

Evaluación de desempeño de un enlace con tecnología WiMAX¹

Performance evaluation of a link with WiMAX technology

I. L. Castro y J. L. Jiménez

Recibido Octubre 03 de 2014 – Aceptado Mayo 29 de 2015

Resumen - Este artículo evalúa, analiza y compara el desempeño de un enlace implementado con tecnología WiMAX en la frecuencia de 3.5 GHz, realizando pruebas de calidad de servicio VoIP y mediciones de desempeño tales como: Throughput, RSSI y SNR usando tráfico TCP y UDP. Para ello se desarrolló una topología punto a punto entre una estación base ubicada en el barrio San José de Bavaria en la ciudad de Bogotá y un terminal de usuario ubicado a diferentes distancias de la misma, bajo diferentes escenarios. Adicionalmente se hace una validación de un modelo teórico de predicción determinístico con respecto a las medidas realizadas. Los resultados obtenidos se muestran en este artículo.

Palabras Clave - WiMAX, TCP, UDP, VoIP, RSSI, SNR, Throughput.

Abstract - This article evaluates, analyzes and compares the performance of WiMAX technology implemented in the frequency of 3.5 GHz link, performing quality tests and VoIP performance metrics such as throughput, RSSI and SNR using TCP and UDP traffic. In order to reach this goal, a point to point topology was developed between a base station located in the San José de Bavaria in the city of Bogota and a user

terminal located at different distances from it, and under different scenarios. Additionally a validation of a theoretical model of deterministic prediction regarding the measurements was proposed. The results obtained are shown in this article.

Key Words - WiMAX, TCP, UDP, VoIP, RSSI, SNR, Throughput.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el mercado de redes 3G es el que mayor fuerza ha tomado, sin embargo, esta tecnología está limitada en datos ya que al tener un espectro disminuido, no puede ofrecer masivamente a sus usuarios el servicio de datos e internet, es decir, está enfocado a servicio de voz y datos básicos; igualmente este tipo de redes en este momento no tiene aplicativos real time como es VoIP ya que no soporta estos niveles de calidad de servicio, adicionalmente para operar en 3G se necesitan licencias móviles, mientras que WiMAX tiene facilidad de licencias, por ejemplo un operador de cable puede montar una red WiMAX con la licencia que tiene caso contrario con una red 3G la cual funciona solo en las bandas 800, 900 y 1900 Hz.

Por estas razones WiMAX sigue siendo una tecnología atractiva para su implementación, además, al momento de migrar a LTE con redes WiMAX se tendrá un empalme más suave, ya que esta tecnología (LTE) está basada en muchas de las características de WiMAX.

Esta tecnología permite prestar servicio en zonas de difícil acceso para aquellas como WiFi y DSL debido a que son más costosas y no resultan rentables para el proveedor de servicios, por lo tanto, esta alternativa tecnológica surge como una opción atractiva ya que cubre largas distancias,

¹Producto derivado del proyecto de Investigación "Evaluación de desempeño de un enlace con tecnología WiMAX", trabajo resultado del proyecto de investigación, para optar al título de Magister en Ingeniería electrónica y de Computadores de la Universidad de los Andes.

I. L. Castro, es Magister en Ingeniería electrónica y de Computadores de la Universidad de los Andes, actualmente se desempeña como profesional de la Vicerrectoría de Educación Virtual de la Universidad de Boyacá, (correo e.: ivonneli8@yahoo.com).

J. L. Jiménez, es Magister en Ingeniería electrónica y de Computadores de la Universidad de los Andes, actualmente ejerce como Ingeniera de Nokia network siemens, en el área de desarrollo y ejecución de proyectos, (correo e.: jaela24@gmail.com).

lo que disminuye la cantidad de estaciones base requeridas en zonas rurales, donde la cantidad de usuarios es poca comparada con la de las zonas urbanas y no se requiere de cableado, además con 3G no es posible brindar servicio de banda ancha, como se explicó anteriormente.

El estándar IEEE 802.16-2004 desarrollado para conexiones inalámbricas de tipo nómada y estático, implementados entre una estación base y un grupo definido de terminales de abonado soporta a l t a s velocidades de transmisión, y diferenciación clara en el tipo y calidad de servicios transmitidos desde el origen, así como un rango amplio de cobertura, proporcional al entorno de propagación y frecuencia de operación de la interfaz de aire. Lo anterior convierte a la tecnología WiMAX, regida por dicho estándar, en una alternativa para operadores de telecomunicaciones, que requieran el desarrollo de una nueva red para prestación de servicios masivos o corporativos orientados a los segmentos de voz y de datos.

El estándar define la interfaz aérea, la cual incluye la capa MAC y la capa PHY. En esta investigación se utilizan las especificaciones Wireless MAN-OFDM PHY, basada en la modulación OFDM y diseñada para operaciones en escenarios NLOS.

En este momento, para el despliegue de redes de datos masivas por acceso inalámbrico, se dispone de la tecnología UMTS - HSDPA, la cual muestra un alto índice de penetración a nivel mundial en operadores de telefonía celular. Esta presenta una excelente disposición para entornos de comunicación móvil, debido a la naturaleza y evolución propiciada desde el 3GPP2, sin embargo a diferencia de la tecnología WiMAX, no genera la posibilidad de transmisiones de servicios en tiempo real como es VoIP ya que no soporta la calidad de servicio requerida para estos. Un segundo aspecto que limita la masificación de datos en este tipo de redes, específicamente en zonas urbanas, es la presencia de un único espectro para explotación de servicios de datos y voz, siendo este último el elemento predominante de explotación en las redes de telefonía celular.

El objetivo principal es evaluar, analizar y comparar el desempeño de un enlace bajo tecnología WiMAX, así como proporcionar una base teórico-práctica para futuros estudios. Adicionalmente realizar la validación de un modelo teórico de predicción determinístico teniendo en cuenta las mediciones en campo y con base en ello, efectuar la sintonización del modelo.

II. ANTECEDENTES

El presente estudio está basado en el rendimiento y desempeño de enlaces WiMAX ([1] y [2]), los cuales analizan el desempeño de una celda WiMAX bajo diferentes realidades como son distancias, tipos de tráfico, modulaciones, atenuaciones y coberturas de acuerdo a

condiciones geográficas. A continuación se presenta un resumen de cada una.

A. “Performance Evaluation of IEEE 802.16 WIMAX link with respect to higher layer protocols” [1]

En este estudio [1], los autores analizaron el desempeño y rendimiento de un enlace WiMAX, para ello se contó con una estación base (BS) y una terminal de usuario (SS), la metodología de este experimento fue la de definir diferentes distancias entre la estación base y la terminal de usuario (220 metros, 5400 metros y 9.4 Km), contando con LOS y Near-LOS, aquí, no fue posible realizar pruebas NLOS y se desconocen los motivos. Se utilizó tráfico TCP y UDP con el fin de observar el desempeño del enlace en cada tipo de tráfico, otro de los factores establecidos en la prueba fue la de fijar la potencia de transmisión a la mínima expresión, 13 dBm, así mismo, las diferentes modulaciones fueron fijadas manualmente para tener más claridad del comportamiento de cada una de ellas. En cada una de las pruebas realizadas se quería determinar el Throughput y QoS del enlace utilizando los diferentes tipos de tráfico en las direcciones Uplink y Downlink, en su mayoría fueron hechas en downlink, por ello con esta investigación se busca analizar el enlace con las características mencionadas anteriormente y a su vez extender dichos parámetros de evaluación, como es el caso de analizar el desempeño del enlace en dirección Uplink, ya que presenta restricciones entre la BS y SS.

A continuación se encontrará una breve explicación de la metodología utilizada para poder determinar la capacidad del enlace, pruebas de Throughput y la calidad de servicio (QoS):

El tráfico TCP y UDP en [1], fue generado mediante una herramienta de simulación llamada Iperf [3], la cual aparte de generar el tráfico, permite obtener varios parámetros como son: ancho de banda utilizado, delay jitter (retardos entre los paquetes) y las pérdidas de paquetes. Esta herramienta soporta IPv6 y multicast. Es importante saber que dicha herramienta funciona bajo el entorno de Linux, aunque existen versiones que funcionan para Windows.

También se utiliza una aplicación para el monitoreo de la red llamado Ethereal [4] ó Wireshark [5], el cual es usado para observar el tráfico de la red y los problemas que la misma pueda presentar, a su vez, esta aplicación intenta: detectar intrusos en la red, recoger estadísticas, filtrar el contenido del tráfico y suprimir errores en la red, entre otros. En las pruebas realizadas en [1] básicamente se utilizó para analizar y capturar los datos recibidos.

Las mediciones del Throughput se llevaron a cabo con el programa Iperf [3] y se realizó una comparación con las tasas de bit especificadas en el equipo para el correspondiente esquema de modulación, teniendo en cuenta que el Throughput depende de la distancia y de la potencia de transmisión.

Para la prueba de calidad de servicio (QoS), en el switch se habilita el VLAN y los clientes 1 y 2 se colocan en VLANS separadas como se aprecia en la Fig. 1 [1].

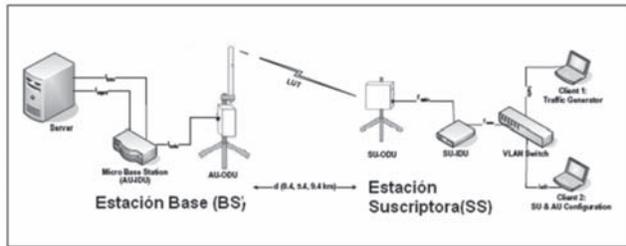


Fig. 1. Configuración del escenario.

El cliente 1 genera el tráfico UDP con parámetros de transmisión simulando tiempo real con VoIP, mientras el cliente 2 genera tráfico TCP simulando tiempo no real con un servicio de aplicación tal como http.

La aplicación en tiempo real es configurada con un Real Time Polling Service (rtPS) mientras que la del tiempo no real es configurada con mejor esfuerzo (BE).

Los 2 clientes generan tráfico al mismo tiempo con un solo esquema de modulación (el más crítico) 64QAM $\frac{3}{4}$ sobre un máximo ancho de banda del enlace.

Sin embargo y de acuerdo a los resultados obtenidos en dichas pruebas, se notó que el desempeño del enlace con tráfico TCP presenta un buen comportamiento solo a una distancia de 220 metros, mientras que UDP presenta buen rendimiento en todas las distancias pero en dirección Downlink debido a que no se presentaron resultados en Uplink.

B. "Measuring the Quality of VoIP Traffic on a WiMAX testbed"

En el estudio realizado por Scalabrino, Pellegrini, Rigió y demás [2], se analizó la calidad de tráfico de VoIP en un escenario punto a multipunto en un ambiente rural con una estación base (BS) y 3 terminales de usuario (SS) a distancias entre los 8 y 13 Km entre la estación base y cada usuario con línea de vista, operando en la banda de 3.5GHz. La evaluación de la calidad de servicio se realizó a través de un esquema computacional llamado E-model. La BS con la que se realizó el estudio es una antena sectorial con ganancia de 14 dBi y potencia de 36 dBm tanto para la BS como para las SS con un nivel de señal a ruido por debajo de los 30 dBm permitiendo así una modulación hasta de 64QAM para cada conexión; cada nodo es conectado a través de una conexión Ethernet al equipo WiMAX. Se generó tráfico CBR VoIP y VBR VoIP, se realizaron medidas de desempeño para Uplink y Downlink separadamente para evitar efectos de interferencia.

Primero se midió la capacidad de la voz en términos del

número máximo de llamadas sostenidas con alta calidad, la pérdida de paquetes y retardo dando como resultado que, dependiendo del códec utilizado, se podían tener entre 10 y 17 llamadas simultáneas con alta calidad. En el análisis de tráfico con VBR VoIP se habilitó la opción de VAD (Activación de voz por detección) aumentando el número de sesiones de 10 (en el caso de tráfico CBR VoIP) a 22 y la degradación del desempeño es más suave.

En este estudio se mostró que la calidad de servicio soportada por WiMAX se ajusta a los requerimientos para aplicaciones de VoIP aun con tráfico de best effort, la calidad de la voz dependía de los códecs adoptados más que de la longitud de paquetes de VoIP.

III. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO

Para el análisis del enlace se realizaron dos tipos de pruebas: la primera para medir el desempeño del enlace analizando medidas como: RSSI, SNR, Modulación y Throughput en uplink y downlink, la segunda para medir la calidad del enlace a través de la generación de flujos de VoIP simulando llamadas con los códecs G.711.1 y G.729.2. La configuración del escenario es la misma para los dos tipos de pruebas y se muestra en la Fig. 2.

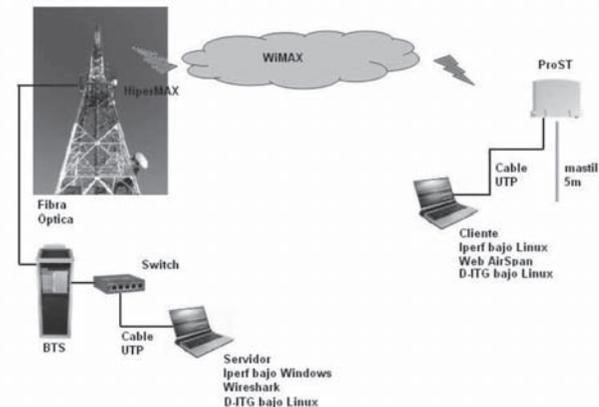


Fig. 2. Escenario de pruebas ViMAX.

Las pruebas de campo se llevaron a cabo en la frecuencia de 3.5 GHz utilizando una estación base ubicada en la zona de San José de Bavaria, ambiente urbano residencial al norte de Bogotá, los elementos radiantes se encuentran instalados a una altura de 19 metros en configuración tri-sectorial orientadas en azimut 0° , 120° y 240° respectivamente, cada una de las antenas tiene una ganancia de 16dBi, un tilt eléctrico de -3° y un ancho de haz vertical de 120° . Cada sector dispone de un tranceptor que tiene una potencia de transmisión de 32 dBm.

Para este estudio, se escogió el sector 3 (azimut 240°), el cual tiene una frecuencia en uplink de 3486 MHz y en downlink 3586 MHz y un ancho de banda de canal de 3.5MHz. La estación base tiene una arquitectura en la cual se tiene una unidad interna y una unidad externa, conectadas por fibra óptica, está última es co-ubicada con la antena en

un segmento definido de la torre. La unidad externa está conectada a un switch el cual a su vez se conecta a un computador a través de un cable UTP que hace las veces de servidor asignando una VLAN para permitir la comunicación entre el cliente y el servidor dentro de la misma red.

En el extremo de recepción se tiene un terminal de usuario para exteriores ProST (fabricante Airspan), adosado a un mástil de altura 5 metros, ubicado a diferentes distancias de la estación base y siempre orientado en dirección a ella. El terminal de usuario radia a 24dBm, y dispone de una antena con una ganancia de 17dBi, la cual cuenta con un ancho de haz vertical de 60°. A través de un cable UTP se conecta un computador que hace las veces de cliente.

En las tablas I y II se muestra el detalle de las especificaciones de la estación base y del terminal de usuario.

TABLA I.
PARÁMETROS DEL TERMINAL DE USUARIO

PARÁMETROS CPE	
POTENCIA (dBm)	24
GANANCIA (dBi)	17
HPBW	60°
SENSITIVIDAD	-103 dBm
THROUGHPUT BRUTO MAX.	12 Mbps
THROUGHPUT BRUTO MIN.	1.25 Mbps
FRECUENCIA (MHz)	3300 A 3800
MODO DE OPERACIÓN	FDD, FULL DUPLEX

TABLA II
PARÁMETROS DE LA ESTACIÓN BASE

PARÁMETROS ESTACIÓN BASE	
POTENCIA (dBm)	33
GANANCIA (dBi)	16
MODULACIÓN	OFDM
ANCHO DE BANDA DE CANAL (MHz)	3.5
HPBW	120°
FIGURA DE RUIDO (dB)	7
TIEMPO DE SÍMBOLO (us)	36
SENSITIVIDAD	-115 dBm
FRECUENCIA DE OPERACIÓN (Downlink) MHz	3550 A 3600

IV. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

C. Configuración para análisis de desempeño

En la Fig. 2 se mostró la configuración del escenario

utilizado para llevar a cabo las pruebas de campo, de tal forma que en cada extremo (Servidor-Cliente) se establecieron los parámetros de configuración necesarios para cada uno de ellos y que se describen a continuación.

En el servidor se corrió un generador de tráfico TCP-UDP llamado Iperf [3]; el cual permite generar paquetes TCP y UDP, configurando para cada uno de ellos parámetros como: tamaño del paquete, tamaño de la ventana, tamaño del buffer, velocidad y tiempo de transmisión. Esta herramienta corre bajo Windows; los resultados que se obtienen con ella son: throughput, jitter, datagramas totales y perdidos. Para estas pruebas se generó tráfico TCP igual a la tasa máxima soportada por el terminal de usuario (12Mbps), según las especificaciones técnicas del fabricante [6].

Para corroborar la transmisión de datos se utilizó un analizador de protocolos de red llamado Wireshark [5], el cual muestra en detalle la descripción de cada paquete tal como: dirección origen, dirección destino, tamaño, protocolo, encabezados, banderas, entre otros.

En el extremo del cliente se utilizaron las mismas herramientas que en el servidor para recibir la información enviada; para Iperf se configuró el tiempo de transmisión, el protocolo y las unidades en las que se quería recibir la información. Adicionalmente, se utilizó la herramienta WiMAX Modem Management propietaria de Airspan [6], con la cual se obtienen los datos de RSSI, SNR, modulación tanto en uplink como en downlink; esta funciona bajo un navegador web, en este caso Internet Explorer el cual necesita como configuración la dirección IP del terminal de usuario para ingresar al software y realizar la captura de los datos.

Es importante resaltar que todas las herramientas mencionadas deben estar en la misma red, es decir, pertenecer a las mismas VLAN, máscara de subred, y tener una dirección IP asignada.

Las pruebas se realizaron a una distancia entre 100 y 2200 metros alrededor del sector 3 de la estación base, se efectuaron 39 mediciones, cada una de ellas con una duración de 3 minutos. En cada punto de medición establecido se realizaron 3 muestreos para generar redundancia en los datos obtenidos.

Las mediciones se dividieron en tres tipos de escenarios: LOS, nLOS y NLOS, para clasificarlas se realizó el perfil entre cada punto y la estación base por medio de la herramienta ICS Telecom [7], con una cartografía de resolución de 5 metros.

En el caso de los sitios clasificados dentro del escenario LOS se verificó que la primera zona de Fresnel estuviese totalmente libre (100%), para el caso de los sitios clasificados dentro del escenario nLOS se verificó que el 60% de la primera zona de Fresnel se encontrara libre y para los

sitios clasificados como NLOS se verificó que el perfil se presentara totalmente obstruido o más del 40% de la primera zona de Fresnel. En la Fig. 3, se muestra la distribución geográfica de los puntos medidos y la clasificación por escenario de cada uno de ellos.

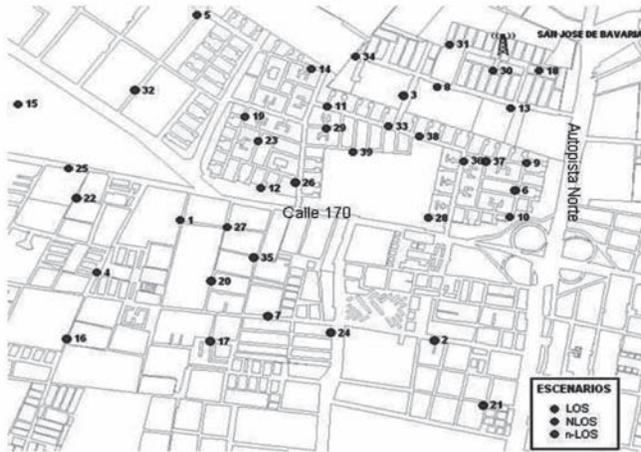


Fig. 3. Ubicación geográfica y Clasificación de cada punto por tipo de escenario

En el terminal de usuario se habilitó la opción de modulación adaptativa en la cual, él mismo de acuerdo al nivel de señal a ruido medido selecciona el esquema de modulación según la tabla III [6].

TABLA III.
ESQUEMA DE MODULACIÓN SEGÚN NIVEL DE SNR.

MODULACIÓN	SNR (DB)
BPSK 1/2	34
QPSK 1/2	32
QPSK 3/4	30,2
16QAM 1/2	28,3
16QAM 3/4	24
64QAM 2/3	22,5
64QAM 3/4	20

D. Configuración para análisis de calidad de servicio

En ambos extremos se utilizó un generador de tráfico distribuido llamado D-ITG, el cual funciona bajo Linux [8], este genera flujos de VoIP simultáneos y permite configurar parámetros tales como: la cantidad de llamadas de VoIP a cursar, el tipo de códec, tipo de calidad de servicio y el tiempo de duración. A través de esta herramienta se obtienen parámetros como: throughput, delay, jitter, porcentaje de pérdida de paquetes y total de paquetes transmitidos.

Para esta prueba se generó tráfico TCP durante toda la transmisión saturando el enlace (a 12Mbps), simultáneamente se generaron flujos de VoIP, entre 2 y 30 dependiendo del tipo de códec utilizado.

Como perfiles de calidad de servicio se utilizaron mejor esfuerzo (BE, Best Effort) para TCP y servicio en tiempo real (rtPS) para VoIP.

Se realizaron tres pruebas (Fig. 4), una por cada escenario con una duración de 3 minutos y con 3 repeticiones para los códecs G.711.1 y G.729.2. La configuración de cada códec se implementó de acuerdo a los parámetros de la tabla 4 [9].

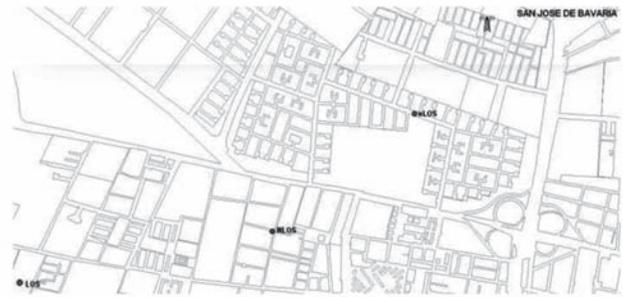


Fig. 4. Puntos de pruebas VoIP para cada tipo de escenario.

TABLA IV
TAMAÑO DEL PAQUETE Y TIEMPO DE TRANSMISIÓN PARA CADA TIPO DE CÓDEC.

Codec	Voice Payload Size (ms)	Voice Payload Size (Bytes)
G.711	20 ms (default)	160 Bytes
	30 ms	240 Bytes
G.729	20 ms (default)	20 Bytes
	30 ms	30 Bytes

En cada punto se generó un script que contiene tráfico TCP y flujos de VoIP que van desde 2 hasta 30 llamadas simultáneas para el códec G.729.2 y para el códec G.711.1 desde 2 hasta 20 llamadas simultáneas.

Al igual que para el análisis de desempeño se utilizó Wireshark con el fin de comprobar los resultados obtenidos durante las pruebas de VoIP, en ella se analizaron el tipo de protocolo, la cantidad de paquetes por segundo y el tamaño del paquete entre otros, evidenciando el correcto funcionamiento de la herramienta y la adecuada configuración de la misma.

IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS

E. Desempeño de la red

Los resultados obtenidos en los 39 puntos analizados se muestran en la tabla V.

TABLA V

RESULTADOS PRUEBAS DE CAMPO PARA ANÁLISIS DE DESEMPEÑO.

Punto	Throughput (Mbps)		RSSI (dBm)	SNR (dB)		Modulación		Distancia (Km)	Escenario
	Downlink	Uplink		Uplink	Downlink	Downlink	Uplink		
1	7	6	-67,358	29,168	34,119	16QAM 3/4	16QAM 1/2	1,34	LOS
2	7,1	1,887	-71,811	23,216	31,251	16QAM 3/4	QPSK 1/2	0,684	NLOS
3	7,6	7,4	-43,884	33,595	34,794	64QAM 3/4	64QAM 2/3	1,736	NLOS
4	7	2	-71,021	23,695	33,353	16QAM 2/3	QPSK 3/4	1,9	LOS
5	7,6	5,6	-66,553	30,021	35,053	64QAM 3/4	16QAM 1/2	1,09	n-LOS
6	7,6	7,4	-53,811	32,895	35,518	64QAM 3/4	64QAM 2/3	0,908	NLOS
7	0	0	-89,895	12,863	18,569	BPSK 1/2	BPSK 1/2	1,38	NLOS
8	7,6	6,8	-55,205	32,232	35,514	64QAM 3/4	64QAM 2/3	0,29	LOS
9	7,6	6,7	-62,863	30,984	34,068	64QAM 3/4	16QAM 3/4	0,48	n-LOS
10	7,6	6,7	-54,111	32,647	34,587	64QAM 3/4	64QAM 2/3	0,68	LOS
11	7,6	5,4	-65,276	30,050	34,124	64QAM 3/4	16QAM 3/4	0,96	n-LOS
12	7,6	6,7	-58,479	31,368	35,371	64QAM 3/4	16QAM 3/4	1,03	n-LOS
13	7,5	6,4	-71,868	30,684	30,907	64QAM 3/4	16QAM 3/4	0,25	LOS
14	7,6	6,7	-58,600	31,342	34,818	64QAM 3/4	16QAM 3/4	0,69	n-LOS
15	7	6,4	-56,421	31,911	35,691	16QAM 3/4	16QAM 3/4	1,93	LOS
16	0	0	-86,295	15,942	19,913	BPSK 1/2	BPSK 1/2	0,957	NLOS
17	0	0	-90,253	11,984	22,374	QPSK 1/2	BPSK 1/2	1,58	NLOS
18	7,6	6,8	-50,037	33,237	35,375	64QAM 3/4	64QAM 2/3	0,15	LOS
19	7,6	6,7	-63,868	30,705	34,500	64QAM 3/4	16QAM 3/4	0,96	n-LOS
20	7,6	6,3	-58,237	31,537	35,503	64QAM 3/4	16QAM 3/4	1,422	NLOS
21	0	0	-85,826	19,732	19,241	BPSK 1/2	BPSK 1/2	1,631	NLOS
22	0	0	-86,679	15,058	19,754	BPSK 1/2	BPSK 1/2	1,62	NLOS
23	7,6	6,7	-58,284	31,474	35,109	64QAM 3/4	16QAM 3/4	0,95	n-LOS
24	7,6	5,5	-66,863	29,232	34,632	64QAM 3/4	16QAM 1/2	1,284	NLOS
25	7	1,958	-71,774	22,579	31,373	16QAM 3/4	QPSK 1/2	1,62	LOS
26	7,6	6,3	-58,016	31,889	35,299	64QAM 3/4	16QAM 3/4	0,92	NLOS
27	7,1	5,5	-67,663	28,642	31,171	16QAM 3/4	16QAM 1/2	1	LOS
28	7,1	5,5	-65,353	30,047	31,909	16QAM 3/4	16QAM 1/2	0,74	n-LOS
29	7,6	7	-42,711	33,779	34,304	64QAM 3/4	64QAM 2/3	0,71	n-LOS
30	7,6	6,8	-43,595	33,779	34,897	64QAM 3/4	64QAM 2/3	0,12	LOS
31	7,6	6,7	-52,047	33,010	35,148	64QAM 3/4	64QAM 2/3	0,38	LOS
32	7,4	2,4	-67,968	27,295	33,113	64QAM 2/3	QPSK 3/4	1,934	NLOS
33	7,1	1,87	-68,363	23,737	31,496	16QAM 3/4	QPSK 1/2	0,52	n-LOS
34	7,6	6,6	-55,432	33,500	34,405	64QAM 3/4	64QAM 2/3	0,53	LOS
35	7,4	1,916	-72,226	23,395	33,071	64QAM 2/3	QPSK 1/2	1,563	NLOS
36	7,6	6,7	-59,368	31,163	34,219	64QAM 3/4	16QAM 3/4	0,48	n-LOS
37	7,1	6,3	-58,053	31,868	31,911	16QAM 3/4	16QAM 3/4	0,15	NLOS
38	7,6	7	-51,958	33,189	34,048	64QAM 3/4	64QAM 2/3	0,47	n-LOS
39	7,6	6,7	-62,137	31,047	35,156	64QAM 3/4	16QAM 3/4	0,68	n-LOS

En la tabla V, se observa que en ningún caso se presentaron niveles inferiores a -95 dBm lo que indica que a 2km de la estación base las pérdidas por espacio libre, atenuaciones y multitrayectorias no deterioran significativamente el enlace. Igualmente se evidenció que con niveles inferiores a -85dBm no es posible suministrar servicio de datos. Particularmente en el escenario NLOS el 84% de los puntos presentan niveles iguales o mayores a -75dBm con lo que se corrobora las facilidades de la modulación con OFDM.

En la Fig. 5, se muestra el comportamiento de RSSI respecto a la distancia para el escenario LOS. Se observa que a lo largo de los 2 km la señal se atenúa aproximadamente 30dB. En el primer kilómetro se presenta una mayor atenuación debido al acople de la antena con el medio, del primer kilómetro en adelante se observa una atenuación de 4dB por cada kilómetro, esto se puede ver en la Fig. 5, entre el punto 27 y 13 se tiene una distancia de 950 metros con una atenuación de 4dB.

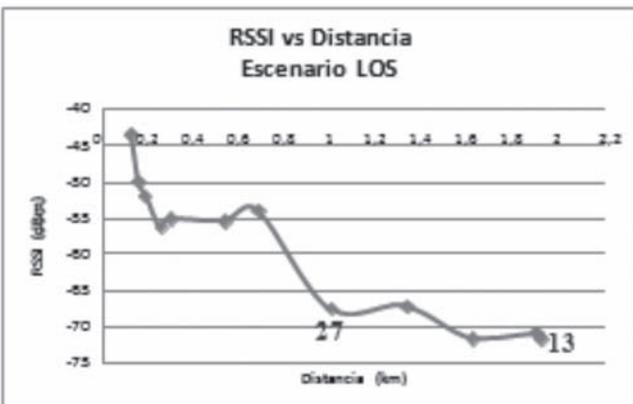


Fig. 5. RSSI vs Distancia.

En la Tabla V se demuestra que la mayoría de puntos tienen nivel de ruido que no deteriora el desempeño del enlace ya que el nivel de potencia recibido no disminuye significativamente con respecto al ruido en banda base. 56% de los resultados en uplink tienen un valor superior a los 30 dB que corresponde a la mejor modulación 64QAM según las especificaciones del fabricante [6].

En la Fig. 6, se muestra la relación de RSSI con SNR donde se observa que a mayor nivel de SNR se tiene un mejor nivel de potencia permitiendo tener un mejor desempeño del enlace.

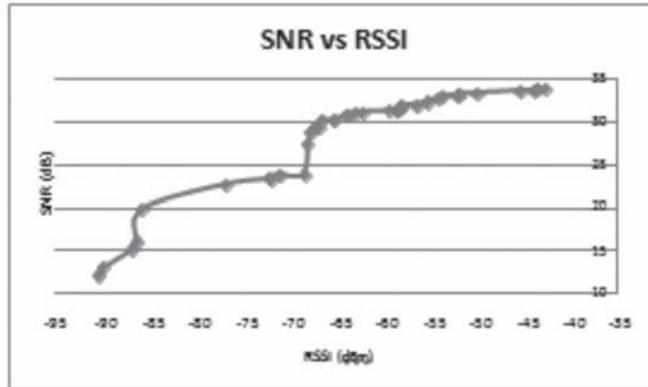


Fig. 6. SNR en función de RSSI.

Se observa que los puntos 7, 16, 17, 21 y 22 (Tabla V) presentan el tipo de modulación más baja en concordancia con el nivel de señal a ruido y la intensidad de señal mostrando que en dichos sitios el enlace es deficiente. En estos puntos se pudo enlazar el terminal de usuario a la radio base pero no fue posible la transferencia de datos.

Comparando la tabla III con la tabla V se observa que los esquemas de modulación coinciden, mostrando el correcto funcionamiento de la herramienta y la dependencia del esquema de modulación con el nivel de señal a ruido.

Se aprecia que las medidas RSSI, SNR y modulación están altamente relacionadas y en conjunto permiten determinar el desempeño del enlace.

De acuerdo a la Tabla V, el 87% de los puntos tiene una transmisión en promedio de 7.5 Mbps, lo que indica que el máximo throughput en el enlace es alrededor de 8Mbps menor al valor nominal de 12Mbps para la estación base especificado por el fabricante.

En la Fig. 7, se observa la relación del Throughput con el nivel de SNR, donde se aprecia que al tener un mayor nivel de señal se obtiene un mayor Throughput, ya que con un nivel de señal a ruido alto el terminal de usuario selecciona el mejor esquema de modulación permitiendo un mayor ancho de banda en el enlace.

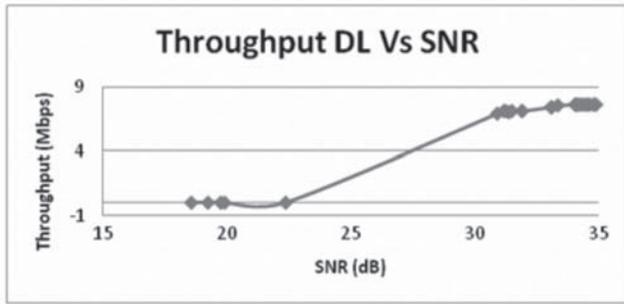


Fig. 7. Throughput en downlink vs. SNR.

Los puntos 7, 16, 17, 21 y 22 presentan un nivel de RSSI menor a -85dBm lo que impide establecer la conexión para datos, simultáneamente el nivel de modulación es el más bajo (BPSK 1/2), hecho que ratifica el comportamiento mencionado. Como hecho adicional se nota que todos estos puntos están clasificados en el escenario NLOS lo que hace que se presente mayor atenuación de la señal.

En la Fig. 8, se observa que los puntos que tienen un valor de throughput en cero son los puntos 7, 16, 17, 21 y 22, los cuales tienen un nivel de RSSI y SNR deficientes como se explicó anteriormente. En los puntos restantes se observa que el Throughput aumenta al mismo tiempo que la relación señal a ruido mejora, dado que en presencia de un mayor nivel de señal se tiene un esquema de modulación superior, elevando el ancho de banda del canal.

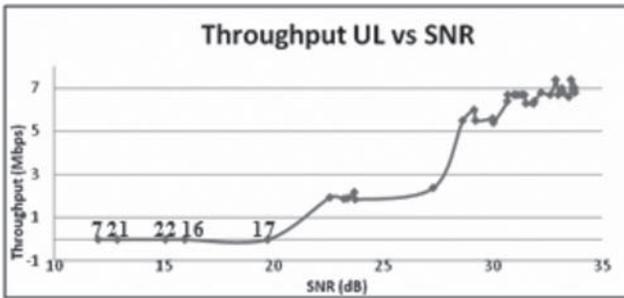


Fig. 8. Throughput en uplink vs. SNR.

Con los resultados obtenidos se muestra un buen desempeño del enlace en un radio de 2 km bajo los diferentes escenarios, permitiendo en su mayoría tener el mejor esquema de modulación (64QAM), el cual es el más adecuado para brindar alta calidad de servicio en llamadas de VoIP, analizadas a continuación.

F. Calidad de la red

Los resultados obtenidos en las pruebas de VoIP para el escenario LOS se muestran en las Tablas VI y VII, las pruebas en los otros dos tipos de escenarios (nLOS y LOS) no se muestran ya que los resultados son similares a los obtenidos para el escenario LOS.

TABLA VI
RESULTADOS D-ITG CÓDEC G 711.1

Flujos	Throughput (Kbps)	Average delay (mSeg)	Average Jitter (mseg)	Paquetes perdidos	% Paquetes perdidos
2	73,654378	20,705	0,129	0	0%
4	73,256908	24,327	1,45	0	0%
6	73,256787	35,456	1,51	2	0,00%
8	62,213459	152,13	2,69	1567	0,30%
10	42,234567	265,07	4,73	32009	4,00%
12	40,23213	267,78	4,88	32987	4,50%
14	38,11321	285,06	5,09	54123	7,00%
16	26,3654	334,67	5,46	70567	19,85%
18	22,74321	356,8	7,32	75654	24,56%
20	21,8076	414,51	8,23	75889	26,34%

TABLA VII
RESULTADOS D-ITG CÓDEC G 729.2

Flujos	Throughput (Kbps)	Average delay (mSeg)	Average Jitter (mseg)	Paquetes perdidos	% Paquetes perdidos
2	12,79521	20,38	0,1572	0	0%
4	12,79789	24,76	0,1674	0	0%
6	12,78657	24,98	0,1679	0	0,00%
8	12,78809	26,45	1,04	0	0,00%
10	12,78879	26,87	1,34	0	0,00%
12	12,78902	28,34	1,38	0	0,00%
14	12,78989	31,98	1,42	0	0,01%
16	12,77986	33,46	1,45	1	0,01%
18	12,77765	36,01	1,67	3	0,01%
20	12,77345	36,12	1,71	4	0,01%
22	12,76832	36,85	1,76	10	0,01%
24	12,76547	39,04	1,87	13	0,01%
26	11,264302	141,72	2,06	24564	17,80%
28	10,6784	173,21	2,56	42947	26,80%
30	9,626789	220,54	3,78	73555	27,50%

De acuerdo a las Tablas VI y VII se determinó el número de llamadas soportadas por la red según cada tipo de códec utilizado.

En las Fig. 9 y Fig. 10, se muestran los resultados del Throughput obtenido contra el número de llamadas con el códec G.711.1 y G.729.2 respectivamente.

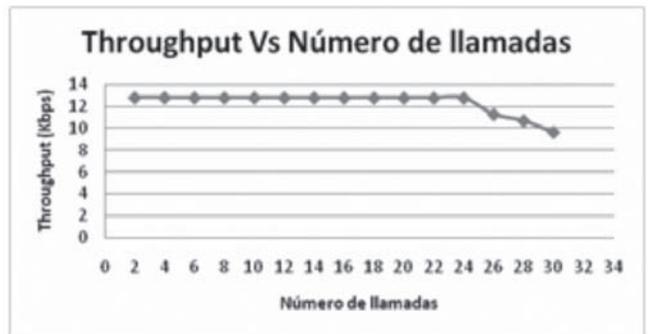


Fig. 9. Throughput Vs Número de llamadas - Códec G.729.2.

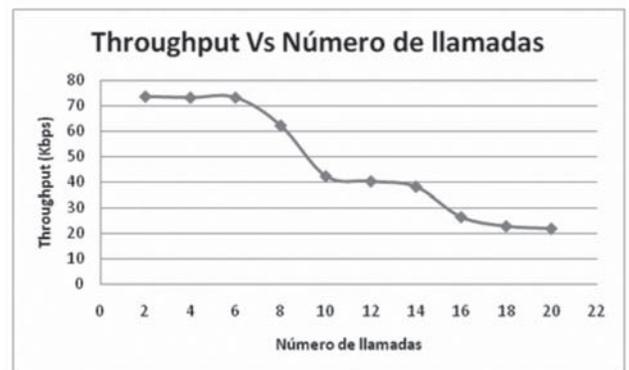


Fig. 10. Throughput Vs Número de llamadas -Códec G.711.1.

En la Fig. 10, se muestra que la red soporta hasta 25 llamadas con calidad de servicio y después de esta cantidad de llamadas el Throughput comienza a degradarse hasta llegar a un valor de 8kbps, a diferencia del códec G.711.1 (Fig. 10), en el que el máximo número de llamadas simultáneas que soporta la red es de 6, con este tipo de códec se evidencia la disminución del Throughput llegando a un valor de 20 Kbps.

Este tipo de códec es más exigente que el códec G.729.2 ya que el ancho de banda necesario es de 64Kbps, sin embargo el códec G 729.2 permite un mejor uso del enlace manteniendo la calidad del servicio.

Para tener mayor detalle de la calidad de servicio de la llamada en este caso rtPS se analizó el delay, jitter y el porcentaje de pérdida de paquetes que se muestran en las siguientes figuras.

Las Fig. 11 y Fig. 12, muestran el retardo obtenido para cada tipo de códec, se resalta que después de la veinticincoava llamada, en el códec G.729.2, se comienza a deteriorar la calidad de la voz ya que el retardo comienza a aumentar significativamente alcanzando un valor de 225mseg, es decir, a partir de la llamada 25 el retardo aumenta en 213mseg. Para el códec G.711.1 el retardo alcanza un valor de 400 mseg en la llamada 20 mientras que en la sexta llamada el retardo es de 43mseg lo que muestra que el enlace soporta con calidad de servicio tan solo 6 llamadas.

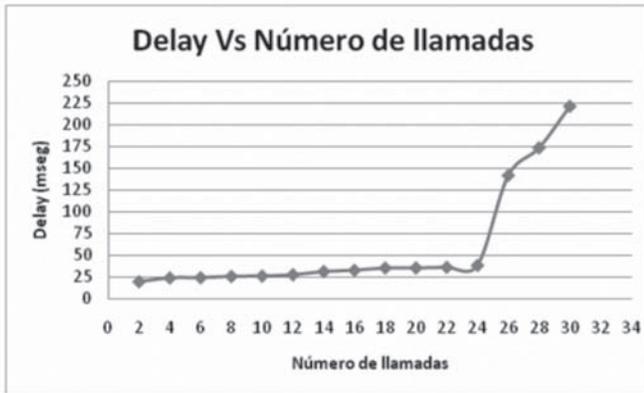


Fig. 11. Delay VS Número de llamadas (Código G.729.2)



Fig. 12. Delay VS Número de llamadas (Código G.711.1)

En las Fig. 13 y Fig. 14, se observa una relación similar a la del retardo donde después de 25 llamadas para el códec G 729.2 y después de 6 llamadas para el códec G 711.1 el jitter aumenta considerablemente alcanzando valores hasta de 8ms.

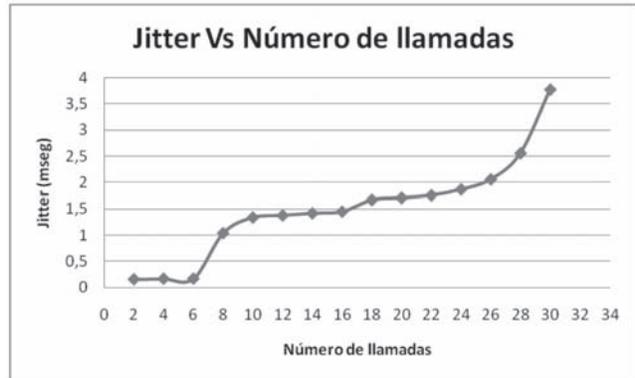


Fig. 13. Jitter Vs Número de llamadas (Código G.729.2)

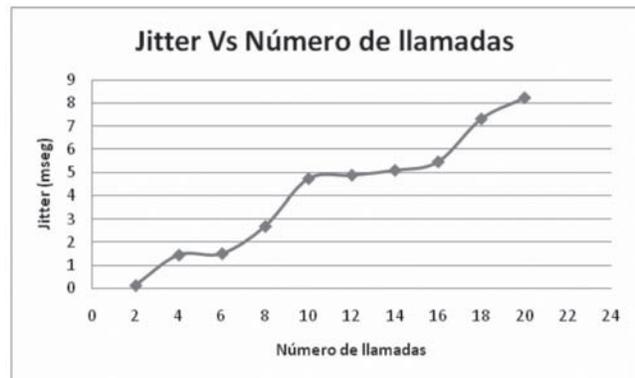


Fig. 14. Jitter Vs Número de llamadas (Código G.711.1)

En las Fig. 15 y 16, se aprecia el porcentaje de pérdida de paquetes, el cual es similar para los dos códec ya que ambos alcanzan a perder hasta un 30% de los datos enviados; se observa que la pérdida de paquetes aparece en el momento en que el enlace empieza a deteriorarse y esto hace que no se puedan soportar llamadas con calidad de servicio.

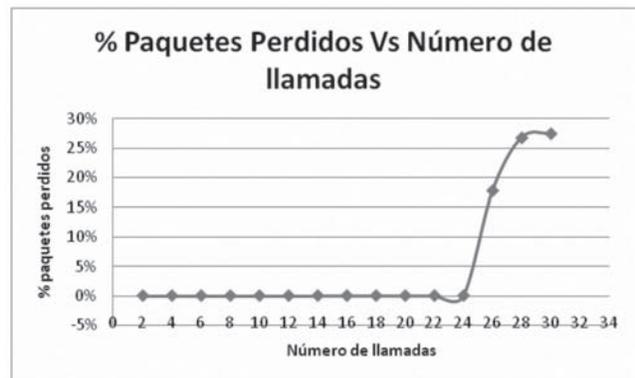


Fig. 15. Porcentaje de pérdida de paquetes Vs Número de llamadas (Código G.729.2)



Fig. 16. Porcentaje de pérdida de paquetes Vs Número de llamadas (código G.729.2)

Con estos resultados se muestra que para determinar la calidad de servicio de VoIP es necesario tener en cuenta los parámetros de Throughput, delay, jitter y pérdida de paquetes en conjunto, los cuales según las recomendaciones técnicas deben ser: retardo menor a 50ms, jitter menor a 2ms y el throughput no debe deteriorarse significativamente, por lo que la cantidad máxima de llamadas simultáneas con buena calidad de servicio que soporta el enlace para el código G.729.2 es de 25 llamadas y para el código G. 711.1 es de 6 llamadas, considerando que el enlace se encuentra saturado por tráfico BE. El análisis revela que el código G.711.1 tiene un menor desempeño en cuanto al número de llamadas cursadas simultáneamente debido a que ocupa un mayor ancho de banda en comparación con el código G.729.2, por tanto se recomienda trabajar con el código G.729.2 ya que ocupa un menor ancho de banda y tiene menos retardo mientras se mantiene la calidad de servicio.

V. SINTONIZACIÓN DEL MODELO

Adicionalmente al análisis del enlace de WiMAX se llevó a cabo la validación de un modelo teórico de predicción determinístico con el fin de revisar su confiabilidad. Para esto se utilizó la herramienta de planeación de redes ICS Telecom [10], en la cual se usó una combinación de modelos (ITU 525, Deygout 94, Standard subpath y 3D coverage) para la predicción de cobertura del sector 3 de la estación base (Para mayor detalle de los modelos referirse a la referencia 6).

Con los valores de intensidad de señal obtenidos en la predicción y los valores medidos para los diferentes escenarios, se hizo el análisis de correlación de cada uno de los puntos medidos.

En la Fig. 17, se observa la correlación realizada entre las mediciones y la predicción realizada por la herramienta

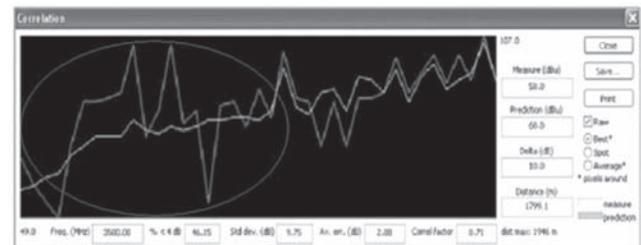


Fig. 17. Correlación entre medidas y predicción.

En la Fig. 17, en la parte inferior, se muestran los parámetros estadísticos que indican que se tiene un factor de correlación del 71%, con una desviación estándar de 9.75 dB y un error promedio de 2.08 dB, esto refleja que el modelo sin ningún ajuste muestra un desempeño cercano a la realidad, sin embargo se observa dispersión en los valores medidos, por lo que lo cual el modelo puede presentar valores divergentes de nivel de señal erróneos en algunos puntos de muestra.

El círculo rojo de la Fig. 17, indica la parte en la que se encuentra mayor error respecto a la medida y a la predicción, esto se debe a la resolución y actualización temporal de la cartografía utilizada (La cual es del año 2004), pues en esta zona en los últimos años se construyeron nuevas edificaciones que se confirmaron mediante visita de campo, generándose determinado grupo de obstáculos que afectan la trayectoria de propagación, produciendo pérdidas importantes en el nivel de señal o reflexiones en los puntos de recepción no previstas, que evidentemente la herramienta de predicción utilizada no muestra o computa en los valores finales de cálculo obtenido.

Una opción adicional que se puede utilizar para balancear este problema es la carga de una grilla de clutters con pérdidas por edificaciones con un valor promedio por estructura definida, la cual debe levantarse previamente para toda la zona, cabe anotar que no se dispone, para la predicción, de esta funcionalidad.

Posteriormente se llevó a cabo la calibración del modelo de propagación, utilizando la ecuación de la recta, para este caso se empleó el coeficiente de posición (B), que permite bajar o subir la señal obtenida con el modelo de predicción; para ajustar el modelo, B se colocó en (-2dB) y se obtuvo la correlación del modelo como se muestra en la Fig. 18.

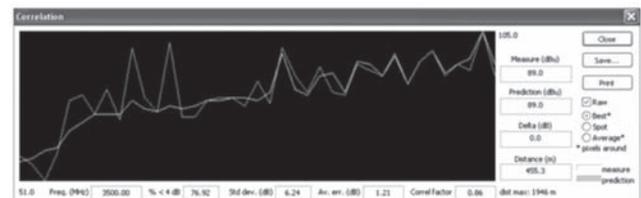


Fig. 18. Correlación con modelo ajustado.

Como se aprecia en la Fig. 18, el factor de correlación aumentó un 15%, quedando en 86%, el error promedio disminuyó un 58% quedando en 1,21 dB y la desviación

estándar disminuyó un 64%, lo que indica que el modelo tiene menor probabilidad de error ya que los valores predichos se ajustan más a los valores medidos, es decir, el modelo es más confiable para la predicción del comportamiento de redes WiMAX en un ambiente urbano denso.

Una vez ajustado el modelo de predicción, se procedió a probarlo en otro sector de la estación base, en este caso la prueba se efectuó en el sector 1, con el fin de observar si este se ajustaba a cualquier sitio de la ciudad. Se escogieron 20 puntos de los diferentes escenarios y se realizaron mediciones de RSSI y SNR.

En la Fig. 19, se muestra la predicción del sector 1 con el modelo calibrado

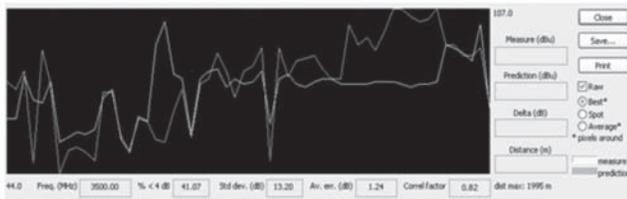


Fig. 19. Predicción sector 1 con modelo calibrado.

En la Fig. 19, se observa una correlación del 82% indicando que este modelo funciona en otras áreas que tengan características similares permitiendo un análisis más cercano a la realidad en el diseño de ese tipo de enlaces.

Sin embargo, se observa que la desviación estándar aumenta a 13.2 dB lo que indica que aun cuando el modelo esta correlacionado con los datos medidos, al cambiar de escenario con el modelo ajustado en un punto diferente, los datos y el ambiente físico varían lo que hace que disminuya la dispersión de los datos, es decir, el ajuste permite mejorar la predicción en otros puntos entre un 8% y 10% aproximadamente, considerando que está condicionado al escenario en donde se aplica.

VI. CONCLUSIONES

Este estudio analizó el desempeño de un enlace implementado con tecnología WiMAX, evaluando los parámetros de Throughput, RSSI y SNR. De acuerdo al tipo de escenario desarrollado, se concluyó que el nivel de RSSI en relación con la distancia disminuye, el valor de reducción, es de aproximadamente 4 dB por kilómetro lo cual se encuentra en concordancia con las pérdidas por espacio libre en un escenario de LOS.

En las medidas de campo, como el nivel de señal a ruido en un punto determinado, claramente en ausencia de fuentes interferentes externas de peso importante, está altamente ligado con el nivel de intensidad de campo recibido (RSSI), en los puntos donde se obtuvo un bajo nivel de RSSI también se tuvo un nivel bajo de SNR debido a que el terminal de usuario tiene la funcionalidad de manejar modulación adaptativa (Y dependiente del RSSI Y SNR recibidos), en la medida en que los valores de RSSI

y SNR, se incrementaron, más altos fueron los niveles de modulación, y en consecuencia el throughput posible en el enlace presente. En contraste en presencia de un esquema de modulación menor, generado por pobres condiciones de radio, se evidenció que el enlace se alcanzaba a establecer pero no era suficiente para permitir la transmisión de voz o datos, por tanto en dichos puntos el throughput obtenido fue cero.

Adicionalmente se obtuvo un buen desempeño en datos y voz, con una intensidad de señal máxima de 85dBm, más allá de este valor es deficiente. Los índices de cobertura de una estación base están condicionados al tipo de terminal utilizado, evidentemente el uso de una antena externa y un aumento significativo de altura, permite garantizar mejores niveles de recepción (aumentando la posibilidad de incidencia de un tren de onda dominante), y reducción en los márgenes de señales reflejadas que se obtienen en ambientes urbanos e interiores. Este escenario es el recomendado para aplicativos punto multipunto fijo, para usuarios simétricos, debido a que se eliminan variables ambientales relacionadas al camino de propagación, que en el momento de implantación de usuarios pueden divergir en forma importante de la planeación original de la red.

De acuerdo con las pruebas de VoIP efectuadas, se demostró que el enlace soporta hasta 25 llamadas simultáneas con calidad de servicio cuando se utiliza el códec G.729.2, mientras que al utilizar el códec G.711.1 el enlace soporta tan solo 6 llamadas con calidad de servicio debido a que este requiere un manejo de ancho de banda superior.

Se observó un porcentaje de factibilidad de servicio generado por la estación base cercano al 90%, considerando la muestra de puntos escogidos para las diferentes mediciones efectuadas, en las que se obtuvo un buen nivel de señal que permitió trabajar con una modulación de QAM y tener un adecuado servicio de voz y datos. Es importante resaltar que en la medida en que los esquemas de modulación presentes en el área de servicio sean menores, la capacidad neta del canal o ancho de banda del sector disminuye, pues el baudio obtenido para cada conexión de usuario es consecuencia directa del esquema de modulación. De esta forma una recomendación de diseño, es la implementación de usuario en zonas en las que las mediciones de campo posteriores a un despliegue de red, indiquen la presencia de los esquemas de modulación más altos.

El análisis del Throughput obtenido en las pruebas indica que la máxima tasa de bits alcanzada desde un terminal de abonado fue de 8Mbps, el cual es menor al especificado por el fabricante para este equipo, debido a que este es un valor nominal pico obtenido en ambiente de laboratorio con condiciones particulares. Es muy importante considerar esta limitante, pues sólo bajo pruebas de campo como las efectuadas, se puede realizar un dimensionamiento real de capacidad desde el extremo de usuario, máxime si el usuario es de perfil corporativo o de alta demanda de tráfico, con requerimientos medianamente simétricos.

Se demostró que al realizar el ajuste del modelo de propagación con los resultados obtenidos durante las pruebas en campo, este funciona adecuadamente en otro punto siempre y cuando se mantengan las condiciones del escenario de propagación objetivo. Por lo anterior, es recomendada la ejecución de pruebas de campo en zonas en las que la morfología del terreno sea diversa, o las técnicas de construcción de edificaciones reflejen el uso de materiales o estructuras altamente heterogéneas, con el fin de lograr resultados de mayor precisión en la fase de planeación de red, mediante el uso de herramientas informáticas.

VII. TRABAJO FUTURO

En este proyecto se realizó el análisis bajo una topología punto a punto en un ambiente outdoor, por lo cual es importante realizar este mismo análisis pero bajo condiciones indoor para analizar el desempeño del enlace bajo este tipo de ambientes y así comparar la eficiencia de esta tecnología tanto en outdoor como en indoor. La razón para llevar a cabo dicha prueba es la de observar el deterioro del enlace debido a las atenuaciones adicionales como muros, puertas, etc. Así como analizar si se requiere contemplar otro tipo de modelo de propagación para que el enlace muestre un desempeño lo más semejantemente posible a la realidad.

También se debe realizar la evaluación de desempeño en una topología punto-multipunto, aumentando la cantidad de usuarios simultáneos en la red y observar su desempeño tanto para datos como para voz. Con esto se podrá concluir la cantidad de usuarios que soporta una estación base con estas características.

Es importante realizar el análisis de alcance máximo de cada modulación realizando pruebas con las modulaciones fijas y observando la distancia máxima a la cual se soporta la modulación y que sea posible tener servicios de voz y datos.

De esta forma se puede determinar el alcance máximo en distancia, de una celda bajo cada uno de los tipos de escenario (LOS, nLOS y NLOS).

Adicionalmente se deben evaluar las diferentes calidades de servicio ofrecidas por WiMAX ya que en este proyecto se evaluaron sólo los servicios BE y rtPS, para observar la priorización de los diferentes servicios dentro de la red; es recomendable realizar este análisis con una topología punto-multipunto que es la que más se asemeja a un escenario real.

REFERENCIAS

- [1] Yousaf Fagir, Daniel Kai and Wietfeld Christian, "Performance Evaluation of IEEE 802.16 WiMAX Link with Respect to Higher Layer Protocols," communication Networks Institute, University of Dortmund, 2007.
- [2] Scalabrino Nicola, Pellegrini et al., "Measuring the Quality of VoIP Traffic on a WiMAX Testbed," Trento, Italy.
- [3] Iperf. [Online]. Disponible en: <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf>.
- [4] Ethereal. [En línea]. Disponible en: <http://www.ethereal.com/>.
- [5] "Wireshark". [Online]. Disponible en: <http://www.wireshark.org>.
- [6] Manuales de Airtspan "HiperMAX y EasyST/ProST". Disponible en: <http://www.sharemethods.net>.

- [7] ATDI. ICS Telecom V6 reference Manual. Enero 2009.
- [8] "D-ITG, Distributed Internet Traffic Generator". Disponible en: <http://www.grid.unina.it/software/ITG/>.
- [9] "VoIP y calidad de servicio (QoS)" Disponible en: <http://proyectovoip.com/voip1.htm>.
- [10] ATDI. Radio Planning WiMAX technologies with ICS Telecom nG a tutorial, 3.3.3.4.2 Outdoor OFDM receiver, Pág. 43.
- [11] "IEEE estándar for local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for fixed Broadband Wireless Access Systems," 2004.
- [12] Configuración física Iperf. Disponible en: <http://www.openmaniak.com, Networking, Iperf. Marzo 2008>.
- [13] Comprehensive Network Engineering on U/V/SHF Bands Reference Manual. Correlation Box. Pág. 96.
- [14] Transmission Control Protocol. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Transmission_Control_Protocol.
- [15] RFC 1889 Protocolo de transporte para Aplicaciones en tiempo Real. Disponible en: <http://www.fags.org/rfcs/rfc1889.html>.
- [16] "Redes Unificadas". Disponible en: [http://iie.fing.edu.uy/ense/assign/redcorp/material/2008/Presentacion%20Redes%20Unificadas%202008%20\(laminas\).pdf](http://iie.fing.edu.uy/ense/assign/redcorp/material/2008/Presentacion%20Redes%20Unificadas%202008%20(laminas).pdf).
- [17] Estándar IEEE 802.16- 2004, Sección 8.3 Págs. 487-488.
- [18] Capítulo 3. "Diseño de una red inalámbrica Disponible en: <http://biiec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream/123456789/755/4/T10514CAP3.pdf>.
- [19] Díaz, Fernando. "Estudio comparativo de las recomendaciones ITU-T G.107, p.862 y p.563 para evaluar la calidad de la voz en redes Ip". Disponible en: http://www.univalle.edu.co/~telecomunicaciones/trabajos_de_grado/anteproyectos/anteproyecto_TG-0420.pdf
- [20] ITU-R P.525-2 Calculation of Free-Space Attenuation. Enero 1994.
- [21] Rappaport, Theodore S., "Wireless Communications principles and practice". 1996
- [22] Jacques Deygout, "Multiple Knife-Edge Diffraction of Microwaves". IEEE antennas and propagation. Vol AP-14. No 4. 1966.
- [23] Beutler, Roland. "Digital Terrestrial Broadcasting Networks". Chapter 6. Pág. 157.
- [24] "Simulación de procesos: modelización climática" Disponible en: http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema_6.pdf.
- [25] ATDI. Radio Propagation in ICS Telecom. 4.3 The Lambertian Reflection Model (3D), Pág. 74.
- [26] AirOS manual. Disponible en línea: http://landatel.helpserve.com/index.php?_m=downloads&_a=downloadfile&downloaditemid=68
- [27] "OFDM". Disponible en: <http://toip.uchile.cl/mediawiki/upload/e/e5/AnexoFG-Marcmun.pdf>.
- [28] Estándar IEEE 802.16- 2004, Sección 8.3 Págs. 491-492.



Ivonne Lilian Castro Molano, nació en Tunja, Colombia, el 20 de Junio de 1982. Magister en Ingeniería electrónica y de Computadores de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2010. Área de telecomunicaciones. Ingeniera Electrónica de la Universidad Santo Tomás de Aquino, Tunja, Colombia, 2005.

Ejerció como Docente Tiempo Completo del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad pedagógica y Tecnológica de Colombia. Actualmente se desempeña como profesional de la Vicerrectoría de Educación Virtual de la Universidad de Boyacá y a su vez es docente catedrática para el programa de Ingeniería Mecatrónica. Entre sus campos de interés se encuentran las telecomunicaciones y la Biomédica.



Jael Lorena Jiménez García, nació en Cúcuta, Colombia, el 23 de Octubre de 1984. Magister en Ingeniería electrónica y de Computadores de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2010. Área de telecomunicaciones. Ingeniera Electrónica de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2006.

Ejerce como Ingeniera de Nokia network siemens, en el área de desarrollo y ejecución de proyectos. Entre sus campos de interés se encuentran las telecomunicaciones.