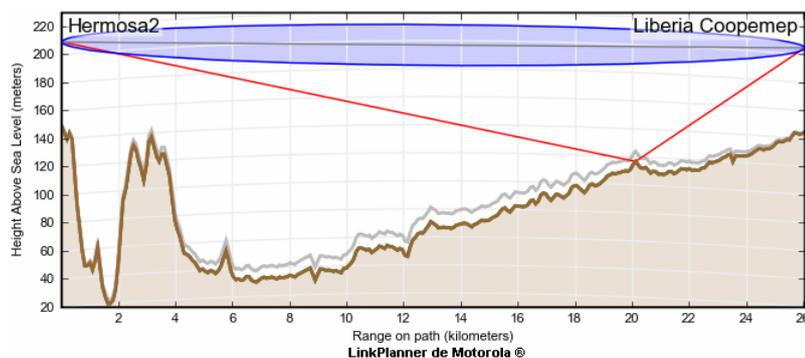


Figura 5.22. Estimación del enlace con Link Planner entre Cerro Hermosa – Liberia.

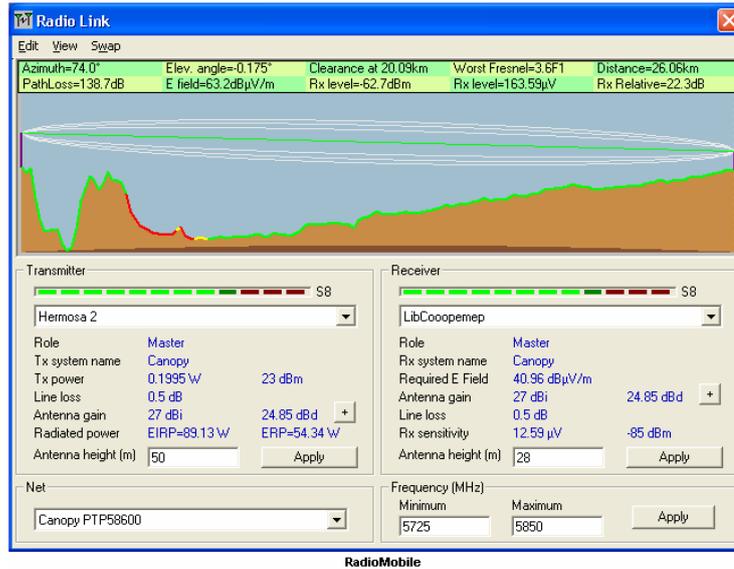


Figura 5.23. Estimación del enlace con RadioMobile entre Cerro Hermosa – Liberia.

El nivel de recepción de la señal radioeléctrica para este enlace es de -51.58dB, y finalmente con la ayuda de la figura 5.22 se pudieron adquirir los datos para obtener el cálculo de la primera zona de Fresnel, el cual se obtuvo un radio de 15.41m. De esta manera la estimación del enlace entre estos puntos permitiría establecer el enlace según las condiciones presentadas en la trayectoria en la que se propaga la señal. Finalmente el ancho de banda calculado con el que este enlace podría disponer es de 125.64Mbps con equipos PTP 600 de Motorola ®, antena con ganancia de 29.4dBi y transmitiendo en la banda de 5.8GHz.

5.6.6 Enlace entre Cerro Bellavista Azul – Cerro Vicente

El enlace entre Cerro Bellavista Azul y Cerro Vicente, este último ubicado en la zona norte en la provincia de Alajuela tiene nuevamente como punto principal el Cerro Bellavista Azul. Entre ambos puntos tienen una distancia de 106.32Km. Con la ayuda de las figuras 5.24 y 5.25 se puede determinar que existe línea de vista y el radio de la zona de Fresnel es de 35.14m. La atenuación total debido a la lluvia presenta pérdidas de 3.963dB según las estimaciones calculadas en el apéndice A.2.5.2.

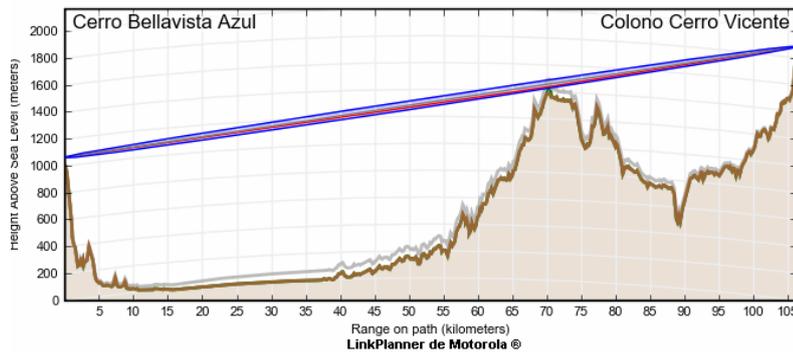


Figura 5.24. Estimación del enlace con Link Planner entre Cerro Bellavista Azul - Cerro Vicente.

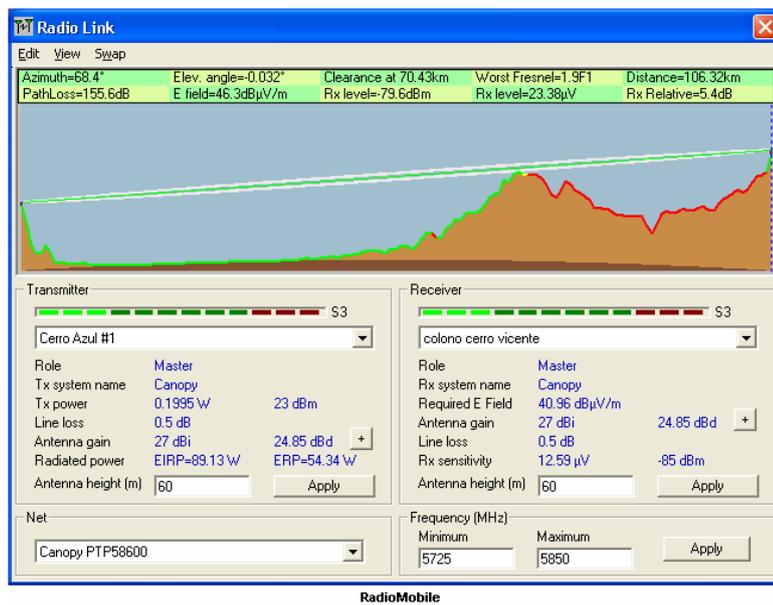


Figura 5.25. Estimación del enlace con RadioMobile entre Cerro Bellavista Azul - Cerro Vicente.

El nivel de recepción de la señal que se propaga en el enlace de Bellavista Azul y Cerro Vicente es de -47.24dB, mientras que el balance de potencias para establecer el enlace estimado es de 34.8dB de acuerdo con los cálculos realizados en la sección A.2.5.3 de los apéndices. Luego se tiene que el ancho de banda que se espera obtener según se resume en la sección A.3 de los apéndices se espera que sea de 131.70Mbps.

Debido a que este enlace presenta condiciones comprometidas de línea vista, es necesario calcular los parámetros para determinar la altura de las antenas del transmisor y receptor. Como se vio en el marco teórico, primero hay que calcular el valor del factor k, para ello se utiliza la ecuación 3.17 en el cual se debe conocer el valor del cóndice de

refracción ya que es específico para cada región. Este dato se obtiene de la recomendación de la UIT R-REC-P.453-9 en el caso de Costa Rica está entre -50/Km y -60/Km ya que este parámetro varía según la época del año; por lo tanto para efecto de los cálculos se tomará el valor de -55/Km y a continuación se realiza el cálculo:

$$K = \frac{1}{1 + 0.00637 \cdot \frac{-55}{Km}} = 1.5393$$

De modo que ahora el radio efectivo de la Tierra se puede calcular mediante la ecuación 3.18 y el resultado es el siguiente:

$$Re = 1.5393 \cdot 6370Km = 9805.34Km$$

Ahora se requiere calcular la curvatura C de la Tierra mediante la ecuación 3.19, pero para ello se necesita conocer las distancias del obstáculo y las alturas de los terrenos y del obstáculo; con la ayuda de la figura 5.24 se obtuvieron los siguientes datos:

Altura H_a del Transmisor: 1003.2 mts sobre el nivel del mar

Altura H_b del Receptor: 1828.4 mts sobre el nivel del mar

Distancia D entre ambos puntos: 106.3Km

Altura H del Obstáculo: 1386.7 mts sobre el nivel del mar.

Distancia D_1 del obstáculo desde el transmisor: 70.103Km

Distancia D_2 del obstáculo hacia el receptor: 36.197Km

Frecuencia de operación: 5.8GHz

Utilizando la ecuación 3.19 se puede calcular la curvatura C de la Tierra de la siguiente manera:

$$C = \frac{4 \cdot 70.103 \cdot 36.197}{51 \cdot 1.5393} = 129.29mts$$

Luego para determinar el despejamiento, se debe realizar con el radio de la primera zona de Fresnel. Para este enlace de Cerro Bellavista Azul – Cerro Vicente se obtuvo un radio de 35.14mts, por lo que utilizando la expresión 3.20 el despejamiento es el siguiente:

$$D = 0.6 \cdot 35.14 = 21.084mts$$

Ahora bien, para determinar las alturas de las torres donde se instalan las antenas se puede obtener sustituyendo los cálculos antes obtenidos en las ecuaciones 3.21, 3.22, 3.23

$$H1 = 1003.2 + ha$$

$$H2 = 1828.4 + hb$$

$$H3 = 129.29 + 1386.7 + 21.084 = 1537.07\text{mts}$$

$$(1537.07 - 1003.2 - ha) * 36.197 = (1828.4 + hb - 1537.07) * 70.103$$

Despejando se obtiene lo siguiente:

$$ha = -30.351 + -1.9367 * hb$$

Altura ha (mts)	Altura hb (mts)
8.383	-20
4.509	-18
2.573	-17
0.636	-16
-1.300	-15
-10.984	-10
-20.667	-5
-30.351	0
-28.414	1
-40.034	5
-49.718	10
-69.085	20

Luego de varios cálculos se determinó que la altura de la antena del lado del transmisor es de 0.636mts y por el contrario en el lado del receptor se debe disminuir en 16mts la altura sobre el punto geográfico que fue propuesto en el lado del receptor, ya que según el dimensionamiento de las antenas este es el punto en que menos afecta el establecimiento de la comunicación entre ambos puntos.

Finalmente en la tabla 14 se muestra el resumen de los parámetros de operación de los diferentes enlaces analizados donde se muestra el tipo de antena en ambos sitios, el ancho de banda máximo esperado y la distancia en que se establecen los diferentes nodos de la red hacia Guanacaste. Además se tienen propuestos en dicha tabla enlaces redundantes como es el caso de los que se comunican con el sitio conocido como Arenal Sabalito el cual es un punto estratégico para ofrecer redundancia hacia la zona de San Carlos tolerante a fallas ya que si uno de los enlaces que se comunica desde Guanacaste presenta problemas de conectividad el tráfico tomaría la otra ruta para mantener comunicación con la red del Área Metropolitana.

Tabla 14. Resumen de Enlaces PTP hacia Guanacaste.

Nombre del Enlace	Antena Local	Antena Remota	Rendimiento Máximo Agregado (Mbps)	Distancia (Kms)
Enlace Cerro Bellavista Azul - Colono Cerro Vicente	Radio Waves 6ft Dual-Pol Parabolic, SPD6-5.2	Radio Waves 6ft Dual-Pol Parabolic, SPD6-5.2	131.70	106.2
Enlace Berlín Casa Lino - Cerro Bellavista Azul	Radio Waves 6ft Dual-Pol Parabolic, SPD6-5.2	Radio Waves 6ft Dual-Pol Parabolic, SPD6-5.2	152.02	88.4
Enlace Cerro Bellavista Azul - Hermosa2	Radio Waves 6ft Dual-Pol Parabolic, SPD6-5.2	Radio Waves 6ft Dual-Pol Parabolic, SPD6-5.2	162.02	81.1
Enlace Cerro Bella Vista Azul - Liberia Coopemep	Radio Waves 6ft Dual-Pol Parabolic, SPD6-5.2	Radio Waves 6ft Dual-Pol Parabolic, SPD6-5.2	167.03	77.9
Enlace Arenal Sabalito - Colono Cerro Vicente	Andrew 2ft Dual-Pol Parabolic, PX2F-52	Andrew 2ft Dual-Pol Parabolic, PX2F-52	34.72	75.5
Enlace Cerro Bellavista Azul - Arenal Sabalito	Andrew 2ft Dual-Pol Parabolic, PX2F-52	Andrew 2ft Dual-Pol Parabolic, PX2F-52	35.34	74.1
Enlace Liberia Coopemep - Arenal Sabalito	Andrew 2ft Dual-Pol Parabolic, PX2F-52	Andrew 2ft Dual-Pol Parabolic, PX2F-52	85.38	47.8
Enlace Berlín Casa Lino - Nodo Heredia	Radio Waves 6ft Dual-Pol Parabolic, SPD6-5.2	Radio Waves 6ft Dual-Pol Parabolic, SPD6-5.2	214.99	42.7
Enlace Cerro Bellavista Azul - Nicoya ICE	Andrew 2ft Dual-Pol Parabolic, PX2F-52	Andrew 2ft Dual-Pol Parabolic, PX2F-52	114.96	29.2
Enlace Hermosa2 - Liberia Coopemep	Andrew 2ft Dual-Pol Parabolic, PX2F-52	Andrew 2ft Dual-Pol Parabolic, PX2F-52	125.64	26

5.7 Topología propuesta para brindar cobertura en Guanacaste

Una vez que se tienen los perfiles de los enlaces punto a punto se procedió a proponer la topología con la que se estima brindar comunicación entre la red de la zona metropolitana y las oficinas en Guanacaste, así como ofrecer cobertura en diferentes zonas de dicha provincia. En la figura 5.26 se puede observar la superposición de los perfiles analizados en la sección anterior. En dicha imagen se muestra una vista digital mediante el programa GoogleEarth ® de la ubicación geográfica de los puntos para ofrecer cobertura hacia la Guanacaste iniciando con el punto de partida en el Nodo de Heredia, luego con Cerro Berlín, que éste a su vez se comunica con Cerro Bellavista Azul Guanacaste. En el Cerro Bellavista Azul se tienen varios enlaces punto a punto como lo son hacia Liberia, Cerro Vicente, Cerro Hermosa, Nicoya, Arenal Sabalito. Además se tienen cuatro enlaces multipunto: Cerro Berlín, Liberia, Hermosa y en Cerro Vicente; este último ubicado en San Carlos, de la provincia de Alajuela. El enlace de Cerro Bellavista Azul con Cerro Vicente es un punto de comunicación muy importante ya que comunica la zona de Guanacaste con la región de San Carlos.

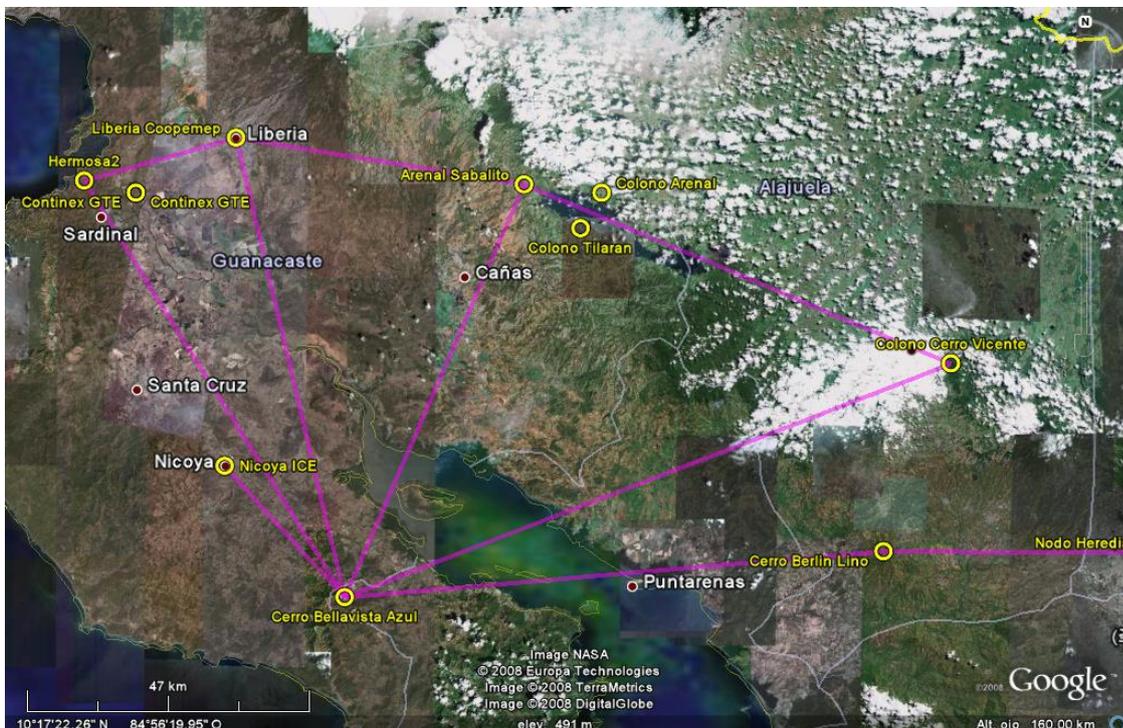


Figura 5.26. Vista Digital de GoogleEarth ® de la topología de red punto a punto hacia Guanacaste.

Imagen tomada del programa GoogleEarth ® propietario de Google®

Para detallar los enlaces de la zona de Guanacaste, se muestra la figura 5.27 en el cual se muestran enlaces punto a punto adicional a los analizados en la sección anterior debido a que son enlaces redundantes y no necesariamente forman parte del *backbone* principal. Estos enlaces adicionales son el que comunica Liberia con Arenal Sabalito; Arenal Sabalito con Cerro Vicente y Cerro Bellavista Azul con Arenal Sabalito. En dicha figura se muestra que el enlace más crítico es Cerro Bellavista Azul y Cerro Vicente, ya que es la distancia más larga con una distancia de 106.20Km. Además se puede decir que se tiene redundancia de enlaces entre los sitios Cerro Bellavista Azul, Cerro Hermosa y Liberia, esto debido a que son los puntos que requieren mayor cobertura según los clientes que se están adquiriendo y además se recomienda los enlaces adicionales antes mencionados para ofrecer redundancia hacia la zona de Guanacaste.

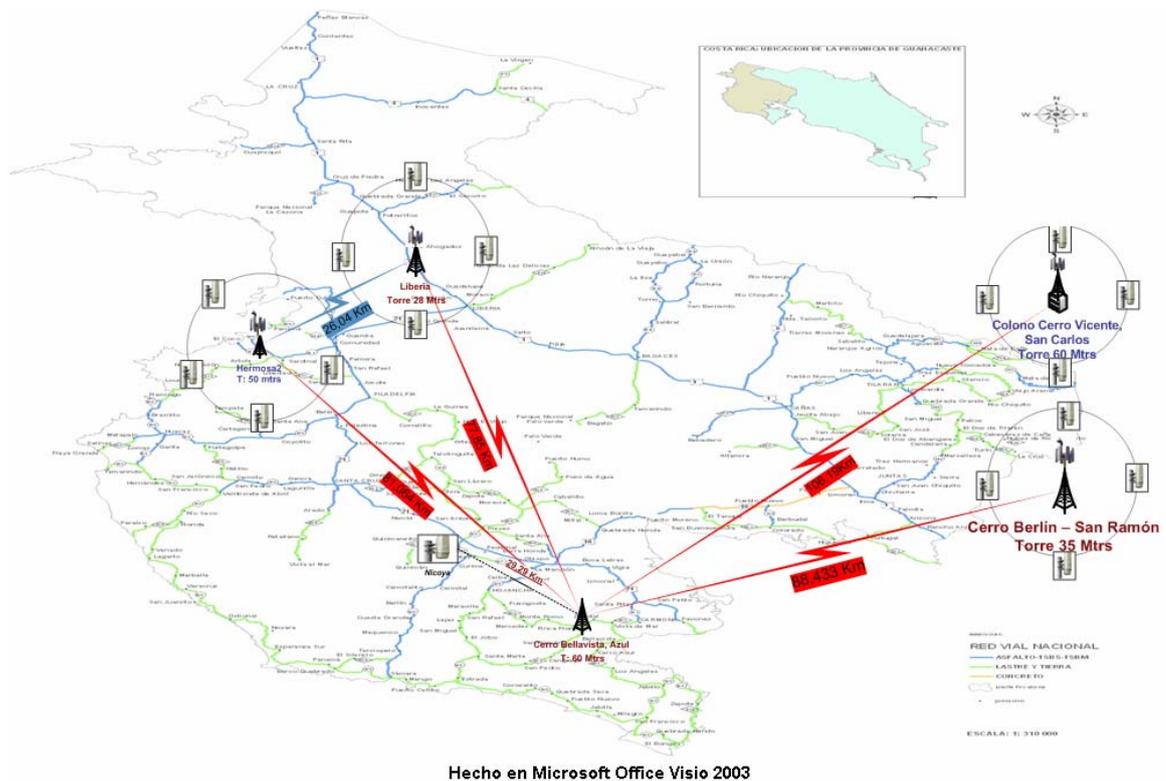


Figura 5.27. Topología punto a punto propuesta de la red inalámbrica en Guanacaste.

Mapa tomado del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, MOPT

Además de proponer la topología de enlaces punto a punto se proponen enlaces punto a multipuntos ubicados en la zona de Cerro Berlín en San Ramón, Cerro Hermosa, Liberia centro y Cerro Vicente en San Carlos. Estos puntos son importantes ya que en los alrededores se tienen proyectos por desarrollar y por lo tanto es de gran importancia tener

la mayor parte del tiempo disponibilidad de la red, especialmente en dichos sitios. En la figura 5.28 se detalla algunos de los potenciales clientes para los sitios multipunto.

En Cerro Berlín se tienen lugares aledaños como Palmares, San Mateo, Orotina, Grecia, Esparza, Atenas en el cual se tiene línea vista desde Cerro Berlín lo cual facilita al acceso para establecer conexión con clientes de dichos lugares.

El sitio de Cerro Hermosa es otro punto importante para establecer enlaces multipuntos ya que en los alrededores de esa zona hay proyectos hoteleros que están a la espera de que Continex inalámbricas les ofrezcan servicios de datos, voz y video. Algunos de los sitios donde se tienen potenciales clientes son en Ocotac Montealegre, Playa Panamá, Playa Hermosa y en Comunidad donde en este último están ubicadas las oficinas de Continex.

En Liberia se tiene la viabilidad de establecer enlaces multipuntos debido a que existen en la zona clientes a los que ya se ofrecen servicios de conexión a Internet en la zona Metropolitana y desean enlazar todos agencias en los diferentes puntos del país. Para mencionar solo algunos posibles suscriptores están: Coopemep, Almacén El Eléctrico, Coopemex, MECO, Coopeservidores, IESA, entre muchos otros.

Otro de los posibles enlaces multipunto es donde está ubicado Cerro Vicente en San Carlos. Este punto es importante ya que permitiría ofrecer cobertura en la zona de Ciudad Quesada a través de multipuntos en el cual existe gran cantidad de clientes en los que se pueden ofrecer servicios de red inalámbrica. Tal es el caso de clientes como Coopemep, Almacenes Casa Blanca, Almacenes El Verdugo, MAFISA Gollo, entre muchos otros más.

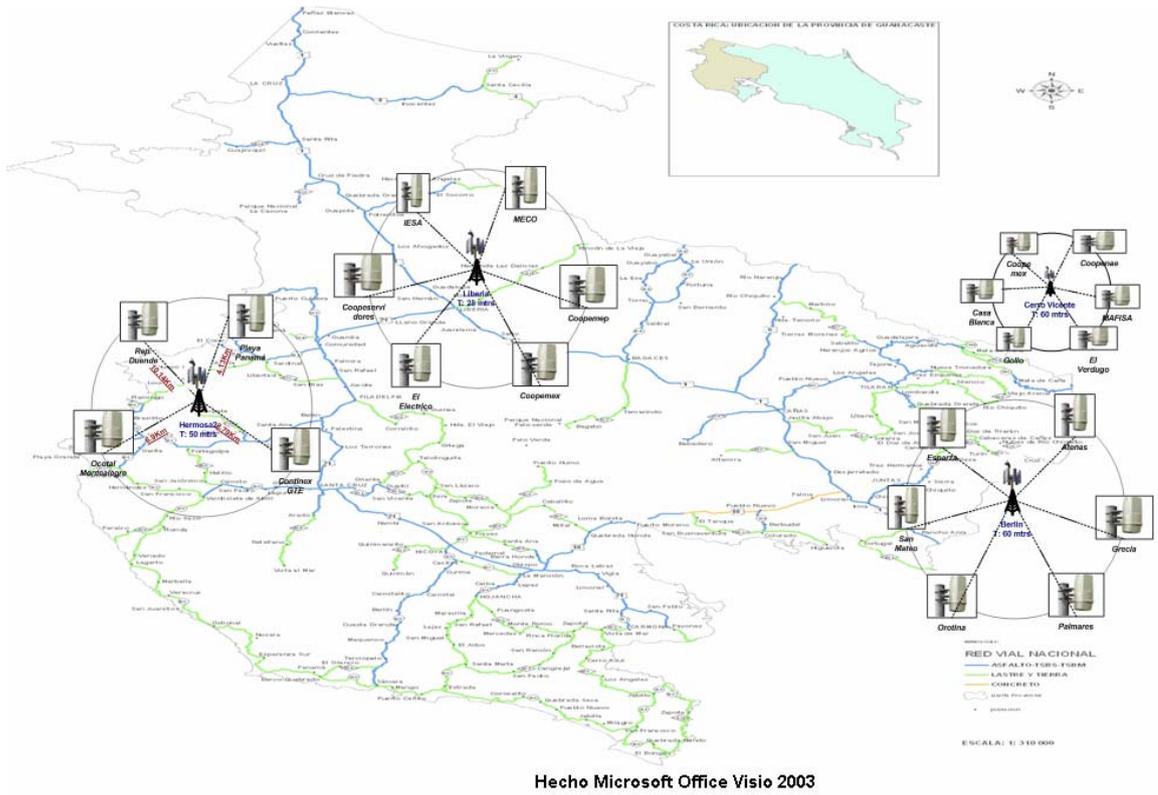


Figura 5.28. Topología punto multipunto para ofrecer cobertura parcial en Guanacaste.

Mapa tomado del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, MOPT

Finalmente, se tiene propuesto ofrecer cobertura en las zonas de Guanacaste que tienen mayor cantidad de clientes potenciales el cual algunos de ellos ya se tienen contratos en la zona metropolitana, así como en la zona de San Carlos en la provincia de Alajuela. Es importante mencionar que el Cerro Vicente permite ofrecer cobertura mediante un enlace multipunto en Ciudad Quesada en San Carlos pero además presenta condiciones de establecer enlaces punto a punto con sitios como Muelle, Santa Clara y Guatuso en donde se presenta condiciones de línea de vista para establecer conectividad.

Capítulo 4 . Análisis de Resultados

6.1 Diagnóstico de la Red inalámbrica del Área Metropolitana

En el capítulo anterior de resultados experimentales se tiene desarrollado toda la solución del estudio de factibilidad. Primero se realizó un diagnóstico de la red que está en funcionamiento. Para ello se tomaron muestras de paquetes de tráfico transmitido y recibido de los nodos que conforman la red durante el periodo de marzo a junio del 2008 para luego analizar gráficamente los resultados obtenidos. Iniciando en el Nodo de Cartago las figuras 5.1 y 5.2 mostraron que de los tres sectores que están en funcionamiento, el sector 2 es el que presenta mayor utilización de los recursos, sin embargo está por debajo de las capacidades máximas que puede funcionar ya que el consumo de ancho de banda es de 22% lo que significa que en estos sectores se pueden aumentar la cantidad de clientes. Además el ancho de banda real consumido en el BH es de 20% por lo que se puede decir que no presenta condiciones de saturación; más bien está en capacidades de establecer enlaces para futuro.

En el nodo de Alajuelita se obtuvieron los resultados mediante las gráficas de las figuras 5.3 y 5.4. Al igual que el nodo Gurdían, éste tiene en funcionamiento 3 sectores y el que tiene mayor ancho de banda comprometido es el sector 2 con CIR de 5Mbps. En contraste al ancho de banda comprometido está el ancho de banda real donde el sector tiene un máximo de utilización de 4.5Mbps, casi todo el CIR que tiene configurado. Además este valor representa un consumo real de 72.5% de ancho de banda real. En el caso de los BH se puede observar que los anchos de banda real consumidos por los equipos están al límite de sus capacidades máximas ya que el BH que comunica Alajuelita con Heredia presenta un valor de 5.32Mbps; es decir un 76% del total que puede transmitir. Esto indica que si se agregan más clientes al enlace se corre el riesgo de saturar la red, por lo que se deben tomar medidas de prevención y corrección para no saturar los enlaces tales como establecer prioridad en los paquetes de tráfico a través de calidad de servicio o tipo de servicio. En el caso del nodo que comunica Alajuelita con RedCom se observó que el porcentaje de consumo real de ancho de banda en este BH es del 82.86% lo que indica que este nodo se deben tomar medidas para disminuir los niveles de consumo como por

ejemplo realizar balanceo de cargas para el tráfico que se transmite en este nodo, establecer prioridad de tráfico, entre otros. Por lo tanto se puede decir que este nodo está próximo a presentar saturación en la transmisión de paquetes de información.

En el Nodo de Heredia de acuerdo con la información de las figuras 5.5 y 5.6 se tienen 4 sectores en los cuales ninguno supera 1Mbps de ancho de banda consumido; sin embargo los 2 BH tienen niveles de casi 70% de sus capacidades máximas. Esto ocurre debido a que los BH reciben y transmiten la información no solo de los sectores del nodo sino también de los nodos adyacentes por lo tanto retransmiten información de los nodos de Alajuela y Abra y de Alajuelita, RedCom y Gurdían, tal como se muestra en la topología de la red (ver figura 3.8). Claro está que el ancho de banda de los sectores del nodo de Heredia no está comprometido, por lo tanto se pueden adquirir clientes sin que los niveles de los BH lleguen a los toques máximos, así como enlazar con la red que se implementaría hacia Guanacaste.

El nodo de Alajuela se tiene configurado 3 sectores tal como lo muestran las figuras 5.9 y 5.10. El consumo máximo de los sectores lo tiene el sector 2 donde se tiene un ancho de banda comprometido de 7Mbps, con puntos máximos de consumo real de 4.21Mbps, representando el 68% de la capacidad total de operación del AP. En los BH se observa que el enlace Alajuela – Heredia tiene un consumo máximo de 65% ya que recibe y transmite paquetes no solo de los sectores que tiene en el nodo sino también de los enlaces que tiene conectado a su vez Heredia como lo son Alajuelita, RedCom e inclusive Gurdían (ver figura 3.1). De manera similar ocurre con el otro BH que se comunica con Escazú donde ha llegado a alcanzar un máximo de 37% de sus capacidades debido al tráfico que pasa del nodo de Abra y de Turrúcares, por lo que se puede decir que en el sector 2 del nodo Alajuela no es conveniente registrar más clientes, sino que por la baja utilización del sector 3 es que se recomienda adquirir más clientes en dicho sector.

Con respecto al nodo RedCom, de acuerdo con las figuras 5.11 y 5.12 se tienen 6 sectores en funcionamiento. A pesar de estar al tope de sectores instalados, solamente el sector 5 y 6 están funcionando a sus capacidades máximas ya que el mayor ancho de banda real de cada AP es de 6.2Mbps. En cuanto a los demás sectores presentan

condiciones aptas para agregar clientes, sin saturar el BH. Sin embargo los anchos de banda real consumidos en los diferentes sectores no superan, a excepción del AP15, el 1.5Mbps lo que significa que están a un 24% de funcionamiento máximo. En cuanto a los BH que comunican con Gurdían no presenta condiciones de saturación ya que ha alcanzado máximos de 1.5Mbps lo que significa 21%; con el BH de Alajuelita tienen niveles de consumo que pueden saturar dicho enlace ya que ha alcanzado picos de consumo máximos de hasta 4.64Mbps, o sea 66% significando valores a considerar para ejecutar medidas correctivas como balanceo de cargas, prioridad de tráfico u otras. En el ancho de banda comprometido los sectores 1 al 4 tienen valores de CIR bajos por lo que puede agregarse más clientes en esos sectores mencionados.

6.2 Costo – beneficio de tecnologías inalámbricas

Con el estudio de la red instalada se ha determinado que en algunos enlaces presentan niveles de saturación ya que la cantidad de clientes adquiridos y las capacidades de operación de los equipos no son suficientes para que la red inalámbrica sea escalable y brinde los servicios sin interrupciones. Por eso es que a partir de este diagnóstico obtenido y por las características que debe tener la red para ofrecer cobertura hacia Guanacaste es que se va a partir el análisis de la elección de la tecnología.

Como se mencionó en el capítulo anterior, entre menos sea la cantidad de radiobases instaladas menor serán los costos de instalación y operación. Para eso se requiere que las distancias entre enlaces sean de máximo 100Km y que existan tecnologías que puedan establecer el enlace. Para ello se investigaron tecnologías punto a punto que operan con frecuencias libres donde el equipo principal es el BH (*BackHaul* en inglés). En la tabla 1 se mostraron los equipos investigados, en donde el equipo marca PTP600 de Motorola ® es el que puede establecer enlaces de hasta 200Km con un ancho de banda de hasta 300Mbps. Si se compara con el equipo Canopy de Motorola ® que opera en la Red del Área Metropolitana apenas tiene un ancho de banda de 20Mbps con rango de alcance de 56Km, por lo que hace ver que tiene capacidades superiores. Además el costo de la tecnología PTP600 de Motorola ® es de \$15995 por enlace lo cual hace que sea un precio accesible ya que si se compara con el BH TeraBridge5845 de Proxim tiene un costo de \$9307 y tiene parámetros inferiores a los que ofrece PTP600 de Motorola ®.

Por otra parte se tienen tecnologías punto a punto que operan con frecuencias licenciadas. Se investigaron varios equipos BH el cual se muestran en la tabla 2. Las marcas investigadas operan en diferentes bandas de frecuencia. Los BH PTP25600 y PTP49600 de Motorola ® que presentan enlaces con rangos de hasta 200Km y ancho de banda de hasta 300Mbps lo que nuevamente en estas bandas equipos muy competitivos. Otros equipos como la marca Trango BroadBand Wireless presentan rangos de alcance medianamente largos pero con anchos de banda muy por encima de las PTP49600 y PTP25600 de Motorola ® y con precios que los hacen aptos a las características de los tipos de enlaces que se requieren para tener cobertura hacia Guanacaste.

Parte importante de los radioenlaces son los equipos multipunto. En la tabla 3 se mostró un cuadro comparativo de tecnologías que ofrecen soluciones multipunto con características muy importantes para lo que se conoce como “última milla”. La solución marca MotoWi4 de Motorola ® opera bajo el estándar Wimax y ofrece rangos de alcance de hasta 20Km con anchos de banda de hasta 12Mbps; claro que el tipo de modulación en que opera OFDM va a estar en función de la distancia ya que de esto depende también el ancho de banda. El otro equipo de Motorola ® que se menciona en la tabla 3, ofrece cortos rangos de alcance pero puede obtener anchos de banda de hasta 20Mbps. Otra tecnología como Proxim que opera bajo el estándar Wimax presenta largos rangos de alcance, prioridad de tráfico y un ancho de banda ajustable de hasta 54Mbps también puede ser otra opción para operar en las soluciones multipunto. Sin embargo la tecnología multipunto Motorola ® es la adecuada para ser parte de la solución de conexión inalámbrica para el enlace entre la red del Área Metropolitana y las oficinas de Continex en Guanacaste debido a la relación de distancia versus ancho de banda.

6.3 Frecuencia de transmisión

Según el Plan de Distribución de Frecuencias que rige en Costa Rica (ver resumen en [anexo 1](#)) las bandas de 4.9GHz, 6GHz, 11GHz y 23GHz son frecuencias licenciadas. Es por ello que la selección de los equipos se limita en parte a la banda de frecuencias que estén disponibles para operar en el país; ya que el espectro radioeléctrico para frecuencias superiores a 2GHz no hay en estos momentos ninguna frecuencia licenciada disponible

para la adquisición de una banda. Por lo tanto para el presente proyecto el tipo de frecuencia que se tiene disponible para establecer conectividad hacia Guanacaste es frecuencia libre. Además la banda de frecuencia de 5.8GHz es la de operación de los equipos PTP600 de Motorola ® que se recomienda (ver tabla 1), además la potencia máxima con la que se puede transmitir es de 2W, así como utilizar espectro disperso, según lo especifica los artículos del 36 al 41 del Plan de Atribución de Frecuencias [5]. De igual manera en los equipos multipunto la banda de frecuencia que se recomienda transmitir es de 2.4GHz y por lo tanto los equipos MotoWi4 de Motorola ® transmiten en dicha frecuencia.

6.4 Topología propuesta para ofrecer cobertura en Guanacaste

En el capítulo anterior se desarrolló la solución planteada, mediante la obtención de resultados experimentales. Con la ayuda de herramientas como GoogleEarth ®, Link Planner y RadioMobile fue posible localizar posibles puntos de repetición, obtener las coordenadas geográficas de los sitios, entre otros con el fin de estimar perfiles para establecer conectividad hacia Guanacaste así como cobertura parcial.

Se evaluaron diferentes puntos geográficos con el fin de encontrar la menor cantidad de saltos para llegar hasta las oficinas de Continex en el pueblo Comunidad, Liberia Guanacaste, así como brindar cobertura parcial. En la sección 4 de los apéndices se muestran los puntos que a futuro se podrían retomar para brindar cobertura en dichos sitios ya que actualmente algunos de los sitios no se tienen clientes potenciales para ofrecerles servicios inalámbricos. Es por ello que para llegar hasta las oficinas de Continex se parte del Nodo de Heredia que se comunica a su vez con Cerro Berlín (ubicado en San Ramón), luego con Cerro Bellavista Azul (Nandayure), Cerro Hermosa y Liberia que finalmente se llega hasta la ciudad de Comunidad. Los perfiles de estos enlaces punto a punto son los que mostraron en la sección 5.6.2 los cuales presentan condiciones aptas para establecer comunicación entre ellos.

Uno de los puntos más importantes es Cerro Berlín y Cerro Bellavista Azul ya que son los puntos que comunican la red inalámbrica instalada en el Área Metropolitana con la zona de Guanacaste. En todos los sitios se realizaron visitas según la coordenadas geográficas; sin embargo en los puntos de Cerro Berlín y Cerro Bellavista Azul se logró

proponer contratos con los dueños de los terrenos para implementar la red en los próximos meses, esto debido a la gran importancia de tener cobertura en la zona de Guanacaste para brindar servicios de datos, voz y video a los clientes potenciales que se tienen en dicha provincia. Claro está que se tienen Cerros alternos en la zona de Guanacaste como se muestran en la tabla del apéndice 4 donde otro sitio punto a punto alternativo es Cerro Esperanza y Cerro del Rosario en caso de no prosperar la instalación de las torres en los sitios antes mencionados. Además, se determinó que el ancho de banda esperado es de 152.02Mbps; lo cual significa que al ser este uno de los enlaces más críticos de la red se debería optimizar en funcionamiento de este nodo. Esto porque el ancho de banda es medio con respecto al máximo que pueden brindar los equipos PTP600 de Motorola ® y tomando en cuenta que es una de las distancias más largas de los enlaces estimados que se tienen y que atraviesa el mar. Finalmente la topología de los enlaces punto a punto con los que puede brindar cobertura hacia Guanacaste es la que se muestra en la figura 5.27. Además

Por otro lado, los enlaces multipunto se realizaron con base en los proyectos que están en etapa de desarrollo por lo que la ubicación de los clúster están colocados según la ubicación de estos proyectos para establecer cobertura en la zona de Guanacaste. En los apéndices A.3 se muestra los perfiles de los sitios que forman parte de los enlaces multipunto donde el clúster estaría ubicado en el punto de repetición Cerro Berlín, Cerro Hermosa, Liberia y Cerro Vicente, este último ubicado en San Carlos. En la figura 5.28 se muestra la topología de red multipunto en donde los clúster estaría conformado por AP MotoWi4 de Motorola ® y a su vez el enlace punto a punto con Liberia y con Cerro Bellavista Azul utilizaría equipos PTP600 de Motorola ®. Es importante mencionar que todos los puntos que se establecieron en la topología de la figura 5.27 y 5.28 presentan línea de vista entre los puntos.

Con las topologías propuestas para establecer conectividad hacia Guanacaste desde la red del Área Metropolitana y con cobertura parcial en Guanacaste es como se pretende ofrecer los servicios la empresa Continex Inalámbricas. Además para los servicios de voz y video el cual requieren considerable consumo de anchos de banda es que se necesitan tecnologías que se puedan dar prioridad de tráfico como calidad de servicio, tipo de servicio, entre otros.

Capítulo 5 . Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- La red inalámbrica del Área Metropolitana presenta varios nodos en el cual se puede iniciar el enlace hacia Guanacaste, sin embargo luego de analizar la información examinada se determinó que el Nodo de Heredia es el punto que mejor se ajusta a las condiciones para agregar un enlace punto a punto adicional. Sin embargo el nodo central de la red, Nodo RedCom, ciertas características favorables pero presenta gran interferencia de radiofrecuencia lo que impediría establecer el enlace directamente desde el Nodo Central de la red.
- De acuerdo con las tecnologías de conexión punto a punto que se investigaron, el producto PTP600 de Motorola ® logra cumplir con parámetros de transmisión que permite establecer enlaces a larga distancia con robustos anchos de banda.
- La tecnología multipunto MOTOWi4 de Motorola ® es la que presenta la mejor relación de distancia y ancho de banda. Además permite configurar prioridad de tráfico lo que da paso a controlar los paquetes de voz y video para mantener la menor pérdida de tiempo en este tipo de paquetes.
- Cada uno de los enlaces inalámbricos que fueron parte de estudio se dimensionaron de manera tal que con los parámetros calculados y las visitas de campo realizadas a cada uno de los puntos, estos presentan las óptimas condiciones para establecer comunicación entre cada uno de los puntos.
- La topología propuesta para ofrecer cobertura hacia Guanacaste presenta un total de 10 enlaces punto a punto en el cual todos presentan condición de línea de vista entre ambos puntos.
- La topología multipunto que permite brindar acceso a la red inalámbrica a los clientes tiene un total de 4 sitios multipunto en los que se pretende utiliza soluciones MOTOWi4 para dar servicios de última milla a los clientes potenciales.

7.2 Recomendaciones

- Para establecer enlaces inalámbricos punto a punto se recomienda realizar visitas de campo a los posibles sitios para verificar si el terreno cumple con las condiciones necesarias para que se lleve a cabo la comunicación entre los sitios.
- Es importante realizar mediciones del ruido del ambiente; es decir, hacer mediciones con analizadores de espectro en el sitio donde se pretende instalar estaciones base ya que las interferencias de radiofrecuencia afectan directamente el funcionamiento de los enlaces tanto punto a punto como multipunto.
- Debido a la falta de frecuencias licenciadas para concesionar, se recomienda transmitir en la banda de 5.8GHz para los enlaces punto a punto y 2.4GHz para enlaces multipunto. Esto con el fin de aprovechar al máximo el espectro radioeléctrico y así evitar interferencias entre los equipos instalados en el mismo sitio.
- En el enlace entre Cerro Bellavista Azul y Cerro Vicente se recomienda instalar una torre en el lado del transmisor de 0.636mts de alto mientras que en el lado del receptor se debe disminuir la altura sobre el nivel del mar en 16 mts para optimizar el establecimiento del enlace entre ambos puntos.

Bibliografía

- [1] Biblioteca Universitaria de Vigo (España). [En Línea]. **UIT-R. Recomendaciones**. Edición 1. <<http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/>>. [Consulta: 2 de mayo de 2008]
- [2] Buettrich, Sebastian. **Unidad 06: Cálculo de Radioenlace**. Editado por: Escudero Pascual, Alberto. Versión 1, julio 2007. [En Línea]. <https://www.it46.se/downloads/courses/wireless/es/06_Calculo-Radioenlace/06_es_calculo-de-radioenlace_guia_v01.pdf>. [Consulta: 13 de mayo de 2008].
- [3] Buettrich, Sebastian. **Unidad 09: Guía para Simulación de Radioenlaces en Exteriores. (Iniciándose con el RadioMobile)**. Editado por: Escudero Pascual, Alberto. Versión 1, julio 2007. [En Línea]. <http://www.it46.se/downloads/courses/wireless/es/09_Simulacion-Redes/09_es_simulacion-redes-inalambricas_guia_v01.pdf> [Consulta: 13 de mayo de 2008].
- [4] Constantini, Sandro. **Guía 6: Visibilidad y factor K**. [En línea]. Universidad Metropolitana de Telecomunicaciones. <<http://medusa.unimet.edu.ve/sistemas/bpis03/radiocomunicaciones/guiaspdf/guia06telecomunicaciones.pdf>>. [Consulta: 13 de mayo 2008].
- [5] Control de Radio. **Marco Jurídico**. San José, junio 2004. [En línea]. <<http://www.controlderadio.go.cr/marcojuridico.php>>. [Consulta: 24 de abril de 2008.]
- [6] Control de Radio. **Reglamento de Radiocomunicaciones**. San José, junio 2004. [En línea]. <http://www.controlderadio.go.cr/marcojuridico/Reglamento_de_Radiocomunicaciones.pdf> [Consulta: 24 de abril de 2008]
- [7] Coudé, Roger. **RadioMobile**. Junio 17, 2008, versión 9.1.9. [En línea]. <http://www.cplus.org/rmw/english1.html> [Consulta: 21 abril de 2008].
- [8] Driessen, Peter F. **Communications Theory and Systems Solutions to Assignment 1**. Traducido por: Kou, Yajung. Setiembre 2000. [En Línea]. <<http://www.ece.uvic.ca/~peter/35001/ass1a/node1.html>>. [Consulta: 11 de junio de 2008].
- [9] Exalt Communications. **Triband Wireless Ethernet Bridge**. [En Línea]. <<http://www.exaltcom.com/products/EX-5rIP5r-cIP.htm>> [Consulta: 22 de mayo de 2008].
- [10] García, Franco. **La Ley de Snell de la refracción**. Movimiento Ondulatorio. “Principio de Huygens”. [En Línea]. <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/snell/snell.htm>>. [Consultado: 12 de junio de 2008].

- [11] GigaBeam. **Products**. [En Línea]. <<http://www.gigabeam.com/products.cfm>>. [Consulta: 22 de mayo de 2008].
- [12] Leal Murillo Allan Leal. “***Estudio de RadioEnlaces para red celular de Ericsson***”. Informe del proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniería Electrónica. Ericsson de Costa Rica S.A. Cartago, 2005.
- [13] Motorola ®. **Wireless BroadBand Networks**. 1994 – 2008. [En línea]. <<http://Motorola®.canopywireless.com>>. [Consulta: 24 de abril de 2008.]
- [14] Motorola ®. **PTP Path Profiler and Link Planner**. [En Línea]. <<http://Motorola.motowi4solutions.com/support/ptp/pathprofile.php>>. [Consulta: 24 abril de 2008]
- [15] Motorola ®. *Cálculos de la zona de Fresnel*. [En Línea]. <http://Motorola.canopywireless.com/click.php?code=1042>>. Consulta: 24 abril de 2008.
- [16] Motorola ®. **Document Library**. 1994 – 2008. [En Línea]. <http://Motorola.motowi4solutions.com/support/library/?region=0&cat=8> [Consultado: 17 de junio 2008].
- [17] Pietrosevoli, Ermanno. **Diseño de Radioenlaces. Redes Inalámbricas para la Trasmisión de Datos**. Escuela Latinoamericana de Redes, Venezuela. <<http://www.zero13wireless.net/foro/showthread.php?t=3239>>. [Consulta: 20 de mayo 2008].
- [18] Práctica de Radiocomunicaciones. **Dimensionando un enlace**. [En línea]. Escuela Universitaria Politécnica de Teruel <<http://eupt2.unizar.es/asignaturas/ittse/radiocomunicaciones/guion.pdf>>. [Consulta: 13 de mayo de 2008]
- [19] Proxim Wireless. **Terabridge 5345 and 5845**. 2005.[En línea]. <<http://www.proxim.com/products/terabridge/index.html>>. [Consulta: 2 de mayo de 2008]
- [20] Quesada Pineda Daniel. “***Evaluación del rendimiento de la red externa de cable telefónico para la implementación de las tecnologías de conexión de banda ancha ADSL2 y ADSL2+***”. Informe del proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniería Electrónica. Instituto Costarricense de Electricidad ICE. Cartago, 2007.
- [21] QuickLink Wireless. **RedCONNEX AN-80i , price**. [En Línea]. <http://www.quicklinkwireless.com/Itemdesc.asp?ic=AN-80i&eq=&Tp=> [Consulta: 12 de mayo de 2008]
- [22] Radiocomunicaciones y Fibra Óptica. **Cálculo de radioenlaces: balance de potencias**. 2008. [En Línea] <http://www.radiooptica.com/Radio/calculo_radioenlaces.asp>. [Consulta: 22 mayo de 2008]

[23] RedLine Communications. **Red Connex AN-30e, Avanzada solución de transporte inalámbrico de banda ancha.** [En Línea].

<http://www.redlinecommunications.com/products/RedCONNEX_AN80i.html>.

[Consulta: 2 de mayo de 2008]

[24] Trango BroadBand Communications. **Trango Link-45.** [En línea].

<<http://www.trangobroadband.com/infobase/pdfs/DS-TrangoLINK-45.pdf>>. [Consulta: 2 de mayo de 2008]

[25] **Datos Climáticos** [En línea]. Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional. 2005.

<http://www.imn.ac.cr/IMN/MainAdmin.aspx?_EVENTTARGET=LinksInfoClimatica>.

[Consulta: 20 de junio de 2008].

[30] **Propagación y campo recibido.** Universidad de Argentina. [En línea].

<[Www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Radioenlaces/1511.pdf](http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Radioenlaces/1511.pdf)> [Consulta: 3 agosto de 2008]

[31] **Modelo de cálculo de radioenlace.** Universidad distrital de Colombia. [En línea].

<www.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/jruiz/jairocd/texto/usm/ci/modradioenle.pdf

> [Consulta: 3 de agosto de 2008]

[26] UIT-R P.453-9 (2003). “**Índice de refracción radioeléctrica: su fórmula y datos sobre la refractividad**”.

[27] UIT-R P.525-2 (1994). “**Cálculo de la atenuación en el espacio libre**”.

[28] UIT-R P.527-3 (1992). “**Características eléctricas de la superficie de la Tierra**”.

[29] UIT-R P.838-3 (2005). “**Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción**”.

[32] UIT-R P.530-12 (2007) “**Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa**”.

Apéndices

A.1 Glosario

Ancho de Banda: la diferencia entre la más alta y más baja señal de frecuencia disponible para señales de redes. El término además es usado para describir la capacidad de rendimiento transferido de un medio de red dado o protocolo.

Atenuación: pérdida de comunicación de una señal de energía. Por lo general se expresa en decibelios (dB).

Backhaul: BH, dispositivo de permite conectividad punto a punto entre dos nodos.

Clúster: conjunto de puntos de acceso (AP) que distribuyen una red o servicios de Internet a los suscriptores.

CPE: *customer premises equipment*, equipo terminal que se refiere como a teléfonos, modems, que los provee la compañía proveedora de teléfono instalado en el sitio del cliente, conectado a la red de la compañía.

Frecuencia libre: banda de frecuencia de uso compartido que no requiere de concesión para transmitir.

Frecuencia licenciada: tipo de frecuencia que requiere concesión para adquirir derechos en la transmisión de datos u otro tipo de infocomunicación. La persona física o jurídica que la adjudica tiene el uso exclusivo para transmitir en la banda de frecuencia que concesionó.

Free Space Loss: Ver pérdidas de propagación en el espacio libre.

Micro: dispositivo que se utiliza en la temporización del GPS, alimentación eléctrica, e interconexión entre redes para un clúster de AP.

Nodo: punto de repetición donde se tiene ubicado una estación base.

Propagación en el espacio libre: Propagación de una onda electromagnética en un medio dieléctrico ideal homogéneo que se puede considerar infinito en todas las direcciones.

Pmtp: siglas para designar la topología de red punto a multipunto.

Ptp: abreviatura de topología punto a punto.

QoS: *Quality of Service*. Medida del desempeño para un sistema de transmisión que refleja su calidad y servicio de transmisión disponible.

Sensibilidad de Receptor: medida de la debilidad de la señal inalámbrica que un receptor puede recibir y aun así puede traducir correctamente en datos.

Suscriber Module: dispositivo que extiende la red o servicios de Internet comunicándose con un punto de acceso.

Switch: dispositivo de red que filtra, envía e inunda tramas basadas en la dirección de destino de cada trama. El switch opera en la capa de enlace de datos según el modelo OSI.

Torre: Estructura metálica en la que se fijan los equipos inalámbricos.

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones. Es una agencia de las Naciones Unidas que estandariza cualquier tipo de telecomunicaciones y actividades de los miembros que pertenecen al ente.

UIT-R: Unión Internacional de Telecomunicaciones, sector de estandarización de Radiocomunicaciones.

Última milla: parte de la red donde están ubicados los suscriptores o clientes que se les brinda el servicio de Internet, cable u otro servicio.

Zona de Fresnel: son zonas espaciales con forma de elipsoides en que se debe tener visibilidad entre antenas para facilitar el establecimiento de un enlace entre dos antenas inalámbricas.

A.2 Cálculos de enlaces punto a punto

A.2.1 Parámetros para el enlace Cerro Berlín – Cerro Bellavista Azul

A.2.1.1 Pérdidas de propagación en el espacio libre.

Utilizando la ecuación 3.7 se obtienen las siguientes pérdidas:

$$L_0 = 32.4 + 20 \log(5800\text{MHz}) + 20 \log(88.4\text{Km})$$

$$L_0 = 146.64\text{dB}$$

A.2.1.2 Atenuación total debido a la lluvia

Con los cálculos del anexo 2.1.2 se obtuvieron los siguientes datos:

$$\gamma_R = 0.9972\text{dB/Km}$$

$$d_0 = 3.976\text{Km}$$

Ahora para calcular el factor de reducción para este enlace de Cerro Berlín – Cerro Bellavista Azul, se tiene una distancia real de 88.4Km:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{88.4}{3.976}}$$

$$r = 0.0389\text{Km}$$

La distancia efectiva según la ecuación 3.14 da un valor de:

$$d_{\text{eff}} = 88.4 \cdot 0.0389$$

$$d_{\text{eff}} = 3.812\text{Km}$$

Finalmente la atenuación total debido a la lluvia se calcula con la ecuación 3.10 de la siguiente manera:

$$A_R = 0.9972 \frac{\text{dB}}{\text{Km}} \cdot 3.812\text{Km}$$

$$A_R = 3.809\text{dB}$$

A.2.1.3 Presupuesto del enlace

Según la ecuación 3.1 el presupuesto del enlace entre Cerro Berlín – Cerro Bellavista Azul y la tabla 4 el presupuesto de potencias es de 27.05dB.

A.2.1.4 Potencia nominal de recepción de señal

Utilizando la ecuación 3.8 se obtiene el siguiente nivel de recepción de señal:

$$P_{Rx} [dBw] = 27dB - 0.5dB + 37.5dBi - 146.64dB + 37.5dBi - 0.5dB$$

$$P_{Rx} [dBw] = -45.64dB-w$$

A.2.2 Parámetros para el enlace Cerro Bellavista Azul – Liberia

A.2.2.1 Pérdidas de propagación en el espacio libre.

Utilizando la ecuación 3.7 se obtienen las siguientes pérdidas:

$$L_0 = 32.4 + 20 \log(5800MHz) + 20 \log(77.94Km)$$

$$L_0 = 145.54dB$$

A.2.2.2 Atenuación específica debido a la lluvia

Con los cálculos del anexo 2.1.2 se obtuvieron los siguientes datos:

$$\gamma_R = 0.9972dB / Km$$

$$d_0 = 3.976Km$$

Ahora para calcular el factor de reducción para este enlace de Cerro Bellavista Azul - Liberia, se tiene una distancia real de 77.94Km:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{77.94}{3.976}}$$

$$r = 0.0786Km$$

La distancia efectiva según la ecuación 3.14 da un valor de:

$$d_{eff} = 77.94 \cdot 0.0786$$

$$d_{eff} = 3.665Km$$

Finalmente la atenuación total debido a la lluvia se calcula con la ecuación 3.10 de la siguiente manera:

$$A_R = 0.9972 \frac{dB}{Km} \cdot 3.665Km$$

$$A_R = 3.655dB$$

A.2.2.3 Presupuesto del enlace

Según la ecuación 3.1 el presupuesto del enlace entre Cerro Bellavista Azul - Liberia se obtiene mediante el siguiente cálculo:

Tabla 15. Presupuesto de enlace para Cerro Bellavista Azul - Liberia

Característica	Valor	Unidades
Potencia del transmisor:	27	dBm
Pérdidas adicionales en transmisión (cables):	0.5	dB
Ganancia de la antena transmisora:	37.5	dB
Pérdidas básicas de propagación en espacio libre:	145.54	dB
Pérdidas adicionales de propagación:	3.655	dB
Ganancia de la antena receptora:	37.5	dB
Pérdidas adicionales en recepción (cables):	0.5	dB
Sensibilidad del receptor:	-86	dBm
Margen resultante:	28.31	dB

A.2.2.4 Potencia nominal de recepción de señal

Utilizando la ecuación 3.8 se obtiene el siguiente nivel de recepción de señal:

$$P_{Rx} [dBw] = 27dB - 0.5dB + 37.5dBi - 145.54dB + 37.5dBi - 0.5dB$$

$$P_{Rx} [dBw] = -44.54dBw$$

A.2.2.5 Radio de la primera zona de Fresnel.

De la ecuación 3.9 se puede calcular la primera zona de Fresnel. Las distancias d1 y d2 se obtienen a partir de la figura 5.18:

$$d = 77.94Km$$

$$d1 = 67.14Km$$

$$d2 = 10.8Km$$

$$r_1 = 17.32 \cdot \sqrt{\left(\frac{67.14Km \cdot 10.8Km}{77.94Km \cdot 5.8GHz}\right)} = 21.93m$$

A.2.3 Parámetros para el enlace Cerro Bellavista Azul – Cerro Hermosa

A.2.3.1 Pérdidas de propagación en el espacio libre.

Utilizando la ecuación 3.7 se obtienen las siguientes pérdidas:

$$L_0 = 32.4 + 20 \log(5800MHz) + 20 \log(81.16Km)$$

$$L_0 = 145.9dB$$

A.2.3.2 Atenuación específica debido a la lluvia

Con los cálculos del anexo 2.1.2 se obtuvieron los siguientes datos:

$$\gamma_R = 0.9972 \text{ dB/Km}$$

$$d_0 = 3.976 \text{ Km}$$

Ahora para calcular el factor de reducción para este enlace de Cerro Bellavista Azul – Cerro Hermosa, se tiene una distancia real de 81.16Km:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{81.16}{3.976}}$$

$$r = 0.071 \text{ Km}$$

La distancia efectiva según la ecuación 3.14 da un valor de:

$$d_{eff} = 81.16 \cdot 0.071$$

$$d_{eff} = 3.70 \text{ Km}$$

Finalmente la atenuación total debido a la lluvia se calcula con la ecuación 3.10 de la siguiente manera:

$$A_R = 0.9972 \frac{\text{dB}}{\text{Km}} \cdot 3.70 \text{ Km}$$

$$A_R = 3.6896 \text{ dB}$$

A.2.3.3 Presupuesto del enlace

Según la ecuación 3.1 el presupuesto del enlace entre Cerro Bellavista Azul – Cerro Hermosa se obtiene mediante el siguiente cálculo:

Tabla 16. Presupuesto de enlace para Cerro Bellavista Azul - Cerros Hermosa

Característica	Valor	Unidades
Potencia del transmisor:	27	dBm
Pérdidas adicionales en transmisión (cables):	5.25	dB
Ganancia de la antena transmisora:	37.5	dB
Pérdidas básicas de propagación en espacio libre:	145.9	dB
Pérdidas adicionales de propagación:	3.6896	dB
Ganancia de la antena receptora:	37.5	dB
Pérdidas adicionales en recepción (cables):	5.25	dB
Sensibilidad del receptor:	-86	dBm
Margen resultante:	27.91	dB

A.2.34 Potencia nominal de recepción de señal

Utilizando la ecuación 3.8 se obtiene el siguiente nivel de recepción de señal:

$$P_{Rx} [dBw] = 27dB - 0.5dB + 37.5dBi - 145.9dB + 37.5dBi - 0.5dB$$

$$P_{Rx} [dBw] = -43.9dBw$$

A.2.3.5 Radio de la primera zona de Fresnel.

De la ecuación 3.9 se puede calcular la primera zona de Fresnel. Las distancias d1 y d2 se obtienen a partir de la figura 5.16:

$$d = 81.16Km$$

$$d1 = 79.14Km$$

$$d2 = 2.02Km$$

$$r_1 = 17.32 \cdot \sqrt{\left(\frac{79.14Km \cdot 2.02Km}{81.16Km \cdot 5.8GHz}\right)} = 10.093m$$

A.2.4 Parámetros para el enlace Cerro Bellavista Azul - Cerro Vicente

A.2.4.1 Pérdidas de propagación en el espacio libre.

Utilizando la ecuación 3.7 se obtienen las siguientes pérdidas:

$$L_0 = 32.4 + 20 \log(5800MHz) + 20 \log(106.32Km)$$

$$L_0 = 148.24dB$$

A.2.4.2 Atenuación específica debido a la lluvia

Con los cálculos del anexo 2.1.2 se obtuvieron los siguientes datos:

$$\gamma_R = 0.9972dB/Km$$

$$d_0 = 3.976Km$$

Ahora para calcular el factor de reducción para este enlace de Cerro Bellavista Azul – Cerro Vicente, se tiene una distancia real de 106.32Km:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{106.32}{3.976}}$$
$$r = 0.0934Km$$

La distancia efectiva según la ecuación 3.14 da un valor de:

$$d_{eff} = 106.32 \cdot 0.0934$$

$$d_{eff} = 3.604 \text{ Km}$$

Finalmente la atenuación total debido a la lluvia se calcula con la ecuación 3.10 de la siguiente manera:

$$A_R = 0.9972 \frac{dB}{Km} \cdot 3.604 \text{ Km}$$

$$A_R = 3.963 \text{ dB}$$

A.2.4.3 Presupuesto del enlace

Según la ecuación 3.1 el presupuesto del enlace entre Cerro Bellavista Azul - Cerro Vicente se obtiene mediante el siguiente cálculo:

Tabla 17. Presupuesto de enlace para Cerro Bellavista Azul - Cerro Vicente

Característica	Valor	Unidades
Potencia del transmisor:	27	dBm
Pérdidas adicionales en transmisión (cables):	5.25	dB
Ganancia de la antena transmisora:	37.5	dB
Pérdidas básicas de propagación en espacio libre:	148.24	dB
Pérdidas adicionales de propagación:	3.963	dB
Ganancia de la antena receptora:	37.5	dB
Pérdidas adicionales en recepción (cables):	5.25	dB
Sensibilidad del receptor:	-86	dBm
Margen resultante:	25.3	dB

A.2.4.4 Potencia nominal de recepción de señal

Utilizando la ecuación 3.8 se obtiene el siguiente nivel de recepción de señal:

$$P_{Rx} [\text{dBw}] = 27 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} + 37.5 \text{ dB} - 148.24 \text{ dB} + 37.5 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB}$$

$$P_{Rx} [\text{dBw}] = -47.24 \text{ dBw}$$

A.2.4.5 Radio de la primera zona de Fresnel.

De la ecuación 3.9 se puede calcular la primera zona de Fresnel. Las distancias d_1 y d_2 se obtienen a partir de la figura 5.21:

$$d = 106.32 \text{ Km}$$

$$d_1 = 70.10 \text{ Km}$$

$$d_2 = 36.22 \text{ Km}$$

$$r_1 = 17.32 \cdot \sqrt{\left(\frac{70.1Km \cdot 36.22Km}{106.32Km \cdot 5.8GHz}\right)} = 35.14m$$

A.2.5 Parámetros para el enlace Cerro Hermosa - Liberia

A.2.5.1 Pérdidas de propagación en el espacio libre.

Utilizando la ecuación 3.7 se obtienen las siguientes pérdidas:

$$L_0 = 32.4 + 20 \log(5800MHz) + 20 \log(26.06Km)$$

$$L_0 = 136.34dB$$

A.2.5.2 Atenuación específica debido a la lluvia

Con los cálculos del anexo 2.1.2 se obtuvieron los siguientes datos:

$$\gamma_R = 0.9972dB / Km$$

$$d_0 = 3.976Km$$

Ahora para calcular el factor de reducción para este enlace de Cerro Hermosa – Liberia, se tiene una distancia real de 26.06Km:

$$r = \frac{1}{1 + \frac{26.06}{3.976}}$$

$$r = 0.128Km$$

La distancia efectiva según la ecuación 3.14 da un valor de:

$$d_{eff} = 26.06 \cdot 0.128$$

$$d_{eff} = 3.474Km$$

Finalmente la atenuación total debido a la lluvia se calcula con la ecuación 3.10 de la siguiente manera:

$$A_R = 0.9972 \frac{dB}{Km} \cdot 3.474Km$$

$$A_R = 3.464dB$$

A.2.5.3 Presupuesto del enlace

Según la ecuación 3.1 el presupuesto del enlace entre Cerro Hermosa - Liberia se obtiene mediante el siguiente cálculo:

Tabla 18. Presupuesto de enlace para Cerro Hermosa Liberia

Característica	Valor	Unidades
Potencia del transmisor:	27	dBm
Pérdidas adicionales en transmisión (cables):	5.25	dB
Ganancia de la antena transmisora:	29.4	dB
Pérdidas básicas de propagación en espacio libre:	136.38	dB
Pérdidas adicionales de propagación:	3.464	dB
Ganancia de la antena receptora:	29.4	dB
Pérdidas adicionales en recepción (cables):	5.25	dB
Sensibilidad del receptor:	-86	dBm
Margen resultante:	20.76	dB

A.2.5.4 Potencia nominal de recepción de señal

Utilizando la ecuación 3.8 se obtiene el siguiente nivel de recepción de señal:

$$P_{Rx} [dBw] = 27dB - 0.5dB + 29.4dB - 136.38dB + 29.4dB - 0.5dB$$

$$P_{Rx} [dBw] = -51.58dBw$$

A.2.5.5 Radio de la primera zona de Fresnel.

De la ecuación 3.9 se puede calcular la primera zona de Fresnel. Las distancias d1 y d2 se obtienen a partir de la figura 5.21:

$$d = 26.06Km$$

$$d1 = 20.11Km$$

$$d2 = 5.95Km$$

$$r_1 = 17.32 \cdot \sqrt{\left(\frac{20.11Km \cdot 5.95Km}{26.06Km \cdot 5.8GHz}\right)} = 15.41m$$

A.3 Anchos de banda estimado de los perfiles PTP

Para obtener el ancho de banda promedio de los enlaces con equipos PTP600 de Motorola ® se utilizó la herramienta Link Planner de Motorola ®. En la figura A.3.1 se muestra los parámetros más relevantes que se requieren configurar cada uno de los enlaces. En la herramienta se muestra el relieve entre ambos sitios con la posibilidad de agregar obstáculos en la trayectoria del enlace con el fin de analizar si existe línea de vista o no, así como varios parámetros de transmisión y de los tipos de equipos.

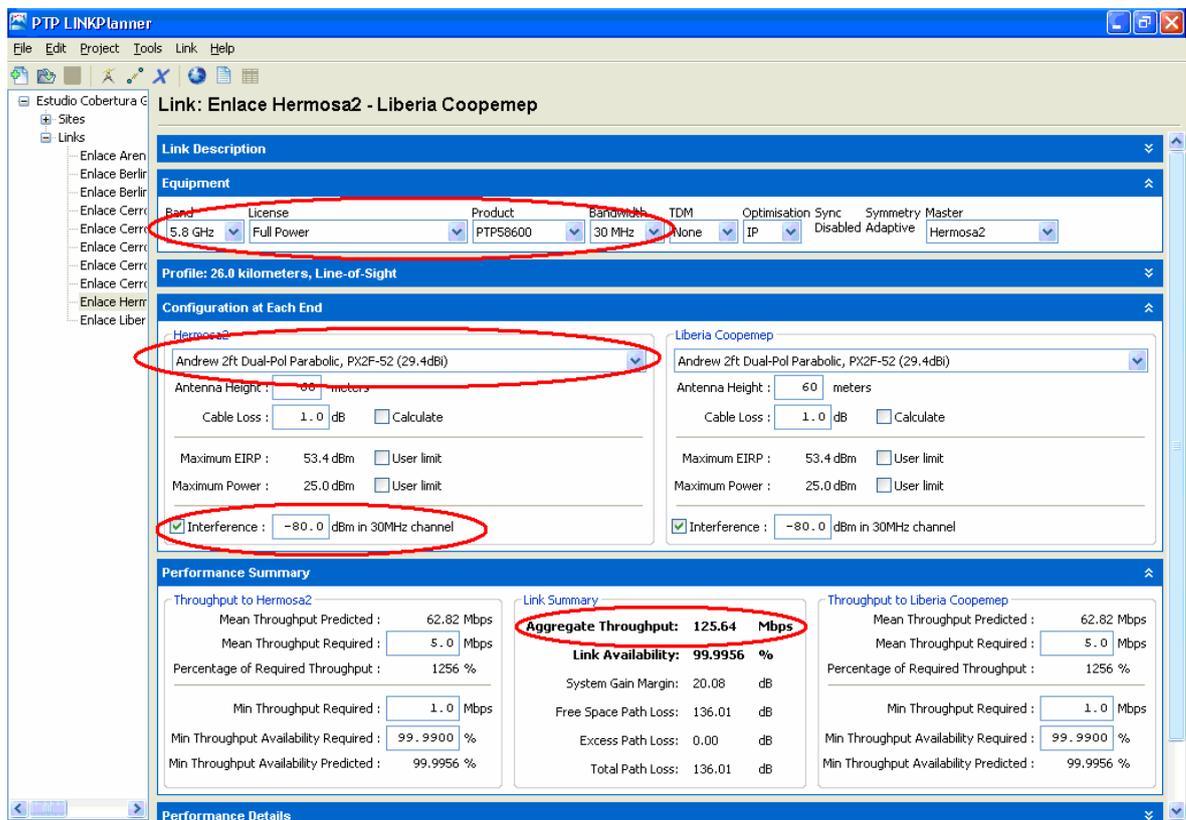


Figura A.3.1. Cálculo de perfiles PTP con Link Planner, de Motorola ®.

Imagen tomada del programa LinkPlanner de Motorola ®.

A.4 Perfiles para enlaces punto a multipunto

Enlace Cerro Bellavista Azul - Nicoya

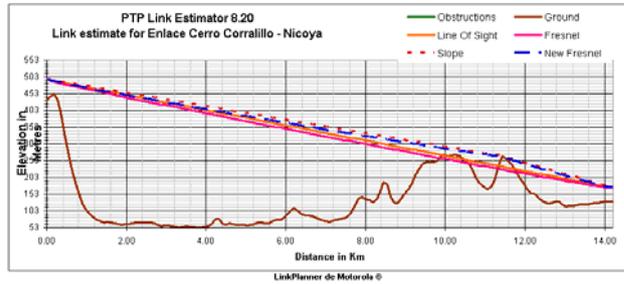


Figura A.4.1. Perfil del relieve entre Cerro Bellavista Azul – Nicoya.

Enlace Comunidad – Tanque Agua

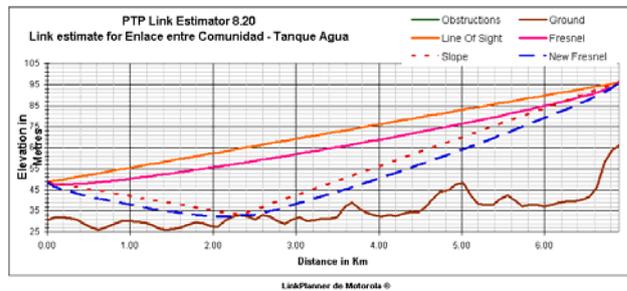


Figura A.4.2. Perfil del relieve entre Comunidad – Tanque Agua.

Enlace Cerro Hermosa – Ocotal Montealegre

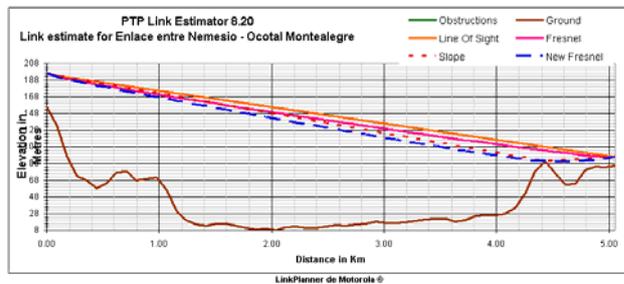


Figura A.4.3. Perfil del relieve entre Cerro Hermosa – Ocotal Montealegre.

Enlace Cerro Hermosa – Playa Hermosa

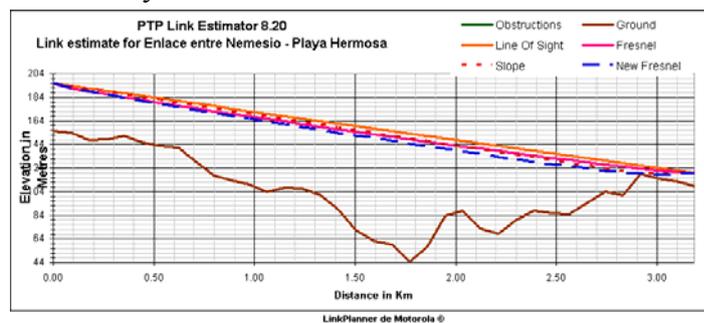


Figura A.4.4. Perfil del relieve entre Cerro Hermosa – Playa Hermosa.

A.4 Coordenadas geográficas de los sitios analizados

Tabla 19. Coordenadas geográficas de los sitios analizados.

Lugar	Coordenada Geográfica		Altura Torre mts	Observaciones
	Latitud	Longitud		
Bagaces	10°31'15.01"N	85°15'17.49"W	30	
Colono Cerro Vicente	10:18:5.8N	84:22:14.2W	60	Importante para ofrecer cobertura en San Carlos desde Guanacaste
Cerro Bellavista Azul, Nandayure	09:57:3.40N	85:16:22.51W	60	Sitio con condiciones para enlaces
Cerro Berlín, San Ramón	10:01:24.3N	84:28:07.5W	60	Enlace entre Red Metropolitana y Guanacaste.
Cerro Cartagena	10°23'28.75"N	85°38'22.54"W	40	Cerro con condiciones para enlaces multipunto.
Cerro Esperanza	10°07'28"N	85°37'51"W	35	Sitio con condiciones aptas para enlace
Cerro Rosario	10°14'48.6"N	85°24'57.7"W	50	Sitio con condiciones aptas para enlace
Cóbano	9°41'55.14"N	85°6'54'79"W	15	
Filadelfia Municip	10°26'49"N	85°33'05.7"W	10	
Liberia	10:37:53.69N	85:26:22.81W	28	Sitio para enlace punto a punto y multipunto
Arenal Sabalito2	10:33:46.5N	85:00:20.5W		Sitio con condiciones para enlace punto a punto.
Nicoya	10:08:41.21N	85:27:12.38W	30	
Nodo Heredia	10°01'23.5"N	84°04'44.5"w	45	Nodo alternativo al Nodo Alajuela para enlace con Cerro Berlín
Nodo Alajuela	10°03'17.6"N	84°12'20.08"W	34	Nodo con punto de enlace con zona Metropolitana
SantaCruz	10°15'24.24"N	85°35'8.67"W	15	
Tanque Agua	10°30'24"N	85°38'08.9"W	30	Ubicado en Sardinal en un proyecto en funcionamiento
Torre Comunidad	10°32'58.9"N	85°35'25.4"W	18	Oficinas de Continex Guanacaste
Rep. Duende	10°34'29.8"N	85°40'9.1"W	25	
Playa Hermosa - rep	10°34'34.56"N	85°40'02.41"W	11	Posible punto de repetición
Playa Panamá	10°35'13.2"N	85°38'12.5"W	20	Proyectos de clientes
Cerro Playa Coco	10°33'14.56"N	85°41'2.82"W	15	Posible punto de repetición
Cerro Hermosa2	10:34:1.99N	85:40:7.39W	60	Cerro para enlace multipunto
Ocotal - Montealegre	10°32'23.65"N	85°43'31.04"W	10	

Anexos

ANEXO 1. Distribución y uso de frecuencias según el Plan de Distribución de Frecuencias.

Tabla 20. Plan de distribución de frecuencias superior a 2GHz según la legislación costarricense.[5]

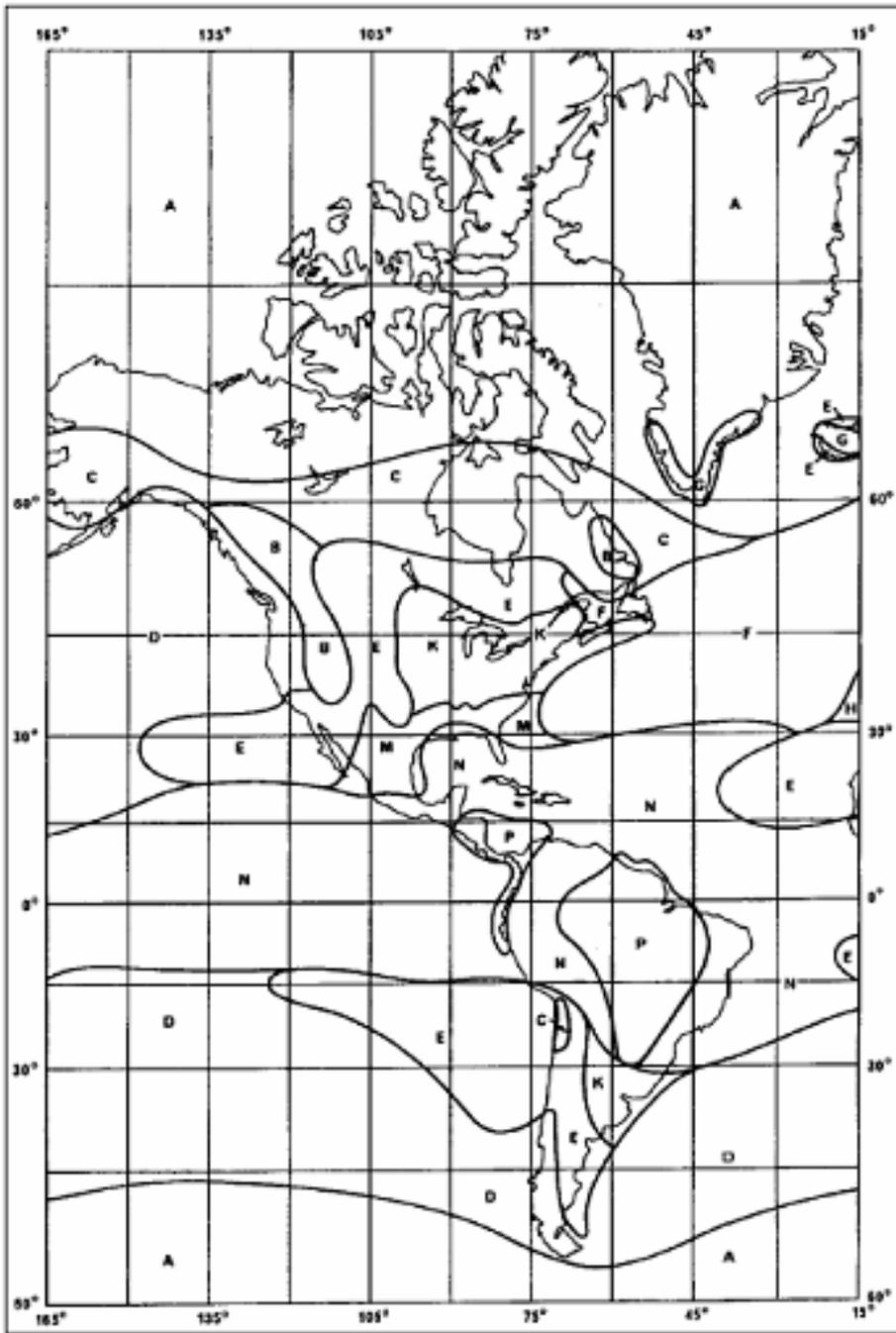
Rango de frecuencia	Sistemas de comunicación	Ejemplos
2300 – 2500 MHz	Fijo y móvil	- Radioenlaces de repetición de canales de televisión
2400 – 2483 MHz	Fijo y móvil	- Sistemas que utilicen tecnología de espectro disperso.
2690 – 2700 MHz	Satelital No asignable a servicios terrestres	- Investigación espacial (pasiva) - Exploración satelital.
3400 – 3620 MHz	Fijo Satélite	- Redes de transporte. - Enlaces de conexión satelital con estaciones terrestre.
4400 – 5000 MHz	Fijo Fijo por satélite (espacio Tierra)	- Redes de transporte SDH
5725 – 5825 MHz	Fijo Móvil	- Sistemas que utilicen tecnología de espectro disperso.
5850 – 5925 MHz	Fijo. Fijo por satélite (Tierra Espacio)	- Red de transporte PDH
5925 – 6450 MHz	Fijo Fijo por satélite (espacio Tierra)	- Enlaces fijos de banda ancha en topologías de anillo de SDH
6450 – 6851 MHz	Fijo Fijo por satélite (espacio Tierra)	- Radiodifusión televisiva
6851 – 7428 MHz	Fijo Móvil	- Radiodifusión televisiva
7428 – 8400 MHz	Fijo Móvil salvo móvil aeronáutico Meteorología por satélite (espacio tierra)	- Centrales telefónicas interurbanas rurales
10.5 – 10.95 GHz	Fijo Móvil	- Radiodifusión televisiva
10.95 – 11.7 GHz	Fijo Fijo por satélite (espacio tierra) Móvil salvo móvil aeronáutico	- Enlaces de protección de anillos ópticos de SDH
11.7 – 12.1 GHz	Fijo Fijo por satélite (espacio tierra) Móvil salvo móvil aeronáutico	- Enlaces de conexión para satélites
12.75 – 13.25 GHz Y 17.7 – 19.7 GHz	Fijo Fijo por satélite (tierra espacio) Móvil	- Radioenlaces punto a punto. - telefonía fija y móvil de punto a punto a multipunto.
21.2 – 23.6 GHz	Fijo Móvil Investigación espacial (pasivo)	Enlaces de conexión
25.25 – 27 GHz	Fijo Fijo por satélite (espacio tierra)	Sistemas satelitales
27.5 – 29.5 GHz	Fijo Móvil	Televisión MMDS

Anexo 2. Constantes de polarización vertical y horizontal según la recomendación de la UIT-R 838-3

Tabla 21. Constantes de polarización horizontal y vertical según la UIT-R P-838-3

Frecuencia				
(GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
1	0.0000259	0.9691	0.0000308	0.8592
1.5	0.0000443	1.0185	0.0000574	0.8957
2	0.0000847	1.0664	0.0000998	0.949
2.5	0.0001321	1.1209	0.0001464	1.0085
3	0.000139	1.2322	0.0001942	1.0688
3.5	0.0001155	1.4189	0.0002346	1.1387
4	0.0001071	1.6009	0.0002461	1.2476
4.5	0.000134	1.6948	0.0002347	1.3987
5	0.0002162	1.6969	0.0002428	1.5317
5.5	0.0003909	1.6499	0.0003115	1.5882
6	0.0007056	1.59	0.0004878	1.5728
7	0.001915	1.481	0.001425	1.4745
8	0.004115	1.3905	0.00345	1.3797
9	0.007535	1.3155	0.006691	1.2895
10	0.01217	1.2571	0.01129	1.2156
15	0.04481	1.1233	0.05008	1.044
20	0.09164	1.0568	0.09611	0.9847
25	0.1571	0.9991	0.1533	0.9491

Anexo 3. Intensidad de lluvia [mm/h] de acuerdo con la recomendación P.837-1 de la UIT-R.



% de tiempo	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115