



**Máster en Oficial en Redes de
Telecomunicación para Países en Desarrollo**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN**

PROYECTO DE FIN DE MASTER

Estudio de aplicabilidad del estándar 802.11n para
redes de larga distancia para entornos rurales en
América Latina

Autor: Patricia Ludeña González
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Tutor: Francisco Javier Simó Reigadas
Doctor Ingeniero de Telecomunicación

Curso académico 2010/2011

Madrid, España



Universidad
Rey Juan Carlos

ACTA DE EVALUACIÓN

Alumna: Patricia Ludeña González

Titulación: Máster Oficial en Redes de Telecomunicación para Países en Desarrollo

Título del Proyecto: Estudio de aplicabilidad del estándar 802.11n para redes de larga distancia para entornos rurales en América Latina

Tutor: Dr. Ing. Francisco Javier Simó Reigadas

TRIBUNAL

Presidente: Dr. Ing.

Vocal: Dr. Ing.

Secretario: Dr. Ing.

CALIFICACIÓN DETALLADA DEL PROYECTO

	Presidente	Vocal	Secretario
Presentación escrita (MB-B-R-M-MM)			
Presentación oral (MB-B-R-M-MM)			
Complejidad técnica (MB-B-R-M-MM)			
Metodología empleada (MB-B-R-M-MM)			
Resultados obtenidos (MB-B-R-M-MM)			
Esfuerzo realizado (MB-B-R-M-MM)			

CALIFICACIÓN FINAL DEL PROYECTO

	SB / NOT / AP / SS / NP
(nota numérica)	Enmarcar la calificación alcanzada

PROYECTO PROPUESTO PARA MATRÍCULA DE HONOR: SÍ / NO
(sólo si la nota numérica final es igual a 10)

Fuenlabrada, de de 2011

El Presidente

El Vocal

El Secretario

Agradecimientos

A Dios por permitirme estar aquí, por poner en mi camino gente linda, por darme sueños y el tiempo para verlos hacerse realidad.

A mi tierra que cada día me llena más... su gente.. sus paisajes... Pueblo Nuevo no se equivocó al decir: "si usted nunca ha ido a Loja no conoce mi país", porque a "Orillas del Zamora" y entre el vaivén de una "Pequeña ciudadana" se tejieron ideales que poco a poco se concretaran.

A la Fundación EHAS, en especial a Andrés Martínez por invitarme a participar en proyectos de cooperación, éste es el origen de mi trabajo.

A la Universidad Técnica Particular de Loja, por apoyarme para continuar mis estudios y sobretodo por permitirme trabajar en lo que me gusta, las redes rurales.

A Javier Simó, por su tutela en la realización de este trabajo; pero más que eso, por su amistad y por creer en mi.

A Nydia, Ferney, Janeth, Betsy y en especial a Katty por ser mi familia en Madrid, por esos meses de constante apoyo, por soportarnos y por alegrarnos.

A Marco, Rafael, Byron, Francisco, Jimmy y Ricardo, los ex-RADIOC, por fortalecer mi trabajo en la UTPL.

He dejado para el final, no por importancia, sino por protocolo a mi familia, Efrén, Mariana, Diana, Soledad, Karina y Yadyra, sin ella no son nadie y de seguro no hubiese podido llegar hasta aquí sin su ejemplo.

A Francisco, por sus esperas, por su comprensión y por el amor con el que alimenta mi vida.

Y a Xavier Francisco, a ti hijo mio, por alegrar mi vida y porque desde que naciste te convertiste en mi razón de ser.

Resumen

La penetración de las tecnologías en las zonas rurales de países en vías de desarrollo es muy reducida, principalmente por la baja densidad poblacional, los altos costos de implementación y mantenimiento, el limitado acceso a tecnología y políticas de inmersión erróneas. Esta realidad tiene como consecuencia el desconocimiento de las TICs como herramienta de desarrollo, generándose un círculo vicioso de necesidades insatisfechas.

A lo largo de América Latina y África se han desplegado redes en base 802.11-2007 que constituyen una alternativa a esta realidad, pero que siguen sin dar respuestas concretas en un mundo que demanda cada vez mayores anchos de banda. En el 2009, IEEE lanza el estándar 802.11n con expectativas de caudales mucho más elevados y alcances de hasta 300m; propiciando un sinnúmero de trabajos de investigación con resultados interesantes pero únicamente válidos para distancias cortas.

En este contexto, el proyecto de fin de master pretende aportar con el análisis de aplicabilidad del estándar 802.11n en redes de larga distancia y las implicaciones que tendría a nivel de caudal.

El trabajo comienza con una revisión de los estándares 802.11, para luego profundizar en el estado del arte sobre la temática. A continuación se realiza un análisis sistemático de las técnicas que 802.11n implementa para conseguir altas prestaciones; y así, poder determinar su aplicabilidad al entorno rural y de largas distancias. Esto se ve complementado por la experimentación a través de, fundamentalmente, simuladores de red, que pretende determinar el efecto que la agregación de tramas tiene en los niveles de caudal y cómo éstos son superiores a los conseguidos con 802.11-2007 .

Índice

Índice de figuras	viii
Índice de tablas	x
I Introducción	1
1 Introducción	3
1.1 Motivación	4
1.2 Justificación	5
1.3 Organización del documento	6
II Marco Referencial	9
2 Estándar 802.11 a/b/g 2007	11
2.1 Estructura básica 802.11	11
2.2 Funcionamiento capa PHY	13
2.3 Funcionamiento capa MAC	14
3 Introducción al estándar 802.11n	17
3.1 Formatos de funcionamiento en 802.11n 2009	17
3.2 Técnicas nuevas incorporadas en 802.11n 2009	18
3.2.1 Reduced InterFrame Space RIFS	18
3.2.2 Agregación de tramas	18
3.2.3 Multiple Input Multiple Output MIMO	21
3.2.4 Modulation and coding schema MCS	24
3.3 Principales mejoras incorporadas en 802.11n 2009	25
3.3.1 ACK de bloque (BlockACK)	25
3.3.2 Dualidad de canales	28
3.3.3 Ampliación de ancho de banda	29
3.3.4 OFDM mejorado	30
3.3.5 Reducción del intervalo de guarda GI	31
4 Estado del arte	33

4.1	Introducción	33
4.2	Limitaciones de soluciones estándar 802.11-2007	34
4.3	Revisión de rendimiento alcanzado con MAC 802.11n	35
4.4	Revisión de rendimiento alcanzado con PHY 802.11n	37
5	Hipótesis	41
6	Objetivos	43
6.1	Objetivo general	43
6.2	Objetivo específico	43
III Materiales y métodos		45
7	Metodología	47
8	Preparación de pruebas de enlace	51
9	Software de simulación	55
9.1	Requisitos	55
9.2	Evaluación de simuladores	56
9.2.1	Qualnet	57
9.2.2	Network Simulator 2	57
9.2.3	Network Simulator 3	57
9.2.4	Selección del simulador	58
10	Preparación del simulador	59
10.1	Determinación de modificaciones para largas distancias	59
10.2	Adaptación de capa MAC	61
10.3	Aseguramiento de características a nivel PHY	62
10.4	Adaptación del modelo de propagación	62
10.5	Validación de NS-3 para WiLD	64
11	Esquemas de pruebas de simulación	69
11.1	Definición de modos de pruebas	69
11.2	Parámetros generales	70
11.3	Escenario: Entorno sin colisiones, flujo unidireccional	70
11.3.1	Prueba 1: Impacto del tamaño de paquete	71
11.3.2	Prueba 2: Impacto del número de tramas agregadas	71
11.3.3	Prueba 3: Relación de caudales para 802.11a y 802.11n	71
IV Análisis de resultados		73
12	Estudio del impacto previsible de la actualización de enlaces de larga distancia 802.11a/b/g a 802.11n	75

12.1	Consideraciones en capa MAC	75
12.2	Consideraciones en capa PHY	76
12.3	Viabilidad de características 802.11n en largas distancias . .	77
13	Evaluación de testbed previo	79
13.1	Pruebas a corta distancia (100cm)	79
13.2	Pruebas a larga distancia	79
14	Evaluación experimental	81
14.1	Escenario: Entorno sin colisiones, flujo unidireccional	81
14.1.1	Prueba 1: Impacto del tamaño de trama	81
14.1.2	Prueba 2: Impacto del número de tramas agregadas .	83
14.1.3	Prueba 3: Relación de caudales para 802.11a y 802.11n	85
15	Conclusiones y trabajos futuros	91
V Apéndices		93
A	Esquema de modulación y codificación de 802.11a y 802.11n	95
B	Cálculo de valores para largas distancias	97
C	Tablas de datos para validación	99
D	Tablas de datos Prueba 1	107
E	Tablas de datos Prueba 2	111
F	Tablas de datos Prueba 3	117
VI Referencias		123
	Referencias	125

Índice de figuras

2.1	Elementos de una red inalámbrica	12
2.2	Mecanismo de acceso básico y relaciones de espacios entre tramas	15
3.1	Formato de trama MAC	19
3.2	Formato de A-MSDU	19
3.3	Formato de A-MPDU	21
3.4	Feedback implícito bidireccional	22
3.5	Políticas de ACK. ACK Normal y BlockACK	26
3.6	Formato de trama BlockACK	27
3.7	Formato de trama BlockACKRequest	27
3.8	Secuencia para envío de BlockACK	28
4.1	Caudal normalizado con y sin agregación de tramas. Kim et al.	36
8.1	Perfil enlace Cerro Cruces-Puerto Miravete	51
8.2	Ejemplo de inyección de flujo <i>IPerf</i> rol servidor	52
8.3	Ejemplo de log de salida <i>IPerf</i> rol cliente	53
10.1	Modificación para tiempo de retardo por propagación	62
10.2	Definición de modelo de retardo y pérdidas para YANS	63
10.3	Caudal versus tamaño de ranura para 6, 12, 24 y 54 Mbps . . .	65
10.4	Caudal para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia	65
10.5	Caudal normalizado para distintas distancias en función de tasa de transferencia	67
14.1	Caudal para distintos tamaños de tramas en función de la velocidad de transmisión con A-MSDU máximo	82
14.2	Comportamiento del caudal en relación al tamaño de agregación con A-MSDU de 3000 bytes	83
14.3	Caudal para distinto tamaño de agregación en función de la distancia con A-MSDU máximo	84
14.4	Comportamiento del caudal normalizado en relación al tamaño de agregación con A-MSDU de 3000bytes	85

14.5 Caudal estándar 802.11a y 802.11n para tramas de 500 y 1500 bytes en función de la distancia	86
14.6 Relación de caudales 802.11a y 802.11n con tamaño de trama de 500 bytes en función de la distancia	87
14.7 Caudales 802.11a y 802.11n para distintos tamaños de trama con tasa de transmisión de 54 Mbps	88

Índice de tablas

2.1	Parámetros de PHY relevantes para estándares a, b y g	13
2.2	Parámetros de MAC relevantes para estándares a, b y g	16
3.1	Máximo número de cadenas-temporales disponibles	23
3.2	Esquemas de velocidades	25
3.3	Esquemas de flujos para modos 802.11n	26
3.4	Canales de operación válidos para el dominio estadounidense . .	29
3.5	OFDM mejorado	30
4.1	Rendimiento de técnica de agregación de tramas. Ginzburg y Kesselman	36
4.2	Escenarios para aplicación de modelos de canales TGn	38
8.1	Características de equipos Rocket M5	52
9.1	Cuadro de evaluación de simuladores	58
10.1	Parámetros de configuración capa MAC	61
10.2	Parámetros de configuración capa física	63
10.3	Caudal en Mbps para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia con tamaño de trama variable	66
10.4	Caudal normalizado para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia con tamaño de trama variable	66
11.1	Selección de modos de operación	70
11.2	Características PHY y MAC de 802.11a vs 802.11n	72
13.1	Caudal obtenido en pruebas con tecnología Airmax en ambiente indoor en enlace de 100 cm	79
13.2	Caudal obtenido en pruebas con tecnología Airmax en enlace de 100 Km	80
14.1	Caudal en Mbps en función de la distancia para distintos tamaños de trama y tasa de transmisión de 54 Mbps	81
14.2	Caudal en Mbps en función de la distancia para distintos tamaños de agregación y tasa de transmisión de 54 Mbps	84

14.3	Caudal en función de la distancia para 802.11a y 802.11n para una tasa de transmisión de 54Mbps	86
14.4	Relación de caudales 802.11n y 802.11a con tamaño de trama de 500 bytes en función de la distancia	87
14.5	Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama en bytes a 54 Mbps	88
14.6	Razón de caudales 802.11n y 802.11a para rangos de tamaños de tramas a 54 Mbps	89
A.1	Esquema de modulación y codificación de 802.11a	95
A.2	Esquema de modulación y codificación de 802.11n, AB=20MHz y NSS=1	96
A.3	Esquema de modulación y codificación de 802.11n, AB=20MHz, NSS=2 y EQM	96
A.4	Esquema de modulación y codificación de 802.11n, AB=40MHz y NSS=1	96
A.5	Esquema de modulación y codificación de 802.11n, AB=40MHz, NSS=2 y EQM	96
B.1	Valores para adaptación de MAC	97
C.1	Caudal en Mbps para distintos tamaños de ranura con velocidad nominal de 6Mbps	100
C.2	Caudal en Mbps para distintos tamaños de ranura con velocidad nominal de 12Mbps	101
C.3	Caudal en Mbps para distintos tamaños de ranura con velocidad nominal de 24Mbps	102
C.4	Caudal en Mbps para distintos tamaños de ranura con velocidad nominal de 54Mbps	103
C.5	Caudal para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia para tramas de 1500 bytes	104
C.6	Caudal para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia para tramas de 500 bytes	104
C.7	Caudal normalizado para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia para tramas de 1500 bytes	105
C.8	Caudal normalizado para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia para tramas de 500 bytes	105
D.1	Caudal normalizado en función del tamaño de trama para 0 Km con A-MSDU máximo	107
D.2	Caudal normalizado en función del tamaño de trama para 20 Km con A-MSDU máximo	108
D.3	Caudal normalizado en función del tamaño de trama para 40 Km con A-MSDU máximo	108

D.4	Caudal normalizado en función del tamaño de trama para 60 Km con A-MSDU máximo	109
D.5	Caudal normalizado en función del tamaño de trama para 80 Km con A-MSDU máximo	109
D.6	Caudal normalizado en función del tamaño de trama para 100 Km con A-MSDU máximo	110
E.1	Caudal normalizado en función del tamaño de agregación para 0 Km	111
E.2	Caudal normalizado en función del tamaño de agregación para 20 Km	112
E.3	Caudal normalizado en función del tamaño de agregación para 40 Km	113
E.4	Caudal normalizado en función del tamaño de agregación para 60 Km	114
E.5	Caudal normalizado en función del tamaño de agregación para 80 Km	115
E.6	Caudal normalizado en función del tamaño de agregación para 100 Km	116
F.1	Caudal en función de la distancia para 802.11a y 802.11n para una tasa de transmisión de 6Mbps	117
F.2	Caudal en función de la distancia para 802.11a y 802.11n para una tasa de transmisión de 12Mbps	117
F.3	Caudal en función de la distancia para 802.11a y 802.11n para una tasa de transmisión de 24Mbps	118
F.4	Caudal en función de la distancia para 802.11a y 802.11n para una tasa de transmisión de 54Mbps	118
F.5	Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama para 0 Km con A-MSDU máximo	118
F.6	Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama para 20 Km con A-MSDU máximo	119
F.7	Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama para 40 Km con A-MSDU máximo	119
F.8	Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama para 60 Km con A-MSDU máximo	120
F.9	Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama para 80 Km con A-MSDU máximo	120
F.10	Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama para 100 Km con A-MSDU máximo	121

Parte I

Introducción

1 Introducción

”... Meditar una hora, entrar un rato dentro de sí e inquirir hasta qué punto tiene una parte y es corresponsable en el desorden y en la maldad del mundo; mira, eso no lo quiere nadie. Y así seguirá todo, y la próxima guerra se prepara con ardor día tras día por muchos miles de hombres...”

El lobo estepario. Hermann Hesse

Las redes inalámbricas son una alternativa bastante eficiente para el despliegue rápido de infraestructura en zonas de difícil acceso, donde las soluciones cableadas resultan demasiado costosas o inclusive demasiado nocivas para el entorno.

El auge que han tenido las TIC (Tecnologías de Información y Comunicación) es mundial, todos los países son conscientes de la necesidad de interconectar a sus habitantes, obviamente las condiciones de subdesarrollo se ven reflejadas incluso en este campo. Las iniciativas de inclusión social son afectadas por los limitantes financieros, tecnológicos y culturales que rodean a las zonas más sensibles.

El IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) propone como estándar para Redes de Área Local Inalámbrica WLAN (Wireless Local Area Network), el 802.11-1997 que basa su funcionamiento en las dos capas inferiores de la arquitectura del modelo OSI (Open System Interconnection).

Este estándar presenta varias ventajas; entre las que podemos mencionar están: el bajo costo, uso de frecuencias de operación no licenciadas como lo son las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical), adaptación de WLAN a proyectos de Telesalud y Teleeducación, lo que la convierte en una tecnología en constante investigación y evolución.

Los estándares que permiten obtener una comunicación inalámbrica, en

la actualidad tienen un alcance de hasta 100 m y brindan velocidades de transmisión que llegan hasta 54 Mbps teóricos (50 al 70 % de esta velocidad es el caudal neto [1]), lo cual ha sido motivo de investigación, pues el afán de una comunicación es transmitir la mayor cantidad de información en el menor tiempo posible.

Es por ello que, en el mes de septiembre de 2009 el IEEE aprobó el estándar 802.11n que resuelve la transmisión de datos a velocidades elevadas que pueden llegar hasta los 600 Mbps teóricos y hasta 300 m de cobertura.

Si bien el estándar no está establecido para operar en largas distancias, con adaptaciones a nivel software y hardware podría ser factible. Esto abre un nicho de investigación para redes de larga distancia que, hoy por hoy, constituyen oportunidades para acceder a información a bajo costo.

1.1 Motivación

De acuerdo al reporte 2010 de las Naciones Unidas sobre los avances en la consecución de los objetivos del milenio, la demanda de tecnologías de telecomunicación ha crecido pese a las crisis reportadas en la mayoría de países, sin embargo, el acceso a "Internet sigue siendo inaccesible para la mayoría de los habitantes del planeta", las cifras comparativas entre los años 2003 y 2008 son: en Asia Meridional el acceso a Internet creció de 2 a 6, para África Subsahariana de 1 a 6; y, para América Latina y el Caribe de 12 a 29 por cada 100 habitantes [2]. En Ecuador, la densidad de Internet para abonados y usuarios en el 2003 fue de 0.84 % y 2.84 %, respectivamente; mientras que para el 2009 fueron 4.01 % y 14.65 % para cada caso [3]. Si bien las cifras son alentadoras, siguen siendo insuficientes pues, en general, sólo 1 de cada 6 personas utiliza Internet en los países en vías de desarrollo, y parte del problema radica en: políticas de gobierno poco propicias, tecnologías poco adecuadas para situaciones de difícil acceso, escasos ingresos, etc.

Por otra parte, existe una gran brecha entre quienes disponen de conexión de alta velocidad a Internet y los usuarios con conexiones lentas y enlaces compartidos, por ejemplo dial-up. Esta realidad limita notablemente el acceso a Internet de estos países, pues, "a la mayoría de las aplicaciones de telecomunicaciones más efectivas para el desarrollo (telemedicina, comercio electrónico, actividad bancaria electrónica, servicios gubernamentales electrónicos) sólo puede accederse mediante conexión a Internet de alta velocidad.... A fines de 2008, la penetración de banda ancha en los países en

vías de desarrollo era, en promedio, de un 3%, estando además muy concentrada en unos pocos países” [2].

El estudio de redes inalámbricas de banda ancha permitirá que se incrementen la cantidad de usuarios de Internet y otros servicios de participación e inclusión social.

Las comunicaciones inalámbricas resultan ser una muy buena opción para desplegar redes de comunicación rápidamente y con características óptimas, sobretodo en redes rurales y sub-urbanas que tienen como característica la baja densidad de usuarios y por tanto, pensar en redes cableadas tiene un alto costo.

Las adaptaciones de tecnología para bajas coberturas existentes, con el fin de potencializarlas en enlaces de larga distancia, resulta prometedor. En este marco se propone evaluar la aplicabilidad para largas distancias del estándar IEEE 802.11n (aprobada en septiembre 2009); lo que se pretende es comprobar que con algunas consideraciones, las ventajas contempladas en la nueva enmienda, como son: mayor ancho de banda y resistencia a los multitrayectos; se pueden aplicar a estos nuevos entornos.

En el contexto de la tecnología en estudio, se podría incrementar varias veces el ancho de banda disponible de redes inalámbricas tradicionales, lo que permitirá implementar un sin número de aplicaciones de banda ancha e incluso aplicaciones en tiempo real.

1.2 Justificación

Durante la última década se han popularizado las redes rurales como respuesta a la brecha digital que muchos países en desarrollo sufren; priorizándose las redes inalámbricas sobre las cableadas por su fácil despliegue y menor costo. Existen muchas soluciones comerciales en el mercado, con innumerables características para una demanda relativamente grande; pero cuando se trata de apuntar a soluciones a baja escala no siempre presentan la mejor relación costo/beneficio, ya sea por su subutilización o por, a la larga, convertirse en insostenibles.

Las aplicaciones son varias, por ejemplo se han desarrollado proyectos exitosos para salud, comercio y educación; lo que cada vez exige mayor ancho de banda y solidez de las redes. Vivo ejemplo de ello es la red de tele-salud TUTUPALY que mantiene la Universidad Técnica Particular de Loja UTPL, junto con sus socios estratégicos Fundación EHAS (Enlace Hispano

Americano de Salud) y la Pontificia Universidad Católica del Perú PUCP; y en la cual se ha tenido un primer acercamiento a este tipo de tecnologías. Advirtiéndose en el horizonte un nicho de operación de tecnologías con mayores prestaciones y que puedan brindar otros enfoques de desarrollo, entre ellos: educación, gobernabilidad y comercio; todo ello para hacer posible la inclusión digital a nivel rural y de áreas desprotegidas.

La necesidad es notoria y se debe buscar una alternativa, para ello se debe considerar la estabilidad, confiabilidad y presupuesto exigido, tales aspectos pueden determinar que una u otra tecnología sea aplicable. La respuesta en la mayoría de los casos no pasa por la adopción de una solución comercial, sino más bien, tomar estándares globales que permitan realizar modificaciones para conseguir mejoras interesantes en cuanto a cobertura, ancho de banda y bajo costo.

En la actualidad, existen grandes avances utilizando 802.11 con algunas enmiendas como a, b y g; es más, en el 2009 se lanzó el estándar 802.11n, que en teoría incrementa su ancho de banda de 54 Mbps propuesto por 802.11g a 300 o 600 Mbps dependiendo del ancho del canal y su uso; además presenta mayor inmunidad al multitrayecto con la adopción de la tecnología MIMO que incorpora técnicas de diversidad, procesado de señales y antenas inteligentes; todo ello traducido en una mayor cobertura en relación a redes indoor.

Si se comprueba que este esquema, con algunas modificaciones, funciona en redes de largas distancias con buenos resultados a nivel de incremento de caudal se podría aprovechar dichas características para mejorar y expandir los servicios que actualmente se han montado sobre redes rurales.

1.3 Organización del documento

La presente memoria se compone de seis partes, así:

En la Parte I *Introducción*, se exponen las razones que fundamentaron el trabajo de investigación.

En la Parte II *Marco Referencial*, en el Capítulo 2 se realiza un repaso por aspectos fundamentales del estándar IEEE 802.11-2007. En el Capítulo 3 se analiza las principales mejoras y técnicas nuevas incorporadas al estándar 802.11n para conseguir mejores prestaciones y caudales elevados. El Capítulo 4, pretende dar algunas pinceladas de la situación actual de las redes WiLD y los temas de investigación que se orientan a medir el impacto del estándar

802.11n. Finalmente, en Hipótesis y Objetivos se establece las preguntas de investigación y los fines perseguidos a través del trabajo desarrollado.

La Parte III engloba los *Materiales y Métodos*, se realiza una descripción de la Metodología utilizada, profundizando luego en el Software de Simulación, la preparación del simulador, y la descripción de Esquemas de Pruebas.

En la Parte IV, se realiza el *Análisis de Resultados*, partiendo de un análisis sistemático para luego realizar una evaluación experimental y llegar a las Conclusiones y Trabajos Futuros.

Finalmente, en las Partes V y VI se disponen respectivamente de *Apéndices* con datos que se han utilizado para el Análisis de Resultados e información de relevancia; y, las *Referencias* que han servido de base para el desarrollo del trabajo de fin de master.

Parte II
Marco Referencial

2 Estándar 802.11 a/b/g 2007

”En Egipto se llamaban a las bibliotecas el tesoro de los remedios del alma. En efecto, curábase en ellas de la ignorancia, la más peligrosa de las enfermedades y el origen de todas las demás.”

Jacques Benigne Bossuet

En el año 1997 la IEEE definió el estándar 802.11, el cual funciona con velocidades de entre 1 y 2 Mbps.

Dos años después, se publican los estándares 802.11b y 802.11a, que definen velocidades nominales de hasta 11Mbps a 2.4 GHz y 54Mbps a 5GHz, respectivamente. Sin embargo más tarde, en el 2003 se lanza el estándar 802.11g con el firme propósito de tomar características de sus predecesores para poder tener mejores prestaciones, así este estándar se propone para banda de 2.4GHz y velocidades nominales de 54 Mbps.

En el 2007, la IEEE publica una revisión de los estándares anteriores [4] especificando las características para las capas 1 y 2 del modelo OSI (Open System Interconnection), es decir, PHY (Physical Layer) y capa MAC (Medium Access Control Layer), respectivamente. Este documento sirve de referencia para los siguientes enunciados.

2.1 Estructura básica 802.11

Un sistema de red típico 802.11 presenta ciertos elementos básicos (Figura 2.1):

- Estación STA (STation): Es cualquier dispositivo cuyos MAC y PHY cumplen el estándar 802.11.

- Punto de acceso AP (Access Point): Es la entidad que tiene funcionalidades de STA y provee acceso a sistemas de distribución, a través del medio inalámbrico.
- Sistema de distribución DS (Distributions System): Es un sistema para interconectar la red inalámbrica con una red LAN.
- Medio inalámbrico WM (Wireless Medium): Es el medio utilizado para implementar la transferencia de unidades de datos entre entidades PHY, por ello, las limitaciones de PHY determinarán la distancia máxima entre STAs que puede ser soportada.

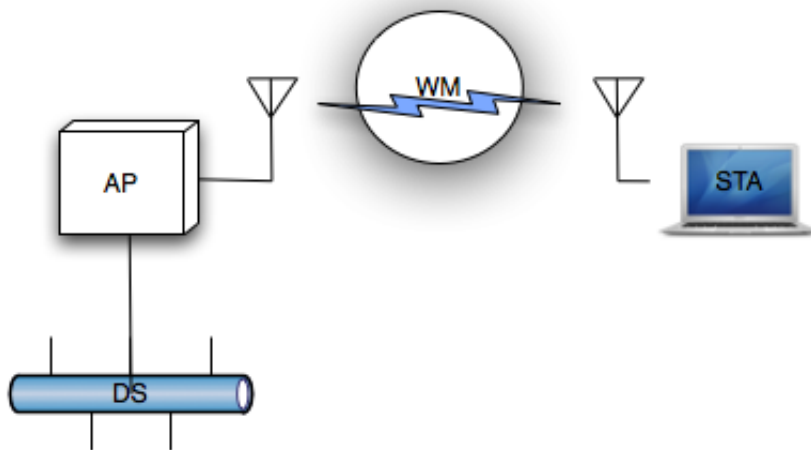


Figura 2.1: Elementos de una red inalámbrica

La información se organiza en tramas de bits encapsuladas a través de su paso por cada una de las capas del modelo OSI y con funciones específicas a su posición. De esta manera la información que llega a la capa MAC proveniente de la capa de encaminamiento se organiza en la denominada MSDU (MAC Service Data Unit) y se le añade información de direccionamiento capa 2 más mecanismos de control de errores, con lo cual se conforma una MPDU (MAC Protocol Data Unit); las MPDU al pasar a la capa física se organizan en una sola PSDU (Physical Service Data Unit) a la cual se le incorpora delimitadores y preámbulos para conformar PPDU (Physical Protocol Data Unit) que es la unidad que se envía al medio de transmisión mediante las técnicas de modulación.

Si la MPDU es suficientemente grande, puede contener varias MSDU gracias a la técnica de agregación de tramas; mientras que si la MPDU es más pequeña que la MSDU, se aplica la técnica de fragmentación para enviar segmentos cortos de información sin saturar el canal.

2.2 Funcionamiento capa PHY

La PHY de 802.11 define los métodos de adaptación al medio inalámbrico (modulación, codificación, etc), de coordinación para intercambio de tramas con su par remoto, de detección del canal, y en general, las definiciones para brindar servicios a la capa MAC.

Para cumplir con estas funciones la capa física está dividida en dos subcapas:

- Physical Layer Convergence Procedure (PLCP): Esta capa sirve como interface entre las tramas MAC y el medio de transmisión, añade su propia cabecera a la trama proveniente de capas superiores con lo cual incorpora un mapeo de MPDU dentro del formato de tramas para poder enviar y recibir datos e información de administración entre STA sobre la subcapa PMD.
- Physical Medium Dependent (PMD): Esta capa es la responsable de transformar la trama proveniente de PLCP a bits e introducirlos en el medio inalámbrico.

Adicionalmente, la PHY dispone de una función especial denominada Clear Channel Assessment (CCA) que permite determinar cuando el canal está libre para que la MAC implemente su mecanismo de acceso al medio.

En la Tabla 2.1 se tiene un cuadro resumen de parámetros PHY utilizados por el estándar 802.11 para las enmiendas a, b y g.

Tabla 2.1: Parámetros de PHY relevantes para estándares a, b y g

Parámetros	802.11	802.11b	802.11a	802.11g
Técnica de modulación	DSSS FHSS IR	HR/DSSS CCK	OFDM	ERP/OFDM
Máxima velocidad (Mbps)	1 2	11	54	54
Banda	ISM	ISM	U-NII	ISM
Rango de frecuencia (GHz)	2.4-2.485	2.4-2.485	Baja 5.15-5.25 Media 5.25-5.35 Alta 5.725-5.825	2.4-2.485
Ancho de banda por canal (MHz)	22	22	20	22
Número de canales no solapables	3	3	8	3
SlotTime (μ s)	20 50	20	9	20 o 9
SIFS (μ s)	10 28	10	16	10

2.3 Funcionamiento capa MAC

La MAC de 802.11 define los mecanismos de acceso al medio de manera equitativa para cada STA y al mismo tiempo da soporte a capas superiores, brindando servicios como: fragmentación, encaminamiento, encapsulamiento, verificación de errores, etc.

En el estándar se definen tres funciones principales para el acceso al canal:

1. Función de Coordinación Distribuída DCF (Distributed Coordination Function): Es el método de acceso fundamental de la capa MAC, conocido como CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) que realiza un sondeo del canal para detectar portadoras antes de intentar transmitir con el objeto de reducir al mínimo la probabilidad de colisiones.

Para ello, cuando una STA quiere transmitir espera a que el canal está libre; entonces espera aún un tiempo DIFS (DCF Interframe Space) y, si el canal sigue libre, la estación abre una ventana de contienda para incorporar un tiempo de espera adicional y diferente para STA. La ventana de contienda es un número entero de ranuras temporales de duración fija que se lleva con una cuenta atrás, cuyo valor inicial se determina aleatoria y uniformemente entre un rango (0, CWmin) (Contention Window) establecido para cada PHY (ver Tabla 2.2). El valor CW extraído, si el canal sigue libre, se decrementa con cada ranura hasta llegar a 0 que es cuando la STA transmite; caso contrario, es decir, si el canal está ocupado, se congela el temporizador conservándose su valor para reanudar la cuenta atrás, sólo cuando el canal vuelva a estar libre durante un tiempo DIFS.

Cuando la estación transmite tramas unicast, ésta espera un tiempo ACKTimeout (Acknowledgment-Timeout) para recibir confirmación de que la trama ha sido recibida sin errores. Si la trama no es confirmada, se asume que se produjo una colisión y por ende se debe programar una retransmisión. Para reducir la probabilidad de tener nuevamente una colisión en cada retransmisión se duplica el extremo superior del rango de ventana de contienda hasta un valor máximo CWmax, definido por el estándar, con ello se pretende obtener en media valores iniciales más altos en cada proceso de retransmisión. Este proceso se realiza hasta un máximo de siete veces (por defecto); si hasta entonces no se ha podido transmitir exitosamente la trama en espera, ésta será descartada. Este sistema se llama "retroceso binario exponencial". El análisis de rendimiento de esta función se realiza

ampliamente en [5, 6].

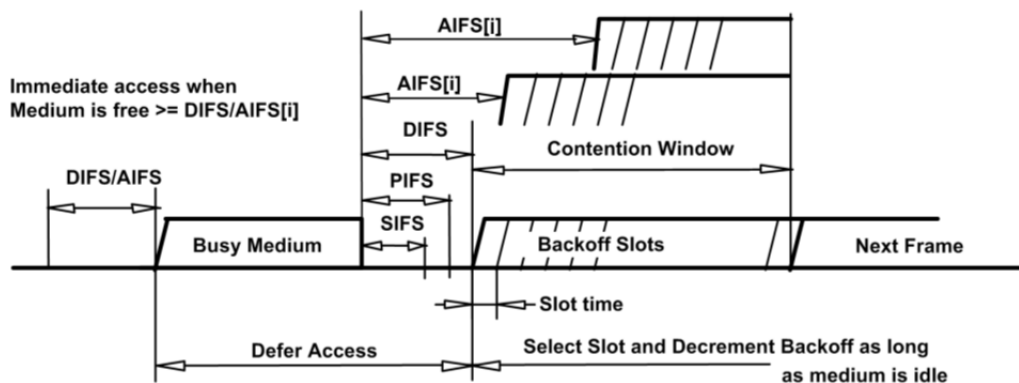


Figura 2.2: Mecanismo de acceso básico y relaciones de espacios entre tramas

2. Función de Coordinación Centralizada PCF (Point Coordination Function): PCF es un mecanismo opcional que se utiliza sólo en redes que tienen una infraestructura formada, debido a que necesita de un AP que ejecute las funciones de coordinación, es decir, debe determinar qué STA debe transmitir y en qué momento, para ello el punto de coordinación realiza constantes consultas (polling) de acuerdo a reglas predefinidas. PCF además utiliza un mecanismo de prioridad sobre DCF para acceder al medio, que se basa esencialmente en manejar tiempos de espera menores denominados PIFS (PCF Interframe Space) para transmitir (ver Figura2.2).
3. Función de Coordinación Híbrida HCF (Hybrid Coordination Function): HCF se incorpora para añadir características de QoS a 802.11, por ello sólo será implementada en STA con capacidades de QoS. HCF utiliza los principios de las dos funciones anteriores con algunas mejoras, mecanismos específicos de QoS y algunos subtipos de tramas, dando lugar a dos mecanismos: primero EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) que es basado en acceso por contienda que define cuatro categorías de acceso para asignación de prioridad. Las prioridades actúan en tres variables de tiempo: AIFS (Arbitration Inter Frame Space), CWmax y CWmin; de tal forma que cuando se tiene tráfico sensible, es decir, cuanto más alta es la prioridad, menores serán los valores para cada uno de estos parámetros y por ende menor la espera para acceder al canal; y, segundo HCCA (HCF Controlled Channel Access) que en esencia es un mecanismo libre de contienda, donde el punto de coordinación designa las prioridades.

2. ESTÁNDAR 802.11 A/B/G 2007

En la Tabla 2.2 se resumen algunas de las principales características de la capa MAC para el estándar 802.11 2007.

Tabla 2.2: Parámetros de MAC relevantes para estándares a, b y g

Parámetros	802.11	802.11b	802.11a	802.11g
SlotTime (μ s)	20 50	20	9	20 o 9
SIFS (μ s)	10 28	10	16	10
PIFS (μ s)	30 78	30	25	30 o 19
DIFS (μ s)	50 106	50	34	50 o 28
Ventana de contienda (slots)	31-1023 15-1023	31-1023	15-1023	15-1023 31-1023
Duración de preámbulo (μ s)	144 96	144	16	20
Duración de cabecera PLCP (μ s)	48 32	48	4	4
Long. max. trama MAC (bytes)	4-8191 4095	4095	4095	4095

3 Introducción al estándar 802.11n

”En la utopía de ayer, se incubó la realidad de hoy, así como en la utopía de mañana palpitarán nuevas realidades.”

José Ingenieros

En este capítulo se trata de realizar una revisión profunda de cómo trabaja el estándar 802.11n [7] y qué aporte significativo brinda a las redes inalámbricas actuales.

3.1 Formatos de funcionamiento en 802.11n 2009

La primera consideración a tener en cuenta es que el estándar 802.11n fue pensado para poder interoperar con 802.11-2007; y que por ello se identifican dos tipos de estaciones HT-STA (High Throughput STAtion) y non-HT-STA, las primeras que cumplen con todo el estándar 802.11n para caudales elevados y las segundas que pueden coexistir en redes del estándar original.

Las técnicas que las HT-STA tienen implementadas son:

- A nivel de capa MAC: agregación de tramas, ACK de bloque, reducción de tiempos de espera y mecanismos de protección para coexistencia con non-HT STA.
- A nivel de capa PHY: incorporación de técnica MIMO (Multiple Input Multiple Output), ampliación de anchos de banda y selectividad de antenas.

Las características de HT son ampliamente aprovechadas en una estructura AP-STA, mientras que se ven reducidas en redes ad-hoc IBSS.

802.11n define tres formatos para PPDU (PLCP Protocol Data Unit) dependiendo del tipo de estaciones que conformen la red, así:

1. Non-HT: Presenta paquetes estructurados de acuerdo al OFDM y ERP de los estándares predecesores. Este esquema es mandatorio para asegurar la convivencia de estándares.
2. HT-mixed (HT-MF): Se identifica por disponer de paquetes que contienen un preámbulo compatible con receptores de estándares predecesores, sin embargo, las opciones del paquete no podrán ser comprendidas por estos equipos, pues sólo HT-STA pueden hacer uso de la información de cabecera para HT. Al igual que el anterior formato, éste es mandatorio para asegurar compatibilidad.
3. HT-greenfield (HT-GF): En este formato se transmiten únicamente paquetes preparados para HT, no tienen ninguna parte compatible con non-HT, por ende este esquema es opcional.

3.2 Técnicas nuevas incorporadas en 802.11n 2009

3.2.1 Reduced InterFrame Space RIFS

Esta característica se incorpora considerando que, cuando una STA logra acceder al canal para transmitir sus tramas no es necesario esperar un tiempo considerablemente mayor para que ésta realice múltiples transmisiones, entonces RIFS puede ser utilizado en lugar de SIFS, con lo cual se reduce el gasto de tiempo innecesario y así se incrementa la eficiencia de la red.

RIFS sólo se utiliza para separar tramas con igual dirección de recepción y sólo en el modo HT. Y como un intercambio normal, su ACK llega con SIFS.

Entonces, se define RIFS como el tiempo desde el final del último símbolo de la trama anterior hasta el inicio del primer símbolo del preámbulo de la trama subsecuente del mismo transmisor siendo estas dos tramas del tipo HT.

RIFS está estrechamente ligado al valor $aRIFSTime$ en PHY para HT que es de $2 \mu s$; con ello se define la duración de RIFS como $aRIFSTime \pm 10\%$.

3.2.2 Agregación de tramas

Las STA compiten por el acceso al medio en cada ventana de contienda, el éxito de tal operación dependerá del valor de ventana de contienda que obtenga cada una de ellas. Esto determina que cada periodo de contienda podría generar un evento de colisión y con ello producir retransmisiones e

incremento del tiempo de demora, que se traduce en un bajo rendimiento de la red.

El estándar 802.11n se basa en el aprovechamiento máximo cuando una STA tiene acceso al medio, para ello se arman tramas globales con tramas normales (subtramas), que es lo que se conoce como agregación de tramas. Entonces, múltiples tramas se combinan y procesan como una entidad única, reduciendo así el overhead total por transmisión.

La agregación de tramas comprende dos técnicas: Aggregate MAC Protocol Data Unit (A-MPDU) y Aggregate MAC Service Data Unit (A-MSDU).

La trama queda definida como se muestra en la Figura 3.1

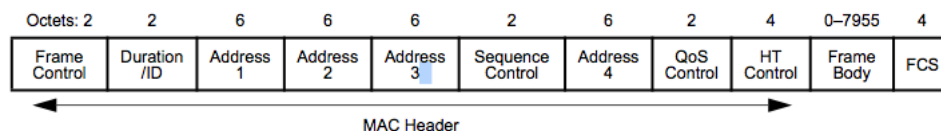


Figura 3.1: Formato de trama MAC

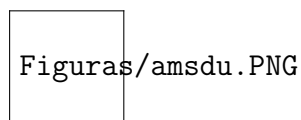


Figura 3.2: Formato de A-MSDU

A-MSDU

Es una estructura que contiene múltiples MSDU de diferentes subtipos; y, que se trata como una simple MPDU, incluso cuando se desea encriptar la información; esta característica es mandatoria dentro de 802.11n.

El tamaño máximo de una MSDU es 2304 octetos, mientras que para un A-MSDU es 3839 o 7935 octetos dependiendo de si el transmisor es STA o AP respectivamente. Sin embargo, el tamaño del campo *frame body* puede ser limitado por: la longitud máxima de PSDU (Protocolo Service Data Unit) de PHY; o, si la agregación A-MPDU es usada, la longitud máxima de MPDU de 4095 octetos incluidos los añadidos para el servicio de QoS.

Formato

Cada subtrama de una A-MSDU está conformada por: una cabecera de subtrama en la cual constan las direcciones de origen y destino, junto con la longitud de la subtrama; a continuación se dispone una MSDU; y, 0 o 3 octetos de relleno de tal forma que la longitud total sea múltiplo de 4 octetos (Figura 3.2). La última subtrama prescinde de relleno.

Restricciones de operación

1. Todas las MSDU dentro de una A-MSDU deben tener el mismo valor TID (Traffic IDentifier), porque cuando se trabaja con parámetros de calidad se puede asignar una prioridad igual a todas las subtramas.
2. Una A-MSDU no puede ser fragmentada.
3. El tiempo de vida de una A-MSDU se corresponde al máximo de entre los valores que tienen sus elementos, es decir, que sólo se vencerá cuando expiren todos los contadores de cada subtrama A-MSDU.
4. Los parámetros de dirección origen y destino en la cabecera de subtrama deben corresponder a las direcciones de transmisor y receptor en la cabecera MAC, de tal forma que no se puede aplicar A-MSDU en transmisiones de broadcast y multicast.
5. Una STA no debe transmitir una A-MSDU a una STA desde la cual no ha recibido una confirmación de sus capacidades para HT.
6. Una STA no debe transmitir una A-MSDU a una STA que excede la longitud máxima de A-MSDU.

A-MPDU

Es una estructura que contiene múltiples MPDU transportadas como una simple PSDU por la capa PHY. La máxima longitud de MPDU que puede ser transportada utilizando A-MPDU es 4095 octetos, así que una A-MSDU que exceda los 4065 octetos (4095 menos los datos de QoS) no pueden ser transportados en una A-MPDU cuando se utilicen dos niveles de agregación [8].

Formato

Una A-MPDU es una secuencia de una o más subtramas A-MPDU, cada una de ellas consta de: un delimitador que tiene por objetivo poder localizar una MPDU dentro de la A-MPDU y saber individualmente si ésta tiene errores; luego se dispone de una MPDU; y, se finaliza con un campo

de relleno, salvo cuando se trata de la última subtrama (Figura 3.3).

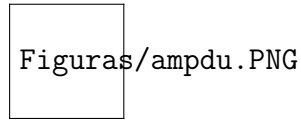


Figura 3.3: Formato de A-MPDU

Restricciones de operación

1. Todas las MPDU dentro de una A-MPDU deben ser dirigidas a la misma dirección de receptor.
2. Las tramas de QoS dentro de una A-MPDU deben tener la misma política de ACK.
3. El campo duración en la cabecera MAC de todas las subtramas A-MPDU deben tener el mismo valor.
4. El orden de las MPDU dentro de una A-MPDU no necesariamente es restringido.
5. El valor máximo de longitud A-MPDU para una transmisión está limitado por las características que puede soportar el receptor informadas en la asociación, como máximo PSDU que puede recibir, de tal manera que una STA no puede transmitir una A-MPDU cuya longitud sea mayor al valor indicado.
6. Una MSDU transmitida dentro de una A-MPDU no debe ser fragmentada aún cuando su longitud excede el límite.

3.2.3 Multiple Input Multiple Output MIMO

El medio inalámbrico constituye un canal de comunicación que tiene un comportamiento muy complicado, pues en él se producen fenómenos que afectan directamente a las ondas electromagnéticas, incluyendo: reflexión, refracción, dispersión y absorción.

Con este antecedente es muy común hablar de multipath o multitrayecto, que no es más que la descomposición de la señal original en varios rayos debido a la presencia de una serie de obstáculos, cuyo tamaño y composición son significativos provocando la reflexión y la dispersión.

La técnica MIMO utiliza M antenas en transmisión y N en recepción, lo que determina diferentes caminos de propagación, con el fin de darle un

uso constructivo al multipath. Los datos se organizan convenientemente en flujos espaciales (spatial streams) que se transmiten por cada antena.

Las altas velocidades de transmisión de los sistemas MIMO obedecen a diversos factores que, bien mejoran los esquemas de transmisión, o bien incrementan la fiabilidad del enlace.

Beamforming

La técnica de beamforming es un mecanismo de filtrado espacial usado por una STA (beamformer, quien proveerá el servicio de beamforming) para mejorar la potencia de señal recibida. Actúa preparando las señales para que lleguen en fase a la STA receptor (beamformee, quien suministra información sobre el canal) incrementando con ello la relación señal a ruido del mismo y causando como efecto práctico la ampliación de cobertura.

Es de notar que esta técnica requiere un conocimiento previo de las características del canal de transmisión, para lo cual el transmisor requiere un feedback del receptor en base a dos parámetros: relación señal a ruido promedio por tonos desde -10dB a 53.75dB y los ángulos de incidencia dentro del enlace. La estimación del canal de transmisión se da a través de dos métodos de cálculo:

1. Feedback implícito: El beamformer recibe del beamformee símbolos largos de conformación que permiten estimar el canal MIMO, para ello es necesario que los radios sean previamente calibrados. Si el canal es recíproco, el beamformer puede usar esa información para calcular matriz adecuada de transmisión. Este método puede operar de manera unidireccional o bidireccional (ver Figura 3.4), dependiendo de quien realiza el pedido de feedback.
2. Feedback explícito: El beamformee hace una estimación directa del canal desde los símbolos que le envía el beamformer, para luego cuantificarla y realizar el feedback.

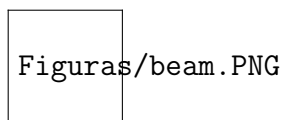


Figura 3.4: Feedback implícito bidireccional

Codificación espacio-temporal por bloques (STBC)

Técnica que posibilita el envío repetitivo de datos por varias antenas, con el objeto de evadir el efecto negativo del desvanecimiento y con ello reducir la tasa de error media, para lo cual por varias antenas (espacio) se envían señales correladas en diferentes periodos de tiempo. Al recibir varias copias de la misma señal por diferentes caminos, cada una de ellas tendrá un degradado diferente tanto en ubicación como en profundidad; y es factible seleccionar las mejores versiones de la señal para realizar una combinación que pueda brindar la mayor cantidad de información, con ello el proceso de recepción es más óptimo en cuanto a fiabilidad, pese a sacrificar la velocidad de transmisión por la redundancia en los flujos enviados.

Para conseguir este efecto para cada símbolo OFDM asociado con los flujos espaciales (N_{ss}) se generan símbolos OFDM espacio-temporales (N_{sts}), creados aplicando una combinación de procesado espacio-temporal; que a su vez determinan las cadenas transmitidas. STBC es usada sólo cuando el número de flujos espaciales es menor al número de cadenas espacio-temporales ($N_{ss} < N_{sts}$).

802.11n determina cuatro modos STBC, así: 1 N_{ss} es codificada en 2 N_{sts} (MCS 0-7); 2 N_{ss} son codificadas en 3 N_{sts} (MCS 8-15, 33-38); 3 N_{ss} son codificadas en 4 N_{sts} (MCS 16-23, 39, 41, 43, 46, 48, 50).

El número máximo de cadenas espaciales disponibles depende del número de cadenas de transmisión N_{TX} y recepción N_{RX} ; y las capacidades STBC de cada equipo (Tabla 3.1), mientras no se conozca dicho número por parte del receptor, este valor se inferirá de las características para MCS y STBC anunciadas al transmisor.

Tabla 3.1: Máximo número de cadenas-temporales disponibles

N_{TX}	N_{RX}	$N_{sts, max}$ sin STBC	$N_{sts, max}$ con STBC
1	1	1	N/A
2	1	1	2
3	1	1	2
3	2	2	3
4	1	1	2
4	2	2	4

Multiplexado espacial (SM)

Técnica de transmisión en la cual se multiplexa la señal deseada en varios flujos espaciales que serán transmitidos simultáneamente por cada antena ocupando el mismo ancho de banda; para poder determinar múltiples cadenas de datos entre un par transmisor - receptor. Tiene como requisito fundamental que cada respuesta de canal utilizado por la técnica MIMO sea lo suficientemente decorrelado, con ello se consiguen las tasas más altas de transmisión a nivel de PHY.

La técnica de STBC y Spatial Multiplexing son mutuamente excluyentes, puesto que en la primera se envía la misma información por caminos diferentes, mientras que en la segunda se aprovechan todos los caminos para enviar datos diferentes y complementarios. Sin embargo se puede realizar una combinación de las dos técnicas donde 1 flujo espacial se transmite con STBC y uno o dos flujos adicionales son transmitidos con SM.

3.2.4 Modulation and coding schema MCS

Se define como el esquema que tienen los equipos para comunicarse en cuanto a modulación, codificación y número de canales espaciales. Resulta conveniente disponer de distintas opciones de configuraciones, puesto que cada una de ellas presenta diferente tipo de inmunidad, dependiendo de las condiciones de propagación presentes. Adicionalmente, más de un MCS puede tener la misma tasa de transmisión, su selección se definirá a través del análisis del canal. Se establecen 127 niveles para el estándar 802.11n, así:

- 0-7 y 32 tienen un solo flujo espacial
- 8-31 tienen múltiples flujos espaciales y utilizan modulación igual EQM (equal modulation) en todos los flujos.
- 33-76 tienen múltiples flujos espaciales, pero utilizan diferentes modulaciones UEQM (unequal modulation).
- 77-127 son reservados

Para 802.11n 2009 los MCS del 0-15 (20 MHz de ancho de banda y 800ns de GI) son mandatorios para APs; en cambio para STAs se consideran mandatorios los esquemas 0-7. Todos los demás esquemas 16-76 son opcionales, esto determina que las características de 400ns en GI y 40 MHz de ancho de banda no serían requisito para cumplir el estándar, sin embargo,

en esquemas HT se deben incorporar las características mencionadas.

Con la disponibilidad de estos modos se aumentan grandemente las configuraciones posibles de velocidades (ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Esquemas de velocidades

Estándar	Nro. de posibilidades	Velocidad nominal (Mbps)
b	4	11, 5.5, 2 y 1
a	8	54, 48, 36, 24, 18, 12, 9 y 6
g	12	a + b
n	más de 150	6.5, 7.2, 13, 14.4, ...150, 162, etc

La PHY en HT determina hasta 4 flujos espaciales, operando en 20 y 40 MHz de ancho de banda, con lo que se obtiene velocidades nominales de 300 y 600 Mbps para el ancho de banda respectivo.

En la Tabla 3.3 se resumen los modos con el número de flujos presentes en el estándar.

3.3 Principales mejoras incorporadas en 802.11n 2009

3.3.1 ACK de bloque (BlockACK)

En sus inicios 802.11, por defecto, contemplaba la transmisión de un acuse de recibo ACK para cada trama de datos unicast recibida. Incorporando el tema de calidad de servicio y la agregación de tramas se tienen las siguientes políticas de acuse de recibo:

3. INTRODUCCIÓN AL ESTÁNDAR 802.11N

Tabla 3.3: Esquemas de flujos para modos 802.11n

Modo	Flujo	Modulación	FEC	Data rate			
				20MHz		40MHz	
				800ns	400ns	800ns	400ns
0	1	BPSK	1/2	6.50	7.20	13.50	15.00
1	1	QPSK	1/2	13.00	14.40	27.00	30.00
2	1	QPSK	3/4	19.50	21.70	40.50	45.00
3	1	16-QAM	1/2	26.00	28.90	54.00	60.00
4	1	16-QAM	3/4	39.00	43.30	81.00	90.00
5	1	64-QAM	2/3	52.00	57.80	108.00	120.00
6	1	64-QAM	3/4	58.50	65.00	121.50	135.00
7	1	64-QAM	5/6	65.00	72.20	135.00	150.00
8	2	BPSK	1/2	13.00	14.40	27.00	30.00
9	2	QPSK	1/2	26.00	28.90	54.00	60.00
10	2	QPSK	3/4	39.00	43.30	81.00	90.00
11	2	16-QAM	1/2	52.00	57.80	108.00	120.00
12	2	16-QAM	3/4	78.00	86.70	162.00	180.00
13	2	64-QAM	2/3	104.00	115.60	216.00	240.00
14	2	64-QAM	3/4	117.00	130.00	243.00	270.00
15	2	64-QAM	5/6	130.00	144.40	270.00	300.00
16	3	BPSK	1/2	19.50	21.70	40.50	45.00
17	3	QPSK	1/2	39.00	43.30	81.00	90.00
18	3	QPSK	3/4	58.50	65.00	121.50	135.00
19	3	16-QAM	1/2	78.00	86.70	162.00	180.00
20	3	16-QAM	3/4	117.00	130.70	243.00	270.00
21	3	64-QAM	2/3	156.00	173.30	324.00	360.00
22	3	64-QAM	3/4	175.50	195.00	364.50	405.00
23	3	64-QAM	5/6	195.00	216.70	405.00	450.00
24	4	BPSK	1/2	26.00	28.80	54.00	60.00
25	4	QPSK	1/2	52.00	57.60	108.00	120.00
26	4	QPSK	3/4	78.00	86.80	162.00	180.00
27	4	16-QAM	1/2	104.00	115.60	216.00	240.00
28	4	16-QAM	3/4	156.00	173.20	324.00	360.00
29	4	64-QAM	2/3	208.00	231.20	432.00	480.00
30	4	64-QAM	3/4	234.00	260.00	486.00	540.00
31	4	64-QAM	5/6	260.00	288.80	540.00	600.00

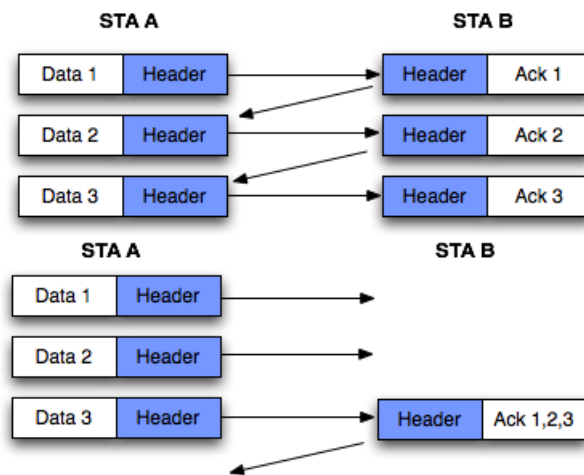


Figura 3.5: Políticas de ACK. ACK Normal y BlockACK

1. ACK normal o Block ACK Request (BlockACKReq) implícito: Si la trama no es A-MPDU (Aggregated MAC Protocol Data Unit), la STA

3.3. Principales mejoras incorporadas en 802.11n 2009

destino direccionada retorna una trama de acuse de recibo luego de un período SIFS (Short Interframe Space), que comienza a partir de la recepción de la trama de datos contenida en una MPDU simple. Si la trama pertenece a una A-MPDU, la STA destino regresa un MPDU conteniendo un BlockACK luego de esperar un período SIFS.

2. Sin ACK: En este mecanismo la STA destino no toma acción cuando recibe tramas; comúnmente utilizada para broadcast y multicast con el objetivo de no congestionar la red, sin embargo, es una técnica que no se utiliza para tramas que necesitan QoS.
3. ACK no explícito o PSMP (power save multi-poll) ACK: En este mecanismo se pueden enviar tramas de confirmación, pero éstas no son específicamente tramas ACK.

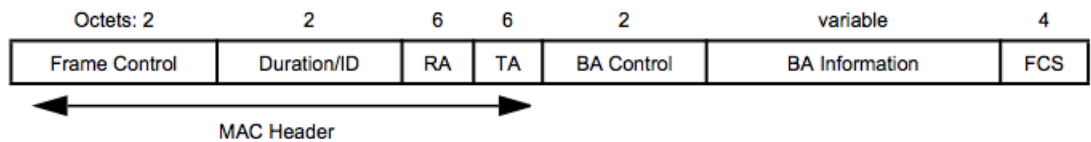


Figura 3.6: Formato de trama BlockACK

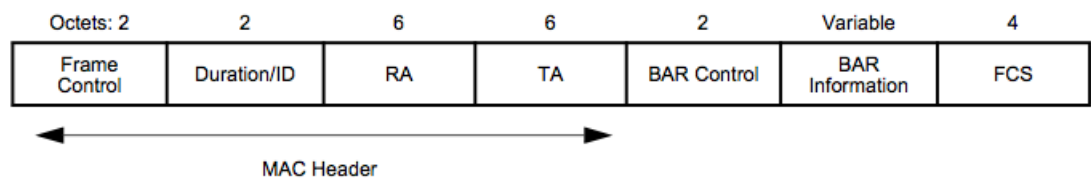


Figura 3.7: Formato de trama BlockACKRequest

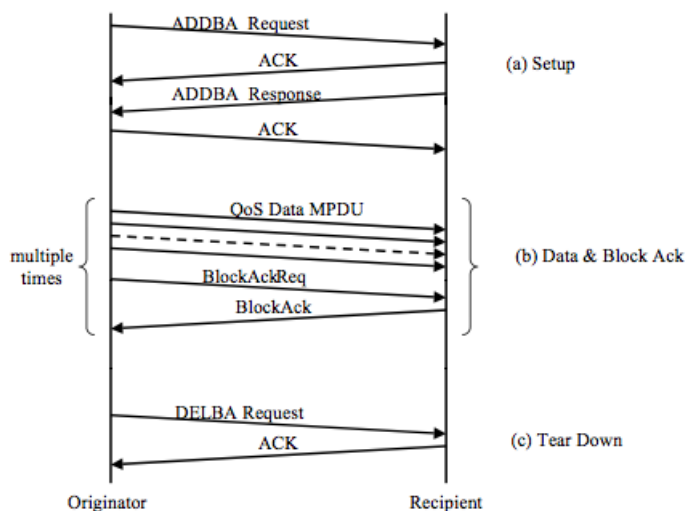


Figura 3.8: Secuencia para envío de BlockACK

4. ACK de bloque: La STA destino cuando recibe una trama únicamente lleva un registro del estado, sin embargo, se espera que luego se dé un acuse de recibo para un bloque de tramas, considerando que la trama BlockACK (Figura 3.6) es la respuesta inmediata a las tramas BlockACKReq explícitas (Figura 3.7) o a una A-MPDU.

Las tramas BlockACKReq pueden ser de dos tipos: ADDBA (Add Block ACK), Request/Response, que añade el pedido de acuse de recibo y sitúan los parámetros básicos del proceso de confirmación, respectivamente; y DELBA (Del Block ACK) que anula el pedido de ACK de bloque, ambas tramas son contestadas con ACK normales (Figura 3.8).

El número de tramas en el bloque es limitado y la cantidad de estados que puede mantener el destino es restringida. Sin embargo, este esquema puede resultar interesante para aplicaciones de alta velocidad que permiten un nivel de retransmisiones bajo.

3.3.2 Dualidad de canales

El estándar 802.11n puede trabajar en dos bandas de frecuencias:

- 2.4 GHz, que emplea 802.11b y 802.11g, y
- 5 GHz, que es usada por 802.11a.

Esto determina que los equipos 802.11n sean completamente compatibles con las versiones Wi-Fi anteriores. Sin embargo, funciona con sólo un esquema de frecuencia a la vez.

Para anchos de banda de 20 MHz y dependiendo de la regulación vigente en la región, se tienen 13 canales para 2.4 GHz (2400-2483 MHz) de los cuales 3 canales son no solapables y para 5 GHz se divide en 3 sub-bandas de frecuencia 5.15-5.35 — 5.47-5.725 — 5.725-5.875 GHz con 12 canales no solapables válidos en la regulación estadounidense (Tabla 3.4).

Tabla 3.4: Canales de operación válidos para el dominio estadounidense

Banda (GHz)	Número de canal de operación	Frecuencia central del canal (MHz)
U-NII banda baja (5.15-5.25)	36	5180
	40	5200
	44	5220
	48	5240
U-NII banda media (5.25-5.35)	52	5260
	56	5280
	60	5300
U-NII banda alta (5.15-5.25)	64	5320
	149	5745
	153	5765
	157	5785
	161	5805

Las frecuencias centrales de cada canal de 40 MHz se asignan en múltiplos enteros de 5 MHz; y, la relación entre frecuencia central y número de canal viene dada por:

- Para 2.4 GHz:

$$F_{\text{central}} = 2407 + 5 \times n_{ch} \text{ (MHz) donde } n_{ch} = 1, 2, \dots, 13 \quad (3.1)$$

- Para 5 GHz:

$$F_{\text{central}} = F_{\text{canal 1}} + 5 \times n_{ch} \text{ (MHz) donde } n_{ch} = 0, 1, \dots, 200 \quad (3.2)$$

3.3.3 Ampliación de ancho de banda

Los estándares predecesores de 802.11n utilizan anchos de banda de 20 MHz, con franjas de guarda de 1 MHz a cada extremo y 18 MHz utilizables para datos. Con la ampliación del ancho de banda a 40 MHz se consigue incrementar el tráfico cursado, puesto que para lograr este espacio en frecuencia se agrupa dos canales consecutivos de 20 MHz combinados, con bandas de guarda de 1 MHz lo que permite aprovechar 38 MHz por cada canal, más de dos veces lo obtenido con el esquema anterior, esto implica haber duplicado

la capacidad de la información que cursa por un canal.

Los canales de 40 MHz son especificados por dos campos dentro de un par: (Nro. de canal primario, Secundario); donde el primer campo representa el número de canal principal, y el segundo campo indica si el canal secundario está por encima o por debajo del canal primario (1 y -1, respectivamente). El número de canal secundario se determina con la fórmula 3.3.

$$N_{\text{canal secundario}} = N_{\text{canal primario}} + \text{Secundario} \times 4 \quad (3.3)$$

3.3.4 OFDM mejorado

El estándar original presentaba muchas complicaciones en cuanto a canales con ruido; por ello se plantea OFDM como opción ya que presenta mayor robustez al desvanecimiento selectivo al dividir la señal en varias subportadoras ortogonales moduladas independientemente a velocidades bajas, lo que tiene efecto de transmisión en paralelo. Es justamente este efecto en paralelo que se ve mejorado con el incremento de cada subportadora

El estándar 802.11n debe cumplir los requisitos de interoperabilidad, por ende cumple con las especificaciones de PHY para las generaciones predecesoras, sin embargo, en este nuevo esquema se incrementa el número de sub-portadoras, es así que para un canal de 20 MHz en a/g y 802.11n modo non-HT se tienen 52 subportadoras (48 usables); mientras que en 802.11n modo HT con el mismo ancho de banda se tienen 56 subportadoras (52 usables); y para 802.11n en modo HT con 40 MHz de ancho de banda se tienen 114 subportadoras (108 usables) (ver Tabla 3.5).

Tabla 3.5: OFDM mejorado

Std.	AB	Formato	Sub-portadoras	Pilotos	P. usables
a/g	20MHz	non-HT	52 (-26...-1 y 1...26)	4 (-21,-7,7,21)	48
n	20MHz	non-HT	52 (-26...-1 y 1...26)	4 (-21,-7,7,21)	48
n	20MHz	HT	56 (-28...-1 y 1...28)	4 (-21,-7,7,21)	52
n	40MHz	non-HT	104 (-58...-6 y 6...58)	4	100
n	40MHz	HT	114 (-58...-2 y 2...58)	6 (-53,-25,-11,11,25,53)	108

Las subportadoras son moduladas con BPSK, QPSK, 16-QAM o 64-QAM; con codificación FEC en tasas de 1/2, 2/3, 3/4 o 5/6.

3.3.5 Reducción del intervalo de guarda GI

El intervalo de guarda se utiliza en OFDM para evitar la interferencia inter-símbolo (ISI) que podría ser generada por datos previos, que enviados por distintos caminos llegan con retrasos variables que superan el tiempo de guarda, sin embargo en muchos casos, sobre todo en interiores, este tiempo incorpora un retardo importante sin tener la utilidad requerida.

En las normas anteriores se maneja como intervalo de guarda (Guard Interval GI) únicamente 800 ns, inclusive es el GI mandatorio para el estándar n; sin embargo, se añade la posibilidad de reducir este valor a 400 ns conocido como SGI (Short Guard Interval); previa negociación entre el transmisor y el receptor; y siempre y cuando se tengan condiciones óptimas en el canal de propagación, es decir, que la diferencia de tiempo entre el camino más rápido y más lento de radiopropagación sea menor que el valor dado.

Los requisitos para utilizar SGI son:

1. La estación debe tener características para HT.
2. Se deben configurar los formatos HT-MF y HT-GF.
3. Se debe ajustar el GI

Se debe puntualizar que el formato HT-GF con un sólo flujo espacial no usa el valor de 400 ns.

4 Estado del arte

”Todos vamos en pos de la cumbre de la montaña sagrada, pero ¿no sería más corto nuestro camino si considerásemos al pasado un mapa y no un guía?”

Kjalil Gibran

En este capítulo se realiza un repaso del estado del arte sobre el rendimiento de las características presentadas en el capítulo anterior, con el fin de tener suficientes elementos de juicio para valorar su aplicabilidad a redes de larga distancia.

4.1 Introducción

El estándar 802.11n nace de la necesidad de incrementar las tasas de transmisión y la cobertura que los anteriores estándares ofrecen; e, incorporar una completa y fiable compatibilidad a las redes; para ello se creó en septiembre de 2002 el Grupo de Trabajo n (Task Group n - TGn), el mismo que se conformó por variados equipos; quienes sugirieron diferentes técnicas para alcanzar las metas propuestas [9].

En noviembre de 2004 se recibieron 32 propuestas, de las cuales sólo 4 estuvieron completas: MITMOT, TGnSync, WWiSE y Qualcomm, siendo las tres primeras presentadas finalmente al TGn en enero del 2005, donde fue eliminada la propuesta conocida como MITMOT [10]. En [11] se realiza una comparación de la capa PHY propuesta por cada grupo postulante.

Más tarde, en marzo del mismo año se realizó una nueva votación que no tuvo los porcentajes requeridos para aprobación, por lo que dos meses después se realizó una re-consideración, quedando una sólo propuesta, TGnSync, para ser abordada por todo el grupo.

En el 2007, luego de versiones y modificaciones frecuentes, el TGn aprueba el Draft 2.0, con el cual se comienza la fabricación de productos denominados ”pre-estándar n”. En julio del 2009, se aprobó el Draft

11.0, y en el mismo año, el 12 de septiembre se hace público el lanzamiento del estándar completo y en octubre se procede a la publicación del estándar oficial 802.11n, con lo cual se cierra un periodo de siete años de trabajo.

4.2 Limitaciones de soluciones estándar 802.11-2007

La inclusión digital es un tema de gran discusión en las últimas décadas, fundamentalmente porque en países en desarrollo se cuentan con características peculiares, como: baja densidad poblacional, limitación de proveedores de servicios, limitado nivel de ingresos y reducida inversión en tecnología; que conducen a alejar más este objetivo. En [12], Brewer analiza el asunto desde un punto de vista técnico, poniendo en la mesa el impacto de la telefonía celular y la fibra óptica, de bandas licenciadas versus no licenciadas, para luego, orientarse a tecnologías inalámbricas fijas y a la mejor manera de implementarlas; ya sea por nuevos desarrollos o adaptaciones a las tecnologías existentes; entre ellas las redes WiLD. En [13], Subramanian et al. realizan un estudio sobre este tipo de redes en África y se determina cuatro razones principales para recomendar su uso: bajo costo, fácil desarrollo, evolución descentralizada y uso de intranet.

Las adaptaciones y consideraciones técnicas se abordan en varios artículos, por ejemplo: adaptaciones en protocolo MAC para redes PtP y Mesh [14] [15], tamaños de tramas e incorporación de técnicas de control de errores [16], modelos óptimos para medir su comportamiento [17], errores de tramas [18] y caracterización de pérdida de paquetes [19]

Las redes WiLD han demostrado tener excelentes resultados en América Latina [20] [21], en India y África [22] [23] [13] [24] [25]. Sin embargo, 802.11 presenta muchos inconvenientes que no han podido ser resueltos. Patra et al. [26] aborda dos de estas restricciones:

- Las limitaciones que la actual capa MAC del estándar presenta en largas distancias sobretodo por su mecanismo de acceso y por su esquema de tiempos de espera definidos, como la técnica de ACK, que incorporan retardos considerables, y,
- Las pérdidas muy elevadas y variables que este tipo de redes pueden presentar, originadas por la interferencia entre enlaces y por el número de retransmisiones, lo que limita el caudal obtenido de extremo a extremo.

Con estas trabas el resultado inmediato es un alcance reducido; Patra afirma que con CSMA/CA en escenarios con colisiones los rangos máximos son 15

Km para 802.11b, 10.2 Km para 802.11a y 8.4 Km para 802.11g; si se desea incrementar la distancia se deberá lidiar con el incremento de las colisiones en contraposición a la reducción del caudal.

Todo esto ha contribuido al apareamiento de tecnologías propietarias e híbridas basadas en el estándar 802.11 con algunas modificaciones, sobre todo a nivel MAC. Por ejemplo:

- En [27] y [28] evalúan la alternativa de utilizar TDMA como método de acceso alternativo en una red WiFi, pues se ha comprobado su robustez en condiciones de pérdidas en largas distancias.
- Koutsonikolas et al. [29] propone utilizar TDM para un mejor rendimiento en redes Mesh con Wifi.
- En [30] Paul et al. utiliza TDD para crear WiFiRe, con esquemas de radio bases.

En base a estas investigaciones, algunos fabricantes han puesto en el mercado soluciones completas, dentro de las más populares están Mikrotik y Ubiquity, con Nstreme y Airmax, respectivamente; con ellas se obtienen alcances de mas de 100 Km. Por ejemplo, se han realizado enlaces en Malawi de 162 Km [31], en Mérida-Venezuela de 279 Km, en El Aguila de 382 Km y en Piancavallo 101 Km [32] con niveles de caudal elevados.

Es por ello que, resulta interesante tratar de hallar alternativas dentro de 802.11 a redes de largas distancias con aplicabilidad a datos de banda ancha, sorteando todos los obstáculos que se encuentran por la naturaleza misma del estándar.

4.3 Revisión de rendimiento alcanzado con MAC 802.11n

La capa MAC se encarga del control de acceso al medio, en términos convencionales el medio inalámbrico es el más adverso, en él se producen controversias, colisiones, pérdida de tiempo y retrasos de backoff. Por ello cuando una estación accede al medio se desea que mantenga su acceso el mayor tiempo posible. Ya en el estándar 802.11e se incorporó el TXOP para conseguir este efecto, sin embargo, con el estándar 802.11n se da un nuevo sentido a este propósito.

En [33] y [34] se establece la necesidad de mejorar las prestaciones que hasta el momento 802.11a/b/g ofrecen, Xiao et al. determinan que el principal problema a nivel MAC es generado por el overhead, sobre todo cuando "la tasa de transmisión es alta o cuando el tamaño de la trama es pequeño".

Se plantea la reducción del overhead creado por cabeceras, preámbulos y ACK, a través de la transmisión de múltiples tramas y un mecanismo más eficiente para los acuses de recibo [35].

Esta idea es apoyada por Bhanage et al. en el 2009, se determina que si se tienen tramas que no aprovechan el máximo payload, ralentizan la red, por ejemplo, en 802.11g, una configuración puede enviar a una velocidad de 26 Mbps, tramas de 1500 bytes; pero cuando la longitud de la trama se reduce a 256 bytes, el rendimiento disminuye a 12 Mbps [36].

Se han realizado muchas investigaciones tendientes a determinar el incremento en eficiencia y reducción de overhead que genera la técnica de agregación de tramas. Entre ellas:

- Bhanage et al. llegan a la conclusión que se puede variar el rendimiento hasta un 25 % si se varía el tamaño de los paquetes, y por otro lado, que el retardo entre tramas puede ser reducido a la mitad si se aplica la agregación de tramas.
- Kim et al. en 2004 [37] evalúa el efecto de la incorporación de la técnica de agregación de tramas en un esquema 802.11a a través del análisis de througpath (ver Figura 4.1).

Figuras/ThAgregacion.PNG

Figura 4.1: Caudal normalizado con y sin agregación de tramas. Kim et al.

- Ginzburg y Kesselman en el 2007 [38] determinan que se puede conseguir hasta un 95% de utilización del canal con la técnica A-MPDU (ver Tabla 4.1), para una configuración 2x2, MCS 15 de 130 Mbps en banda de 5 GHz y protocolo UDP, mientras que sin agregación de tramas en similares condiciones se accedería a solo un 33% de utilización.

Tabla 4.1: Rendimiento de técnica de agregación de tramas. Ginzburg y Kesselman

PHY	Protocolo	A-MPDU	A-MSDU
130 Mbps	TCP	84 %	51 %
	UDP	95 %	71 %
300 Mbps	TCP	78 %	32 %
	UDP	91 %	53 %

- Skordoulis en el 2008 [8] recomienda el uso de dos niveles de agregación para lograr mayor eficiencia con un aprovechamiento casi total de la capacidad en capa PHY. Además plantea el problema de la probabilidad de retransmisión de supertramas en ambientes con predominio de ruido, que vuelve contraproducente tramas de gran tamaño.
- En [39] Soo et al. concluyen que la agregación es mucho más efectiva cuanto más se acerca a la zona de saturación, notándose incrementos sustanciales de caudal al aumentar el tamaño de la agregación.
- Por su parte, Yuxia y Wong [40] determina que el tamaño de la trama agregada para conseguir el mayor caudal varía con las condiciones BER del canal, y éstas a su vez dependerán del MCS utilizado para obtener determinado SNR.
- Para completar este estudio, en [41] se comprueba que la técnica de agregación de tramas es eficiente aún en medios no saturados y que por otra parte, si bien es cierto el caudal es proporcional al tamaño de trama agregada, se debe conseguir tamaños adecuados para el tamaño de A-MSDU, puesto que al incrementar la tasa de datos se incrementa además la probabilidad de errores producidos dentro del canal, finalmente Selvam et al. propone un planificador con dos niveles de agregación que tiene en cuenta estas consideraciones.

4.4 Revisión de rendimiento alcanzado con PHY 802.11n

Los grupos de investigación para el mejoramiento de la capa PHY parten de dos metas claras: enriquecer la inmunidad a los efectos del canal y lograr velocidades mayores.

Para el primer objetivo se realizó un trabajo previo por el TGn para establecer la parametrización del canal para posibles escenarios, basándose en los entornos determinados por Medbo para HIPERLAN/2 [42]. Así, se tiene 6 modelos de canal (A-F) [43] para las bandas de 2GHz y 5 GHz. En [44] se identifica los usos de cada uno de los canales (ver Tabla 4.2).

De varias experimentaciones por el mismo TGn se observa que en ambientes indoor la condición LOS no siempre se cumple y por otro lado que la presencia de obstáculos influye directamente en la degradación de la señal.

Los obstáculos pueden ser naturales o de naturaleza humana, y dependiendo del ángulo de incidencia, dimensiones físicas y características de composición de los obstáculos se puede producir uno o varios fenómenos físicos, para el objetivo de este trabajo nos interesa el efecto de reflexión y

Tabla 4.2: Escenarios para aplicación de modelos de canales TGn

Modelo	Entorno
A	Desvanecimiento plano (no multitrayecto)
B	Residencial
C	Residencial / Oficina pequeña
D	Oficina típica
E	Oficina grande
F	Espacios grandes (indoor/outdoor)

reflexión que dan paso al multipath o multitrayecto [45].

El multitrayecto hace que el receptor reciba una señal y sucesivas versiones retardadas y/o degradadas de ella misma. El nombre multitrayecto se debe a que el efecto es provocado por rebotes de la señal, aunque éste no es el único motivo posible de la ocurrencia de este efecto.

Por otra parte, se definen niveles de eficiencia espectral para cada una de las técnicas de modulación, de aquí que se tenga niveles de adaptación al canal diferentes para cada modo [46].

Con estos antecedentes, Moghe en [47] parte de la evaluación de prestaciones que una tecnología SISO tiene dentro del estándar 802.11n, donde se concluye primero que para tener un incremento sustancial de eficiencia es necesario incrementar notablemente las SNR, y en segundo lugar, que este modelo es efectivo en canales con ruido, por ejemplo AWGN; no para canales con multitrayecto, como el caso Rayleigh y Rician. De esta forma se determina que para los entornos definidos por TGn no es suficiente un esquema SISO.

Partiendo de los resultados anteriores, en [48] se analiza la contraposición con los valores de BER obtenidos para MIMO, que son menores para los canales con multitrayecto, es más, para canales con comportamiento Rician se determina que cuanto más difiera la energía entre el rayo directo y los rayos difusos, menor será el BER.

Resumiendo, en ambientes indoor la técnica MIMO aprovecha el multipath para darle un efecto constructivo a las múltiples reflexiones de la señal. Para ello es necesario mantener un sondeo constante del comportamiento del canal y realizar adaptaciones a las características de transmisión, entre ellas SM y STBC. Si bien SM es una técnica de multiplexación para aumentar la velocidad de transmisión de datos, STBC se encargan de mejorar la relación señal-ruido.

Ahora bien, en [49] se establece las ventajas de trabajar con SM para incrementar la capacidad del sistema sin incrementar potencia ni ancho de banda, sin embargo todo esto está supeditado a que dentro del medio se presenten niveles de scattering altos en contextos de desvanecimiento plano, de tal manera que se puedan aprovechar la transmisión de flujos independientes. Además, se evalúa la aplicabilidad de la codificación espacio-temporal para incrementar la eficiencia en términos de PHY, sobretodo en presencia de desvanecimiento selectivo porque se brinda una redundancia a cada flujo de datos.

Por otro lado, en [50] se estima que siempre que la distancia de separación entre las antenas que conforman el MIMO considere el mantener la ortogonalidad de los flujos se tendrán excelentes resultados para redes de larga distancia.

Para el segundo objetivo se abordan esencialmente la incorporación de más subportadoras en la modulación OFDM y el incremento del ancho de banda.

En cuanto al incremento del ancho de banda es necesario revisar las implicaciones de compatibilidad entre STA que manejan 20 MHz y STA con 40 MHz, Shrivastava et al. en [51] determina que el principal problema es la interferencia debida al overlapping entre canales, en [52] se realizaron pruebas para determinar la eficiencia en redes 802.11 heterogéneas; se comprueba que el máximo rendimiento en PHY se consigue en un esquema HT de 40 MHz tanto para AP con dos STA también en HT; luego, si las estaciones se configuran en 20 MHz HT el caudal se degrada en un 60%; mientras que, cuando las STA funcionan fuera del formato HT la degradación llega a un 78%.

Si bien es cierto 802.11n tiene compatibilidad de HT-STA y non-HT-STA, el uso del formato HT-mixed representa gastos de recursos adicionales, lo que es demostrado por Perahia en 2008 [53] a través de la evaluación de la duración de preámbulos. Para una trama 802.11a la longitud del preámbulo es de 20 *us*, para 802.11n es de 16 *us*; y para un formato mixto, con información adicional y mecanismos de protección, va de 36 *us* con un flujo espacial a 48 *us* para cuatro cadenas espaciales.

Las investigaciones sobre 802.11n son amplias y numerosas, sin embargo, estos estudios sólo se han desarrollado para redes indoor y/o mixtas (indoor-outdoor) pero de corto alcance. De lo antes expuesto se puede advertir que no existen hasta el momento investigaciones sobre el comportamiento del estándar 802.11n para redes de larga distancia, siendo un tema de especial

4. ESTADO DEL ARTE

interés para redes rurales. Entonces se define el nicho de investigación en determinar el rendimiento que tienen las principales características del nuevo estándar y determinar que contribución tendría al trabajo desempeñado por el estándar 802.11a.

5 Hipótesis

“He de hablar aquí sólo en hipótesis, diciendo no lo que sé, sino lo que supongo más probable”

Doctor Jeckill

Después de la contextualización realizada en el Capítulo 1 y luego de exponer un marco referencial suficientemente sustentado en los Capítulos 2-4; se sienta el precedente del interés que representa el análisis de 802.11n para redes de larga distancia sobretodo en zonas rurales. Así mismo, como punto de partida, se determina que en ambientes indoor se ha comprobado que a frecuencia de 5GHz y ancho de banda 20 MHz y MIMO 2x2, con 802.11n se puede conseguir velocidades de 117 Mbps, mientras que con 802.11a se tiene velocidades nominales de 54Mbps; y que para ambientes outdoor no se han realizado investigaciones al respecto para el caso de 802.11n.

Entonces, la hipótesis principal de este trabajo es:

La aplicabilidad de 802.11n en redes de larga distancia es factible, obteniéndose niveles de caudal superiores a los presentados en redes con 802.11-2007.

Además se plantean las siguientes sub-hipótesis:

1. A partir de una revisión sistemática de PHY y MAC de 802.11n es posible determinar características adaptables a enlaces de largas distancias.
2. Las mejoras presentes en el estándar IEEE 802.11n a nivel MAC para redes de larga distancia determinan incrementos en los niveles de caudal que presentan las redes con 802.11-2007.

En los capítulos siguientes se expondrá el trabajo desarrollado para comprobar dichas hipótesis, partiendo de la deducción teórica hasta llegar a la experimentación.

6 Objetivos

”Podremos saber cómo, dónde y de qué manera estamos aquí. Pero la pregunta ¿para qué? será siempre una pregunta sin respuesta.”

Paulo Coelho

6.1 Objetivo general

Contribuir a una elevación de las prestaciones que se pueden obtener en redes rurales con enlaces largos basadas en el estándar 802.11n.

6.2 Objetivo específico

Determinar qué ventajas comparativas tiene el estándar 802.11n versus 802.11a, a través de:

- una revisión sistemática del estándar, analizando el impacto que puede tener la distancia sobre el funcionamiento de cada mecanismo propuesto en éste para elevar las prestaciones, y
- experimentaciones reales y simulaciones de redes para validar las conclusiones obtenidas mediante dicha revisión.

Parte III
Materiales y métodos

7 Metodología

”No basta tener buen ingenio; lo principal es aplicarlo bien.”

René Descartes

En esta sección se describe los procedimientos bajo los cuales se realizará el trabajo de investigación. La metodología seguida consta de dos partes fundamentales: un estudio analítico basado en la revisión sistemática del estándar; y un estudio experimental del comportamiento de 802.11n en entornos de larga distancia.

En la primera sección, el objetivo es conocer qué características de 802.11n tienen aplicabilidad en redes de largas distancias librando la problemática incorporada por tener dimensiones de canal muy superiores a las consideradas por el estándar.

Para ello, es necesario partir de una revisión profunda de los mecanismos de HT que presenta 802.11n, considerando los requisitos básicos de implementación hasta llegar a las prestaciones que resultan de su incorporación. Luego es imprescindible determinar qué modelos de propagación son predominantes en redes de largas distancias y cual es su impacto previsible en el comportamiento de las características 802.11n.

En base a los resultados obtenidos analíticamente se llega a la segunda sección. La parte experimental, a su vez, consta de dos bloques:

- Evaluación de capa PHY: El alcance actual no contempla un estudio profundo de características de propagación de cada escenario, ni introducción al estudio detallado de las operaciones de procesado en MIMO, sin embargo si se intentó determinar la relevancia o no, que tiene la incorporación de la técnica MIMO en entornos rurales de larga distancia, para ello se realizó pruebas con equipos para 802.11n y una tecnología propietaria denominada Airmax, a través de inyección de flujo de saturación con la herramienta IPerf.

- Evaluación de capa MAC: En [52] se analiza la problemática para desarrollar testbeds con tecnología 802.11n, debido sobretodo al limitado acceso al firmware que determina las características del estándar. Por ello se propone realizar simulaciones de tal forma que se pueda plantear el uso de tales técnicas con un cambio de escenario para largas distancias con las modificaciones que ello implique.

Fundamentalmente, se trata de determinar el impacto que tiene la agregación de tramas en el aumento de caudal a través de simulación. Para ello en una fase inicial es necesario justificar la selección de la herramienta de simulación basándose en viabilidad, evolución, módulos disponibles y soporte. Posteriormente, es necesario establecer una fase de validación de resultados para configuraciones básicas de redes y así poder determinar índices de confiabilidad para el modelo de simulación.

Luego se pone de manifiesto la evaluación específica del estándar para redes de larga distancia, la técnica empleada para dicho fin será la simulación del estándar a través de Network Simulator 3 (NS-3), con características de saturación y modificación de tiempos ACKTimeout y SlotTime que tiendan a evitar las retransmisiones debidas a tiempos de propagación muy largos. Además, será necesaria la adaptación de módulos de agregación de tramas y modelo de pérdidas de propagación para adaptarlos a los requerimientos de larga distancia; y por otro lado, será necesaria la programación de scripts de simulación en relación a tamaño de canales, número de paquetes, tamaño de agregación, etc.

El tráfico empleado para la experimentación será unidireccional, pues luego de varios intentos por conseguir generar tráfico bidireccional, esta opción se ha descartado por los errores de ejecución que se manifestaban en el simulador al cambiar los tamaños de paquetes.

Ya entrados en pruebas, primero se realizan iteraciones de simulación que permitan determinar la respuesta del caudal en relación a distancia y número de paquetes donde se compara resultados obtenidos para la MAC de 802.11a versus A-MPDU 802.11n; luego la idea es contemplar iteración con tamaño de agregación variable para así poder determinar el tamaño óptimo para obtener el mayor caudal.

Finalmente se confrontarán todos los valores con el propósito de contrastar la respuesta teórica y la práctica; para luego extraer resultados bastante fiables y sobretodo replicables. Con los resultados, se pretende poder

realizar recomendaciones para trabajos futuros y, de llegar a comprobarse la hipótesis planteada, proponerse un mejoramiento en la tecnología utilizada para redes rurales.

8 Preparación de pruebas de enlace

En el mes de mayo de 2010 se realizaron experiencias de campo en la Universidad Rey Juan Carlos, con el fin de determinar el impacto previsible de la tecnología 802.11n en redes de largas distancias, para lo cual se procedió a realizar pruebas cortas en interiores (100cm) y poder determinar niveles típicos de caudal. Más tarde, se desarrolló una experiencia de campo para largas distancias entre el Cerro Cruces (Toledo) y Puerto Miravete (Cáceres), localizados en $40^{\circ}08'26.2''\text{N } 04^{\circ}43'27.1''\text{O}$ y $39^{\circ}42'54.9''\text{N } 05^{\circ}44'53.6''\text{O}$, respectivamente, separados aproximadamente 100 Km (ver Figura 8.1).

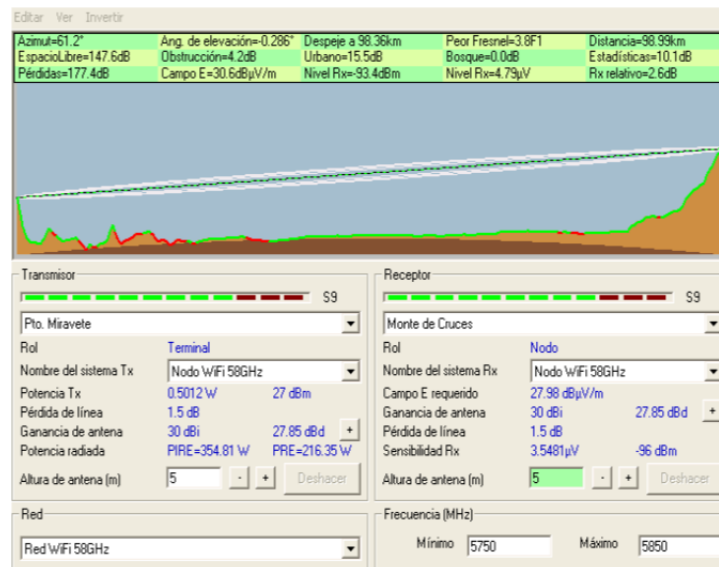


Figura 8.1: Perfil enlace Cerro Cruces-Puerto Miravete

Los modos contemplados son los definidos en la Sección 11.1 *Definición de modos de pruebas*.

Los equipos utilizados para ello son: 2 equipos portátiles con la herramienta IPerf[54] y dispositivos Rocket MD5 2x2 [55] con antenas para 5GHz que pueden trabajar con estándar 802.11a y 802.11n-draft 2.0 (ver

Tabla 8.1).

Los equipos Rocket M5, además, disponen de la tecnología Airmax para exteriores, que esencialmente utiliza capa física MIMO igual que 802.11n pero método de acceso TDMA a diferencia del estándar WiFi, con esta tecnología también se realizan algunas pruebas.

Tabla 8.1: Características de equipos Rocket M5

Estándar	802.11a		802.11n	
	Data rate (Mbps)	Sensibilidad (dBm)	Potencia (dBm)	Sensibilidad (dBm)
6	94	27	96	27
12	94	27	95	27
18	94	27	92	27
24	94	27	90	27
36	80	26	86	26
48	77	24	83	24
54	75	22	77	22
13	NA	NA	95	27
26	NA	NA	93	27
39	NA	NA	90	27
52	NA	NA	87	27
78	NA	NA	84	26
104	NA	NA	79	24
117	NA	NA	78	22

NA: No aplica

Para las pruebas realizadas se parte de la planificación en Radio Mobile[56], verificando uno a uno los modos funcionales para la prueba en largas distancias, con lo cual se obtiene cuatro posibles configuraciones MCS0, MCS1, MCS8 y MCS9, tanto para 20 MHz como para 40 MHz de ancho de banda y con intervalo de guarda de 800 ns.

```
patricia@patricia-laptop:~$ iperf -s -u -i5 -f1472 -fk
-----
Server listening on UDP port 5001
Receiving 1470 byte datagrams
UDP buffer size: 110 KByte (default)
-----
[ 3] local 192.168.1.21 port 5001 connected with 192.168.1.11 port 58486
-----
```

Figura 8.2: Ejemplo de inyección de flujo *IPerf* rol servidor

```

patricia@patricia-laptop:~$ iperf -c 192.168.1.11 -u -l 1472 -i5 -t60 -b 4M -fk -d
-----
Client connecting to 192.168.1.11, UDP port 5001
Sending 1472 byte datagrams
UDP buffer size: 110 KByte (default)
-----
[ 5] local 192.168.1.21 port 45605 connected with 192.168.1.11 port 5001
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 5] 0.0- 5.0 sec  2442 KBytes   4001 Kbits/sec
[ 3] 0.0- 5.0 sec   102 KBytes    167 Kbits/sec  67.244 ms 6042/ 6113 (99%)
[ 5] 5.0-10.0 sec  2441 KBytes   3999 Kbits/sec
[ 3] 5.0-10.0 sec   96.2 KBytes    158 Kbits/sec  76.149 ms 1975/ 2042 (97%)
[ 5] 10.0-15.0 sec  2442 KBytes   4001 Kbits/sec
[ 3] 10.0-15.0 sec   103 KBytes     169 Kbits/sec  68.396 ms 1471/ 1543 (95%)
[ 5] 15.0-20.0 sec  2441 KBytes   3999 Kbits/sec
[ 3] 15.0-20.0 sec   83.3 KBytes    136 Kbits/sec  70.602 ms 1481/ 1539 (96%)
[ 5] 20.0-25.0 sec  2441 KBytes   3999 Kbits/sec
[ 3] 20.0-25.0 sec   17.2 KBytes    28.2 Kbits/sec 126.871 ms 1525/ 1537 (99%)
[ 5] 25.0-30.0 sec  2442 KBytes   4001 Kbits/sec
[ 3] 25.0-30.0 sec   37.3 KBytes    61.2 Kbits/sec 180.581 ms 1510/ 1536 (98%)
[ 5] 30.0-35.0 sec  2441 KBytes   3999 Kbits/sec
[ 3] 30.0-35.0 sec   41.6 KBytes    68.2 Kbits/sec 115.307 ms 1536/ 1565 (98%)
[ 5] 35.0-40.0 sec  2441 KBytes   3999 Kbits/sec
[ 3] 35.0-40.0 sec   34.5 KBytes    56.4 Kbits/sec  56.211 ms 2022/ 2046 (99%)
[ 3] 40.0-45.0 sec   33.0 KBytes    54.1 Kbits/sec  65.491 ms 1511/ 1534 (99%)
[ 5] 40.0-45.0 sec  2442 KBytes   4001 Kbits/sec
[ 5] 45.0-50.0 sec  2441 KBytes   3999 Kbits/sec
[ 5] 50.0-55.0 sec  2441 KBytes   3999 Kbits/sec
[ 5] 55.0-60.0 sec  2442 KBytes   4001 Kbits/sec
[ 5] 0.0-60.0 sec 29299 KBytes  4000 Kbits/sec
[ 5] Sent 20382 datagrams

```

Figura 8.3: Ejemplo de log de salida *IPerf* rol cliente

La herramienta *IPerf* funciona en estructura cliente-servidor, por lo que es necesario determinar los roles específicos para cada ordenador (ver Figura 8.2 y Figura 8.3) y añadir las siguientes opciones:

Rol servidor: Se activa para "escuchar" los requerimientos del cliente.

- s definir rol de servidor.
- u definir tráfico UDP (por defecto TCP).
- i definir intervalo en segundos para reportes de medida.
- f(bkmBKB) definir formato para presentar resultados en bps, Kbps, Mbps, Bps, KBps, MBps.

Rol cliente: Realiza las consultas al servidor.

- c definir rol de cliente, a continuación se escribe la dirección IP del servidor.
- u definir tráfico UDP (por defecto TCP).
- l definir tamaño de buffer de lectura o escritura (por defecto 8KB).
- b (KM)] definir ancho de banda de transmisión en bps (por defecto

1Mbps).

-d definir que se realice un test bidireccional simultáneo.

-t definir tiempo en segundos que dura la transmisión (por defecto 10s).

-i definir intervalo en segundos para reportes de medida.

-f(bkmBKB) definir formato para presentar resultados en bps, Kbps, Mbps, Bps, KBps, MBps.

Para la definición de la longitud del buffer se considera el tamaño máximo de 1500 bytes sin cabecera UDP(8 bytes)/TCP(20 bytes) y sin direcciones IP (20 bytes), cuyo resultado es 1472 bytes y 1460 bytes, respectivamente.

En el formato de reporte se dispone de 7 columnas que en su orden son: identificador, intervalo de tiempo, bytes transmitidos, ancho de banda, jitter, Datagramas perdidos/Datagramas totales y porcentaje. Al final del reporte se dispone el número total de bytes transmitidos y el caudal, por ello es necesario disponer de logs en ambos sentidos de la comunicación.

Para las pruebas en todos los casos se utiliza la técnica de saturación por sondeo, que consiste en inyectar tráfico a partir de un valor cercano a la velocidad nominal del modo que se encuentra a prueba, e ir incrementando esta cantidad paulatinamente hasta conseguir el máximo caudal; el valor de flujo con el que se obtenga este máximo es el denominado punto de saturación.

9 Software de simulación

”Siempre es preferible hablar con franqueza sin querer presentar muchas pruebas; todas las pruebas que alegamos no son sino otras tantas variantes de nuestra opinión.”

Goethe

Las herramientas para simulación de redes se usan para probar configuraciones, módulos, topologías, etc. en cuanto a rendimiento y operación, antes de ser implementadas en una red real.

En la actualidad, existe una gran variedad de simuladores de red disponibles, éstos van desde los más básicos a los más complejos, desde los más elaborados a los más sencillos y desde los licenciados a los de uso libre.

Para el presente proyecto se evaluaron tres de estos simuladores (Qualnet, NS-2 y NS-3). En esta sección se pretende determinar el proceso para selección de un simulador sobre otros disponibles.

9.1 Requisitos

Los requisitos que se evalúan para seleccionar el simulador ha utilizar son:

- **Licenciamiento:** Determina si se debe adquirir un contrato para poder utilizar el software, esto implica el conocimiento de cláusulas como: acceso a módulos, tiempo de vigencia, garantías, respaldo técnico, etc.
- **Plataforma:** Implica determinar sobre que sistema operativo debe ser montado el software de simulación, entre ellos: Windows, Linux y MacOS.
- **Interfaz gráfica GUI:** La disponibilidad de interfaz gráfica es una ventaja, siempre y cuando el uso de la misma no disminuya la potencialidad del software.

- Soporte: Determina el grado de respaldo que se tenga para la aplicación e incluso modificación de la herramienta, en este aspecto interesa conocer: existencia de un equipo de respaldo propio del fabricante del software, grupo de desarrolladores, comunidad de usuarios, foros, wikis, etc.
- Protocolos inalámbricos: El simulador que se selecciona debe tener soportados módulos específicos para redes inalámbricas, que cumplan con los estándares para PHY y MAC.
- Modelado de propagación: Es importante para simular redes inalámbricas el modelado de propagación puesto que influye directamente en el rendimiento de las mismas.
- Modelado de pérdidas por retardo: Además de considerar los efectos del medio inalámbrico para el cálculo de caudal, es necesario incluir el efecto de retardo que adiciona la distancia de separación entre dispositivos, más aún cuando las redes en estudio son de larga distancia, sobre los 10 Km.
- Análisis de trazas: La herramienta seleccionada debe permitir realizar una evaluación del funcionamiento integral del escenario en prueba, los parámetros de interés son: caudal, paquetes perdidos, retardo y jitter con diferentes puntos de referencia tanto en capa 1 como en capa 2.
- Módulos reconfigurables: El tema de investigación implica extender la aplicabilidad del estándar 802.11n desde las redes indoor e indoor-outdoor de corto alcance; por ello será necesario modificar parámetros contenidos en módulos propios tanto para el estándar como para los modelos de propagación; siendo necesario que la herramienta permita tener un mínimo grado de flexibilidad.
- Módulos para 802.11n: Se tomará ventaja de módulos desarrollados para incorporar características 802.11n que sean validadas.

9.2 Evaluación de simuladores

Primero se realizará un breve repaso por cada uno de los simuladores propuestos, para luego evaluar el cumplimiento individual de los requisitos mencionados.

9.2.1 Qualnet

Qualnet [57] es un simulador de redes con licenciamiento comercial, sin embargo, tiene licencias temporales especiales para fines académicos. Es multiplataforma, manejado por Linux, MacOS y Windows.

Utiliza computación distribuída por lo que obtiene tiempos de simulación bastante reducidos, por otra parte se pueden incorporar módulos customizados siempre y cuando mantenga la estructura propia del software.

Tiene una potente interfaz gráfica y se pueden realizar simulaciones en 2D y 3D muy conveniente para comunicaciones móviles.

9.2.2 Network Simulator 2

Network Simulator 2 (NS-2) [58] es un simulador basado en eventos creado por la Universidad de Berkeley que se distribuye con licencia GNU. Esta herramienta está programada en C++, pero utiliza scripts en oTcl para definir los escenarios de simulación, a través de clases para definir los objetos de la simulación.

Es capaz de manejar protocolos TCP y UDP, además de varios protocolos a nivel de aplicación.

NS-2 posee una herramienta para realizar animaciones de las simulaciones realizadas, network Animator NAM y por otro lado, permite extraer trazas de resultados del tipo .tr para su posterior análisis.

9.2.3 Network Simulator 3

Network Simulator 3 (NS-3) [59] es un simulador de código abierto que se maneja con licencia GNU-GPLv2. Los scripts para simulación se basan en eventos discretos y utilizan programación orientada a objetos en C++ o en Python. Esta herramienta está disponible para plataformas Linux fundamentalmente, pero puede ser montado sobre OS X y Windows a través de Cygwin¹.

Permite tener dos métodos de prueba: el primero es creando dispositivos y montando sobre ellos interfaces para la simulación; y el segundo, es asociando al NS-3 máquinas reales para crear pruebas.

¹<http://www.cygwin.com/>

Otra de sus ventajas es que cuenta con un potente módulo de trazas, que permite el análisis tanto de flujos como de datos trama a trama, para lo cual maneja los formatos .tr y .pcap.

En cuanto a su desventajas, se centran fundamentalmente en la carencia de interfaz gráfica propia, sin embargo permite asociarle varias herramientas de animación como NetAnim.

9.2.4 Selección del simulador

Para la evaluación de los simuladores se utiliza la técnica de valoración cuantitativa, de tal forma que se pueda asignar un puntaje entre 0 y 5 a cada una de las características de acuerdo al porcentaje de cumplimiento del parámetro específico (Tabla 9.1).

Tabla 9.1: Cuadro de evaluación de simuladores

Característica	Qualnet	NS-2	NS-3
Licenciamiento	2	5	5
Plataforma	5	5	5
Interfaz gráfica	5	0	0
Soporte	5	4	4
Protocolos inalámbricos	5	5	5
Modelado de propagación	4	3	4
Modelado de pérdidas por retardo	3	2	4
Análisis de trazas	5	5	4
Módulos reconfigurables	3	5	5
Módulos para 802.11n*	0	0	5
Valoración total	37	34	41

* Módulo ACK de bloque y Módulo de agregación de tramas

De acuerdo a la valoración dada la herramienta seleccionada es NS-3 sobretodo por la disponibilidad de módulos bajo el estándar 802.11n adaptables al tema central de esta investigación.

10 Preparación del simulador

”La inteligencia ... es la facultad de hacer objetos artificiales, sobretodo herramientas para hacer herramientas”

Henry Bergson

La adaptación y validación de la herramienta es importante para garantizar los resultados obtenidos del trabajo que se desarrolla sobre redes; ya en trabajos anteriores se han evaluado los modelos utilizados por NS-3 para 802.11b [60] y 802.11a/g [61] para entornos WLAN, pero queda pendiente la evaluación de éstos para redes WiLD.

Entonces, primero se deben identificar los módulos NS-3 que influyen directamente en el alcance máximo permitido para luego determinar que la extensión del modelo a largas distancias no modifica sustancialmente las respuestas de los modelos para 802.11a.

NS-3 dispone del modelo Yet Another Network Simulator (YANS) [62] que se utilizará para la preparación del simulador, puesto que implementa las capas MAC y PHY de 802.11a de manera sencilla y es fácilmente modificable.

En esta sección, se identifica los parámetros modificables dentro de los módulos ns-3 y se acondiciona sus valores para su correcto funcionamiento en escenarios de largas distancias. Finalmente, se detalla un esquema básico de pruebas de validación de cambios y se describen los resultados obtenidos.

10.1 Determinación de modificaciones para largas distancias

La incorporación de mayores distancias de pruebas conduce a tener que realizar ciertas modificaciones en los parámetros de funcionamiento de cada estándar y considerar el balance de enlace necesario. En [63] Simó et al. realiza un análisis profundo de las limitantes para cada capa dentro del estándar 802.11, en esta sección se destacarán algunas observaciones impor-

tantes referidas a este trabajo.

A nivel de capa PHY las restricciones no provienen del estándar mismo, sino más bien de la legislación y la disponibilidad de equipos en el mercado para alcanzar largas distancias. Es de singular importancia la definición de potencias de transmisión, umbral de recepción y margen de desvanecimiento, todos ellos relacionados en la expresión 10.1 para el cálculo de la potencia de recepción P_r .

$$P_r(\text{dB}) = P_t - L_{cct} + G_t L_p + G_r - L_{ccr} > S_{Rx} + M \quad (10.1)$$

donde P_t es la potencia de transmisión, G_t y G_r son las ganancias de antenas de transmisión y recepción respectivamente, L_{cct} y L_{ccr} son las pérdidas de conectores y líneas en transmisión y recepción respectivamente, L_p las pérdidas de propagación, S_{Rx} sensibilidad del equipo de recepción y M margen de desvanecimiento, todos en dB.

A nivel de capa MAC, la definición de tiempos para el funcionamiento del mecanismo de acceso al medio imponen restricciones al alcance máximo. Tiene fundamental interés la modificación del ACKTimeout cuyo valor determina el tiempo que el transmisor espera por la llegada de una trama ACK confirmando la transmisión de una trama de datos, caso contrario vuelve a transmitir la trama.

En la publicación del estándar 802.11-2007 *Sección 9.2.8 ACK procedure*, se establece que el valor de ACKTimeout se obtiene de la expresión (Ec.10.2).

$$\text{ACKTimeout}_{std} = \text{SIFS} + \text{SlotTime} + \text{aPHY-RX-START-Delay} \quad (10.2)$$

donde *aPHY-RX-START-Delay* tiene valores específicos para cada técnica de modulación definida para PHY, por ejemplo 128 μs para FHSS, 192 μs para DSSS y HR, 25 μs para OFDM y 24 μs para ERP-OFDM.

En el trabajo de Simó se realiza una definición formal del valor para ACKTimeout en relación a aumentar el alcance máximo (Ec.10.3).

$$\text{ACKTimeout} = 2\delta + \text{SIFS} + \text{SlotTime}_{std} + \text{PLCPPreamble} + \text{PLCPHeader} \quad (10.3)$$

donde 2δ es el tiempo de propagación de ida y vuelta, $PLCP\text{Preamble}$ y $PLCP\text{Header}$ son el tiempo de recepción del preámbulo y cabecera PLCP respectivamente cuya suma es equivalente a $aPHY\text{-RX-START-Delay}$, los valores para $SIFS$ y $SlotTime_{std}$ se han definido anteriormente en la Tabla 2.2 para cada estándar.

10.2 Adaptación de capa MAC

En una evaluación del modelo NS-3 para manejo de capa MAC, se determina que los parámetros para nivel 2 sustancialmente son configurados en el archivo `wifi-mac.cc` en la Tabla 10.1 se tiene un detalle de las principales alteraciones para adaptar el modelo a largas distancias.

Tabla 10.1: Parámetros de configuración capa MAC

Parámetro	Descripción	Valor por defecto en NS-3 (1 Km)	Valor máximo definido (100 Km)
CtsTimeout	Tiempo cuya expiración determina cuando se considera que handshake RTS/CTS ha fallado (ns)	75000	735666
ACKTimeout	Tiempo cuya expiración determina cuando se considera que handshake DATA/ACK ha fallado (ns)	75000	735666
SIFS	Valor definido por el estándar 802.11 (ns)	16000	16000
SlotTime	Duración de un slot definido para cada estándar 802.11 (ns)	9000	300000*2
PIFS	Valor definido por el estándar 802.11 (ns)	25000	25000
MaxPropagationDelay	Tiempo de retardo de propagación máximo (ns)	3333	333333
Ssid	Service Set Identifier	default	default

Es de especial interés el parámetro de retardo de propagación máximo, porque depende de este valor la modificación de los timeout para ACK y CTS, de acuerdo a las expresiones 10.4 y 10.5.

$$\text{ACKTimeout} (\mu\text{s}) = \text{SIFS} + \text{CtsACKDelay} + 2 * (\text{MaxPropagationDelay}) + \text{SlotTime}_{std} \quad (10.4)$$

$$\text{CtsTimeout} (\mu\text{s}) = \text{SIFS} + \text{CtsACKDelay} + 2 * (\text{MaxPropagationDelay}) + \text{SlotTime}_{std} \quad (10.5)$$

donde CtsACKDelay para 802.11a con tasa de transferencia 6 Mbps es $44 \mu\text{s}$ y para 802.11b/g es de $304 \mu\text{s}$ con tasa de transferencia 2 Mbps; el valor $\text{MaxPropagationDelay}$ depende de la distancia de prueba y los valores

para *SIFS* y *SlotTime_{std}* se han definido anteriormente en la Tabla 2.2 para cada estándar. En la Figura 10.1 se ejemplifican las configuraciones para la extensión del modelo en MAC para WiLD a 100 Km.

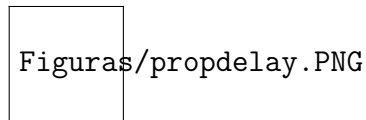


Figura 10.1: Modificación para tiempo de retardo por propagación

Las largas distancias exigen, además, la ampliación de las ranuras de tiempo que determinan los periodos de espera en cada transmisión, este parámetro es directamente proporcional al retardo de propagación, pues debe asegurar tiempo suficiente para considerar el retardo de ida y vuelta a cada una de las distancias de prueba, en el trabajo de Simó se demuestra con suficiente evidencia que para enlaces PtP bidireccionales los valores de *SlotTime* deben estar contenidos entre 1-2 veces el tiempo de propagación.

Es preciso recalcar las siglas *std* en las ecuaciones anteriores, puesto que el efecto del retardo de propagación debe ser considerado solo una vez en cada expresión; es decir, si se trabaja con el *SlotTime* modificado en la expresión no es necesario sumar el retardo por distancias. En el anexo B se dispone de una tabla con valores para cada una de estas variables.

10.3 Aseguramiento de características a nivel PHY

En el módulo *yans-wifi-phy.cc* se configuran los parámetros de enlace necesarios para establecer una comunicación inalámbrica, en la Tabla 10.2 se detallan los valores por defecto y los modificados para cada uno de ellos, en base al cálculo de enlace para 100 Km y con valores referenciados a equipos disponibles en el mercado.

10.4 Adaptación del modelo de propagación

El NS-3 utiliza Log-distance como modelo de propagación por defecto para el cálculo de las pérdidas de propagación cuando se utiliza el módulo *yans-wifi-helper.cc* (Figura 10.2).

Tabla 10.2: Parámetros de configuración capa física

Parámetro	Descripción	Valor por defecto	Valor modificado
Energy Detection Threshold	Umbral sobre el cual debiera estar la energía de la señal recibida para poder ser detectada(dBm)	-96	-75
CcaModel Threshold	Umbral sobre el cual la señal recibida debe estar para que el canal sea considerado en estado "BUSY"(dBm)	-99	-99
TxGain	Ganancia de la antena de transmisión (dB)	1	16
RxGain	Ganancia de la antena de recepción (dB),	1	24
TxPowerLevels	Número de niveles de potencia de transmisión disponibles	1	1
TxPowerEnd	Nivel de potencia de transmisión máximo disponible (dbm)	16.0206	24.0206
TxPowerStart	Nivel de potencia de transmisión mínimo disponible (dbm)	16.0206	24.0206
RxNoiseFigure	Figura de ruido definida como pérdida (dB)	7	7

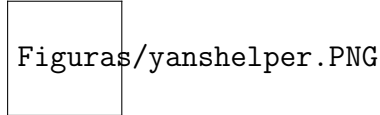


Figura 10.2: Definición de modelo de retardo y pérdidas para YANS

Este modelo indica que la potencia de recepción promedio decrece logarítmicamente con la distancia [64], a través de las siguientes expresiones:

$$L(\text{dB}) = L_0 + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (10.6)$$

donde L_0 son las pérdidas de referencia a una distancia d_0 , n es el exponente que determina la tasa con la cual las pérdidas incrementan con la distancia dependiendo del entorno de propagación particular, d es la distancia de separación entre transmisor y receptor; y d_0 distancia de referencia cercana al transmisor dentro de la región Fraunhofer.

El cálculo de las pérdidas de referencia se realizan en base al modelo Friis, de tal forma que se tiene la siguiente expresión:

$$L_0(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = 10 \log \left(\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right) \quad (10.7)$$

donde G_t y G_r son las ganancias de antenas de transmisión y recepción respectivamente, λ es la longitud de onda para la frecuencia de operación, y d distancia de separación entre transmisor y receptor.

Este modelo es extensible para medios con desvanecimiento, a través de incrementar el factor de shadowing $X\sigma$ [64], definido como una variable

aleatoria con determinada desviación estándar, así la expresión quedaría como:

$$L(\text{dB}) = L_0 + 10n\log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (10.8)$$

En el módulo `propagation-loss-model.cc` se da valores de distancia y pérdidas básicas referidas a 1m que para condiciones WLAN son válidas, sin embargo, en el esquema de esta investigación no son adecuadas. Para enlaces largos la distancia de referencia suele ser de 1000 m y con ello se obtiene la nueva pérdida de referencia en 58.42 dB.

10.5 Validación de NS-3 para WiLD

La primera validación que se realiza es comprobar que el simulador responde a los cambios para ranuras de tiempo; para ello se inyecta tráfico de saturación en tramas de 1500 bytes. En la Figura 10.5 se puede observar el caudal con el tamaño de ranura variable para distancias entre 0 y 100Km (ver Anexo C Tablas C.1 y C.4).

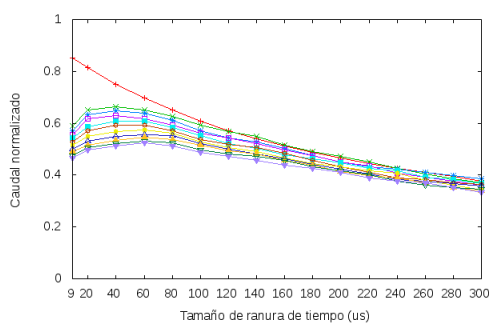
Se evidencia que al tener un flujo unidireccional las curvas de caudal no se cortan, sin embargo se puede observar que la modificación del SlotTime en el NS-3 afecta el comportamiento de la respuesta del caudal. Los valores tienen un máximo de caudal bajo los 100 *useg* y a partir de ello tienden a estabilizarse, pues al agrandar las ranuras de tiempo se añade retardos en la transmisión.

La segunda validación se orienta a comprobar que la implementación en NS-3 del estándar 802.11 presenta resultados aceptables. Para ello, realizadas las adaptaciones para largas distancias mencionadas en las secciones anteriores, se prepara un escenario de pruebas de dos estaciones en modo Ad-Hoc con un flujo de datos de 60 Mbps y tamaño de paquetes entre 500 y 1500 bytes ¹, para todas los niveles de tasa de transmisión de 802.11a con distancias entre 0 y 100 Km en saltos de 5 Km.

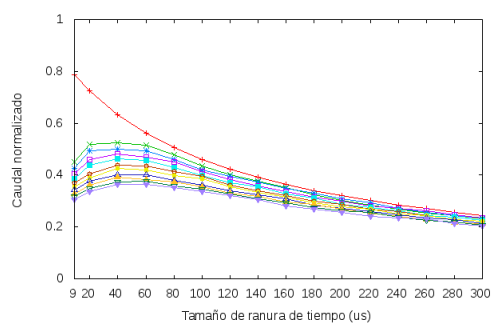
Los valores obtenidos se detallan en el Anexo C (Tablas C.5 y C.6), los datos en la Tabla 10.3 resumen los resultados para las velocidades obligatorias del estándar 802.11a, adicionalmente se considera el comportamiento para 54Mbps.

¹Referenciando a valores estándar para comunicaciones VoIP y conexiones a redes Ethernet

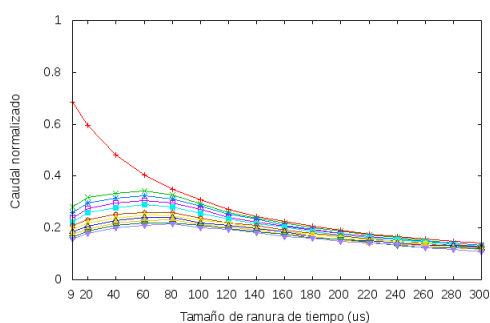
10.5. Validación de NS-3 para WiLD



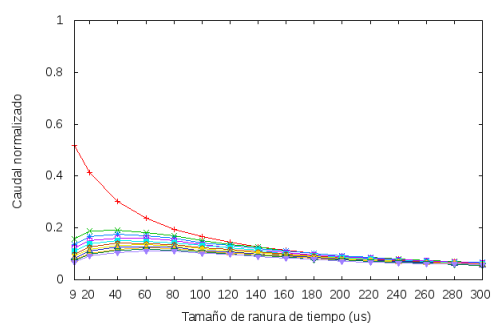
(a) Caudal normalizado para 6 Mbps



(b) Caudal normalizado para 12 Mbps

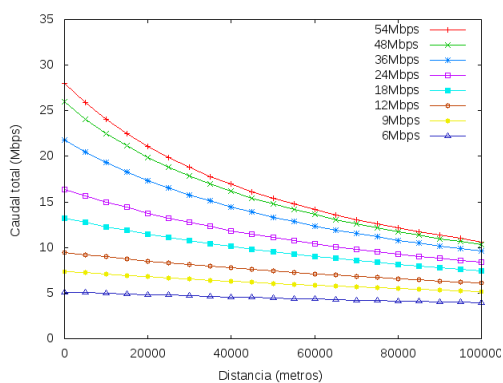


(c) Caudal normalizado para 24 Mbps

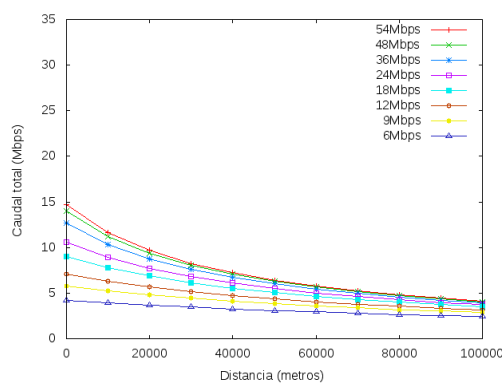


(d) Caudal normalizado para 54 Mbps

Figura 10.3: Caudal versus tamaño de ranura para 6, 12, 24 y 54 Mbps



(a) Tamaño de trama 1500 bytes



(b) Tamaño de trama 500 bytes

Figura 10.4: Caudal para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia

La Figura 10.5 presenta las tendencias del comportamiento del caudal para dichas condiciones, en ella se puede evidenciar que la afectación es mu-

10. PREPARACIÓN DEL SIMULADOR

Tabla 10.3: Caudal en Mbps para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia con tamaño de trama variable

Velocidad nominal	54Mbps		24Mbps		12Mbps		6Mbps	
	1500	500	1500	500	1500	500	1500	500
0 Km	27.98	14.66	16.40	10.56	9.44	7.05	5.12	4.23
10 Km	24.07	11.68	14.96	8.92	8.97	6.27	4.98	3.94
20 Km	21.13	9.65	13.78	7.72	8.50	5.64	4.83	3.69
30 Km	18.80	8.27	12.74	6.77	8.13	5.15	4.69	3.46
40 Km	16.94	7.23	11.86	6.08	7.75	4.73	4.58	3.27
50 Km	15.42	6.41	11.12	5.49	7.40	4.36	4.46	3.09
60 Km	14.14	5.77	10.43	5.01	7.12	4.05	4.35	2.93
70 Km	13.05	5.24	9.84	4.60	6.83	3.78	4.23	2.79
80 Km	12.12	4.80	9.32	4.27	6.56	3.55	4.13	2.66
90 Km	11.34	4.43	8.82	3.97	6.33	3.35	4.03	2.54
100 Km	10.62	3.50	8.40	3.20	6.09	2.90	3.95	2.29

cho mas sensible para distancias hasta 30 Km, desde donde el caudal empieza a seguir una tendencia hacia la linealidad. Por otra parte, el tamaño de paquetes en un flujo unidireccional determina directa proporcionalidad en el incremento del caudal.

Tabla 10.4: Caudal normalizado para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia con tamaño de trama variable

Velocidad nominal	54Mbps		24Mbps		12Mbps		6Mbps	
	1500	500	1500	500	1500	500	1500	500
0 Km	0.52	0.27	0.68	0.44	0.79	0.59	0.85	0.71
10 Km	0.45	0.22	0.62	0.37	0.75	0.52	0.83	0.66
20 Km	0.39	0.18	0.57	0.32	0.71	0.47	0.80	0.62
30 Km	0.35	0.15	0.53	0.28	0.68	0.43	0.78	0.58
40 Km	0.31	0.13	0.49	0.25	0.65	0.39	0.76	0.54
50 Km	0.29	0.12	0.46	0.23	0.62	0.36	0.74	0.51
60 Km	0.26	0.11	0.43	0.21	0.59	0.34	0.72	0.49
70 Km	0.24	0.10	0.41	0.19	0.57	0.32	0.71	0.47
80 Km	0.22	0.09	0.39	0.18	0.55	0.30	0.69	0.44
90Km	0.21	0.08	0.37	0.17	0.53	0.28	0.67	0.42
100 Km	0.20	0.06	0.35	0.13	0.51	0.24	0.66	0.38

Luego es conveniente realizar un estudio del caudal normalizado, en el Anexo C (Tablas C.7 y C.8) se tienen los valores para la totalidad de las pruebas, los datos en la Tabla 10.4 resumen los resultados para cuatro velocidades; como era de esperar se tienen niveles más bajos de caudal normalizado para velocidades nominales mayores debido a que las sensibilidad del receptor es más restrictiva cuanto mayor es la velocidad de transmisión.

En la Figura 10.5 se comprueba que mientras más rápida es la tasa de transmisión, ésta presenta mayor afectación al incremento de la distancia.

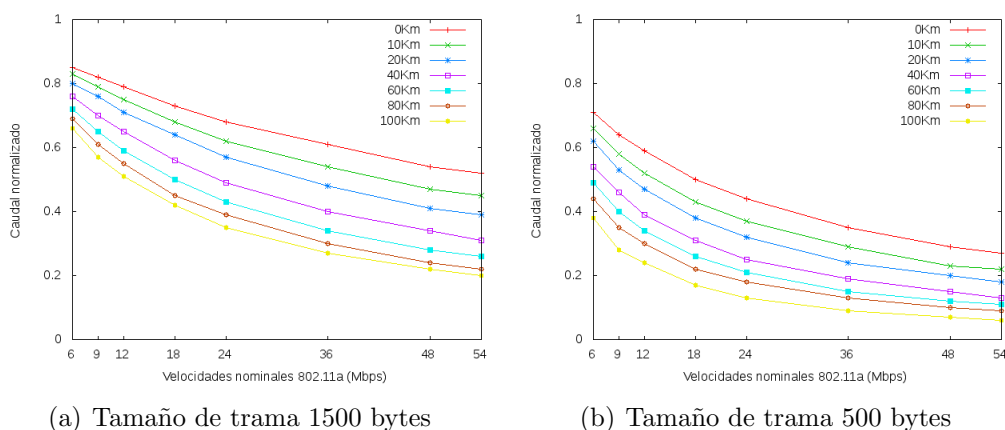


Figura 10.5: Caudal normalizado para distintas distancias en función de tasa de transferencia

Con las tendencias presentadas en cada una de las pruebas se considera validada la herramienta para el estándar 802.11a en el rango de 0 a 100Km, y por ende plausible de ser utilizada en este trabajo de investigación, puesto que se utilizará en esencia PHY 802.11a y MAC 802.11n.

Resta por puntualizar que, salvo que se indique lo contrario, los cambios referidos en esta sección se mantienen a lo largo de las iteraciones siguientes; con el fin de asegurar la extensión del modelo a largas distancias y los niveles de señal a ruido suficientes para mantener un enlace aceptable.

11 Esquemas de pruebas de simulación

”Para alcanzar algo que nunca has tenido,
tendrás que hacer algo que nunca hiciste”

Albert Einstein

En esta sección, se pone de manifiesto la construcción de escenarios de pruebas para abordar los objetivos propuesto para este trabajo de investigación, y que son resueltos en base a la operación del simulador de red ns-3.

Se parte de la selección de esquemas de modulación y definición de variables independientes acorde a los estándares 802.11 a y n; luego se disponen pruebas diseñadas para evaluar el efecto que tiene la variación de características MAC en el caudal total.

11.1 Definición de modos de pruebas

Los modos disponibles en 802.11n como se revisó en la Sección 3.2.4 son 127, teniendo principal relevancia los 15 primeros modos (ver Anexo A); sin embargo, para el presente trabajo se consideran únicamente los modos que tienen esquemas similares a 802.11a en cuanto a modulación y código de errores, es decir, los modos del 0 al 6 (ver Tabla 11.1); con ancho de banda de 20MHz e intervalo de guarda de 400ns.

Por otra parte, para las simulaciones se evalúan las respuestas SISO para ambas tecnologías, debido a que la NS-3 no tiene implementados módulos para el modelado de canales MIMO.

Finalmente, se consideran las tasas de transmisión obligatorias para 802.11a, esto es: 6, 12 y 24 Mbps; adicionalmente se incorpora 54 Mbps.

En la Sección 3.1 se establecieron diferencias entre STA-HT que cumplen el estándar 802.11n en su totalidad y STA para compatibilidad con estándares anteriores; las primeras se enmarcan en la definición de QoS, pues ya se aclaró que para tener los mejores niveles de caudal es necesario que todos

11. ESQUEMAS DE PRUEBAS DE SIMULACIÓN

los dispositivos trabajen con las mismas capacidades. Por ello, para las iteraciones en 802.11n es necesario configurar un esquema de QoS para capa PHY y MAC.

Tabla 11.1: Selección de modos de operación

Estándar		802.11a	802.11n			
Modulación	CR	DR (Mbps)	Modo	DR (Mbps)	Modo	DR (Mbps)
BPSK	1/2	6	0	6.5	8	13
QPSK	1/2	12	1	13	9	26
QPSK	3/4	18	2	19.5	10	39
16-QAM	1/2	24	3	26	11	52
16-QAM	3/4	36	4	39	12	78
64-QAM	2/3	48	5	52	13	104
64-QAM	3/4	54	6	58.5	14	117

CR: Coding rate

DR: Data rate

11.2 Parámetros generales

Para determinar la tasa de paquetes exitosos/paquetes perdidos como se detalla en [65], se considera el BER teórico de acuerdo al tipo de modulación, velocidad de transmisión y código convolucional utilizado, y con fórmulas específicas para variados canales, entre ellos: AWGN, Slow-fading, Fading y Fast-fading.

Los campos Fragmentation Threshold y de RTS Threshold se ajustan a 2346 y 3000, respectivamente, por ser los valores por defecto definidos en el Anexo D de [4] y porque con ellos se asegura que, primero no existan fragmentaciones cuando se emplea la agregación de tramas y, segundo, que RTS se desactive por no ser eficiente en largas distancias.

Todas las pruebas se realizan en condiciones de saturación con aseguramiento del 1% mínimo.

11.3 Escenario: Entorno sin colisiones, flujo unidireccional

El escenario está compuesto de dos dispositivos 802.11n en una red Ad-Hoc .

11.3.1 Prueba 1: Impacto del tamaño de paquete

La primera prueba a realizar es en relación al tamaño de paquete óptimo para conseguir el mayor caudal posible con la técnica de agregación de tramas.

Para ello se definen el tamaño del paquete entre 100 y 2000 bytes, pues como se revisó en la Sección 3.2.2 el máximo número de octetos para un MSDU es de 2304, para conseguir una granularidad suficientemente fina se consideran pasos de 100 bytes. Para todas las iteraciones se toma el valor máximo de A-MSDU para STA, es decir, 3839 bytes.

11.3.2 Prueba 2: Impacto del número de tramas agregadas

El objetivo de esta prueba es determinar la influencia del número de tramas agregadas en el caudal máximo.

Se parte de un esquema sin agregación, es decir una sólo trama contenida, para pasar a esquemas de 2, 3, 5, 6, 7, 10, 12 y 14 tramas, con tamaños de A-MSDU desde 2304 a 3500 bytes, y, con tamaños de tramas entre 250 y 2304 bytes para obtener los esquemas deseados.

Para un detalle de comportamiento se evalúa, además, el tamaño de agregación con pasos más finos desde 2 a 30 tramas para un A-MSDU de 3000 bytes.

11.3.3 Prueba 3: Relación de caudales para 802.11a y 802.11n

El objetivo de esta prueba es determinar las diferencias de rendimiento para los dos estándares, por ello se consideran los resultados para las tasas nominales obligatorias para 802.11a, y se sitúan los valores propios de cada estándar de acuerdo a la Tabla 11.2.

En cuanto al régimen de tamaño de paquete y de número de agregación de tramas, se procede a utilizar el esquema de máximo rendimiento.

Tabla 11.2: Características PHY y MAC de 802.11a vs 802.11n

Parámetro	802.11a	802.11n
aRIFSTime	NA	2
aSlotTime [μ s]	9	9
aSIFSTime [μ s]	16	16
aSignalExtension	0	
aCCATime	< 4	< 4
aPHY-RX-START-Delay [μ s]	25	33
aRxTxTurnaroundTime	< 2	< 2
aTxPLCPDelay	DI	DI
aRxPLCPDelay	DI	DI
aRxTxSwitchTime	<< 1	<< 1
aTxRampOnTime	DI	DI
aTxRampOffTime	DI	DI
aTxRFDelay	DI	DI
aRxRFDelay	DI	DI
aAirPropagationTime	<< 1	<< 1
aMACProcessingDelay	< 2	< 2
aPreambleLength [μ s]	20	16
aPLCPHeaderLength [μ s]	4	4
aMPDUMaxLength	4095	
aCWmin	15	15
aCWmax	1023	1023

DI: Depende de la implementación

Parte IV
Análisis de resultados

12 Estudio del impacto previsible de la actualización de enlaces de larga distancia 802.11a/b/g a 802.11n

”Todo lo que nace proviene necesariamente de una causa; pues sin causa nada puede tener origen.”

Platón

En secciones anteriores se ha realizado un estudio teórico-analítico del estándar 802.11n y las variantes que éste incorpora en relación a los estándares predecesores; en esta sección se presentan conjeturas que se realizan en base a este proceso.

En condiciones indoor, como se vió en la Sección 4, resulta indiscutible la contribución de 802.11n sobre otros estándares; por ejemplo, en condiciones 1x1 y 20 MHz se tiene un factor de incremento de 1.1 y 1.2 para intervalo de guarda de 800ns y 400ns, respectivamente; de la misma forma si se duplica el ancho de banda a 40 MHz, se tendrán factores de 2.3 y 2.5; y finalmente, si se cambia a un MIMO 2x2 se consigue doblar los resultados obtenidos para cada ancho de banda.

En el mismo apartado se concluyó que no se han realizado pruebas con extensión de cobertura, por ello a continuación se puntualiza algunas consideraciones que podrían determinar comportamientos diferentes.

12.1 Consideraciones en capa MAC

802.11n mantiene el uso de la técnica de acceso al medio CSMA/CA que resulta conveniente en términos de equidad de STAs, sin embargo, dentro de sus principales limitantes se encuentra la notable sensibilidad a los cambios de sus variables temporales, ergo cuando el tiempo de propagación medio

se extiende más de 100 veces a lo propuesto por el estándar su eficiencia es afectada considerablemente.

En la Sección 3.2.2 ya se introdujo el tema de limitaciones propias de la agregación de tramas en cuanto a tamaños máximos y funcionamiento, a esto se debe añadir que es intuitiva la necesidad de determinar tamaños eficientes para la formación de tramas de datos y al mismo tiempo la definición de esperas funcionales para los recibimientos de acuses de recibo.

12.2 Consideraciones en capa PHY

En cuanto a la técnica empleada para PHY, es necesario estimar el comportamiento del canal de transmisión, puesto que la diferencia de características en medio de propagación de ambientes interiores y exteriores es fundamental [66].

En ambientes de interiores se puede advertir la presencia de limitantes de origen humano, es decir, objetos dispuestos por personas de tal o cual manera, en ambientes de oficina son típicos los elementos de metal y madera, la presencia de concreto e inclusive el cuerpo de las personas, todos ellos potenciadores del efecto multitrayecto. El problema se complica si consideramos que la cobertura al igual que las limitaciones son tridimensionales y por ende es necesario el análisis en toda su extensión. Y si ha ello le incrementamos el dinamismo de cuerpos en movimiento el problema se radicaliza.

En ambientes de exteriores, el problema se matiza, por ejemplo, en zonas urbanas, la construcción de edificios de magnitudes considerables y con componente metálicos es lo más frecuente, lo que desemboca en altos niveles de ruido que pueden determinar retransmisiones; mientras que en entornos rurales, las presencia de cordilleras y espejos de agua presentan el problema mayor; sin embargo el dinamismo de tales obstáculos se anula, provocando un mejor modelamiento de entornos.

En el caso andino es necesario caracterizar la presencia de cordilleras montañosas muy pronunciadas que ocasionan altos niveles de difracción, donde se diferencian tres tipos de escenarios: trayecto con línea de vista directa; multitrayecto con un rayo dominante; y, multitrayecto plano. Este comportamiento determina un desvanecimiento a larga escala y de naturaleza selectiva que ocasiona desvanecimientos no homogéneos [67], por lo que la técnica debe ir orientada a mejorar los niveles de señal recibida y al mismo tiempo extraer la mayor cantidad de información por transmisión, la solución planteable sería el aprovechamiento de la codificación espacio-

temporal.

12.3 Viabilidad de características 802.11n en largas distancias

Con las consideraciones previas en mente se puede evaluar a priori la viabilidad de la utilización de algunas características 802.11n en largas distancias, así:

- Todos los dispositivos que intervienen en la red deben cumplir con las características HT definidas en la Sección 3.1; pues para los formatos Non-HT y HT-MF se deben incorporar bits de control que garanticen la convivencia de STAs, lo cual reduce notablemente la eficiencia.
- La reducción del intervalo de guarda per se no tendría un resultado positivo al implementarlo en enlaces de larga distancia, puesto que su contribución es notable en condiciones LOS sin rayos indirectos relevantes; de otro modo, es decir en presencia de múltiples reflexiones, el desfase temporal entre rayos puede alcanzar y superar con relativa facilidad los 400ns.
- De los estudios realizados parece obvio presumir que la técnica de agregación de tramas tendrá suprema relevancia cuando se tienen tramas pequeñas que por sí mismas cargarían un overhead muy significativo al tráfico de la red y que, por el contrario, cuando se tienen tramas grandes el aporte puede dejar de ser positivo, sobretodo en condiciones de retransmisión y ruido. Por ello es necesario identificar el tamaño óptimo, tanto para las tramas como para la agregación.
- De la misma forma el comportamiento del canal limita el uso del ACK de bloque, sin embargo, debido a las largas esperas por acuses de recibo es deseable recibir la confirmación de varias tramas en una sola trama ACK; con lo que se optimiza la utilización del canal.
- Es indiscutible el efecto de la duplicación del ancho de banda para el incremento del caudal efectivo por enlace; si consideramos la Ley de Shannon que determina la proporcionalidad directa entre el ancho de banda y la capacidad de información proporcionada a un determinado SNR; así, inclusive, "resulta viable reducir la SNR requerida aumentando el ancho de banda del canal" [68]. Pero, si bien es cierto el ancho de banda se puede duplicar uniendo dos canales de 20 MHz del estándar 2007; por condiciones de espacio en las bandas ISM, es conveniente utilizar el esquema únicamente para la banda de 5 GHz, porque en la banda de 5 GHz los canales se definen como pares de

12. ESTUDIO DEL IMPACTO PREVISIBLE DE LA ACTUALIZACIÓN DE ENLACES DE LARGA DISTANCIA 802.11A/B/G A 802.11N

los canales de 20 MHz existentes, y no se alinean con los comúnmente utilizados en los de 20 MHz, debido a la mayor cantidad de canales no solapables; mientras que en la banda de 2,4 GHz los canales utilizados para duplicar el ancho de banda son adyacentes y por ello los canales de 40 MHz podrían interferir con al menos otro canal de 802.11b/g.

- El uso de la técnica MIMO contribuye notablemente a la eficiencia de la red, principalmente por la disponibilidad de múltiples versiones de la señal transmitida que pueden ser convenientemente combinadas, con lo cual se garantiza conseguir niveles SNR más estables y favorables que los obtenidos con SISO. En condiciones de múltitrayecto se acentúa mucho más este efecto, siendo más significativo cuantas más cadenas espaciales se dispongan. Las consecuencias directas de tal comportamiento pasan por el incremento del alcance máximo hasta el incremento en la tasa de transferencia.

13 Evaluación de testbed previo

”Da igual. Prueba otra vez. Fracasa otra vez.
Fracasa mejor.”

Samuel Beckett

Esta sección se divide en dos partes, la primera pruebas en laboratorio y la segunda las pruebas de campo para los modos MCS0, MCS1, MCS8 y MCS9.

13.1 Pruebas a corta distancia (100cm)

En las pruebas en interiores con bajos niveles de ruido y a distancias inferiores a 100cm los valores de caudal son bastante altos. Para la tecnología Airmax se tiene valores de caudal normalizado entre 0.85 y 0.95 para 1x1; y, entre 0.60 y 0.89 para 2x2 (ver Tabla 13.1). Los valores para 802.11n fueron muy similares a los obtenidos con Airmax, por ende no se puede hacer un análisis comparativo demasiado concluyente. Sin embargo, lo que si se puede observar claramente es como al doblar el ancho de banda se tiende a duplicar la tasa de transmisión en cada uno de los modos considerados.

Tabla 13.1: Caudal obtenido en pruebas con tecnología Airmax en ambiente indoor en enlace de 100 cm

AB	20 MHz		40 MHz	
Modo	T. nominal	Caudal	T. nominal	Caudal
MCS0	6.4	5.54	13.5	12.88
MCS1	13	11.06	27	23.62
MCS8	13	9.82	27	23.06
MCS9	26	15.72	54	41.54

13.2 Pruebas a larga distancia

En el trabajo de campo, por cuestiones de tiempo, sólo se pudo trabajar con 20 MHz de ancho de banda, sin embargo, se pudo obtener resultados

interesantes sobretodo para tecnología Airmax.

En las pruebas para largas distancias con 802.11n Draft2.0 se registraron niveles de caudal muy bajos en el orden de las decenas de Kbps; debido principalmente a que el ACKTimeout no se ha ajustado para poder cubrir la distancia requerida (100 Km), este comportamiento era predecible debido al límite físico del chipset utilizado por el fabricante que establece como alcance máximo 50 Km. Con este antecedente se desechan los valores obtenidos por considerarlos inservibles para el objetivo de la prueba.

En las pruebas con Airmax si se obtienen lecturas interesantes, por ejemplo: se consiguen niveles de caudal de aproximadamente 18 Mbps; esto se debe principalmente a la alta sensibilidad que tiene la técnica de acceso al medio CSMA/AC al retardo de propagación y que Airmax solventa con el uso de TDMA.

Tabla 13.2: Caudal obtenido en pruebas con tecnología Airmax en enlace de 100 Km

AB	20 MHz	
Modo	T. nominal	Caudal
MCS0	6.4	4.14
MCS1	13	4.12
MCS8	13	4.34
MCS9	26	18.04

14 Evaluación experimental

”La prueba de toda verdad reside,
sencillamente, en su eficacia.”

William James

En esta sección se resumen y analizan los resultados obtenidos de las pruebas de simulación sobre el rendimiento de la técnica de agregación de tramas que se describen en el Capítulo 11.

14.1 Escenario: Entorno sin colisiones, flujo unidireccional

14.1.1 Prueba 1: Impacto del tamaño de trama

En la Tabla 14.1 se resumen los valores obtenidos para el caudal en relación a la distancia variando el tamaño de trama entre 250 y 2000 bytes para A-MSDU máximo. En el Anexo D, en las Tablas D.1 a D.6 se dispone de los detalles para las velocidades obligatorias y para varios tamaños de trama.

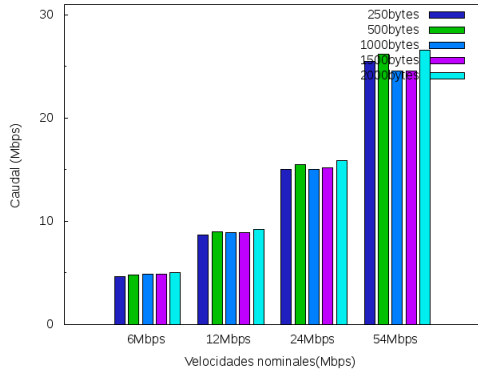
Tabla 14.1: Caudal en Mbps en función de la distancia para distintos tamaños de trama y tasa de transmisión de 54 Mbps

Distancia Km	250 bytes	500 bytes	1000 bytes	1500 bytes	2000 bytes
0	29.38	30.19	28.24	28.81	30.55
10	25.51	26.17	24.58	24.58	26.62
20	22.77	23.08	21.01	21.44	24.02
30	20.28	20.67	19.04	19.04	21.55
40	18.55	18.69	16.74	17.09	19.83
50	16.82	17.08	15.56	15.54	18.08
60	15.43	15.70	13.91	14.20	16.89
70	13.19	13.36	12.03	12.03	14.31
80	13.51	13.53	11.91	12.16	14.70
90	11.49	11.63	10.42	10.42	12.55
100	11.87	11.91	10.39	10.61	13.04

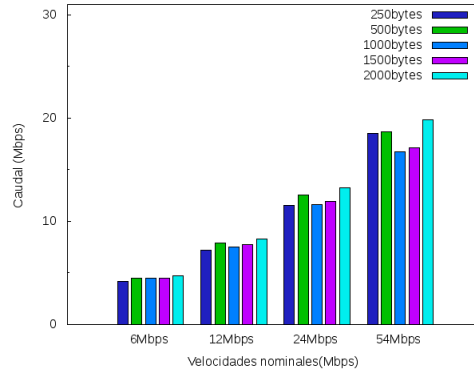
En las Figuras 14.1(a) a 14.1(d) se puede apreciar el comportamiento que tiene el caudal para cada una de las velocidades de transmisión en diferentes distancias de prueba; donde se puede observar un patrón similar de

14. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

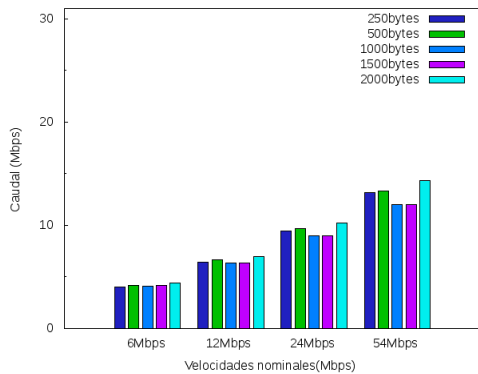
comportamiento de los índices de proporcionalidad para cada tamaño de trama en una tasa específica independiente de la distancia.



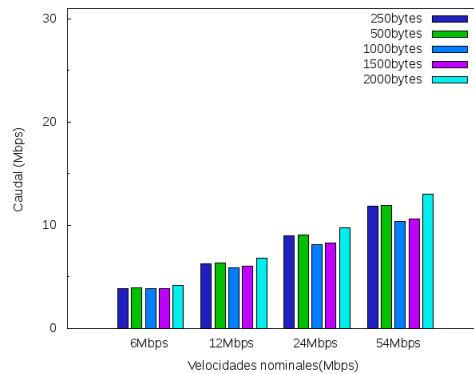
(a) Histograma de caudal para 10Km



(b) Histograma de caudal para 40Km



(c) Histograma de caudal para 70Km



(d) Histograma de caudal para 100Km

Figura 14.1: Caudal para distintos tamaños de tramas en función de la velocidad de transmisión con A-MSDU máximo

Las Figuras 14.2(a) a 14.2(d) muestran las gráficas caudal versus tamaño de trama para un tamaño de A-MSDU de 3000 bytes; se logra demostrar la proporción directa entre estas dos variables hasta un punto de caudal máximo en aproximadamente 1400 bytes que es predecible; pues esto se debe a las limitaciones de tamaño máximo de trama y al impedimento de fragmentación para la técnica de agregación de tramas, es decir que a partir de 1500 bytes se pasa a una zona sin agregación.

De estas dos pruebas se puede determinar que en condiciones de A-MSDU máximo las tramas pequeñas consiguen mejores prestaciones, mientras que para valores diferentes de tamaño de A-MSDU la respuesta de caudal dependerá del número de veces que ésta pueda contener a las sub-tramas. Por ello es necesario establecer valores óptimos de agregación, es

decir, hallar una relación entre tamaño de trama y tamaño de supertrama.

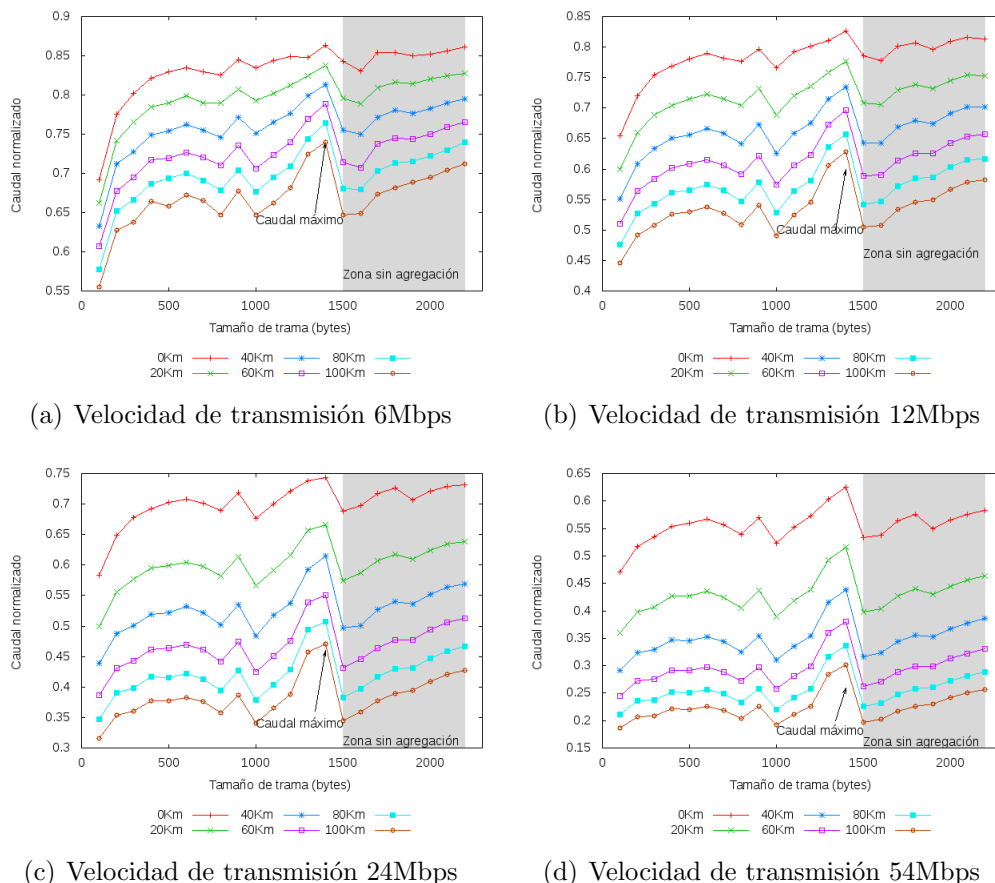


Figura 14.2: Comportamiento del caudal en relación al tamaño de agregación con A-MSDU de 3000 bytes

14.1.2 Prueba 2: Impacto del número de tramas agregadas

En la Tabla 14.2 se resumen los valores obtenidos para el caudal en relación al número de tramas agregadas para una tasa de transmisión de 54 Mbps. En el Anexo E, en las Tablas E.1 a E.6 se dispone de los detalles para las velocidades obligatorias y para varios tamaños de agregación.

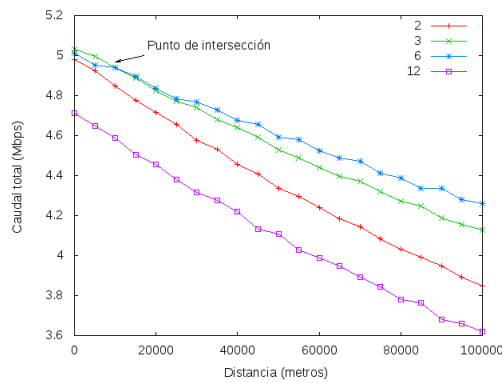
Las Figuras 14.3(a) a 14.3(d) muestran el comportamiento del caudal en función de la distancia para diferentes tamaños de agregación (2, 3, 6 y 12) para un tamaño máximo de A-MPDU. Para valores de 2 y 3 tramas por agregación se tiene un incremento directo en el caudal, esto se debe a que es posible contener más datos por trama agregada; en 6 tramas se consigue un valor pico y luego de este umbral se ve una reducción significativa del

14. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

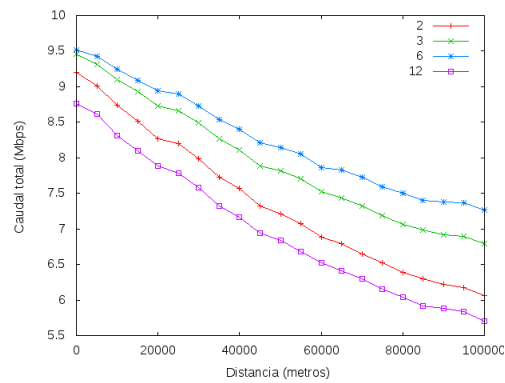
Tabla 14.2: Caudal en Mbps en función de la distancia para distintos tamaños de agregación y tasa de transmisión de 54 Mbps

Distancia	2	3	6	12
0	26.79	30.28	32.16	26.98
10	23.18	26.71	28.89	22.97
20	20.20	23.67	26.02	19.84
30	18.05	21.44	23.79	17.58
40	16.26	19.57	21.91	15.77
50	14.86	17.97	20.36	14.31
60	13.66	16.66	18.95	13.10
70	12.62	15.51	17.76	12.05
80	11.73	14.49	16.65	11.21
90	10.96	13.62	15.78	10.45
100	10.42	12.99	15.07	9.87

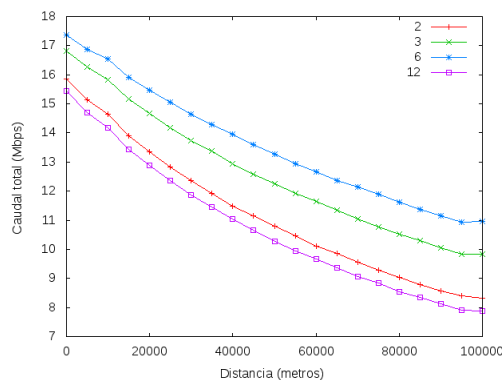
caudal para agregación mayor a 10 tramas por A-MPDU.



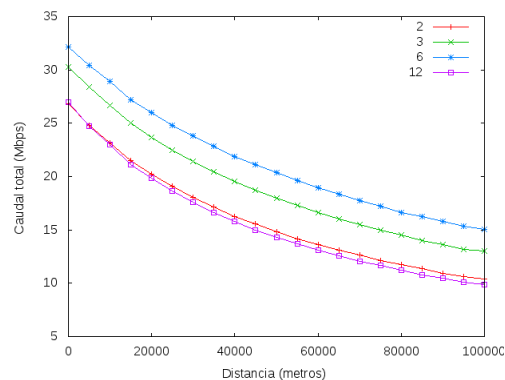
(a) Velocidad nominal 6Mbps



(b) Velocidad nominal 12Mbps



(c) Velocidad nominal 24Mbps



(d) Velocidad nominal 54Mbps

Figura 14.3: Caudal para distinto tamaño de agregación en función de la distancia con A-MSDU máximo

Las Figuras 14.5(a) a 14.5(d) demuestran el caudal normalizado en función del tamaño de agregación para distancias de 0 a 100 Km para las

velocidades de 6, 12, 24 y 54 Mbps; la respuesta del caudal al incremento en el número de tramas agregadas tiene un comportamiento cíclico con puntos de inflexión en 12, 17, 22, 27 y 30, debido posiblemente a errores en la implementación de los módulos de simulación.

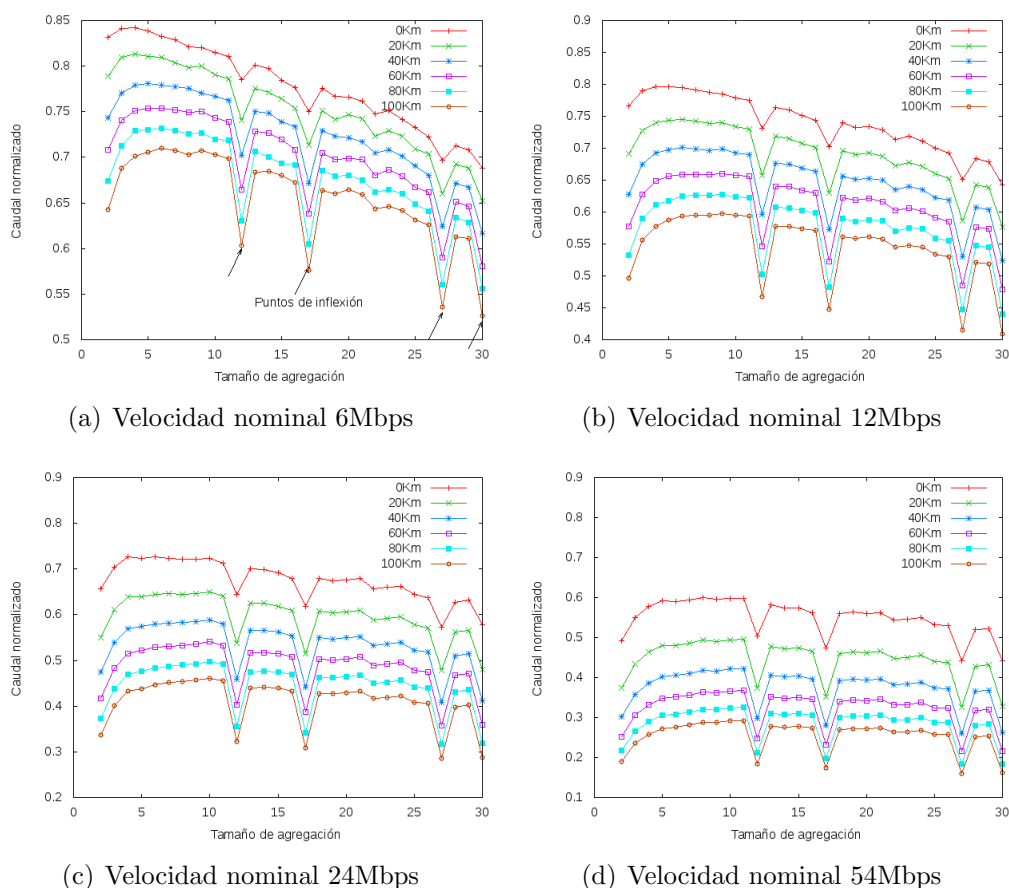


Figura 14.4: Comportamiento del caudal normalizado en relación al tamaño de agregación con A-MSDU de 3000bytes

14.1.3 Prueba 3: Relación de caudales para 802.11a y 802.11n

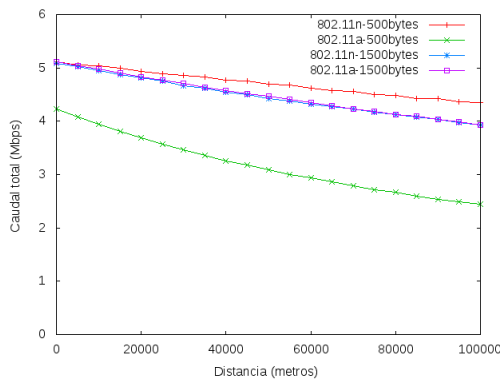
En la Tabla 14.3 se resumen los valores obtenidos para el caudal para 802.11a y 802.11n para una tasa de transmisión de 54 Mbps. En el Anexo F, Tablas F.1 a F.4 se dispone de los detalles para las velocidades obligatorias.

La Figura 14.1.3 presenta el comportamiento del canal para 802.11a y 802.11n con tramas de 500 y 1500 bytes, utilizando para el caso de 802.11n el máximo A-MSDU. Es notorio que para 1500 bytes no se tienen diferencias sustanciales en el comportamiento del caudal la relación es casi 1 a 1 (0.99),

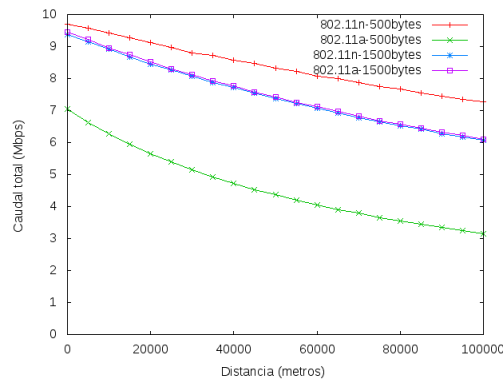
14. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

Tabla 14.3: Caudal en función de la distancia para 802.11a y 802.11n para una tasa de transmisión de 54Mbps

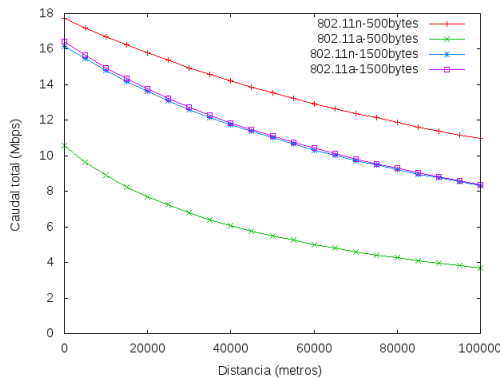
Tamaño de trama	1500 bytes		500 bytes	
	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n
0	27.98	27.07	14.66	32.48
20000	21.13	20.61	9.65	26.55
40000	16.94	16.59	7.23	22.35
60000	14.14	13.94	5.77	19.34
80000	12.12	11.97	4.80	16.99
100000	10.62	10.53	4.11	15.22



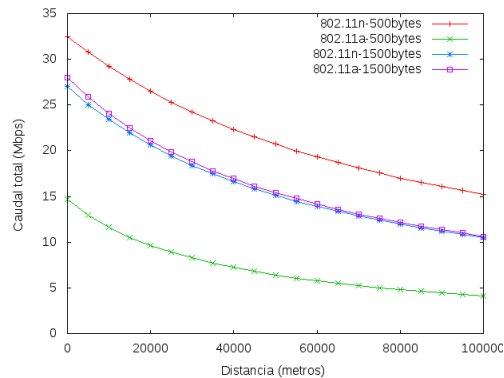
(a) Velocidad nominal 6Mbps



(b) Velocidad nominal 12Mbps



(c) Velocidad nominal 24Mbps



(d) Velocidad nominal 54Mbps

Figura 14.5: Caudal estándar 802.11a y 802.11n para tramas de 500 y 1500 bytes en función de la distancia

mientras que para tramas de 500 bytes se obtienen resultados interesantes. En la Tabla 14.4 se resumen los valores de relación de caudal entre 802.11n y 802.11a para un tamaño de trama de 500 bytes, en la Figura 14.6 se puede constatar que los factores van desde 1.21 para 6Mbps a 3.70 para 54Mbps, y como consecuencia el factor de utilización del canal es optimizado. 802.11a no utiliza agregación de tramas por ello la reducción del tamaño de trama afecta drásticamente a su eficiencia, por ejemplo para un valor de 1500 bytes

14.1. Escenario: Entorno sin colisiones, flujo unidireccional

a 50 Km de distancia para ambas tecnologías se tiene un rendimiento entre el 74% y 29% para 6Mbps y 54 Mbps, respectivamente; si ahora se reduce el tamaño de la trama a 500 bytes el rendimiento para 802.11a se reduce a 52% y 12%, y por el contrario para 802.11n la eficiencia crece a 78% y 38% para 6Mbps y 54 Mbps, respectivamente.

Tabla 14.4: Relación de caudales 802.11n y 802.11a con tamaño de trama de 500 bytes en función de la distancia

Distancia (Km)	54Mbps	24Mbps	12Mbps	6Mbps
0	2.22	1.68	1.38	1.21
10000	2.50	1.88	1.50	1.28
20000	2.75	2.05	1.62	1.34
30000	2.93	2.20	1.71	1.40
40000	3.09	2.35	1.81	1.46
50000	3.24	2.47	1.90	1.52
60000	3.35	2.58	1.99	1.57
70000	3.46	2.69	2.08	1.63
80000	3.54	2.78	2.16	1.68
90000	3.63	2.87	2.23	1.74
100000	3.70	2.96	2.30	1.78

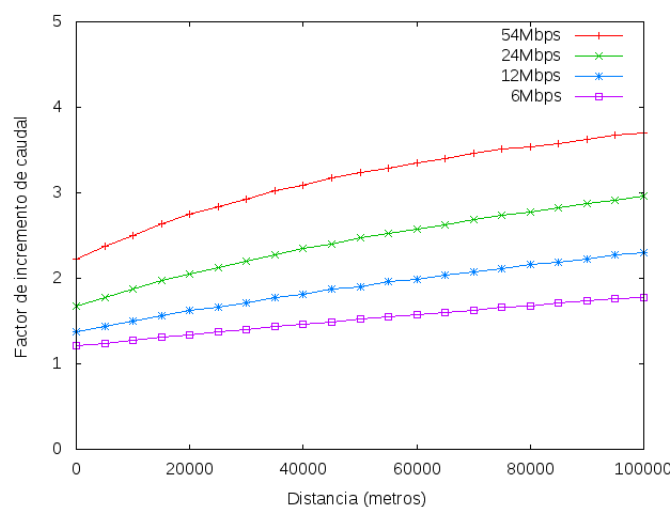


Figura 14.6: Relación de caudales 802.11a y 802.11n con tamaño de trama de 500 bytes en función de la distancia

En la Tabla 14.5 se presenta el caudal para diferentes valores de tamaño de trama entre 100 y 2200 para 802.11a y 802.11n, con A-MSDU máximo, en la Figura 14.7 se representa estos valores para 54Mbps. En el Anexo F, Tablas F.5 a F.10 se dispone los valores para distancias diferentes y velocidades obligatorias.

14. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

Tabla 14.5: Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama en bytes a 54 Mbps

Distancia Trama	0Km		40Km		100 Km	
	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n
100	3.73	26.17	1.62	16.25	0.88	10.35
200	7.05	29.12	3.16	18.21	1.73	11.67
300	9.84	29.47	4.59	18.13	2.55	11.51
400	12.29	30.83	5.93	19.28	3.33	12.36
500	14.66	30.81	7.24	19.07	4.10	12.15
600	16.58	31.25	8.44	19.45	4.84	12.41
700	18.28	30.97	9.56	19.12	5.55	12.15
800	19.79	29.98	10.61	18.07	6.24	11.33
900	21.42	31.41	11.69	19.47	6.96	12.41
1000	22.66	29.41	12.65	17.44	7.61	10.83
1100	23.81	30.46	13.54	18.51	8.24	11.63
1200	25.11	31.56	14.47	19.53	8.88	12.47
1300	26.07	33.55	15.30	23.13	9.46	15.79
1400	26.91	34.49	16.08	24.16	10.04	16.64
1500	27.98	29.40	16.89	17.44	10.64	10.83
1600	28.74	30.29	17.60	18.19	11.18	11.38
1700	29.42	31.09	18.29	18.94	11.72	11.93
1800	30.06	31.70	18.94	19.61	12.25	12.47
1900	30.93	30.28	19.66	19.44	12.79	12.67
2000	31.49	30.85	20.29	20.03	13.26	13.17
2100	32.00	31.37	20.84	20.60	13.71	13.65
2200	32.73	32.09	21.53	21.25	14.23	14.15

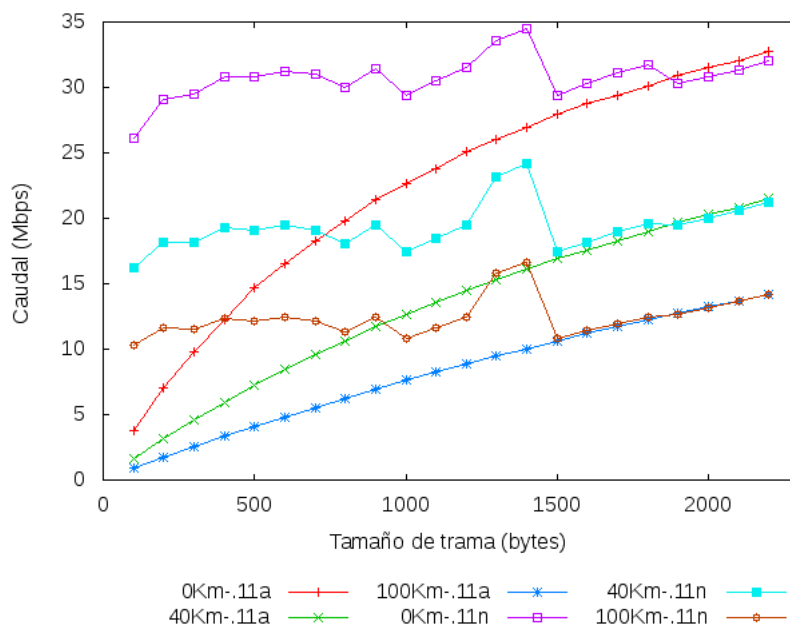


Figura 14.7: Caudales 802.11a y 802.11n para distintos tamaños de trama con tasa de transmisión de 54 Mbps

En la Tabla 14.6 se han calculado los índices de proporcionalidad para el incremento que se obtiene con la técnica de agregación de tramas de 802.11n en relación al rendimiento promedio obtenido con 802.11a.

Tabla 14.6: Razón de caudales 802.11n y 802.11a para rangos de tamaños de tramas a 54 Mbps

Rango	0Km	40Km	100 Km
100-500 bytes	3.75	5.13	5.95
500-1000 bytes	1.57	1.81	1.96
1000-1500 bytes	1.28	1.43	1.54
Promedio	2.27	2.89	3.26

En general, la técnica de agregación de tramas incrementa la eficiencia de la red dependiendo del tamaño de las tramas, para tramas grandes el uso de A-MSDU no tiene mayor eficacia puesto que la relación de tamaño de agregación es la unidad; mientras que cuando se tiene tramas pequeñas se puede utilizar de manera eficiente el tamaño de la supertrama para transmitir la mayor cantidad de información cuando se tiene el acceso al canal.

Por otra parte, se observa para 802.11n una respuesta de caudal bastante plana para distintos tamaños de tramas, lo que constituye un resultado interesante para asegurar una variación mínima en el comportamiento de paquetes pequeños y grandes en aplicaciones de banda ancha como VoIP y video que tenían un rendimiento reducido en redes 802.11a.

15 Conclusiones y trabajos futuros

”Puedes llegar a cualquier parte, siempre que andes lo suficiente.”

Lewis Carroll

Las pruebas desarrolladas conducen a la confirmación de las subhipótesis propuestas, para situaciones óptimas se puede obtener prestaciones entre 2 y 3 veces superiores con 802.11n que con 802.11a, teniendo máximos cuando el tamaño de las tramas agregadas es corto.

A través del desarrollo del trabajo de fin de master se han podido conseguir aportes significativos, entre ellos:

1. Se ha determinado valores óptimos para el tamaño de tramas de agregación para 802.11n, y al mismo tiempo se pudo determinar el valor máximo de trama sobre el cual el rendimiento es similar al obtenido por 802.11a.
2. Se ha podido determinar valores óptimos para el tamaño de agregación de tramas para 802.11n, muy influyente en redes con presencia de retransmisiones repetitivas.
3. Se ha podido comprobar a través de las pruebas previas realizadas que el principal limitante en cuanto a la incorporación de tecnologías para largas distancias es la sensibilidad de los valores temporales que intervienen en la técnica de acceso al medio.
4. Se ha determinado que la eficiencia del PHY 802.11n está estrechamente ligado al entorno de propagación del sistema de telecomunicaciones; y al grado de multitrayecto presente.
5. Se confirma que el uso de anchos de banda mayores determinan incrementos directamente proporcionales para los niveles de caudal, en entornos con niveles de ruido moderado.
6. Se ha demostrado que es necesaria la modificación de parámetros presentes en el estándar para el funcionamiento de redes 802.11 en largas

distancias y el aseguramiento de niveles SNR suficientes para sensibilizar receptores.

En base a las preguntas sin solución y problemas encontrados durante el desarrollo de este PFM se identifican como trabajos futuros:

- Determinar de forma más precisa el impacto que tienen sobre el caudal otras técnicas de 802.11n en redes de larga distancia y que por requerir un considerable incremento en los objetivos de este proyecto no han sido abordados en profundidad, como es el caso de las técnicas MIMO y otras técnicas de capa física.
- Desarrollar modelos matemáticos que puedan generalizar el comportamiento identificado en todas las pruebas desarrolladas.
- Realizar esquemas de testbeds que permitan verificar los valores analítico-teóricos que se han presentado en este trabajo, sobretodo en cuanto a variabilidad del intervalo de guarda y flujos espaciales.
- Puede resultar interesante y enormemente conveniente orientar trabajo al desarrollo de módulos de simulación para características 802.11n, entre ellas: MIMO, intervalos de guarda, ancho de banda variable, etc; como respaldo para futuras investigaciones de adaptabilidad.
- Incorporar técnicas dinámicas para la adaptación de tamaño de tramas y agregación para optimización de redes 802.11n.

Parte V
Apéndices

A Esquema de modulación y codificación de 802.11a y 802.11n

A continuación se detallan los esquemas de modulación y codificación para 802.11a y algunos modos de 802.11n, donde:

N_{BPSC} : Número de bits codificados por subportadora.

$N_{BPSC(i_{SS})}$: Número de bits codificados por subportadora por cada cadena espacial, $i_{SS}= 1, \dots, N_{SS}$.

N_{CBPS} : Número de bits codificados por símbolo OFDM.

N_{DBPS} : Número de bits de datos por símbolo OFDM.

N_{SS} : Número de cadenas espaciales.

N_{SD} : Número de números de datos complejos por cadena espacial por símbolo OFDM.

N_{SP} : Número de valores pilotos por símbolo OFDM.

GI: Intervalo de guarda.

AB: Ancho de banda.

EQM: Esquema de modulación igual para todas las cadenas.

R: Tasa de codificación.

DR: Tasa de transferencia en Mbps.

Tabla A.1: Esquema de modulación y codificación de 802.11a

Modulación	R	N_{BPSC}	N_{CBPS}	N_{DBPS}	DR (20 Mhz)	DR (10 Mhz)	DR (5 Mhz)
BPSK	1/2	1	48	24	6	3	1.5
BPSK	3/4	2	48	36	9	4.5	2.25
QPSK	1/2	2	96	48	12	6	3
QPSK	3/4	2	96	72	18	9	4.5
16-QAM	1/2	4	192	96	24	12	6
16-QAM	3/4	4	192	144	36	18	9
64-QAM	2/3	6	288	192	48	24	12
64-QAM	3/4	6	288	216	54	27	13.5

A. ESQUEMA DE MODULACIÓN Y CODIFICACIÓN DE 802.11A Y 802.11N

Tabla A.2: Esquema de modulación y codificación de 802.11n, AB=20MHz y NSS=1

Indice	Modulación	R	N_{BPSC} (iSS)	N_{SD}	N_{SP}	N_{CBPS}	N_{DBPS}	DR	
								GI=800ns	GI=400ns
0	BPSK	1/2	1	52	4	52	26	6.5	7.2
1	QPSK	1/2	2	52	4	104	52	13	14.4
2	QPSK	3/4	2	52	4	104	78	19.5	21.7
3	16-QAM	1/2	4	52	4	208	104	26	28.9
4	16-QAM	3/4	4	52	4	208	156	39	43.3
5	64-QAM	2/3	6	52	4	312	208	52	57.8
6	64-QAM	3/4	6	52	4	312	234	58.5	65
7	64-QAM	5/6	6	52	4	312	260	65	72.2

Tabla A.3: Esquema de modulación y codificación de 802.11n, AB=20MHz, NSS=2 y EQM

Indice	Modulación	R	N_{BPSC} (iSS)	N_{SD}	N_{SP}	N_{CBPS}	N_{DBPS}	DR	
								GI=800ns	GI=400ns
8	BPSK	1/2	1	52	4	104	52	13	14.4
9	QPSK	1/2	2	52	4	208	104	26	28.9
10	QPSK	3/4	2	52	4	208	156	39	43.3
11	16-QAM	1/2	4	52	4	416	208	52	57.8
12	16-QAM	3/4	4	52	4	416	312	78	86.7
13	64-QAM	2/3	6	52	4	624	416	104	115.6
14	64-QAM	3/4	6	52	4	624	468	117	130
15	64-QAM	5/6	6	52	4	624	520	130	144.4

Tabla A.4: Esquema de modulación y codificación de 802.11n, AB=40MHz y NSS=1

Indice	Modulación	R	N_{BPSC} (iSS)	N_{SD}	N_{SP}	N_{CBPS}	N_{DBPS}	DR	
								GI=800ns	GI=400ns
0	BPSK	1/2	1	108	6	108	54	13.5	15
1	QPSK	1/2	2	108	6	216	108	27	30
2	QPSK	3/4	2	108	6	216	162	40.5	45
3	16-QAM	1/2	4	108	6	432	216	54	60
4	16-QAM	3/4	4	108	6	432	324	81	90
5	64-QAM	2/3	6	108	6	648	432	108	120
6	64-QAM	3/4	6	108	6	648	486	121.5	135
7	64-QAM	5/6	6	108	6	648	540	135	150

Tabla A.5: Esquema de modulación y codificación de 802.11n, AB=40MHz, NSS=2 y EQM

Indice	Modulación	R	N_{BPSC} (iSS)	N_{SD}	N_{SP}	N_{CBPS}	N_{DBPS}	DR	
								GI=800ns	GI=400ns
8	BPSK	1/2	1	108	6	216	108	27	30
9	QPSK	1/2	2	108	6	432	216	54	60
10	QPSK	3/4	2	108	6	432	324	81	90
11	16-QAM	1/2	4	108	6	864	432	108	120
12	16-QAM	3/4	4	108	6	864	648	162	180
13	64-QAM	2/3	6	108	6	1296	864	216	240
14	64-QAM	3/4	6	108	6	1296	972	243	270
15	64-QAM	5/6	6	108	6	1296	1080	270	300

B Cálculo de valores para largas distancias

Tabla B.1: Valores para adaptación de MAC

Distancia (m)	Tiempo de propagación (μ s)	SlotTime _{max} (μ s)	ACKTimeout (μ s)
1000	3.33	6.67	75.67
5000	16.67	33.33	102.33
10000	33.33	66.67	135.67
15000	50.00	100.00	169.00
20000	66.67	133.33	202.33
25000	83.33	166.67	235.67
30000	100.00	200.00	269.00
35000	116.67	233.33	302.33
40000	133.33	266.67	335.67
45000	150.00	300.00	369.00
50000	166.67	333.33	402.33
55000	183.33	366.67	435.67
60000	200.00	400.00	469.00
65000	216.67	433.33	502.33
70000	233.33	466.67	535.67
75000	250.00	500.00	569.00
80000	266.67	533.33	602.33
85000	283.33	566.67	635.67
90000	300.00	600.00	669.00
95000	316.67	633.33	702.33
100000	333.33	666.67	735.67

C Tablas de datos para validación

C. TABLAS DE DATOS PARA VALIDACIÓN

Tabla C.1: Caudal en Mbps para distintos tamaños de ranura con velocidad nominal de 6Mbps

Kms	9us	20us	40us	60us	80us	100us	120us	140us	160us	180us	200us	220us	240us	260us	280us	300us
0	5.12	4.89	4.51	4.19	3.90	3.65	3.42	3.24	3.08	2.93	2.79	2.67	2.56	2.46	2.37	2.27
10	3.53	3.90	3.98	3.91	3.76	3.56	3.41	3.30	3.10	2.95	2.83	2.71	2.55	2.43	2.31	2.22
20	3.43	3.80	3.89	3.84	3.66	3.43	3.26	3.16	3.01	2.86	2.71	2.60	2.54	2.47	2.38	2.31
30	3.34	3.70	3.77	3.71	3.55	3.36	3.25	3.14	2.99	2.85	2.71	2.61	2.45	2.36	2.27	2.17
40	3.25	3.52	3.65	3.65	3.51	3.32	3.13	3.01	2.87	2.77	2.68	2.55	2.49	2.36	2.29	2.20
50	3.17	3.43	3.56	3.56	3.42	3.22	3.11	3.04	2.91	2.74	2.59	2.46	2.33	2.30	2.22	2.19
60	3.09	3.30	3.41	3.44	3.37	3.17	3.04	2.95	2.79	2.67	2.60	2.49	2.44	2.28	2.16	2.06
70	3.01	3.19	3.29	3.34	3.32	3.13	3.01	2.88	2.77	2.64	2.53	2.43	2.30	2.27	2.21	2.15
80	2.94	3.10	3.20	3.28	3.22	3.09	2.96	2.88	2.74	2.62	2.48	2.39	2.33	2.22	2.12	2.04
90	2.86	3.03	3.13	3.18	3.14	2.99	2.88	2.84	2.74	2.60	2.49	2.40	2.25	2.17	2.12	2.07
100	2.80	2.98	3.08	3.14	3.07	2.93	2.83	2.75	2.62	2.56	2.46	2.33	2.27	2.22	2.12	1.99

Tabla C.2: Caudal en Mbps para distintos tamaños de ranura con velocidad nominal de 12Mbps

Kms	9us	20us	40us	60us	80us	100us	120us	140us	160us	180us	200us	220us	240us	260us	280us	300us
0	9.45	8.71	7.61	6.73	6.08	5.52	5.06	4.69	4.36	4.07	3.85	3.62	3.41	3.25	3.08	2.94
10	5.39	6.23	6.30	6.17	5.74	5.23	4.82	4.52	4.21	3.90	3.64	3.40	3.23	3.06	2.92	2.77
20	5.12	5.94	6.01	5.92	5.51	5.05	4.76	4.49	4.19	3.96	3.72	3.52	3.26	3.07	2.94	2.83
30	4.87	5.51	5.77	5.63	5.39	4.96	4.59	4.30	4.03	3.77	3.58	3.39	3.26	3.15	2.95	2.82
40	4.64	5.27	5.56	5.47	5.17	4.78	4.44	4.26	3.94	3.74	3.43	3.28	3.14	2.93	2.86	2.70
50	4.46	4.85	5.27	5.24	4.97	4.75	4.34	4.09	3.86	3.60	3.46	3.20	3.11	2.92	2.74	2.66
60	4.26	4.67	5.12	5.03	4.78	4.61	4.26	4.02	3.77	3.52	3.34	3.22	2.99	2.92	2.74	2.68
70	4.10	4.51	4.80	4.80	4.54	4.34	4.09	3.90	3.69	3.42	3.27	3.10	2.96	2.80	2.76	2.54
80	3.93	4.33	4.69	4.59	4.48	4.24	3.97	3.80	3.57	3.46	3.23	3.02	2.88	2.76	2.61	2.54
90	3.80	4.18	4.49	4.50	4.29	4.15	3.91	3.71	3.51	3.30	3.14	3.07	2.85	2.69	2.63	2.48
100	3.66	4.05	4.36	4.38	4.22	4.04	3.86	3.66	3.39	3.20	3.09	2.90	2.83	2.79	2.55	2.43

C. TABLAS DE DATOS PARA VALIDACIÓN

Tabla C.3: Caudal en Mbps para distintos tamaños de ranura con velocidad nominal de 24Mbps

Kms	9us	20us	40us	60us	80us	100us	120us	140us	160us	180us	200us	220us	240us	260us	280us	300us
0	16.41	14.28	11.55	9.69	8.37	7.37	6.55	5.88	5.38	4.96	4.57	4.26	3.98	3.77	3.55	3.38
10	6.75	7.66	8.03	8.22	7.82	7.02	6.20	5.72	5.23	4.78	4.50	4.17	3.91	3.66	3.42	3.18
20	6.19	7.08	7.54	7.76	7.51	6.80	6.08	5.61	5.05	4.68	4.29	4.01	3.74	3.52	3.38	3.20
30	5.73	6.60	7.08	7.31	7.14	6.55	5.79	5.33	4.96	4.62	4.29	3.99	3.71	3.48	3.30	3.12
40	5.34	6.22	6.69	7.00	6.77	6.18	5.62	5.22	4.86	4.45	4.13	3.90	3.72	3.51	3.28	3.09
50	5.00	5.54	6.06	6.25	6.22	5.67	5.28	5.00	4.62	4.30	4.09	3.80	3.54	3.32	3.20	3.10
60	4.69	5.24	5.74	5.99	5.96	5.45	5.24	4.81	4.43	4.23	3.94	3.70	3.54	3.38	3.10	2.94
70	4.42	4.97	5.51	5.80	5.77	5.26	5.06	4.76	4.45	3.98	3.69	3.62	3.42	3.20	3.18	2.98
80	4.19	4.70	5.23	5.52	5.59	5.10	4.88	4.60	4.20	4.02	3.72	3.43	3.26	3.20	2.95	2.85
90	3.96	4.49	5.05	5.28	5.29	5.02	4.73	4.46	4.22	3.86	3.74	3.50	3.22	2.99	2.93	2.88
100	3.78	4.27	4.81	5.04	5.15	4.83	4.70	4.37	4.01	3.88	3.57	3.39	3.26	2.95	2.80	2.61

Tabla C.4: Caudal en Mbps para distintos tamaños de ranura con velocidad nominal de 54Mbps

Kms	9us	20us	40us	60us	80us	100us	120us	140us	160us	180us	200us	220us	240us	260us	280us	300us
0	27.98	22.35	16.38	12.83	10.57	8.98	7.82	6.82	6.13	5.56	5.06	4.65	4.33	4.02	3.77	3.54
10	8.44	10.11	10.30	9.87	9.14	8.13	7.40	6.80	6.07	5.55	5.08	4.69	4.34	4.07	3.79	3.50
20	7.38	9.00	9.51	9.23	8.67	7.68	7.16	6.49	5.93	5.42	4.96	4.60	4.25	3.90	3.73	3.59
30	6.59	8.21	8.72	8.65	8.23	7.36	6.73	6.19	5.69	5.13	4.80	4.44	4.19	3.97	3.69	3.47
40	5.93	7.50	8.13	8.05	7.73	7.19	6.62	6.11	5.38	4.97	4.66	4.34	3.99	3.79	3.57	3.36
50	5.39	6.90	7.65	7.58	7.34	6.63	6.35	5.88	5.37	4.98	4.42	4.14	3.93	3.72	3.48	3.26
60	4.94	6.41	7.21	7.37	6.93	6.51	5.97	5.61	5.23	4.77	4.45	4.18	3.79	3.55	3.35	3.34
70	4.58	5.92	6.77	6.91	6.80	6.05	5.90	5.33	4.98	4.66	4.41	3.98	3.87	3.60	3.32	3.07
80	4.25	5.57	6.39	6.63	6.52	6.00	5.48	5.33	4.77	4.49	4.19	4.01	3.74	3.43	3.44	3.20
90	3.96	5.25	6.11	6.30	6.17	5.80	5.38	4.96	4.75	4.25	4.10	3.86	3.62	3.50	3.17	3.00
100	3.73	4.96	5.69	6.02	6.00	5.55	5.35	4.85	4.46	4.29	3.87	3.70	3.57	3.38	3.27	3.10

C. TABLAS DE DATOS PARA VALIDACIÓN

Tabla C.5: Caudal para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia para tramas de 1500 bytes

Kms	54Mbps	48Mbps	36Mbps	24Mbps	18Mbps	12Mbps	9Mbps	6Mbps
0	27.98	25.96	21.80	16.40	13.20	9.44	7.39	5.12
5	25.92	24.06	20.44	15.68	12.74	9.21	7.23	5.05
10	24.07	22.51	19.34	14.96	12.27	8.97	7.10	4.98
15	22.49	21.14	18.30	14.40	11.87	8.75	6.94	4.91
20	21.13	19.88	17.36	13.78	11.46	8.50	6.81	4.83
25	19.82	18.80	16.56	13.24	11.09	8.32	6.67	4.77
30	18.80	17.85	15.78	12.74	10.76	8.13	6.52	4.69
35	17.78	16.97	15.11	12.31	10.41	7.92	6.42	4.65
40	16.94	16.16	14.43	11.86	10.12	7.75	6.31	4.58
45	16.10	15.43	13.88	11.49	9.81	7.59	6.20	4.52
50	15.42	14.75	13.32	11.12	9.58	7.40	6.08	4.46
55	14.76	14.17	12.83	10.77	9.25	7.26	5.97	4.41
60	14.14	13.61	12.36	10.43	9.05	7.12	5.88	4.35
65	13.58	13.07	11.92	10.07	8.82	6.97	5.77	4.29
70	13.05	12.63	11.54	9.84	8.58	6.83	5.68	4.23
75	12.58	12.15	11.16	9.57	8.39	6.69	5.57	4.19
80	12.12	11.75	10.80	9.32	8.17	6.56	5.49	4.13
85	11.73	11.34	10.48	9.04	7.99	6.43	5.41	4.10
90	11.34	10.97	10.17	8.82	7.80	6.33	5.32	4.03
95	10.99	10.64	9.86	8.58	7.66	6.23	5.24	3.99
100	10.62	10.36	9.61	8.40	7.47	6.09	5.16	3.95

Tabla C.6: Caudal para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia para tramas de 500 bytes

Kms	54Mbps	48Mbps	36Mbps	24Mbps	18Mbps	12Mbps	9Mbps	6Mbps
0	14.66	13.96	12.66	10.56	9.04	7.05	5.77	4.23
5	12.94	12.42	11.38	9.67	8.39	6.63	5.50	4.08
10	11.68	11.20	10.37	8.92	7.82	6.27	5.24	3.94
15	10.54	10.20	9.52	8.27	7.33	5.94	5.02	3.81
20	9.65	9.40	8.77	7.72	6.88	5.64	4.81	3.69
25	8.90	8.66	8.16	7.24	6.47	5.40	4.61	3.57
30	8.27	8.05	7.61	6.77	6.15	5.15	4.43	3.46
35	7.71	7.52	7.12	6.41	5.83	4.91	4.26	3.36
40	7.23	7.08	6.71	6.08	5.54	4.73	4.11	3.27
45	6.79	6.65	6.34	5.76	5.29	4.53	3.96	3.18
50	6.41	6.29	6.00	5.49	5.05	4.36	3.83	3.09
55	6.07	5.96	5.71	5.23	4.83	4.20	3.70	3.01
60	5.77	5.67	5.44	5.01	4.64	4.05	3.60	2.93
65	5.50	5.39	5.18	4.80	4.47	3.91	3.49	2.86
70	5.24	5.15	4.96	4.60	4.30	3.78	3.40	2.79
75	5.01	4.92	4.76	4.43	4.14	3.66	3.28	2.72
80	4.80	4.73	4.58	4.27	4.00	3.55	3.19	2.66
85	4.62	4.54	4.39	4.12	3.86	3.44	3.10	2.60
90	4.43	4.37	4.23	3.97	3.75	3.35	3.03	2.54
95	3.65	3.62	3.57	3.44	3.33	3.15	2.94	2.48
100	3.50	3.43	3.40	3.20	3.05	2.90	2.56	2.29

Tabla C.7: Caudal normalizado para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia para tramas de 1500 bytes

Kms	54Mbps	48Mbps	36Mbps	24Mbps	18Mbps	12Mbps	9Mbps	6Mbps
0	0.52	0.54	0.61	0.68	0.73	0.79	0.82	0.85
5	0.48	0.50	0.57	0.65	0.71	0.77	0.80	0.84
10	0.45	0.47	0.54	0.62	0.68	0.75	0.79	0.83
15	0.42	0.44	0.51	0.60	0.66	0.73	0.77	0.82
20	0.39	0.41	0.48	0.57	0.64	0.71	0.76	0.80
25	0.37	0.39	0.46	0.55	0.62	0.69	0.74	0.80
30	0.35	0.37	0.44	0.53	0.60	0.68	0.72	0.78
35	0.33	0.35	0.42	0.51	0.58	0.66	0.71	0.77
40	0.31	0.34	0.40	0.49	0.56	0.65	0.70	0.76
45	0.30	0.32	0.39	0.48	0.54	0.63	0.69	0.75
50	0.29	0.31	0.37	0.46	0.53	0.62	0.68	0.74
55	0.27	0.30	0.36	0.45	0.51	0.60	0.66	0.73
60	0.26	0.28	0.34	0.43	0.50	0.59	0.65	0.72
65	0.25	0.27	0.33	0.42	0.49	0.58	0.64	0.72
70	0.24	0.26	0.32	0.41	0.48	0.57	0.63	0.71
75	0.23	0.25	0.31	0.40	0.47	0.56	0.62	0.70
80	0.22	0.24	0.30	0.39	0.45	0.55	0.61	0.69
85	0.22	0.24	0.29	0.38	0.44	0.54	0.60	0.68
90	0.21	0.23	0.28	0.37	0.43	0.53	0.59	0.67
95	0.20	0.22	0.27	0.36	0.43	0.52	0.58	0.67
100	0.20	0.22	0.27	0.35	0.42	0.51	0.57	0.66

Tabla C.8: Caudal normalizado para distintas velocidades de 802.11a en función de la distancia para tramas de 500 bytes

Kms	54Mbps	48Mbps	36Mbps	24Mbps	18Mbps	12Mbps	9Mbps	6Mbps
0	0.27	0.29	0.35	0.44	0.50	0.59	0.64	0.71
5	0.24	0.26	0.32	0.40	0.47	0.55	0.61	0.68
10	0.22	0.23	0.29	0.37	0.43	0.52	0.58	0.66
15	0.20	0.21	0.26	0.34	0.41	0.49	0.56	0.64
20	0.18	0.20	0.24	0.32	0.38	0.47	0.53	0.62
25	0.16	0.18	0.23	0.30	0.36	0.45	0.51	0.60
30	0.15	0.17	0.21	0.28	0.34	0.43	0.49	0.58
35	0.14	0.16	0.20	0.27	0.32	0.41	0.47	0.56
40	0.13	0.15	0.19	0.25	0.31	0.39	0.46	0.54
45	0.13	0.14	0.18	0.24	0.29	0.38	0.44	0.53
50	0.12	0.13	0.17	0.23	0.28	0.36	0.43	0.51
55	0.11	0.12	0.16	0.22	0.27	0.35	0.41	0.50
60	0.11	0.12	0.15	0.21	0.26	0.34	0.40	0.49
65	0.10	0.11	0.14	0.20	0.25	0.33	0.39	0.48
70	0.10	0.11	0.14	0.19	0.24	0.32	0.38	0.47
75	0.09	0.10	0.13	0.18	0.23	0.30	0.36	0.45
80	0.09	0.10	0.13	0.18	0.22	0.30	0.35	0.44
85	0.09	0.09	0.12	0.17	0.21	0.29	0.34	0.43
90	0.08	0.09	0.12	0.17	0.21	0.28	0.34	0.42
95	0.07	0.08	0.10	0.14	0.18	0.26	0.33	0.41
100	0.06	0.07	0.09	0.13	0.17	0.24	0.28	0.38

D Tablas de datos Prueba 1

Tabla D.1: Caudal normalizado en función del tamaño de trama para 0 Km con A-MSDU máximo

Tamaño de trama	6Mbps	12Mbps	24Mbps	54Mbps
100	0.6914	0.6545	0.5830	0.4702
200	0.7756	0.7197	0.6492	0.5176
300	0.8022	0.7546	0.6774	0.5349
400	0.8214	0.7684	0.6926	0.5539
500	0.8293	0.7811	0.7022	0.5591
600	0.8352	0.7899	0.7075	0.5670
700	0.8297	0.7818	0.7017	0.5563
800	0.8259	0.7761	0.6900	0.5385
900	0.8445	0.7968	0.7180	0.5701
1000	0.8349	0.7660	0.6759	0.5229
1100	0.8444	0.7923	0.7004	0.5529
1200	0.8494	0.8015	0.7215	0.5727
1300	0.8483	0.8105	0.7388	0.6028
1400	0.8636	0.8260	0.7438	0.6259
1500	0.8430	0.7860	0.6878	0.5335
1600	0.8301	0.7784	0.6981	0.5384
1700	0.8538	0.8018	0.7166	0.5642
1800	0.8546	0.8063	0.7262	0.5753
1900	0.8500	0.7956	0.7068	0.5496
2000	0.8524	0.8094	0.7207	0.5657
2100	0.8557	0.8156	0.7296	0.5751
2200	0.8608	0.8128	0.7313	0.5824

D. TABLAS DE DATOS PRUEBA 1

Tabla D.2: Caudal normalizado en función del tamaño de trama para 20 Km con A-MSDU máximo

Tamaño de trama	6Mbps	12Mbps	24Mbps	54Mbps
100	0.6623	0.5995	0.4990	0.3602
200	0.7415	0.6599	0.5561	0.3984
300	0.7649	0.6888	0.5767	0.4071
400	0.7851	0.7038	0.5950	0.4263
500	0.7894	0.7153	0.5986	0.4274
600	0.7985	0.7223	0.6048	0.4351
700	0.7900	0.7145	0.5979	0.4245
800	0.7894	0.7045	0.5822	0.4057
900	0.8075	0.7313	0.6135	0.4367
1000	0.7925	0.6885	0.5658	0.3890
1100	0.8019	0.7196	0.5912	0.4176
1200	0.8120	0.7357	0.6168	0.4382
1300	0.8242	0.7584	0.6574	0.4921
1400	0.8374	0.7764	0.6657	0.5153
1500	0.7963	0.7084	0.5736	0.3971
1600	0.7890	0.7051	0.5871	0.4041
1700	0.8093	0.7287	0.6069	0.4275
1800	0.8164	0.7379	0.6180	0.4396
1900	0.8145	0.7316	0.6091	0.4296
2000	0.8200	0.7453	0.6244	0.4448
2100	0.8243	0.7548	0.6351	0.4556
2200	0.8279	0.7525	0.6388	0.4639

Tabla D.3: Caudal normalizado en función del tamaño de trama para 40 Km con A-MSDU máximo

Tamaño de trama	6Mbps	12Mbps	24Mbps	54Mbps
100	0.6327	0.5513	0.4394	0.2919
200	0.7118	0.6081	0.4877	0.3237
300	0.7278	0.6333	0.5007	0.3290
400	0.7492	0.6505	0.5195	0.3464
500	0.7545	0.6564	0.5222	0.3460
600	0.7626	0.6662	0.5317	0.3529
700	0.7554	0.6583	0.5213	0.3435
800	0.7459	0.6414	0.5023	0.3246
900	0.7717	0.6729	0.5350	0.3534
1000	0.7515	0.6262	0.4843	0.3101
1100	0.7649	0.6580	0.5171	0.3358
1200	0.7761	0.6751	0.5372	0.3544
1300	0.7985	0.7152	0.5925	0.4155
1400	0.8130	0.7345	0.6150	0.4385
1500	0.7552	0.6430	0.4973	0.3165
1600	0.7500	0.6426	0.5010	0.3233
1700	0.7711	0.6694	0.5275	0.3437
1800	0.7806	0.6796	0.5395	0.3559
1900	0.7766	0.6748	0.5357	0.3528
2000	0.7825	0.6911	0.5513	0.3673
2100	0.7903	0.7019	0.5637	0.3778
2200	0.7951	0.7018	0.5689	0.3856

Tabla D.4: Caudal normalizado en función del tamaño de trama para 60 Km con A-MSDU máximo

Tamaño de trama	6Mbps	12Mbps	24Mbps	54Mbps
100	0.6068	0.5106	0.3864	0.2454
200	0.6779	0.5645	0.4316	0.2725
300	0.6950	0.5840	0.4431	0.2760
400	0.7178	0.6017	0.4618	0.2916
500	0.7196	0.6084	0.4634	0.2908
600	0.7268	0.6146	0.4687	0.2970
700	0.7209	0.6065	0.4619	0.2883
800	0.7104	0.5921	0.4420	0.2719
900	0.7357	0.6213	0.4744	0.2976
1000	0.7066	0.5749	0.4248	0.2576
1100	0.7237	0.6065	0.4508	0.2810
1200	0.7402	0.6236	0.4755	0.2986
1300	0.7697	0.6735	0.5387	0.3599
1400	0.7885	0.6961	0.5511	0.3803
1500	0.7140	0.5888	0.4311	0.2629
1600	0.7070	0.5898	0.4460	0.2704
1700	0.7373	0.6144	0.4639	0.2881
1800	0.7447	0.6258	0.4778	0.2991
1900	0.7434	0.6262	0.4777	0.2994
2000	0.7502	0.6433	0.4935	0.3127
2100	0.7589	0.6530	0.5056	0.3225
2200	0.7649	0.6566	0.5120	0.3305

Tabla D.5: Caudal normalizado en función del tamaño de trama para 80 Km con A-MSDU máximo

Tamaño de trama	6Mbps	12Mbps	24Mbps	54Mbps
100	0.5772	0.4755	0.3469	0.2118
200	0.6525	0.5271	0.3901	0.2357
300	0.6662	0.5428	0.3979	0.2380
400	0.6864	0.5617	0.4163	0.2521
500	0.6934	0.5648	0.4154	0.2506
600	0.6998	0.5742	0.4218	0.2562
700	0.6907	0.5655	0.4133	0.2485
800	0.6789	0.5467	0.3947	0.2333
900	0.7043	0.5787	0.4273	0.2573
1000	0.6767	0.5292	0.3781	0.2205
1100	0.6950	0.5634	0.4040	0.2413
1200	0.7088	0.5809	0.4285	0.2573
1300	0.7440	0.6366	0.4947	0.3168
1400	0.7641	0.6577	0.5076	0.3361
1500	0.6804	0.5420	0.3830	0.2251
1600	0.6797	0.5469	0.3977	0.2317
1700	0.7033	0.5719	0.4163	0.2476
1800	0.7132	0.5855	0.4295	0.2577
1900	0.7150	0.5860	0.4309	0.2602
2000	0.7228	0.6030	0.4475	0.2722
2100	0.7301	0.6146	0.4594	0.2814
2200	0.7402	0.6168	0.4661	0.2885

D. TABLAS DE DATOS PRUEBA 1

Tabla D.6: Caudal normalizado en función del tamaño de trama para 100 Km con A-MSDU máximo

Tamaño de trama	6Mbps	12Mbps	24Mbps	54Mbps
100	0.5550	0.4459	0.3158	0.1859
200	0.6271	0.4918	0.3539	0.2076
300	0.6374	0.5078	0.3608	0.2088
400	0.6640	0.5262	0.3774	0.2220
500	0.6586	0.5299	0.3773	0.2205
600	0.6729	0.5383	0.3827	0.2253
700	0.6648	0.5267	0.3767	0.2183
800	0.6473	0.5092	0.3572	0.2035
900	0.6774	0.5406	0.3869	0.2253
1000	0.6467	0.4908	0.3406	0.1925
1100	0.6621	0.5243	0.3653	0.2111
1200	0.6819	0.5451	0.3881	0.2263
1300	0.7248	0.6061	0.4570	0.2836
1400	0.7397	0.6281	0.4700	0.3020
1500	0.6467	0.5047	0.3450	0.1965
1600	0.6485	0.5078	0.3592	0.2023
1700	0.6737	0.5338	0.3771	0.2166
1800	0.6819	0.5451	0.3892	0.2263
1900	0.6889	0.5493	0.3943	0.2299
2000	0.6953	0.5665	0.4085	0.2415
2100	0.7039	0.5790	0.4204	0.2503
2200	0.7128	0.5826	0.4270	0.2568

E Tablas de datos Prueba 2

Tabla E.1: Caudal normalizado en función del tamaño de agregación para 0 Km

Tamaño de agregación	6Mbps	12Mbps	24Mbps	54Mbps
2	0.8317	0.7664	0.6559	0.4912
3	0.8413	0.7894	0.7037	0.5494
4	0.8421	0.7967	0.7275	0.5777
5	0.8382	0.7959	0.7232	0.5918
6	0.8324	0.7947	0.7260	0.5895
7	0.8294	0.7907	0.7241	0.5934
8	0.8215	0.7869	0.7223	0.6006
9	0.8204	0.7853	0.7222	0.5953
10	0.8146	0.7791	0.7241	0.5982
11	0.8105	0.7747	0.7128	0.5988
12	0.7851	0.7318	0.6443	0.5046
13	0.8011	0.7631	0.7008	0.5827
14	0.7971	0.7602	0.6984	0.5738
15	0.7843	0.7518	0.6909	0.5737
16	0.7767	0.7438	0.6789	0.5610
17	0.7503	0.7024	0.6185	0.4747
18	0.7760	0.7400	0.6795	0.5602
19	0.7671	0.7325	0.6738	0.5635
20	0.7660	0.7339	0.6752	0.5592
21	0.7615	0.7293	0.6789	0.5626
22	0.7475	0.7137	0.6566	0.5436
23	0.7512	0.7186	0.6602	0.5451
24	0.7416	0.7117	0.6616	0.5503
25	0.7328	0.6997	0.6438	0.5329
26	0.7224	0.6920	0.6373	0.5296
27	0.6970	0.6511	0.5736	0.4411
28	0.7130	0.6835	0.6278	0.5195
29	0.7086	0.6788	0.6315	0.5214
30	0.6880	0.6429	0.5775	0.4424

Tabla E.2: Caudal normalizado en función del tamaño de agregación para 20 Km

Tamaño de agregación	6Mbps	12Mbps	24Mbps	54Mbps
2	0.7885	0.6916	0.5504	0.3732
3	0.8100	0.7277	0.6106	0.4333
4	0.8131	0.7402	0.6394	0.4635
5	0.8105	0.7432	0.6400	0.4798
6	0.8100	0.7446	0.6448	0.4808
7	0.8032	0.7424	0.6456	0.4857
8	0.7981	0.7393	0.6444	0.4935
9	0.8001	0.7403	0.6465	0.4906
10	0.7907	0.7334	0.6500	0.4943
11	0.7864	0.7304	0.6406	0.4954
12	0.7402	0.6580	0.5371	0.3738
13	0.7756	0.7188	0.6258	0.4781
14	0.7713	0.7152	0.6256	0.4729
15	0.7646	0.7080	0.6189	0.4737
16	0.7536	0.7014	0.6103	0.4650
17	0.7139	0.6300	0.5157	0.3516
18	0.7509	0.6966	0.6082	0.4610
19	0.7419	0.6902	0.6042	0.4648
20	0.7468	0.6928	0.6053	0.4622
21	0.7422	0.6880	0.6097	0.4655
22	0.7229	0.6727	0.5888	0.4484
23	0.7295	0.6772	0.5925	0.4501
24	0.7228	0.6714	0.5948	0.4553
25	0.7088	0.6594	0.5772	0.4396
26	0.7042	0.6531	0.5718	0.4377
27	0.6603	0.5857	0.4785	0.3266
28	0.6923	0.6424	0.5617	0.4289
29	0.6879	0.6392	0.5666	0.4314
30	0.6520	0.5758	0.4799	0.3276

Tabla E.3: Caudal normalizado en función del tamaño de agregación para 40 Km

Tamaño de agregación	6Mbps	12Mbps	24Mbps	54Mbps
2	0.7436	0.6281	0.4750	0.3014
3	0.7701	0.6754	0.5402	0.3579
4	0.7795	0.6926	0.5700	0.3863
5	0.7806	0.6969	0.5750	0.4021
6	0.7788	0.7010	0.5803	0.4053
7	0.7776	0.6992	0.5816	0.4107
8	0.7753	0.6968	0.5839	0.4186
9	0.7702	0.6988	0.5851	0.4168
10	0.7671	0.6931	0.5889	0.4210
11	0.7626	0.6897	0.5805	0.4223
12	0.7025	0.5962	0.4592	0.2980
13	0.7504	0.6763	0.5652	0.4052
14	0.7488	0.6752	0.5657	0.4018
15	0.7387	0.6690	0.5621	0.4032
16	0.7340	0.6639	0.5530	0.3964
17	0.6711	0.5724	0.4408	0.2804
18	0.7292	0.6563	0.5508	0.3913
19	0.7231	0.6511	0.5470	0.3953
20	0.7213	0.6530	0.5498	0.3937
21	0.7167	0.6497	0.5526	0.3968
22	0.7047	0.6346	0.5331	0.3813
23	0.7080	0.6402	0.5364	0.3831
24	0.7010	0.6355	0.5390	0.3882
25	0.6909	0.6221	0.5226	0.3739
26	0.6801	0.6185	0.5191	0.3728
27	0.6239	0.5295	0.4086	0.2604
28	0.6718	0.6072	0.5104	0.3651
29	0.6672	0.6037	0.5144	0.3678
30	0.6161	0.5234	0.4112	0.2611

Tabla E.4: Caudal normalizado en función del tamaño de agregación para 60 Km

Tamaño de agregación	6Mbps	12Mbps	24Mbps	54Mbps
2	0.7080	0.5776	0.4177	0.2525
3	0.7402	0.6281	0.4841	0.3051
4	0.7515	0.6491	0.5155	0.3324
5	0.7536	0.6565	0.5219	0.3478
6	0.7539	0.6589	0.5288	0.3513
7	0.7521	0.6592	0.5313	0.3562
8	0.7491	0.6591	0.5323	0.3631
9	0.7503	0.6606	0.5353	0.3618
10	0.7435	0.6578	0.5404	0.3659
11	0.7389	0.6559	0.5330	0.3675
12	0.6648	0.5465	0.4027	0.2475
13	0.7282	0.6400	0.5163	0.3515
14	0.7264	0.6400	0.5169	0.3488
15	0.7192	0.6334	0.5143	0.3503
16	0.7080	0.6297	0.5078	0.3451
17	0.6382	0.5231	0.3865	0.2328
18	0.7043	0.6221	0.5026	0.3396
19	0.6981	0.6182	0.5009	0.3432
20	0.6990	0.6212	0.5028	0.3421
21	0.6976	0.6163	0.5076	0.3453
22	0.6803	0.6025	0.4880	0.3311
23	0.6864	0.6063	0.4917	0.3328
24	0.6791	0.6012	0.4949	0.3378
25	0.6669	0.5906	0.4785	0.3247
26	0.6621	0.5854	0.4747	0.3240
27	0.5904	0.4854	0.3576	0.2157
28	0.6512	0.5764	0.4672	0.3171
29	0.6465	0.5742	0.4704	0.3201
30	0.5802	0.4785	0.3593	0.2163

Tabla E.5: Caudal normalizado en función del tamaño de agregación para 80 Km

Tamaño de agregación	6Mbps	12Mbps	24Mbps	54Mbps
2	0.6742	0.5327	0.3737	0.2177
3	0.7128	0.5895	0.4386	0.2659
4	0.7290	0.6112	0.4688	0.2907
5	0.7297	0.6176	0.4763	0.3055
6	0.7321	0.6247	0.4836	0.3084
7	0.7296	0.6256	0.4873	0.3136
8	0.7262	0.6264	0.4907	0.3209
9	0.7271	0.6274	0.4929	0.3202
10	0.7200	0.6242	0.4971	0.3248
11	0.7185	0.6220	0.4915	0.3257
12	0.6305	0.5021	0.3564	0.2114
13	0.7062	0.6069	0.4753	0.3104
14	0.7008	0.6064	0.4768	0.3086
15	0.6934	0.6026	0.4746	0.3103
16	0.6916	0.5987	0.4690	0.3060
17	0.6053	0.4820	0.3421	0.1988
18	0.6857	0.5896	0.4631	0.3003
19	0.6792	0.5854	0.4617	0.3039
20	0.6800	0.5879	0.4647	0.3036
21	0.6752	0.5860	0.4682	0.3060
22	0.6620	0.5705	0.4499	0.2932
23	0.6648	0.5756	0.4525	0.2948
24	0.6604	0.5732	0.4571	0.2994
25	0.6490	0.5593	0.4411	0.2874
26	0.6410	0.5553	0.4393	0.2875
27	0.5600	0.4474	0.3180	0.1842
28	0.6336	0.5470	0.4305	0.2810
29	0.6288	0.5447	0.4354	0.2836
30	0.5562	0.4396	0.3197	0.1848

Tabla E.6: Caudal normalizado en función del tamaño de agregación para 100 Km

Tamaño de agregación	6Mbps	12Mbps	24Mbps	54Mbps
2	0.6424	0.4963	0.3367	0.1904
3	0.6879	0.5558	0.4019	0.2357
4	0.7010	0.5776	0.4319	0.2589
5	0.7058	0.5877	0.4388	0.2723
6	0.7103	0.5935	0.4471	0.2766
7	0.7073	0.5953	0.4520	0.2817
8	0.7032	0.5954	0.4538	0.2875
9	0.7071	0.5975	0.4565	0.2873
10	0.7032	0.5955	0.4614	0.2912
11	0.6983	0.5932	0.4559	0.2925
12	0.6031	0.4678	0.3221	0.1846
13	0.6841	0.5769	0.4390	0.2782
14	0.6848	0.5776	0.4408	0.2769
15	0.6804	0.5735	0.4390	0.2786
16	0.6721	0.5709	0.4335	0.2748
17	0.5758	0.4474	0.3093	0.1737
18	0.6640	0.5616	0.4282	0.2693
19	0.6605	0.5588	0.4273	0.2726
20	0.6641	0.5609	0.4297	0.2722
21	0.6593	0.5574	0.4336	0.2749
22	0.6437	0.5445	0.4164	0.2630
23	0.6464	0.5479	0.4193	0.2647
24	0.6418	0.5452	0.4225	0.2689
25	0.6310	0.5338	0.4083	0.2578
26	0.6259	0.5297	0.4063	0.2578
27	0.5356	0.4154	0.2861	0.1609
28	0.6131	0.5207	0.3982	0.2523
29	0.6111	0.5181	0.4026	0.2548
30	0.5264	0.4083	0.2869	0.1614

F Tablas de datos Prueba 3

Tabla F.1: Caudal en función de la distancia para 802.11a y 802.11n para una tasa de transmisión de 6Mbps

Tamaño de trama Distancia (m)	1500 bytes		500 bytes	
	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n
0	5.12	5.08	4.23	5.12
10000	4.98	4.94	3.94	5.04
20000	4.83	4.82	3.70	4.94
30000	4.70	4.67	3.46	4.86
40000	4.58	4.54	3.26	4.77
50000	4.46	4.43	3.09	4.69
60000	4.35	4.33	2.93	4.62
70000	4.23	4.22	2.79	4.56
80000	4.13	4.12	2.66	4.48
90000	4.04	4.03	2.54	4.43
100000	3.94	3.93	2.44	4.35

Tabla F.2: Caudal en función de la distancia para 802.11a y 802.11n para una tasa de transmisión de 12Mbps

Tamaño de trama Distancia (m)	1500 bytes		500 bytes	
	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n
0	9.45	9.38	7.05	9.71
10000	8.96	8.91	6.27	9.42
20000	8.51	8.45	5.65	9.14
30000	8.13	8.07	5.14	8.81
40000	7.77	7.71	4.72	8.56
50000	7.42	7.37	4.37	8.32
60000	7.12	7.07	4.05	8.07
70000	6.83	6.77	3.79	7.88
80000	6.57	6.52	3.54	7.67
90000	6.33	6.28	3.34	7.46
100000	6.09	6.07	3.15	7.27

F. TABLAS DE DATOS PRUEBA 3

Tabla F.3: Caudal en función de la distancia para 802.11a y 802.11n para una tasa de transmisión de 24Mbps

Tamaño de trama	1500 bytes		500 bytes	
	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n
0	16.41	16.17	10.57	17.72
10000	14.95	14.80	8.91	16.71
20000	13.78	13.62	7.70	15.79
30000	12.75	12.61	6.80	14.95
40000	11.86	11.73	6.07	14.23
50000	11.11	11.02	5.49	13.54
60000	10.43	10.31	5.01	12.93
70000	9.82	9.74	4.60	12.38
80000	9.29	9.22	4.27	11.86
90000	8.82	8.75	3.97	11.39
100000	8.38	8.33	3.70	10.97

Tabla F.4: Caudal en función de la distancia para 802.11a y 802.11n para una tasa de transmisión de 54Mbps

Tamaño de trama	1500 bytes		500 bytes	
	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n
0	27.98	27.07	14.66	32.48
10000	24.07	23.41	11.68	29.18
20000	21.13	20.61	9.65	26.55
30000	18.80	18.41	8.27	24.28
40000	16.94	16.59	7.23	22.35
50000	15.42	15.16	6.41	20.77
60000	14.14	13.94	5.77	19.34
70000	13.05	12.87	5.24	18.12
80000	12.12	11.97	4.80	16.99
90000	11.34	11.18	4.43	16.10
100000	10.62	10.53	4.11	15.22

Tabla F.5: Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama para 0 Km con A-MSDU máximo

Tasa	54Mbps		24Mbps		12Mbps		6Mbps	
	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n
100	3.73	26.17	3.32	14.57	2.75	8.10	2.07	4.28
200	7.05	29.12	5.83	16.23	4.48	9.00	3.04	4.75
300	9.84	29.47	7.70	16.59	5.60	9.24	3.61	4.91
400	12.29	30.83	9.27	17.14	6.40	9.51	3.96	5.03
500	14.66	30.81	10.57	17.20	7.05	9.56	4.23	5.08
600	16.58	31.25	11.54	17.41	7.52	9.67	4.43	5.11
700	18.28	30.97	12.45	17.36	7.89	9.67	4.57	5.13
800	19.79	29.98	13.24	17.07	8.23	9.60	4.69	5.11
900	21.42	31.41	13.82	17.59	8.49	9.76	4.79	5.17
1000	22.66	29.41	14.42	16.90	8.70	9.57	4.86	5.11
1100	23.81	30.46	14.96	17.33	8.92	9.70	4.93	5.17
1200	25.11	31.56	15.34	17.67	9.07	9.81	4.99	5.20
1300	26.07	33.55	15.78	18.28	9.20	10.03	5.03	5.25
1400	26.91	34.49	16.16	18.60	9.36	10.12	5.07	5.29
1500	27.98	29.40	16.41	17.02	9.45	9.62	5.12	5.16
1600	28.74	30.29	16.74	17.27	9.55	9.73	5.14	5.19
1700	29.42	31.09	17.03	17.55	9.66	9.82	5.18	5.23
1800	30.06	31.70	17.22	17.78	9.74	9.87	5.20	5.23
1900	30.93	30.28	17.48	17.31	9.80	9.74	5.22	5.20
2000	31.49	30.85	17.72	17.47	9.89	9.81	5.25	5.22
2100	32.00	31.37	17.85	17.69	9.93	9.89	5.27	5.24
2200	32.73	32.09	18.04	17.91	9.99	9.95	5.29	5.27

Tabla F.6: Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama para 20 Km con A-MSDU máximo

Tasa Trama	54Mbps		24Mbps		12Mbps		6Mbps	
	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n
100	2.26	20.05	2.10	12.47	1.85	7.42	1.52	4.10
200	4.35	22.41	3.86	13.90	3.21	8.25	2.40	4.54
300	6.24	22.43	5.31	14.12	4.21	8.43	2.99	4.68
400	7.97	23.73	6.59	14.72	4.99	8.71	3.38	4.81
500	9.66	23.55	7.69	14.66	5.65	8.76	3.69	4.83
600	11.13	23.98	8.60	14.89	6.16	8.84	3.92	4.89
700	12.49	23.63	9.47	14.79	6.59	8.84	4.10	4.89
800	13.78	22.58	10.24	14.40	6.98	8.72	4.25	4.88
900	15.11	24.06	10.88	15.02	7.29	8.95	4.38	4.94
1000	16.23	21.88	11.51	14.14	7.55	8.61	4.48	4.85
1100	17.26	23.01	12.07	14.63	7.81	8.81	4.58	4.91
1200	18.39	24.14	12.52	15.11	8.02	9.01	4.66	4.97
1300	19.29	27.39	12.98	16.27	8.20	9.38	4.72	5.10
1400	20.18	28.39	13.45	16.64	8.38	9.51	4.79	5.13
1500	21.15	21.88	13.79	14.19	8.54	8.67	4.84	4.88
1600	21.91	22.73	14.16	14.53	8.67	8.81	4.88	4.93
1700	22.63	23.55	14.51	14.86	8.81	8.92	4.93	4.95
1800	23.32	24.22	14.78	15.13	8.91	9.04	4.97	5.00
1900	24.12	23.67	15.08	14.92	9.02	8.96	5.00	4.99
2000	24.70	24.26	15.35	15.14	9.12	9.03	5.04	5.02
2100	25.31	24.85	15.56	15.40	9.21	9.15	5.06	5.05
2200	26.02	25.56	15.81	15.64	9.28	9.21	5.09	5.07

Tabla F.7: Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama para 40 Km con A-MSDU máximo

Tasa Trama	54Mbps		24Mbps		12Mbps		6Mbps	
	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n
100	1.62	16.25	1.54	10.87	1.40	6.82	1.20	3.91
200	3.16	18.21	2.89	12.19	2.51	7.60	1.99	4.36
300	4.59	18.13	4.06	12.26	3.39	7.75	2.54	4.46
400	5.93	19.28	5.12	12.85	4.10	8.05	2.94	4.59
500	7.24	19.07	6.08	12.79	4.71	8.04	3.27	4.62
600	8.44	19.45	6.89	13.02	5.22	8.16	3.52	4.67
700	9.56	19.12	7.66	12.90	5.65	8.14	3.72	4.67
800	10.61	18.07	8.39	12.43	6.05	7.93	3.89	4.61
900	11.69	19.47	8.97	13.10	6.38	8.24	4.04	4.72
1000	12.65	17.44	9.57	12.11	6.67	7.83	4.16	4.60
1100	13.54	18.51	10.13	12.66	6.95	8.06	4.26	4.68
1200	14.47	19.53	10.59	13.16	7.17	8.27	4.36	4.75
1300	15.30	23.13	11.07	14.66	7.38	8.85	4.43	4.94
1400	16.08	24.16	11.48	15.06	7.58	8.99	4.51	4.98
1500	16.89	17.44	11.86	12.18	7.75	7.87	4.58	4.62
1600	17.60	18.19	12.24	12.52	7.91	8.03	4.64	4.69
1700	18.29	18.94	12.61	12.92	8.07	8.20	4.68	4.72
1800	18.94	19.61	12.88	13.21	8.20	8.32	4.74	4.78
1900	19.66	19.44	13.19	13.12	8.32	8.26	4.78	4.75
2000	20.29	20.03	13.50	13.37	8.44	8.38	4.81	4.79
2100	20.84	20.60	13.75	13.67	8.54	8.51	4.85	4.84
2200	21.53	21.25	14.03	13.93	8.64	8.59	4.88	4.87

F. TABLAS DE DATOS PRUEBA 3

Tabla F.8: Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama para 60 Km con A-MSDU máximo

Tasa Trama	54Mbps		24Mbps		12Mbps		6Mbps	
	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n
100	1.26	13.66	1.21	9.66	1.13	6.32	0.99	3.75
200	2.47	15.33	2.30	10.79	2.06	7.06	1.70	4.15
300	3.62	15.21	3.28	10.85	2.83	7.15	2.22	4.25
400	4.71	16.23	4.18	11.43	3.48	7.44	2.61	4.39
500	5.78	16.02	5.01	11.35	4.05	7.45	2.92	4.41
600	6.76	16.37	5.74	11.54	4.54	7.53	3.19	4.45
700	7.71	16.05	6.45	11.43	4.96	7.50	3.40	4.46
800	8.62	15.14	7.08	10.94	5.35	7.32	3.59	4.39
900	9.54	16.40	7.65	11.62	5.67	7.61	3.75	4.50
1000	10.35	14.49	8.21	10.62	5.97	7.19	3.88	4.33
1100	11.15	15.48	8.73	11.15	6.24	7.43	3.99	4.43
1200	11.98	16.45	9.16	11.65	6.49	7.64	4.09	4.53
1300	12.71	20.03	9.62	13.33	6.70	8.33	4.19	4.76
1400	13.42	20.96	10.05	13.78	6.93	8.52	4.27	4.83
1500	14.17	14.49	10.41	10.67	7.12	7.21	4.35	4.37
1600	14.83	15.21	10.80	11.04	7.28	7.37	4.41	4.42
1700	15.45	15.88	11.15	11.36	7.44	7.52	4.47	4.51
1800	16.03	16.48	11.47	11.70	7.58	7.66	4.52	4.56
1900	16.68	16.50	11.79	11.70	7.71	7.67	4.57	4.55
2000	17.23	17.06	12.10	11.96	7.86	7.80	4.62	4.59
2100	17.77	17.59	12.35	12.26	7.98	7.91	4.66	4.65
2200	18.35	18.21	12.62	12.54	8.07	8.04	4.70	4.68

Tabla F.9: Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama para 80 Km con A-MSDU máximo

Tasa Trama	54Mbps		24Mbps		12Mbps		6Mbps	
	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n
100	1.03	11.79	1.00	8.67	0.94	5.88	0.85	3.57
200	2.03	13.26	1.92	9.75	1.74	6.59	1.47	3.99
300	2.98	13.12	2.75	9.74	2.43	6.65	1.96	4.08
400	3.89	14.04	3.53	10.30	3.02	6.95	2.35	4.20
500	4.80	13.81	4.26	10.17	3.55	6.92	2.66	4.25
600	5.65	14.12	4.92	10.38	4.00	7.03	2.92	4.28
700	6.47	13.83	5.55	10.23	4.41	7.00	3.13	4.27
800	7.26	12.99	6.13	9.77	4.79	6.76	3.33	4.20
900	8.04	14.17	6.67	10.46	5.12	7.09	3.49	4.31
1000	8.77	12.41	7.18	9.45	5.41	6.61	3.62	4.14
1100	9.47	13.29	7.66	10.00	5.69	6.90	3.76	4.25
1200	10.19	14.17	8.09	10.49	5.93	7.11	3.87	4.34
1300	10.87	17.63	8.54	12.24	6.16	7.88	3.97	4.60
1400	11.49	18.52	8.95	12.69	6.37	8.05	4.06	4.68
1500	12.17	12.41	9.30	9.48	6.56	6.64	4.13	4.17
1600	12.73	13.04	9.67	9.84	6.74	6.84	4.20	4.25
1700	13.32	13.64	10.01	10.19	6.91	7.00	4.27	4.31
1800	13.87	14.20	10.31	10.52	7.07	7.17	4.34	4.37
1900	14.47	14.34	10.64	10.55	7.22	7.18	4.39	4.38
2000	14.98	14.85	10.93	10.85	7.35	7.31	4.44	4.43
2100	15.51	15.35	11.18	11.14	7.48	7.45	4.50	4.47
2200	16.06	15.90	11.46	11.41	7.59	7.55	4.53	4.53

Tabla F.10: Caudal para 802.11a y 802.11n en función del tamaño de trama para 100 Km con A-MSDU máximo

Tasa Trama	54Mbps		24Mbps		12Mbps		6Mbps	
	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n	802.11a	802.11n
100	0.88	10.35	0.85	7.90	0.81	5.52	0.74	3.43
200	1.73	11.67	1.64	8.85	1.52	6.15	1.31	3.84
300	2.55	11.51	2.37	8.84	2.13	6.22	1.76	3.90
400	3.33	12.36	3.06	9.34	2.67	6.51	2.13	4.06
500	4.10	12.15	3.71	9.24	3.16	6.49	2.44	4.03
600	4.84	12.41	4.30	9.42	3.59	6.59	2.70	4.12
700	5.55	12.15	4.87	9.32	3.97	6.52	2.91	4.11
800	6.24	11.33	5.41	8.84	4.33	6.30	3.09	4.00
900	6.96	12.41	5.90	9.48	4.66	6.62	3.27	4.15
1000	7.61	10.83	6.38	8.51	4.94	6.13	3.41	3.96
1100	8.24	11.63	6.83	9.04	5.21	6.42	3.55	4.05
1200	8.88	12.47	7.25	9.50	5.46	6.67	3.66	4.17
1300	9.46	15.79	7.65	11.31	5.68	7.50	3.77	4.48
1400	10.04	16.64	8.04	11.75	5.92	7.69	3.86	4.53
1500	10.64	10.83	8.39	8.54	6.10	6.18	3.95	3.96
1600	11.18	11.38	8.73	8.89	6.27	6.35	4.03	4.05
1700	11.72	11.93	9.09	9.23	6.46	6.54	4.10	4.12
1800	12.25	12.47	9.37	9.53	6.61	6.67	4.16	4.17
1900	12.79	12.67	9.70	9.65	6.74	6.73	4.22	4.22
2000	13.26	13.17	9.99	9.90	6.91	6.87	4.29	4.26
2100	13.71	13.65	10.24	10.19	7.03	7.02	4.33	4.31
2200	14.23	14.15	10.51	10.46	7.17	7.13	4.38	4.36

Parte VI

Referencias

Referencias

- [1] Grupo de Telecomunicaciones Rurales. *WiLD: WiFi Based Long Distance*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2009.
- [2] Naciones Unidas. Website, 2010. Sitio oficial Naciones Unidas. Disponible en: <http://www.un.org/spanish/millenniumgoals>.
- [3] Consejo Nacional de Telecomunicaciones. Website, 2010. Sitio oficial CONATEL. Disponible en: <http://www.conatel.gov.ec>.
- [4] Ieee standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements - part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. *IEEE Std 802.11-2007 (Revision of IEEE Std 802.11-1999)*, pages C1 –1184, 12 2007.
- [5] G. Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18:535–547, Mar 2000.
- [6] Giuseppe Bianchi and Ilennia Tinnirello. Remarks on IEEE 802.11 DCF performance analysis. *IEEE Communications Letters*, 9(8):765–767, Aug 2005.
- [7] Ieee standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications amendment 5: Enhancements for higher throughput. *IEEE Std 802.11n-2009 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, and IEEE Std 802.11w-2009)*, pages c1 –502, 29 2009.
- [8] D. Skordoulis, Qiang Ni, Hsiao-Hwa Chen, A.P. Stephens, Changwen Liu, and A. Jamalipour. Ieee 802.11n mac frame aggregation mechanisms for next-generation high-throughput wlans. *Wireless Communications, IEEE*, 15(1):40 –47, 2008.

- [9] Yuan Yuan, Daqing Gu, W. Arbaugh, and Jinyun Zhang. High-performance mac for high-capacity wireless lans. In *Computer Communications and Networks, 2004. ICCCN 2004. Proceedings. 13th International Conference on*, pages 167–172, 2004.
- [10] IEEE. Ieee 802.11n report, 2009. Estado de reuniones y resoluciones TGn. Disponible en: http://www.ieee802.org/11/Reports/tgn_update.htm.
- [11] T.K. Paul and T. Ogunfunmi. Evolution, insights and challenges of the phy layer for the emerging ieee 802.11n amendment. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 11(4):131–150, 2009.
- [12] Eric A. Brewer. Technology insights for rural connectivity, 2005.
- [13] Lakshminarayan Subramanian. Rethinking wireless in the developing world. In *In Proc. of the 5th Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets)*, 2006.
- [14] Bhaskaran Raman and Kameswari Chebrolu. Design and evaluation of a new mac protocol for long-distance 802.11 mesh networks , 2005.
- [15] Ananth Rao Ion Stoica. An overlay mac layer for 802.11 networks. In *in MobiSys, 2005*, pages 135–148, 2005.
- [16] Rajendrakumar Patil, Prasanna Chaporkar, and Abhay Kar. Diversity combining and packet size adaptation for maximizing throughput of arq protocols in awgn and fading channel, 2009.
- [17] Kameswari Chebrolu, Bhaskaran Raman, and Sayandeep Sen. Long-distance 802.11b links: performance measurements and experience. In *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile computing and networking*, MobiCom '06, pages 74–85, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [18] Paolo Barsocchi, Gabriele Oligeri, and Francesco Potortì. Frame error model in rural Wi-Fi networks. In *proceedings of the International Symposium on Modeling and Optimization (Wiopt)*, pages 41–46, Limassol (CY), April 2007. ACM. WinMee/WiTMeMo workshop.
- [19] Anmol Sheth, Sergiu Nedeveschi, Rabin Patra, Sonesh Surana, and Eric Brewer. Packet loss characterization in wifi-based long distance networks. *IEEE INFOCOM*, 2007.
- [20] Andrés Martínez, Valentin Villarroel, Jaume Puig-Junoy, Joaquin Seoane, and Francisco del Pozo. An economic analysis of the ehas telemedicine system in alto amazonas. *J Telemed Telecare*, 13(1):7–14, 2007.

-
- [21] Alvaro Rendón, Andrés Martínez, María F. Dulcey, Joaquín Seoane, Richard G. Shoemaker, Valentín Villarroel, Diego M. López, and Javier Simó. Rural telemedicine infrastructure and services in the Department of Cauca, Colombia. *Telemedicine journal and e-health : the official journal of the American Telemedicine Association*, 11(4):451–459, August 2005.
- [22] Shridhar Mubaraq Mishra, John Hwang, Reza Moazzami, Lakshminarayanan Subramanian, and Tom Du. Economic analysis of networking technologies for rural developing regions. In *In 1st Workshop on Internet and Network Economics*, 2005.
- [23] Eric Brewer, Michael Demmer, Bowei Du, Melissa Ho, Matthew Kam, Sergiu Nedevschi, Joyojeet Pal, Rabin Patra, Sonesh Surana, and Kevin Fall. The case for technology in developing regions. *Computer*, 38:25–38, June 2005.
- [24] Melissa R. Ho and RJ Honicky. Re-assessing long distance wireless for west africa. 2008.
- [25] Chebrolu Kameswari Raman Bhaskaran. Experiences in using wifi for rural internet in india, 2007.
- [26] Surana Sonesh Sheth Anmol Subramanian Lakshminarayanan Brewer Eric Patra Rabin, Nedevschi Sergiu. Wildnet: Design and implementation of high performance wifi based long distance networks. In *4th USENIX Symposium on Networked Systems Design Implementation*, pages 87–100, 2007.
- [27] Debmalya Panigrahi and Bhaskaran Raman. Tdma scheduling in long-distance wifi networks, 2009.
- [28] Sergiu Nedevschi, Rabin K. Patra, Sylvia Ratnasamy Lakshminarayanan, Sonesh Surana, and Eric Brewer. An adaptive, high performance mac for long-distance multihop wireless networks, 2008.
- [29] Dimitrios Koutsonikolas, Theodoros Salonidis, Henrik Lundgren, Pascal Leguyadec, Y. Charlie Hu, and Irfan Sheriff. Tdm mac protocol design and implementation for wireless mesh networks. In *In Proc. of ACM CoNEXT*, 2008.
- [30] Krishna Paul, Anitha Varghese, Sridhar Iyer, Bhaskar Ramamurthi, and Anurag Kumar. Wifire: Rural area broadband access using the wifi phy and a multisector tdd mac. *IEEE Communications Magazine*, 45(January):111–119, 2007.
- [31] E. Pietrosevoli A.S. Okay R. Flickenger M. Zennaro, C. Fonda and S. Radicella. On a long wireless link for rural telemedicine in malawi. In *Proceedings Sixth Int’l Conf. Open Access*, 2008.

- [32] Rob Flickenger, Steve Okay, Ermanno Pietrosemoli, Marco Zennaro, and Carlo Fonda. Very long distance wi-fi networks. In *Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Networked systems for developing regions*, NSDR '08, pages 1–6, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [33] Yang Xiao. Mac performance analysis and enhancement 100 mbps data rates for ieee 802.11. In *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th*, volume 3, pages 1869 – 1873 Vol.3, 2003.
- [34] Yang Xiao. Packing mechanisms for the ieee 802.11n wireless lans. In *Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04. IEEE*, 2004.
- [35] Yang Xiao. Ieee 802.11n: enhancements for higher throughput in wireless lans. *Wireless Communications, IEEE*, 12(6):82 – 91, 2005.
- [36] Gautam Bhanage, Rajesh Mahindra, Ivan Seskar, and Dipankar Raychaudhuri. Implication of mac frame aggregation on empirical wireless experimentation. In *Proceedings of the 28th IEEE conference on Global telecommunications*, GLOBECOM'09, pages 545–551, Piscataway, NJ, USA, 2009. IEEE Press.
- [37] Youngsoo Kim, Sunghyun Choi, Kyunghun Jang, and Hyosun Hwang. Throughput enhancement of ieee 802.11 wlan via frame aggregation. In *Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th*, volume 4, pages 3030 – 3034 Vol. 4, 2004.
- [38] B. Ginzburg and A. Kesselman. Performance analysis of a-mpdu and a-msdu aggregation in ieee 802.11n. In *Sarnoff Symposium, 2007 IEEE*, 30 2007.
- [39] Byung Soo Kim, Ho Young Hwang, and Dan Keun Sung. Effect of frame aggregation on the throughput performance of ieee 802.11n. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*, 31 2008.
- [40] Yuxia Lin and V.W.S. Wong. Wsn01-1: Frame aggregation and optimal frame size adaptation for ieee 802.11n wlans. In *Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE*, 27 2006.
- [41] T. Selvam and S. Srikanth. A frame aggregation scheduler for ieee 802.11n. In *Communications (NCC), 2010 National Conference on*, pages 1 –5, 2010.
- [42] P. Almers, E. Bonek, A. Burr, N. Czink, M. Debbah, V. Degli-esposti, H. Hofstetter, P. Kyösti, D. Laurenson, G. Matz, A. F. Molisch, C. Oestges, and H. Özcelik. Survey of channel and radio propagation models for wireless mimo systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007.

-
- [43] IEEE 802.11 TGn channel model special committee. Tgn channel models for ieee 802.11 wlans. *IEEE doc.: IEEE 802.11-03/940r4*, May 2004.
- [44] IEEE 802.11 TGn channel model special committee. Usage models for ieee 802.11 wlans. *IEEE doc.: IEEE 802.11-03/802r23*, May 2004.
- [45] José M. Hernando Rábanos. *Transmisión por Radio*. Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid-España, 2003.
- [46] Jeffrey M. Gilbert, Won-Joon Choi, and Qinfang Sun. Mimo technology for advanced wireless local area networks. In *Proceedings of the 42nd annual Design Automation Conference, DAC '05*, pages 413–415, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [47] S. Moghe and R. Upadhyay. Single input single output technology in 802.11n. In *Emerging Trends in Electronic and Photonic Devices Systems, 2009. ELECTRO '09. International Conference on*, pages 247–249, 2009.
- [48] S. Moghe and R. Upadhyay. Comparison of siso and mimo techniques in 802.11n wireless local area network. In *Emerging Trends in Electronic and Photonic Devices Systems, 2009. ELECTRO '09. International Conference on*, pages 245–246, 2009.
- [49] H. Bolcskei. Mimo-ofdm wireless systems: basics, perspectives, and challenges. *Wireless Communications, IEEE*, 13(4):31–37, 2006.
- [50] Jonas Hansryd and Jonas Edstam. Microwave capacity evolution –new technologies and additional frequencies. In *Ericsson Review I -2011*, Ericsson Review, New York, NY, USA, 2011. Ericsson RSS.
- [51] Vivek Shrivastava, Shravan Rayanchu, Jongwoon Yoonj, and Suman Banerjee. 802.11n under the microscope. In *Proceedings of the 8th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement, IMC '08*, pages 105–110, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [52] Chun Yeow Yeoh. Experimental study of 802.11n network. In *Advanced Communication Technology (ICACT), 2010 The 12th International Conference on*, volume 2, pages 1067–1072, 2010.
- [53] E. Perahia. Ieee 802.11n development: History, process, and technology. *Communications Magazine, IEEE*, 46(7):48–55, 2008.
- [54] NLANR/DAST. Website, 2010. Sitio oficial IPERF. Disponible en: <http://iperf.sourceforge.net/>.
- [55] Ubiquiti Networks. Website, 2010. Sitio oficial equipos Ubiquiti, datasheets. Disponible en: <http://ubnt.com/rocketm>.

- [56] Roger Coudé VE2DBE. Website, 2010. Sitio oficial Radio Mobile. Disponible en: <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>.
- [57] Scalable Networks. Website, 2010. Sitio oficial Qualnet. Disponible en: <http://www.scalable-networks.com/products/qualnet/>.
- [58] Information Sciencies Institute. Website, 2010. Sitio oficial NS-2. Disponible en: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [59] Information Sciencies Institute. Website, 2010. Sitio oficial NS-3. Disponible en: <http://www.nsnam.org/>.
- [60] Guangyu Pei and Thomas R. Henderson. Validation of ns-3 802.11b phy model. *Boeing Research Technology*, pages 1–21, May 2009.
- [61] Guangyu Pei and Thomas R. Henderson. Validation of ofdm error rate model in ns-3. *Boeing Research Technology*, pages 1–15, 2010.
- [62] Mathieu Lacage and Thomas R. Henderson. Yet another network simulator. In *Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network simulator*, WNS2 '06, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [63] J. Simo Reigadas, A. Martinez-Fernandez, J. Ramos-Lopez, and J. Seoane-Pascual. Modeling and optimizing ieee 802.11 dcf for long-distance links. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 9(6):881–896, 2010.
- [64] Theodore S. Rappaport. *Wireless Communications. Principles and practice*. Prentice Hall PTR, United States of America, 2002.
- [65] Masood Khosroshahy. Study and implementation of ieee 802.11 physical channel model in yans (ns3 prototype) network simulator. Technical report, INRIA-Sophia Antipolis-Planète Group, 2006.
- [66] J.C. Liberti and T.S. Rappaport. *Smart antennas for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications*. Prentice-Hall communications engineering and emerging technologies series. Prentice Hall PTR, 1999.
- [67] John S. Seybold. *Introduction to RF Propagation*. Wiley-Interscience, New Jersey, 2005.
- [68] Simon Haykin. *Sistemas de comunicación*. Limusa Wiley, 2008.