



## **Análisis del desempeño de modelos de propagación utilizados en 4g**

Camacho Muncha Diana María

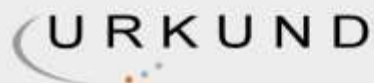
Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Electrónica y  
Telecomunicaciones

Ing. Bernal Oñate, Carlos Paúl, MSc.

18 de marzo del 2021



## Urkund Analysis Result

Analysed Document: CAMACHO\_MUNCHA\_DIANA\_MARIA\_TESIS\_V5.docx (D98763079)  
Submitted: 3/18/2021 1:28:00 PM  
Submitted By: cpbernal@espe.edu.ec  
Significance: 2 %

### Sources included in the report:

[### Instances where selected sources appear:](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052017000200083#:~:text=Un%20modelo%20de%20propagaci%C3%B3n%20es,radio%20de%20un%20ambiente%20dado.Boccardi,https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-ltePedraza,https://www.universidadviu.com/int/actualidad/nuestros-expertos/evolucion-de-la-red-de-comunicacion-movil-del-1g-al-5g#:~:text=Red%20de%20comunicaci%C3%B3n%20m%C3%B3vil%20de,Noruega%20y%20Suecia%252C%20en%201981.&text=Est%C3%A1ndares%20-%20AMPS%20(AdvanceVaca,</a></p></div><div data-bbox=)

12



Escaneado y autenticado por:  
**CARLOS PAUL  
BERNAL ONATE**



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y

TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y

TELECOMUNICACIONES

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Análisis del desempeño de Modelos de propagación utilizados en 4G”** fue realizado por la señorita **Camacho Muncha Diana María** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 18 de Marzo del 2021**



Firma digitalizada por:  
**CARLOS PAUL  
BERNAL ONATE**

.....  
Ing. Bernal Oñate Carlos Paúl. Msc.

C.C. 1709775637



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Camacho Muncha Diana María**, con cédula de ciudadanía n° 1804382776, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Análisis del desempeño de Modelos de propagación utilizados en 4G"** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 19 de marzo del 2021**

**Camacho Muncha Diana María**

C.C.: 1804382776



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo **Camacho Muncha Diana María** con cédula de ciudadanía n° 1804382776 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Análisis del desempeño de Modelos de propagación utilizados en 4G”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

**Sangolquí, 18 de marzo del 2021**

**Camacho Muncha Diana María**

C.C.: 1804382776

### **Dedicatoria**

*“Para empezar un gran proyecto, hace falta valentía. Para terminar un gran proyecto, hace falta perseverancia”.*

Esta meta se la dedico de todo corazón a mi madre Carmen Muncha, a mi padre Elías Camacho, a todos mis hermanos y hermanas y a mi esposo e hija, ya que fueron ellos quienes me apoyaron en los buenos y malos momentos, supieron darme una palabra de aliento, y estuvieron siempre pendientes de cada uno de mis pasos. Y fueron mis guías durante este largo trayecto de mi vida.

## **Agradecimiento**

Agradezco a mis padres por creer en mí, por siempre levantarme el ánimo cuando más lo necesite. Y aconsejarme para tomar las mejores decisiones.

Quiero agradecer de manera especial al Ing. Paul Bernal quien fue la persona que estuvo siempre apoyándome y guiándome con la elaboración de mi trabajo de Titulación y supo darme una palabra de aliento en los momentos más difíciles. De igual forma al Ing. Ariel Diaz quien me enseñó a ver los grandes retos como oportunidades para crecer más, quien estuvo ahí incondicionalmente y me apoyo cuando más lo necesite.

A mi esposo e hija, quienes con sus sonrisas diarias hacían que este proceso sea más sencillo. Gracias por cuidarme y siempre apoyarme en mis decisiones.

A mis hermanas y hermanos quienes con sus palabras me hacían saber que era capaz de lograr culminar esta etapa de mi vida.

De manera especial quiero agradecer a todos mis amigos/as quienes formaron parte de mi vida, con cada uno de sus detalles, quienes fueron confidentes, cómplices y sobre todo amigos/as. Gracias por su amistad Ariel, Jonathan V., Yomara, Vanessa, Marco, Jonathan S., Joselyn, Cinthia y Kevin definitivamente jamás volveré a vivir las cosas que pasamos juntos.

## Contenidos

Urkund .....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de Autoría .....	4
Autorización de Publicación .....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimiento .....	7
Contenidos .....	8
Índice de Tablas .....	13
Índice de Figuras.....	15
Abstract .....	20
Capítulo I .....	21
Descripción .....	21
Introducción .....	21
Antecedentes .....	22
Justificación e importancia.....	23
Alcance .....	24
Objetivos .....	24
<i>Objetivo General</i> .....	24
<i>Objetivos específicos</i> .....	25
Capitulo II .....	26



Marco Teórico .....	26
Definición de sistema de comunicación inalámbrica .....	26
Evolución de las redes inalámbricas en telefonía móvil .....	26
<i>Primera Generación 1G</i> .....	26
<i>Segunda Generación 2G</i> .....	27
<i>Tercera Generación (3G)</i> .....	27
<i>Cuarta generación (4G)</i> .....	28
Modelo de propagación .....	30
<i>Modelo Cost 231 Hata</i> .....	30
<i>Ericsson 9999</i> .....	31
<i>Modelo de propagación JTG5-6</i> .....	32
Tecnología LTE .....	34
<i>Parámetros de radio en la red LTE</i> .....	36
Capítulo III.....	38
Desarrollo.....	38
LTE .....	38
Arquitectura de Sistema 4G de Comunicaciones .....	38
<i>Tecnologías de acceso radio</i> .....	38
<u>ñ</u> OFDMA .....	39
SC-FDMA.....	40
<i>Canales físicos</i> .....	41

	10
<i>MIMO</i> .....	43
<i>Modelado de capa Física LTE (PHY)</i> .....	45
<i>Bandas de frecuencia</i> .....	46
<i>Componentes para un Sistema 4G</i> .....	49
<i>Modelos de propagación</i> .....	51
Potencia de Recepción.....	58
<i>Procedo de Downlink</i> .....	59
Capítulo IV .....	60
Desempeño del Modelo Cost 231 Hata .....	60
<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs SNR con el modelo Cost 231 Hata urbano</i> .....	60
<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs Distancia con Cost 231 Hata urbano</i> .....	64
<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs SNR Cost 231 Hata Suburbano</i> .....	69
<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs Distancia</i> .....	71
Desempeño del modelo Ericsson .....	76
<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs SNR con el modelo Ericsson Urbano</i> .....	77
<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs Distancia con el modelo Ericsson Urbano</i> .....	80

<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs SNR para Ericsson suburbano</i> .....	85
<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs distancia para Ericsson Suburbano</i> .....	87
<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs SNR para Ericsson Rural</i> .....	92
<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según BER vs Distancia con Ericsson Rural</i> .....	94
Desempeño del modelo JTG56 .....	99
<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según BER vs SNR con un modelo JTG5-6 Urbano</i> .....	99
<i>Análisis del desempeño de un sistema 4G según BER vs distancia con un modelo JTG5-6 Urbano</i> .....	102
<i>Análisis del comportamiento del sistema 4G según BER vs SNR JTG5-6 Suburbano</i> .....	106
<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs Distancia con un modelo JTG5-6 Suburbano</i> .....	109
<i>Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs SNR con un modelo JTG5-6 Rural</i> .....	113
<i>Análisis del desempeño de un sistema 4G según el BER vs distancia para el modelo JTG5-6 rural</i> .....	116
Factores que influyen en los resultados .....	120
Comparación de los modelos de propagación.....	121

<i>Escenario Urbano</i> .....	121
<i>Escenario Suburbano</i> .....	122
<i>Escenario Rural</i> .....	124
Capítulo V .....	127
Conclusiones y recomendaciones .....	127
Conclusiones .....	127
Recomendaciones .....	128
Bibliografía .....	129
Anexos .....	134

## Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Parámetros del modelo de propagación Cost 231 Hata</i> .....	31
Tabla 2 <i>Definición de valores según su distancia</i> .....	32
Tabla 3 <i>Parámetros radio de LTE</i> .....	36
Tabla 4 <i>Especificación de OFDM</i> .....	39
Tabla 5 <i>Canales físicos para Downlink</i> .....	41
Tabla 6 <i>Canales físicos para Uplink</i> .....	42
Tabla 7 <i>Modos de transmisión LTE</i> .....	44
Tabla 8 <i>Bandas de frecuencia emparejadas definidas para E-UTRA</i> .....	47
Tabla 9 <i>Bandas de frecuencia no emparejadas definidas para E-utran</i> .....	48
Tabla 10 <i>Especificaciones funcionales</i> .....	49
Tabla 11 <i>Parámetros para Cost 231 Hata</i> .....	51
Tabla 12 <i>Perdidas de propagación escenario urbano, rural y suburbano de 0 a 2[km]</i> .....	53
Tabla 13 <i>Parámetros para Cost 231 Hata</i> .....	54
Tabla 14 <i>Perdidas de propagación en escenarios urbanos, rurales, suburbanos de 0 a 2[km]</i> .....	55
Tabla 15 <i>Parámetros de trabajo para el modelo JT5-6</i> .....	57
Tabla 16 <i>Perdidas de propagación en escenarios urbanos, rurales, suburbanos de 0 a 2[km]</i> .....	57
Tabla 17 <i>Potencia de recepción con el Modelo Cost 231 Hata</i> .....	60
Tabla 18 <i>Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000</i> .....	68
Tabla 19 <i>Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000</i> .....	68
Tabla 20 <i>Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000</i> .....	68
Tabla 21 <i>Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000</i> .....	75
Tabla 22 <i>Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000</i> .....	76
Tabla 23 <i>Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000</i> .....	76

Tabla 24	<i>Potencias en escenarios urbano, Suburbano y rural</i> .....	77
Tabla 25	<i>Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	84
Tabla 26	<i>Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	84
Tabla 27	<i>Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	84
Tabla 28	<i>Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	91
Tabla 29	<i>Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	91
Tabla 30	<i>Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	91
Tabla 31	<i>Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	98
Tabla 32	<i>Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	98
Tabla 33	<i>Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	98
Tabla 34	<i>Potencia de recepción para el modelo JTG5-6.</i> .....	99
Tabla 35	<i>Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	105
Tabla 36	<i>Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	105
Tabla 37	<i>Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	106
Tabla 38	<i>Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	112
Tabla 39	<i>Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	112
Tabla 40	<i>Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	113
Tabla 41	<i>Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	119
Tabla 42	<i>Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	119
Tabla 43	<i>Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.</i> .....	120

## Índice de Figuras

Figura 1 Modelo Jtg5-6 Entre 100m Y 1000m .....	33
Figura 2 Soluciones De Red Desde Gsm (2g) A LTE (4g).....	35
Figura 3 Interfaces S1 Y X2 .....	36
Figura 4 Asignación De Recursos De Diferentes Usuarios OFDMA.....	40
Figura 5 Diferencia Entre La Asignacion De Subportadoras OFDMA Y SC-FDMA.....	41
Figura 6 Sistema MIMO. ....	43
Figura 7 Especificación De La Capa Física LTE.....	46
Figura 8 Perdidas De Propagación Para Cost 231 Hata, Urbano, Suburbano, Rural....	54
Figura 9 Perdidas De Propagación Para Ericsson, Urbano, Suburbano, Rural.....	56
Figura 10 Perdidas De Propagación Para El Modelo Jtg5-6.....	58
Figura 11 Especificación De La Capa Física LTE.....	59
Figura 12 Ber Vs Snr.....	62
Figura 13 Grafica De Ber Vs Snr, Distancia Entre El Tx Y Rx A 200m, Cost231 Hata- Urbano .....	62
Figura 14 Grafica De Ber Vs Snr, Distancia Entre El Tx Y Rx A 1000m, Cost231 Hata- Urbano .....	63
Figura 15 Grafica De Ber Vs Snr, Distancia Entre El Tx Y Rx A 2000m, Cost231 Hata- Urbano .....	63
Figura 16 Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Cost 231 Hata Urbano .....	65
Figura 17 Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Cost 231 Hata Urbano .....	65
Figura 18 Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Cost 231 Hata Urbano .....	66
Figura 19 Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 0db. ....	67
Figura 20 Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 8db. ....	67
Figura 21 Grafica De Ber Vs Snr, Distancia De Tx Y Rx A 200m, Cost231 Hata- Suburbano .....	70

Figura 22 Grafica De Ber Vs Snr, Distancia De Tx Y Rx A 1000m, Cost231 Hata-Suburbano .....	70
Figura 23 Grafica De Ber Vs Snr, Distancia De Tx Y Rx A 2000m, Cost231 Hata-Suburbano .....	71
Figura 24 Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Cost 231 Hata Suburbano ....	73
Figura 25 Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Cost 231 Hata Suburbano .....	73
Figura 26 Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Cost 231 Hata Suburbano .....	74
Figura 27 Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 0db .....	74
Figura 28 Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 8db. ....	75
Figura 29 Grafica De Ber Vs Snr, Distancia Entre El Tx Y Rx A 200m, Ericsson-Urbano .....	78
Figura 30 Grafica De Ber Vs Snr, Distancia Entre El Tx Y Rx A 1000m, Ericsson-Urbano .....	79
Figura 31 Grafica De Ber Vs Snr, Distancia Entre El Tx Y Rx A 2000m, Ericsson-Urbano .....	79
Figura 32 Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Ericsson Rural.....	81
Figura 33 Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Ericsson Rural.....	82
Figura 34 Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Ericsson Urban .....	82
Figura 35 Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 0db. ....	83
Figura 36 Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 8db. ....	83
Figura 37 Ber Vs Snr, Modelo Ericsson-Suburbano, Distancia Entre Tx Y Rx 200m. ....	86
Figura 38 Ber Vs Snr, Modelo Ericsson-Suburbano, Distancia Entre Tx Y Rx 1000m. .	86
Figura 39 Ber Vs Snr, Modelo Ericsson-Suburbano, Distancia Entre Tx Y Rx 2000m. .	87
Figura 40 Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Ericsson Suburbano.....	88
Figura 41 Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Ericsson Suburbano.....	89
Figura 42 Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Ericsson Suburbano.....	89



Figura 43	Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 0db. ....	90
Figura 44	Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 8db. ....	90
Figura 45	Ber Vs Snr, Modelo Ericsson-Rural, Distancia Entre Tx Y Rx 200m. ....	93
Figura 46	Ber Vs Snr, Modelo Ericsson-Rural, Distancia Entre Tx Y Rx 1000m. ....	93
Figura 47	Ber Vs Snr, Modelo Ericsson-Rural, Distancia Entre Tx Y Rx 2000m. ....	94
Figura 48	Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Ericsson Rura .....	95
Figura 49	Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Ericsson Rural.....	96
Figura 50	Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Ericsson Rural.....	96
Figura 51	Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 0db. ....	97
Figura 52	Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 8db. ....	97
Figura 53	Ber Vs Snr, Modelo Jtg5-6, Distancia Entre Tx Y Rx 200m.....	100
Figura 54	Ber Vs Snr, Modelo Jtg5-6, Distancia Entre Tx Y Rx 1000m.....	101
Figura 55	Ber Vs Snr, Modelo Jtg5-6, Distancia Entre Tx Y Rx 2000m.....	101
Figura 56	Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Jtg5-6 Urbano .....	103
Figura 57	Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Jtg5-6 Urbano .....	103
Figura 58	Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Jtg5-6 Urbano. ....	104
Figura 59	Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 0db. ....	104
Figura 60	Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 8db. ....	105
Figura 61	Ber Vs Snr, Modelo Jtg5-6, Distancia Entre Tx Y Rx 200m.....	107
Figura 62	Ber Vs Snr, Modelo Jtg5-6, Distancia Entre Tx Y Rx 1000m.....	108
Figura 63	Ber Vs Snr, Modelo Jtg5-6, Distancia Entre Tx Y Rx 2000m.....	108
Figura 64	Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Jtg5-6 Suburbano .....	110
Figura 65	Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Jtg5-6 Suburbano .....	110
Figura 66	Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Jtg5-6 Suburbano .....	111
Figura 67	Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 0db. ....	111
Figura 68	Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 8db. ....	112

Figura 69	Ber Vs Snr, Modelo Jtg5-6, Distancia Entre Tx Y Rx 200m.....	114
Figura 70	Ber Vs Snr, Modelo Jtg5-6, Distancia Entre Tx Y Rx 1000m.....	115
Figura 71	Ber Vs Snr, Modelo Jtg5-6, Distancia Entre Tx Y Rx 2000m.....	115
Figura 72	Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Jtg5-6 Rural. ....	117
Figura 73	Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Jtg5-6 Rural ....	117
Figura 74	Grafica Del Ber Vs Distancia Para El Modelo Jtg5-6 Rural. ....	118
Figura 75	Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 0db. ....	118
Figura 76	Ber Vs Distancia Para 16qam Y 64qam Para Un Snr De 0db. ....	119
Figura 77	Grafica Del Ber Vs Snr.....	121
Figura 78	Grafica Del Ber Vs Snr.....	122
Figura 79	Grafica Del Ber Vs Snr.....	123
Figura 80	Grafica Del Ber Vs Snr.....	124
Figura 81	Grafica Del Ber Vs Snr.....	125
Figura 82	Grafica Del Ber Vs Snr.....	126

## Resumen

El comportamiento de un sistema de comunicación 4G, depende de varios factores para obtener una tasa de bits erróneos baja. Entre los factores se tiene: el esquema de modulación, la configuración de las antenas, el tipo de tecnología, la tasa de codificación, las bandas de frecuencias, el tipo de canal y el modelo de propagación para la transmisión. Es por esto que el presente proyecto se enfoca en estudiar los diferentes comportamientos que toma un sistema de comunicación 4G al utilizar los modelos de propagación Cost 231 Hata, Ericsson 9999 y JTG-6. Para obtener mejores resultados se establece que la distancia entre el Tx y Rx será variado de 200m a 2000m, con el objetivo de observar el comportamiento del BER vs la distancia, de igual forma se trabaja con valores de SNR de 1dB-15dB, para determinar la tasa de error de bits (BER) en cada uno de los escenarios y con cada uno de los modelos. Finalmente se procede a obtener graficas del BER vs SNR para un escenario urbano, suburbano, rural, con los tres modelos de propagación con el objetivo de determinar qué modelo de propagación permite que el sistema 4G presenta la menor tasa de error de bis (BER) en cada uno de los escenarios.

### **PALABRAS CLAVES:**

- **MODELOS DE PROPAGACION**
- **TASA DE ERROR DE BITS (BER)**
- **RELACION SEÑAL A RUIDO (SNR)**
- **SISTEMA DE COMUNICACION 4G**

### **Abstract**

The behavior of a 4G communication system depends on several factors to obtain a low erroneous bit rate. Among the factors are: the modulation scheme, the antenna configuration, the type of technology, the coding rate, the frequency bands, the type of channel and the propagation model for the transmission. That is why this project focuses on studying the different behaviors that a 4G communication system takes when using the propagation models Cost 231 Hata, Ericsson 9999 and JTG-6. To obtain better results, it is established that the distance between the Tx and Rx will be varied from 200m to 2000m, in order to observe the behavior of the BER vs the distance, in the same way it works with SNR values of 1dB-15dB, to determine the bit error rate (BER) in each of the scenarios and with each of the models. Finally, The graphs of the BER vs SNR are obtain for an urban, suburban, rural scenario, with the three propagation models in order to determine which propagation model allows the 4G system to present the lowest bis error rate (BER) in each of the scenarios.

### **KEYWORDS:**

- **PROPAGATION MODEL**
- **BIT ERROR RATE (BER)**
- **SIGNAL TO NOISE RATIO (SNR)**
- **4G COMMUNICATION SYSTEM**

## Capítulo I

### Descripción

#### Introducción

Hoy en día las redes de comunicación inalámbricas, representan un papel muy importante, ya que no solo permiten la transmisión de voz y datos, si no con frecuencia se utiliza para emitir señales de televisión, de sensores, para domótica y más. (Báez, 2016). Sin duda la comunicación inalámbrica ha permitido que todo el mundo logre mantenerse comunicado a pesar de la emergencia sanitaria que se vive en la actualidad, permitiendo que se continúe con las labores diarias independientemente de la ubicación.

Es necesario tomar en cuenta que la transmisión y recepción de estas señales inalámbricas son afectadas por diversos factores que impiden su adecuado funcionamiento, como es, la frecuencia de trabajo, la capacidad de la red, la distancia de las antenas de Tx y Rx y otros. Por otra parte, las redes inalámbricas de comunicación se encuentran presentes desde 1980, año en el que se únicamente se tenía servicios de voz, y la seguridad de la red era ineficiente, poco a poco el avance tecnológico permite transmitir datos, y video con alta calidad de servicio, así también mejora la seguridad dando privacidad al usuario. En el año de 2010 ya se tiene una cuarta generación (4G), la cual ofrece alta velocidad, alta capacidad, seguridad y servicios de bajo coste para voz y datos y multimedia e internet a través de IP. Las características más relevantes de para 4G son: Ancho de banda de 10MHz, velocidad máxima de transmisión pico de 100Mbps para Downlink (DL) y 50Mbps para Uplink(UL), eficiencia espectral típica de Uplink(UL) 2.5bps/Hz y para Downlink(DL) 5bps/Hz,

frecuencias de operación para Uplink(UL) de 1710MHz-1785MHz y para Downlink de 1805MHz-1880Mhz (Toledo, 2013) (López, 2014).

También se puede mencionar que, en los últimos años se ha producido un gran avance en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas lo que ha dado paso a 5G una tecnología que tiene por objetivo admitir nuevos tipos de aplicaciones y un uso flexible del espectro, inclusión de frecuencias nunca antes utilizadas en sistemas celulares, realidad aumentada, inteligencia artificial(IA), un entorno en que todo está conectado, el acceso fijo-inalámbrico, banda ancha móvil optimizada, y soporte para IoT (internet de las cosas) y más. (RESEARCH, 2018)

Debido a que la comunicación inalámbrica depende de varios parámetros de radio frecuencia, el presente proyecto se enfoca en las condiciones de propagación, tomando en cuenta diferentes modelos de propagación como Cost 231 Hata, Ericsson 9999 y JTG5-6, que permiten identificar cuan eficiente a nivel de tasa de error de bits (BER) es un sistema de comunicación 4G al trabajar con cada uno de los modelos de propagación.

### **Antecedentes**

En el ámbito internacional en una investigación realizada por (Garcia, 2016) en Madrid, la cual llevo por nombre, modelos de propagación para comunicaciones móviles en 4G y 5G, donde destaca que a lo largo de su investigación el modelo COST 231 Hata fue el más adecuado para identificar las pérdidas del trayecto de la banda 4G donde sufre una mitigación en la propagación de la misma, se determinó que la no excesiva complejidad debe ser un requisito prioritario para su empleabilidad.

El trabajo de (Fernandez A. , 2014), completa el estudio y simulación del canal móvil para bandas de LTE llevando una distribución Rician Rayleigh con un modelo de

propagación Okumura Hata y la utilización de Matlab, realizando la introducción de las características esenciales de LTE, describiendo la compatibilidad con tecnologías pasadas, además se determinan las características del canal inalámbrico utilizado, así mismo el efecto del desvanecimiento de las distribuciones Rician y Rayleigh, de esta forma dando paso a un análisis detallado del modelo de propagación Okumura Hata en sus diferentes ambientes. En el presente trabajo se realiza el mismo análisis con la diferencia que se trabaja con dos esquemas de modulación 16QAM y 64QAM y con 3 modelos de propagación diferentes a los establecidos en el proyecto cita.

### **Justificación e importancia**

A lo largo de los años las comunicaciones inalámbricas han sufrido un gran desarrollo, en cuanto a la velocidad de la red para que se pueda realizar una óptima transmisión de datos, así mismo en las diferentes técnicas o métodos empleados al momento de prestar los servicios.

Con las nuevas tecnologías el factor velocidad en la comunicación se vuelve importante para los usuarios ya que, les permite tener una mejor experiencia en los diferentes aspectos que resalta la transmisión de datos tales como; los servicios de video, voz, en este caso para la ejecución de lo mencionado y su funcionalidad, entran en juego los métodos y modelos de propagación, a través de ello grandes empresas han innovado las comunicaciones inalámbricas, permitiendo el nuevo surgimiento de la tecnología 4G generando que muchos usuarios lo usen por los beneficios importantes tales como la recepción de datos y emisión de los mismos además los servicios de voz y video pero con un mayor alcance y cubrimiento de zonas aledañas, por lo que motiva su uso en las personas.

A través de estos diferentes tipos de desarrollo y avances en las comunicaciones inalámbricas, en las conexiones de diferentes tipos de redes móviles, debido a estos beneficios se da paso al estudio de los modelos de propagación tradicional utilizados ya que, puede que no cubran con las necesidades y características de la tecnología 4G, por lo que los métodos de propagación juegan un papel fundamental para ofrecer un buen servicio de calidad a los usuarios. Con esta intención se desea desarrollar una investigación en los modelos mencionados para la verificación de que puedan abarcar los diferentes requisitos que se encuentran presentes hoy en día. Se debe tomar en cuenta la frecuencia de trabajo que emplean estos modelos, es por ello que la presente investigación desea determinar el rendimiento de los modelos de propagación empíricos mayormente utilizados en 4G con respecto a modelos de propagación recientemente propuestos y dar un enfoque en la mitigación de las pérdidas que puedan encontrarse.

### **Alcance**

Se determinará el desempeño que pueda tener de los modelos de propagación Cost 231 Hata, Ericsson y JTG5- 6 para 4G, siendo un gran aporte a la investigación ya que, se quiere identificar si se encuentran pérdidas en las comunicaciones, de esta forma generar un análisis en el comportamiento de los modelos de propagación y enfatizar el modelo que posea las características más adecuadas y con menor pérdida de datos.

### **Objetivos**

#### ***Objetivo General***

Analizar el rendimiento de los modelos de propagación empíricos mayormente utilizados en 4G con respecto a modelos de propagación recientemente propuestos.



***Objetivos específicos***

- Investigar el desempeño de los modelos de propagación Cost 231 Hata, Ericsson y JTG5- 6 para 4G.
- Determinar los parámetros a utilizar en cada modelo de propagación que afectaran el comportamiento del canal de comunicaciones.
- Analizar el comportamiento de cada uno de los modelos de propagación para un mismo escenario con el fin de encontrar el modelo que presente menor pérdida de datos al obtener la gráfica del BER en función de SNR.
- Determinar los resultados con más relevación, que permitan identificar si los modelos actuales presentan menores pérdidas con respecto a los modelos comúnmente utilizados.
- Simular los modelos de propagación COST 231 Hata, JTG5-6, Ericsson 9999 en los distintos escenarios propuestos.

## Capítulo II

### Marco Teórico

#### Definición de sistema de comunicación inalámbrica

Las comunicaciones inalámbricas son aquellas donde el emisor y el receptor no se encuentran unidos por un medio de propagación físico, sino que se realiza el uso de modulación de ondas electromagnéticas en un área determinada. De esta manera lo tangible se encuentra en los dispositivos físicos tanto en los emisores y receptores de la señal, entre los cuales se tiene antenas, conexiones tipo punto a punto y punto a multipunto.

Este tipo de comunicaciones permite movilidad amplia, conexión de varios dispositivos en simultaneo, configuración de redes de alta complejidad, fácil instalación, y bajo costo, siendo de gran preferencia para redes domésticas, de trabajo, y en la actualidad es de gran ayuda en la educación, medicina, construcción y un sinnúmero de áreas que requiere de este tipo de comunicación.

#### Evolución de las redes inalámbricas en telefonía móvil

##### *Primera Generación 1G*

Este tipo de sistema móvil fue lanzado comercialmente por NTT en Japón en el año 1979, para luego del lanzamiento del Sistema Móvil Nórdica (NMI) en Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suecia en 1981, se caracterizaba por realizar transmisiones de tipo analógico de servicio de voz, pero su nivel era de baja calidad por lo que era usada la técnica FDMA o Acceso Múltiple por División de Frecuencia, su servicio era solo de voz, su tecnología era analógica y tenía una velocidad de 1kbps a 2,4 kbps a su vez contaba con una conmutación de circuitos, tenía un frecuencia de 800 a 900 MHz, el

ancho de la banda de radio frecuencia era de 30 kHz la banda tenia una capacidad de 832 canales dúplex, donde 21 se encontraban reservados por el establecimiento de llamadas y el resto para comunicaciones de voz, haciendo que la calidad de transmisión no sea eficiente.

### ***Segunda Generación 2G***

Esta generación ya contaba con la transmisión de voz y datos digitales de volúmenes bajos, como ejemplo se puede mencionar los mensajes de texto conocido como SMS (Servicio de mensajes cortos) o los Mensajes de Multimedia (MMS Servicio de mensajes de multimedia) además era posible identificar las llamadas, esta generación pudo lograr que los sistemas de telefonía celular incrementaran las velocidades de transmisión de información además de que los sistemas 2G logro el incremento de la seguridad, el Roaming además de la calidad de voz, su velocidad de transmisión era desde 9.6 hasta aprox.30kbps, y las sus tecnologías de acceso se basaron en TDMA y CDMA, dependiendo de la multiplexación utilizada.

Según la (Universidad Internacional de Valencia, 2020) Contaba con los siguientes servicios de voz digital, SMS, Roaming internacional, llamada en espera, conferencia, transferencia de llamadas, retención de llamada, bloqueo de llamadas, grupos cerrados de usuarios (CUG), número de identificación de llamadas, servicios suplementario de datos no estructurados USSD, facturación basada en los servicios prestados a sus clientes tales como cargos con respecto a llamadas locales, de larga distancia, en tiempo real de facturación”.

### ***Tercera Generación (3G).***

Los estándares de trabajo para 3G establecidos por la IMT-2000 son : UMTS (WCDMA) basado en GSM infraestructura del sistema 2G, estandarizado por 3GPP,

CDMA 2000 se basó en la tecnología CDMA (IS-95) estándar 2G, estandarizado por 3GPP2, entre otras características importantes de 3G se tiene que la velocidad de transmisión es de 2 Mbps, cuenta con tecnología de multiplexación y acceso, su interfaz de llamada WCDMA (Wideband Code División Multiple Access). WCDMA forma parte del conjunto de técnicas de acceso múltiple por separación de código (CDMA), que tiene como características que todos los usuarios transmiten simultáneamente, lo que provoca que no exista separación en el tiempo, con un mismo ancho de banda, al no existir separación en frecuencia, pudiendo ser discriminados porque a los usuarios se les asigna un código que los identifica de forma unívoca.

El HSPA puede brindar servicios de velocidades de datos picos teóricos de hasta 168 Mbit/s de bajada y 22 Mbit/s de subida, en cuando al CDMA2000 1X, tiene la capacidad de soportar servicios de voz como de datos la máxima velocidad de datos puede llegar hasta 153 kbps. (Universidad Internacional de Valencia, 2020)

#### ***Cuarta generación (4G)***

Esta tecnología es la clave a la evolución de las redes móviles ya que gracias a sus características se logra solucionar problemas de velocidad, capacidad y conectividad. Creado por 3GPP para lograr la convergencia entre redes analámbricas e inalámbricas mediante el uso de toda clase de dispositivos, optimiza el uso del espectro, recude costos, mejora calidad de servicio y brinda mayor seguridad. Con 4G se logra velocidad de acceso o descarga de 1Gbps en reposo y 100Mbps en movimiento, soporta QoS(Quality of service). (Toledo, 2013)

Estos sistemas inalámbricos se caracterizan por brindar a sus usuarios una alta velocidad de transmisión y a la vez garantizar un servicio en todos los aspectos, en los últimos años ha sido posible apreciar que el incremento de la demanda en este tipo de

servicios inalámbricos de banda ancha, por lo tanto, se han creado tecnologías que logren la satisfacción de los requerimientos exigidos.

Los requerimientos del sistema pueden ser cumplidos a través de la combinación de dos tipos de tecnologías idóneas para el proyecto de capa física. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) y una estructura de comunicación MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output). Según lo señalado anteriormente es necesario conocer sobre la OFDM ya que, es una técnica de modulación que es usado en diversas portadoras ortogonales sobrepuestas, comenzó a cobrar popularidad en la década de los 90 con el auge de los procesadores digitales de señales en alta capacidad, la OFDM se ha convertido rápidamente en una técnica para la transmisión de señales de banda ancha en canales inalámbricos.

El cual convierte el canal selectivo de frecuencia, en cierto conjunto paralelo de sub-canales lo que logra facilitar el proyecto del receptor. En la actualidad la *OFDM* es la interface aérea para distintos estándares de transmisión dentro de la banda ancha, como las normas de audio digital *DAB (Digital Audio Broadcasting)*, de televisión digital *DVB-T (Digital Video Broadcasting Terrestrial)* (European Broadcasting Union, 2001) y *ISDB-T (Integrated Service of Digital Broadcasting Terrestrial)* (International Telecommunication Union, 1999) además de las normas WI-FI y WI-MAX en redes inalámbricas. (Córdova, H Boets, P Biesen V, 2005)

Ahora bien, dentro del sistema de comunicación inalámbrica MIMO puede utilizarse una gran cantidad de antenas, distintas antenas para el transmisor y receptor, por lo tanto tiene ventajas dentro de la diversidad espacial, estas son obtenidas por la distancias que existen entre antenas en un ambiente con desvanecimiento de multitrayecto las configuraciones empleadas son aquellas que dentro de la implementación del sistema MIMO, obtienen una gran ganancia según su diversidad lo

que permite mejorar la calidad de la señal y a su vez para lograr obtener mayor capacidad dentro del sistema.

### **Modelo de propagación**

Para el ámbito de las comunicaciones móviles, un modelo de propagación es una expresión matemática, que caracteriza la propagación de las ondas de radio en función de parámetros, como la frecuencia, distancia entre el TX y Rx, obstáculos, ambientes y otros dependiendo del modelo. Así pues se logra formular ecuaciones que permiten predecir las pérdidas de un radio enlace, o también identificar la distancia prudente para una tener cobertura adecuada en un sistema de comunicación.

En esta manera los modelos de propagación se pueden clasificar en los siguientes tipos: como lo son los empíricos o estáticos y teóricos o determinísticos, también se puede dar la combinación de ambos llamándose semiempíricos (Vaca J. , “SIMULACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN COST 231 WALFISCHKEGAMI PARA EL CANAL MÓVIL DE BANDAS 4G, 2015).

#### **Modelo Cost 231 Hata**

Este modelo es una de las extensiones del modelo Hata, de acuerdo a lo señalados por (Catarina, 2018) los creadores fueron la Cooperativa Europea para la investigación científica y técnica (EURO-COST) quienes desarrollaron dicho modelo, con la finalidad de extender el modelo Hata hasta un rango de los 2 GHz por lo tanto cubriría la banda VHF y UHF, se expresa de la siguiente manera:

$$L_{50}(\text{urbano}) = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_{BSe f} - ah_{MS} + (44.9 - 6.55 \log h_{BSe f}) \log d + C_M \quad (2. 1)$$

d: distancia entre el Tx y Rx [km]  $1 \leq d \leq 20$  km

$h_{BSef}$  : altura efectiva de la estación base[m]  $30 \leq h_{BSef} \leq 200$  m

$h_{MS}$  : Altura de la estación móvil [m]  $1 \leq h_{MS} \leq 10$  m

$f$  : frecuencia [MHz]  $1500 \leq f \leq 2000$  MHz

En la Tabla 1, se establece los parámetros con los que trabaja el modelo Cost 231 Hata.

**Tabla 1**

*Parámetros del modelo de propagación Cost 231 Hata*

Urbano	Suburbano	Rural
$a_{hMS} = 3.2(\log 11.75 h_{MS})^2 - 4.97d$ $f > 300MHz$	$a_{hMS} = (1.1 \log(f) - 0.7)h_{MS} - (1.56f - 0.8)$	$a_{hMS} = (1.1 \log(f) - 0.7)h_{MS} - (1.56f - 0.8)$
$C_M = 3dB$	$C_M = 0dB$	$C_M = 0dB$

*Nota.* En la Tabla 1, se muestra valores de los parámetros  $a_{hMS}$ , para zonas urbano, suburbano, rural.

### **Ericsson 9999**

Este modelo se desarrolló por ingenieros de Ericsson según (Beciez, Flores y Perez, 2015) indican que este modelo se basó en el de Okumura Hata extendido, es conocido por ser un modelo sencillo y su correcto uso está implicado por la exactitud dentro del ajuste de los parámetros libres en cuanto a la base de mediciones según la región. Sus restricciones son las siguientes:

Frecuencia de trabajo 150 – 2000 MHz

Distancia entre el transmisor y receptor 0.2 - 100 km

Altura de la estación base 20 – 200m

Altura de la estación móvil [m]  $1 \leq h_{MS} \leq 10$ m

Este modelo puede ser escrito por cuatro contribuciones a las pérdidas:

1. Ecuaciones de Okumura-Hata con ciertos parámetros modificables A0-A3
2. Pérdidas adicionales las cuales se presentan cuando la propagación es modificada según los picos de montaña entre otros.
3. En distancias mayores a 10 kilómetros se aparecen las pérdidas adicionales esto se debe a los disturbios que son causados por la curvatura de la tierra.
4. Y por último en pérdida por topografía de la zona

El modelo descrito se escribe de la siguiente manera:

$$L = a_0 + a_1 \log(d) + a_2 \log(h_{te}) + a_3 \log(h_{te}) \log(d) - 3.2 \log((11.75h_{re})^2) + g(f_c) \quad (2. 2)$$

$$g(f_c) = 44.9 \log(f_c) - 4.78(\log(f_c))^2 \quad (2. 3)$$

En la Tabla 2, se muestran los valores que toman  $a_0, a_1, a_2, a_3$  para escenarios urbanos, suburbanos, y rurales.

**Tabla 2**

*Definición de valores según su distancia*

<b>Parámetro</b>	<b>Urbano</b>	<b>Suburbano</b>	<b>Rural</b>
$a_0$	36.2	43.2	45.95
$a_1$	30.2	68.93	100.6
$a_2$	-12.	-12	-12
$a_3$	0.1	0.1	0.1

### ***Modelo de propagación JTG5-6***

El modelo señalado es perteneciente dentro de la misma recomendación de la ITU y que es una combinación del modelo Hata extendido y además del modelo P.1546 de la ITU (Alfort, 2009), cabe resaltar que el comportamiento de este modelo depende



de la distancia que hay entre el transmisor y el receptor por lo tanto se representa de la siguiente manera:

- Hasta los 40 m la pérdida básica es calculada mediante el modelo del espacio libre, pero es necesario tener cuenta la distancia real entre el Tx y Rx.
- Así mismo entre los 40 m y los 100 m, donde la pérdida básica es calculada a través de una interpolación lineal entre el modelo de espacio libre y el Hata extendido.
- De igual forma entre 100 m y 1000m, la interpolación lineal se realiza entre el modelo Hata y el P.1546-4. La ecuación se representa de la siguiente manera:

$$L(d) = L(0.1) + \frac{[\log(d) - \log(0.1)]}{[\log(1) - \log(0.1)]} [L(1) - L(0.1)] \quad (2.4)$$

Donde  $L(1)$  pérdida básica calculada mediante P.1546.4 en el km 1

Donde  $L(0.1)$  pérdida básica a través de Hata extendido en el km 0.1

$d$ : distancia entre antenas [km]  $0.2 \leq d \leq 1000$  km

$h_{BSef}$  : altura efectiva de la estación base  $30 \leq h_{BS} \leq 200$  m

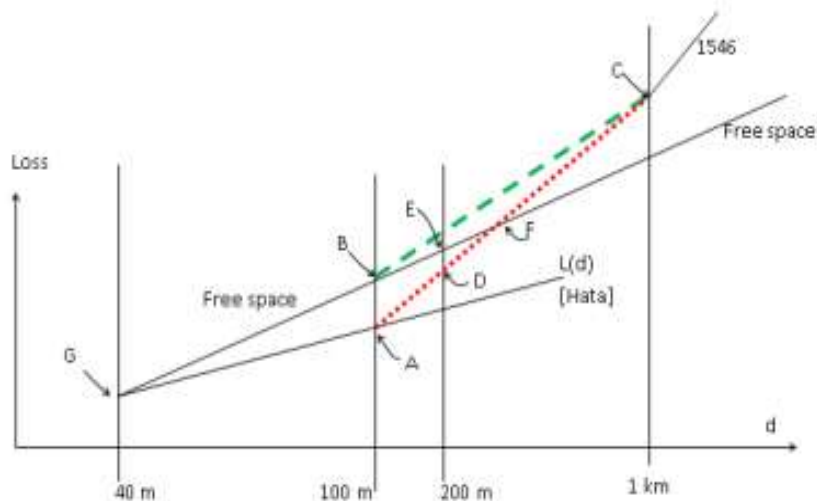
$h_{MS}$ : Altura de la estación móvil [m]  $1,5 \leq h_{MS} \leq 10$ m

$f$  : frecuencia [MHz]  $600 \leq f \leq 2000$  MHz

Para poder apreciar mejor lo señalado con anterioridad en la Figura 1 se puede observar lo siguiente:

### Figura 1

*Modelo JTG5-6 entre 100m y 1000m*



*Nota.* En la imagen se puede ver que a partir del km la representación de la pérdida básica disminuye entre los 30 y 40 dBs por década esto es dependiendo de la altura de las antenas, además a partir de los 20km la curvatura de la tierra desempeña un papel muy importante ya que las pérdidas aumentan a un 60 dBs por década. Recuperado de Comements on the JTG5-6 propagation model. Copyright 2009, Alfort, M.

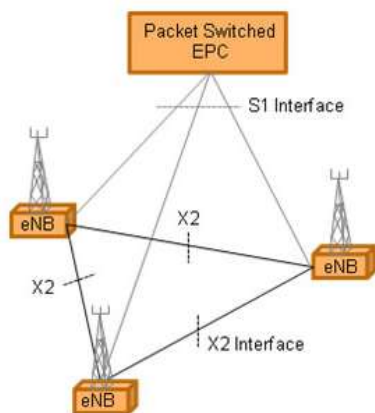
### Tecnología LTE

Conocida por las siglas en inglés Long Term Evolution (LTE), es un estándar de comunicaciones móviles para la transmisión de datos de alta velocidad, el mismo fue desarrollado por 3GPP en su reléase 8.

Para que este tipo de modelo fuera creado y empleado existieron ciertas circunstancias que así lo permitieron:

- Escalabilidad
- La demanda por parte del usuario de mayor velocidad en cuanto a la transmisión de datos y para la mejora de los datos y una excelente calidad de servicios.
- Optimización en los sistemas de conmutación de paquetes.
- Disminución dentro de la complejidad de los sistemas.
- Evitar que se fragmenten las tecnologías innecesarias en la operación de bandas.



**Figura 3***Interfaces S1 y X2*

Nota. Recuperado de Techplayon Explore Learn and Share, 2016

LTE se logra desarrollar un número de bandas de frecuencia (bandas de operación E-UTRA) ya que estas van desde 700 MHz hasta los 2.7 GHz así mismo los anchos de las bandas que se encuentren disponibles pueden ir desde los 1.4 MHz hasta los 20MHz, cabe destacar que la red LTE puede soportar tanto a la TDD (Time Division Duplex) como FDD (Frequency División Duplex).

### ***Parámetros de radio en la red LTE***

A continuación, se puede observar la Tabla 3 la misma que arroja los valores según los parámetros que son acogidos por la red LTE en cuanto al canal de radio se observan los siguientes:

**Tabla 3***Parámetros radio de LTE*

<b>Parámetros</b>	<b>LTE (rel.8)</b>	
Esquema de acceso	UL	SC-FDMA
	DL	OFDMA

Ancho de banda	1.4,3,5,10,15,20 MHz
TTI mínimo	1 ms
Espaciado de subportadoras	15 kHz
Modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM
Bandas operativas	Bandas operativas LTE
Tecnología	MIMO 2x2
Banda de frecuencia para UL	1710-1786 MHz
Banda de frecuencia para DL	1805-1880 MHz

*Nota.* En la Tabla 3 se puede apreciar los valores de acuerdo a los parámetros mismos que son adoptados por la red LTE.

## Capítulo III

### Desarrollo

#### LTE

La norma mundial establecida para 4G es la IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications-Advanced), permitiendo acceso a una gran cantidad de servicios de telecomunicaciones y soportando aplicaciones de alta y baja movilidad. Los estándares aprobados y ratificados por la UIT para las IMT-Avanzadas son: WirelessMan-Advanced (IEEE 802.16m-2011) y LTE-Advanced (LTE 3GPP Release 10 y posteriores) (Reyes, 2013)

Una de las características importantes de LTE es que su interfaz radio eléctrica está basada en OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) para su enlace descendente (DL) y SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) para su enlace ascendente (UL), lo que permite comunicar al teléfono móvil con la estación base en la capa física de la interfaz radio, el ancho de banda disponible desde 1.4 hasta 20MHz, los esquemas de modulación utilizados son: QPSK(Phase Shift Keying, Modulación por desplazamiento de fase), 16-QAM y 64-QAM(Quadrature Amplitude Modulation, Modulación de Amplitud en Cuadratura).

### Arquitectura de Sistema 4G de Comunicaciones

#### *Tecnologías de acceso radio*

La técnica OFDM es considerada para LTE ya que permite tener las siguientes características: robustez al canal de desvanecimiento de multirrayecto, alta eficiencia espectral, implementación de baja complejidad, la capacidad de proporcionar anchos de banda de transmisión flexibles, admitir funciones avanzadas como programación

selectiva de frecuencia, la transmisión MIMO y la coordinación de interferencias. (Zarrinkoub, 2014).

OFDM utiliza gran número de subportadoras para la transmisión de información de datos y control, sobre cierto ancho de banda. Las portadoras tienen la propiedad de ser ortogonales lo que permite enviar simultáneamente los símbolos y separarlos en el receptor. Cada subportadora es modulada por los esquemas de modulaciones PSK y QAM. (VILLENA, 2017)

El ancho de banda de las portadoras OFDM es de 15 kHz, formando cada 12 portadoras el llamado bloque frecuencia (180kHz), que es la unidad frecuencia mínima en la red.

Para el desarrollo del proyecto se establece los siguientes valores de los parámetros especificados en la tabla 4.

**Tabla 4**

Especificación de OFDM

Parámetro	Valor
Número de Subportadoras por bloque de recurso	12
Espaciado de subportadoras	15kHz
Número de símbolos OFDM por bloque de recurso	7
Número de bits por símbolo	4
Número de símbolos OFDM dedicados a control de información	2
Prefijo cíclico	normal
Número de símbolos por subestructura	14
Número de elementos de recurso	84
Índice de ancho de banda de canal	4

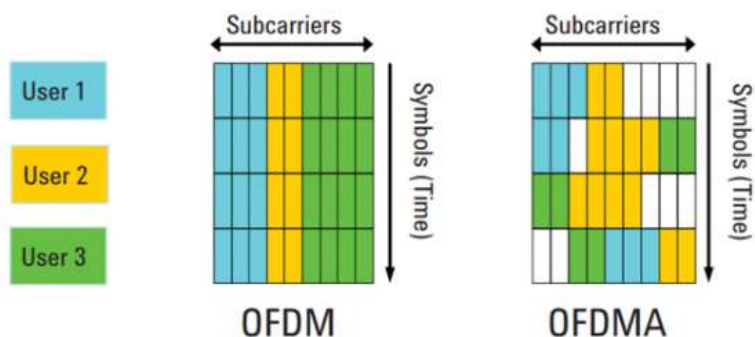
### ***OFDMA***

Permite enviara varios flujos de información, pertenecientes a diferentes usuarios, básicamente lo que hace OFDMA es asignar los diferentes símbolos

modulados en diferentes subportadoras. En la Figura 4 se puede apreciar como OFDMA y OFDM trabajan.

#### Figura 4

*Asignación de recursos de diferentes usuarios OFDMA*



*Nota.* Para OFDM diferentes usuarios comparten el canal, pero no al mismo tiempo. Cuando un usuario transmite ocupa todas las portadoras, pero en OFDMA diferentes usuarios comparten el canal al mismo tiempo, cada usuario ocupa diferentes portadoras. Recuperado de Étude des mécanismes de gestion de congestion dans la EUTRAN pour les applications M2M IoT (cas d'étude PRACH). Copyright 2016, Roumane.

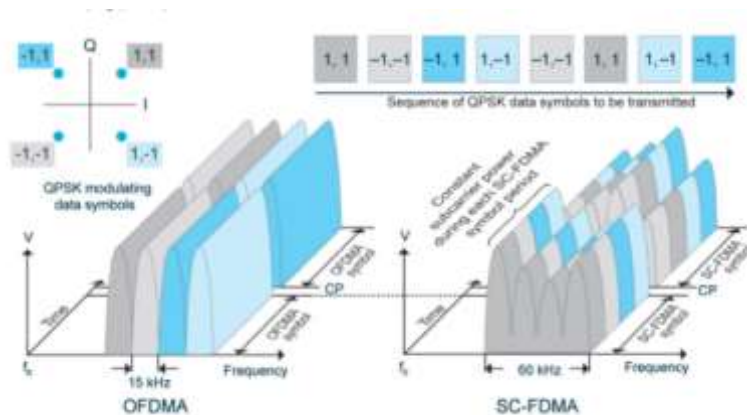
#### **SC-FDMA**

SC-FDM se implementa combinando un sistema OFDM regular con una pre codificación basada en la Transformada Discreta de Fourier (DFT), permitiendo reducir sustancialmente las fluctuaciones de la potencia de transmisión



**Figura 5**

*Diferencia entre la asignación de subportadoras OFDMA y SC-FDMA.*



Nota. Recuperado de SC-FDMA (acceso de multiplexación por división de frecuencia de portadora única) Vs OFDMA (acceso de multiplexación por división de frecuencia ortogonal) en 5G. Copyright 2019, Shaw.

La Figura 5 muestra la comparación común entre OFDMA y SC-FDMA, en SC-FDMA los datos se distribuyen en todas las subportadora en lugar de transmitir sobre una subportadora como OFDMA.

### ***Canales físicos***

Son realmente necesarios para permitir una transmisión eficiente y se encarga de transportar una determinada señalización.

A continuación en la Tabla 5 y 6 se muestra los canales utilizados tanto en Downlink y Uplink respectivamente.

**Tabla 5**

*Canales físicos para Downlink.*

<b>Canal</b>	<b>Función</b>
PDSCH (Canal físico compartido en el enlace descendente)	Transmite información de usuario y de control tanto dedicada como común.

PMCH(Canal físico de multidifusión )	Transmite información de difusión a redes de una sola frecuencia.
PBCH(Canal físico de difusión)	Transmite la información básica de la red, permitiendo.
PDCCH(Canal físico de control de enlace descendente)	Informa sobre los recursos en el enlace descendente asignados al PDSCH.
PCFICH(Canal físico de control indicador de formato)	Informa al terminal móvil sobre el número de símbolos utilizados para transmitir el PDCCH.
PHICH (Canal físico indicador híbrido de protocolo ARQ)	Transmite información de reconocimiento correspondiente a las transmisiones del enlace ascendente

Nota. En la tabla se presenta, la función de cada uno de los canales físicos para Downlink.

**Tabla 6**

*Canales físicos para Uplink.*

<b>Canal</b>	<b>Función</b>
PUSCH(Canal físico compartido en enlace ascendente)	Transmite información de usuario y de control dedicada.
PUCCH(canal físico de control para enlace ascendente)	Contiene información de control: transmite peticiones de asignación de recursos, reconocimientos del enlace descendente e información de la calidad del canal.
PRACH(Canal físico de acceso aleatorio )	Envía un preámbulo para iniciar, por parte del móvil, el procedimiento de conexión al sistema.

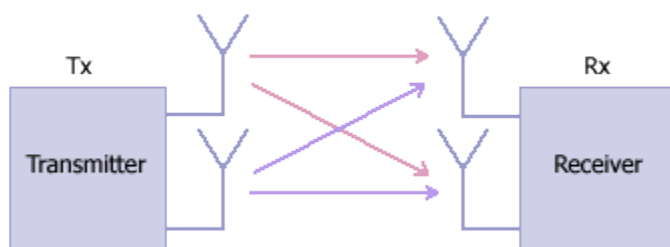
Nota. En la tabla se presenta, la función de cada uno de los canales físicos para Downlink.

## MIMO

MIMO es un sistema compuesto por más de una antena tanto en el transmisor como en el receptor, maneja técnicas de diversidad y conformación de haces como la multiplexación espacial permitiendo que el sistema aproveche la cantidad de antes de ambos lados de la comunicación. La Figura 6 muestra un esquema básico de un sistema MIMO.

**Figura 6**

*Sistema MIMO.*



Nota. Tomado de Introducción a los sistemas de antenas múltiples: SIMO, MISO, MIMO, Copyright 2012.

MIMO pueden mejorar la comunicación móvil de dos formas diferentes: aumentando las velocidades de datos y aumentando la fiabilidad del enlace de comunicación. MIMO se puede dividir en cuatro categorías amplias: diversidad de recepción, diversidad de transmisión, formación de haces y multiplexación espacial. Al tener diversidad de transmisión y formación de haces, se transmite información redundante en diferentes antenas. Haciendo que el enlace de comunicaciones sea más sólido. Sin embargo, con la multiplexación espacial, el sistema transmite información independiente (no redundante) en diferentes antenas, aumentando sustancialmente la velocidad de datos de un enlace determinado. El estándar LTE proporciona múltiples configuraciones de transmisión de hasta cuatro antenas de transmisión en su

especificación de enlace descendente. El LTE-Advanced permite el uso de hasta ocho antenas de transmisión para transmisión de enlace descendente. En el presente proyecto se decide trabajar con MIMO de 2x2, ya que el estándar release 8 si lo admite.

### **Modos de transmisión.**

En la Tabla 7 se especifica un resumen de los modos de transmisión de LTE.

**Tabla 7**

*Modos de transmisión LTE*

<b>Modo</b>	<b>Función</b>
Modo 1	Transmisión de antena única.
Modo 2	Transmitir diversidad.
Modo 3	Precodificación basada en el libro de códigos de bucle abierto.
Modo 4	Precodificación basada en el libro de códigos de bucle cerrado.
Modo 5	Versión MIMO multiusuario del modo de transmisión 4
Modo 6	Caso especial de una sola capa de código de ciclo cerrado basado en pre codificación
Modo 7	La pre codificación no basada en libros de códigos de la versión 8 admite solo una capa única, basada en la formación de vigas
Modo 8	Versión 9 de pre codificación no basada en libro de códigos que admite hasta dos Capas
Modo 9	Versión 10 pre codificación no basada en libro de códigos que admite hasta ocho capas

Nota. Recuperado de Understanding LTE with MATLAB with the Copyright 2014.

Para el presente Proyecto se trabaja con el modo de transmisión 2, que permite transmitir diversidad.

### ***Modelado de capa Física LTE (PHY)***

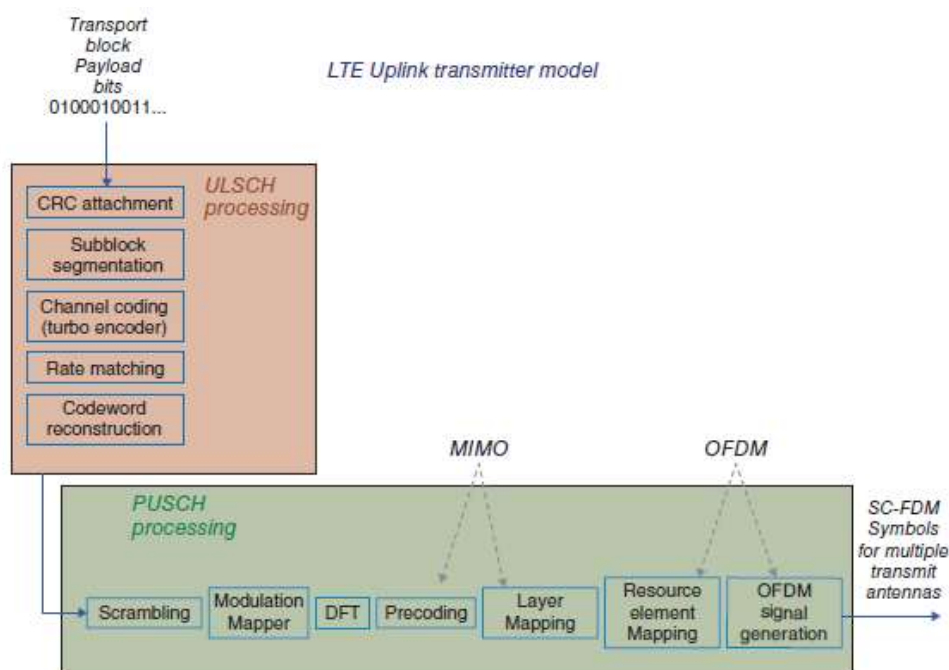
Implica todo el procesamiento realizado en bits de datos que se transmiten desde capas superiores a la PHY. Se explica cómo se asigna varios canales de transporte a canales físicos, como se procesa en cada canal y como se envía la información a la antena para la transmisión.

En la Figura 7 se observa el proceso que conlleva la transmisión de enlace ascendente. A continuación, se describe la cadena de operación del procesamiento de señales.

- CRC Bloque de transporte.
- Segmentación del bloque de código y conexión con CRC.
- Codificación turbo con tasa de 1/3.
- Tasa de coincidencia para manejar cualquier tasa de codificación solicitada.
- Scrambling permite garantizar que la interferencia sea aleatoria y que las transmisiones de diferentes celdas se separan antes de la decodificación.
- Modulación de bits codificados para generar símbolos de valores complejos.
- Mapeo de símbolos de modulación.
- DCT Precodificación de transformación para generar símbolos de valor complejo.
- Precodificación de los símbolos de valor complejo.
- Asignación de símbolos precodificados a elementos de recursos
- Generación de una señal SC-FDM en el dominio del tiempo para cada puerto de antena.

Figura 7

Especificación de la capa física LTE



Nota. Recuperado de Understanding LTE with MATLAB with the Copyright 2014.

### ***Bandas de frecuencia***

LTE especifican los espectros de radio disponibles en diferentes bandas de frecuencia, lo que se pretende con LTE es la integración perfecta con los sistemas móviles anteriores, es por eso que las bandas de frecuencia ya definidas para 3GPP anteriores están disponibles para la implementación de LTE.

Lo modos que admite LTE son FDD y TDD con bandas de frecuencia especificadas como espectros emparejados y no emparejados respectivamente, FDD permite la transmisión simultánea en dos frecuencias: una para el enlace descendente y otro para el ascendente. TDD las transmisiones de enlace ascendente y descendente comparten el mismo canal de frecuencia portadora y se encuentran multiplexadas en el tiempo.

A continuación se presenta las Tablas 8 y 9 donde se especifica la lista completa de bandas de frecuencia ITU IMT Advanced, incluyendo 26 bandas de frecuencia para FDD y 11 para TDD.

**Tabla 8**

*Bandas de frecuencia emparejadas definidas para E-UTRA*

<b>Índice de operación</b>	<b>Banda de operación para UL (MHz)</b>	<b>Banda de operación para UL (MHz)</b>	<b>Modo dúplex</b>
1	1920-1980	2100-2170	FDD
2	1860-1910	1930-1990	FDD
3	1710-1786	1805-1880	FDD
4	1710-1766	2100-2155	FDD
5	824-849	869-894	FDD
6	830-840	875-885	FDD
7	2600-2670	2620-2690	FDD
8	880-916	925-960	FDD
9	1749.9-1784.9	1844.9-1879.9	FDD
10	1710-1770	2110-2170	FDD
11	1427.9-1447.9	1475.9-1495.9	FDD
12	699-716	729-746	FDD
13	777-787	746-756	FDD
14	768-798	758-768	FDD
15	Reservado	Reservado	FDD
16	Reservado	Reservado	FDD

17	704-716	734-746	FDD
18	816-860	860-875	FDD
19	830-846	875-890	FDD
f20	832-862	791-821	FDD
21	1447.9-1462.9	1495.9-1510.9	FDD
22	3410-3490	3510-3590	FDD
23	2000-2020	2180-2200	FDD
24	1626.6-1660.6	1525-1559	FDD
25	1860-1916	193-1995	FDD

Nota. Recuperado de Understanding LTE with MATLAB with the Copyright 2014.

Para el desarrollo del presente proyecto se establece trabajar con las bandas de frecuencia emparejadas establecidas en el índice 3, que son 1710-1786MHz para UL y 1805-1880 para DL, como se puede observar en la Tabla 8.

**Tabla 9**

*Bandas de frecuencia no emparejadas definidas para E-utran*

<b>Índice de operación</b>	<b>Banda de operación para UL y DL (MHz)</b>	<b>Modo dúplex</b>
33	1900-1920	FDD
34	2010-2025	FDD
35	1850-1910	FDD
36	1930-1990	FDD
37	1910-1930	FDD
38	2570-2620	FDD



39	1880-1920	FDD
40	2300-2400	FDD
41	2496-2690	FDD
42	3400-3600	FDD
43	3600-3800	FDD

Nota. Recuperado de Understanding LTE with MATLAB with the Copyright 2014.

### ***Componentes para un Sistema 4G***

#### **Antena**

El modelo de antena que se toma como referencia 2G/3G/4G Wall Mount Gain MiMo + GPS/GNSS Antena, la cual presenta los siguientes parámetros: rango de frecuencia 698-960/1710-2700, la ganancia a 1710-2170MHz es de 9dB. En el anexo A muestra los datos especificados en esta sección.

#### **Equipo**

El equipo que se va a tomar como referencia para la simulación de un sistema 4G en este proyecto es el siguiente: LTE2680: Nokia AirScale RRH 2T2R B3120W (FHEL). En la Tabla 10 se especifican los valores de los parámetros según el anexo B.

**Tabla 10**

*Especificaciones funcionales*

<b>Propiedades</b>	<b>Valor especificados</b>	<b>Valores a utilizar</b>
Potencia de salida	2x60 W	2x60W
Numero de transmisores y receptores	2T2R	2T2R
Tecnología que soporta	FDD-LTE	FDD-LTE

Rango de frecuencia TX	1805-1880 MHz	1850 MHz
Rango de frecuencia RX	1710-1785 MHz	1750 MHz
DL Ancho de Banda instantáneo	75 MHz	20 MHz
UL Ancho de Banda instantáneo	75 MHz	20MHz

Nota: Parámetros del equipo transmisor.

La frecuencia del TX y RX se establece de 1850Mhz y 1750Mhz, debido a que son los valores establecidos para uso en la banda 3 de E-UTRAN. (Zarrinkoub, 2014)

Se establece el ancho de banda para DL y UP de 10MHz porque, son los valores establecidos para trabajar en LTE. (Zarrinkoub, 2014)

### **Modelo de Canales**

Los canales inalámbricos permiten la disponibilidad de diferentes trayectos de propagación entre el transmisor y receptor. Se puede dar el caso de trayectos directos o también se puede tener otros trayectos formados a través de la reflexión, difracción, dispersión y otros escenarios de propagación. Debido a que la señal transmitida toma diferentes trayectorias por la reflexión, difracción y dispersión, se recibe diferentes versiones de la señal emitida con diferentes niveles de potencia de señal y retardo de tiempo o fase. Es por esto que el modelado adecuado del canal inalámbrico es muy importante para el diseño de sistemas de comunicaciones móviles. Al momento de transmitir información se usa diferentes modelos de propagación y dependiendo de estos la potencia de la señal recibida se atenúa con respecto a la emitida.

Generalmente las reducciones de potencia se tratan en dos categorías:

desvanecimiento a gran escala y desvanecimiento a pequeña escala.

### Desvanecimiento a gran y pequeña escala

Para el desvanecimiento a gran escala se considera la pérdida de trayectoria y el sombreado, mientras que el desvanecimiento a pequeña escala se considera el desvanecimiento por trayectos múltiples y la dispersión en el tiempo debido a la movilidad.

### Efecto Doppler

Es la variación de frecuencia de una onda causada por el movimiento de la fuente respecto a su observador. Este afecta a las comunicaciones móviles debido a que el emisor y/o receptor están en movimiento.

### *Modelos de propagación*

#### Modelo de propagación COST 231 Hata

Para determinar las pérdidas de propagación del modelo COST 231 Hata, se utiliza los valores de los parámetros establecidos en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Parámetros para Cost 231 Hata.*

PARAMETROS	VALOR
Distancia entre el TX y RX[km]	1-2
Frecuencia[Mhz]	1850
Altura Tx[m]	60
Altura Rx[m]	2
$a_{hMS}$ para urbano	$a_{hMS} = 3.2(\log 11.75 h_{MS})^2 - 4.97 \text{ dB}$
$a_{hMS}$ para suburbano	$a_{hMS} = (1.1 \log(f) - 0.7)h_{MS} - (1.56 \log f) - 0.8$

$a_{hMS}$ para rural	$a_{hMS} = (1.1 \log(f) - 0.7)h_{MS} - (1.56 \log f - 0.8)$
$C_M$ para urbano	3
$C_M$ para rural	0
$C_M$ para suburbano	0

Nota. Parámetros del modelo.

Los siguientes cálculos se efectuaron con una distancia de 2000m.

- **Calculo de la perdida de propagación.**

**Urbano**

$$L(\text{urbano}) = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_{BSeff} - ah_{MS} + (44.9 - 6.55 \log h_{BSeff}) \log d + C_M$$

Con una distancia entre Tx y Rx de 2km

$$L_{50}(\text{urbano}) = 167.67 \text{dBm}$$

**Suburbano**

$$L(\text{suburbano}) = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_{BSeff} - ah_{MS} + (44.9 - 6.55 \log h_{BSeff}) \log d + C_M$$

$$L(\text{dBm}) = 141 \text{dBm}$$

**Rural**

$$L(\text{rural}) = 46.3 + 33.9 \log f - 13.82 \log h_{BSeff} - ah_{MS} + (44.9 - 6.55 \log h_{BSeff}) \log d + C_M$$

$$L(\text{dBm}) = 141 \text{dBm}$$

De la misma manera se obtuvo las pérdidas con distancias de 200m hasta 2000m. En la Tabla 12 se puede observar el valor de las pérdidas a medida que la distancia entre el Tx y Rx, para 3 escenarios, urbano, suburbano y rural.

**Tabla 12**

*Perdidas de propagación escenario urbano, rural y suburbano de 0 a 2[km]*

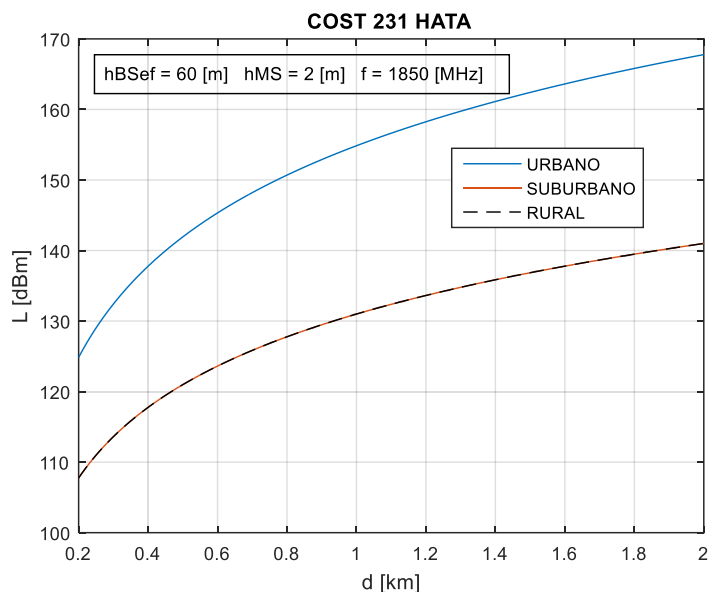
Distancia[m]	L_urbano[dBm]	L_suburbano[dBm]	L_rural[dBm]
200	124,84588	107,74916	107,74916
400	137,76857	117,75934	117,75934
600	145,32786	123,61492	123,61492
800	150,69126	127,76952	127,76952
1000	154,85144	130,99208	130,99208
1200	158,25055	133,62510	133,62510
1400	161,12446	135,85129	135,85129
1600	163,61395	137,77971	137,77971
1800	165,80984	139,48069	139,48069
2000	167,77413	141,00226	141,00226

Nota. Los datos se obtienen de la simulación del modelo Cost 231 Hata en escenarios, urbanos, suburbanos y rurales.

En la Figura 8 se muestra como la pérdida de propagación aumenta a medida que la distancia entre el transmisor Tx y el receptor Rx también aumenta. El modelo Costo 231 para escenarios suburbanos y rurales, mantienen el mismo parámetro  $a_{hMS}$ . Es por esto que en la figura 8 se observa la misma curva, la de color negra entrecortada representa el escenario rural, y la roja el escenario suburbano.

**Figura 8**

*Perdidas de propagación para Cost 231 Hata, Urbano, Suburbano, Rural.*



Nota. Perdidas del Modelo Cost 231 Hata, zonas Urbanas, Suburbanas y Rurales.

### **Modelo de propagación Ericsson 9999**

En la tabla 13 se especifica los parámetros y sus correspondientes valores para el cálculo de la pérdida de propagación.

**Tabla 13**

*Parámetros para Ericsson.*

<b>PARAMETROS</b>	<b>VALOR</b>
Distancia entre el TX y RX[km]	1-2
Frecuencia[MHz]	1850
Altura Tx[m]	60
Altura Rx[m]	2
$a_0, a_1, a_2, a_3$ , para urbano	36.2, 30.2, -12, 0.1
$a_0, a_1, a_2, a_3$ , para suburbano	43.2, 68.93, -12, 0.1

---

$a_0, a_1, a_2, a_3$ , para rural 45.95, 100.6, -12, 0.1

---

Nota. Se establece los valores de cada parámetro para el cálculo de la pérdida de propagación.

A continuación se tiene el cálculo de la pérdida a una distancia de 2km entre el Tx y

Rx

- **Calculo de la pérdida de propagación.**

**Urbano**

$$g(f_c) = 44.9 \log(f_c) - 4.78(\log(f_c))^2$$

$$L_{urb} = a_0 + a_1 \log(d) + a_2 \log(h_{te}) + a_3 \log(h_{te}) \log(d) - 3.2 \log((11.75h_{re})^2) + g(f_c)$$

$$L_{urb} = 112.32dBm$$

**Suburbano**

$$L_{subur} = a_0 + a_1 \log(d) + a_2 \log(h_{te}) + a_3 \log(h_{te}) \log(d) - 3.2 \log((11.75h_{re})^2) + g(f_c)$$

$$L_{subur} = 130.98dBm$$

**Rural**

$$L_{rural} = a_0 + a_1 \log(d) + a_2 \log(h_{te}) + a_3 \log(h_{te}) \log(d) - 3.2 \log((11.75h_{re})^2) + g(f_c)$$

$$L_{rural} = 143.26Bm$$

En la Tabla 14 se establece los valores de las pérdidas en los 3 escenarios

Urbano, Suburbano, Rural, y se varía la distancia entre el Tx y Rx desde 200-2000m.

**Tabla 14**

*Pérdidas de propagación en escenarios urbanos, rurales, suburbanos de 0 a 2[km]*

Distancia[m]	L_urbano[dBm]	L_suburbano[dBm]	L_rural[dBm]
200	81,94634	61,87523	42,48885
400	91,09098	82,67876	72,82600
600	96,44024	94,84804	90,57209
800	100,23561	103,48228	103,16314
1000	103,17952	110,17952	112,92952
1200	105,58488	115,65157	120,90924
1400	107,61857	120,27811	127,65599
1600	109,38024	124,28581	133,50029
1800	110,93414	127,82085	138,65533

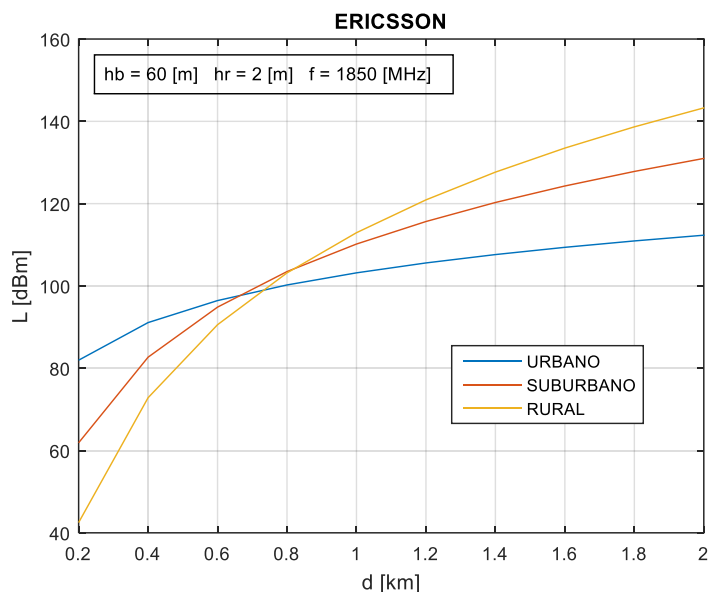
2000	112,32416	130,98305	143,26667
------	-----------	-----------	-----------

Nota. Los datos se obtienen de la simulación del modelo Ericsson en escenarios, urbanos, suburbanos y rurales.

En la Figura 9 se observa el comportamiento de cada uno de los escenarios a medida que la distancia entre el Tx y Rx varía, claramente se observa que a mayor distancia, mayor pérdida se obtendrá, en el Modelo Ericsson se tiene una particularidad como se puede observar que cuando la distancia entre el Rx y Tx es menor a 700m se tiene menor pérdida en zonas rurales que en zona suburbanas y urbanas. Y a partir de los 700m la zona que tiene menor pérdida es la urbana.

### Figura 9

*Perdidas de propagación para Ericsson, Urbano, Suburbano, Rural.*



Nota. En la figura se puede apreciar el comportamiento de la pérdida del modelo Ericsson en sus tres diferentes escenarios, Urbano, Suburbano, Rural.

### Modelo de propagación JTG5-6

Este modelo es una combinación del modelo Hata extendido y recomendación UIT-R P. 1546 para cubrir continuamente el rango de 10 m a 100 km. El modelo Hata



extendido (hasta 40 m de espacio libre, a 100 m de pérdida de ruta para el área urbana, interpolación lineal entre 40 y 100 m) y la Recomendación UIT-R P. distancias mayor a 1 km. La pérdida es linealmente interpolada entre los valores obtenidos a 100 m (Hata) y 1000 m (P. 1546).

En la Tabla 15 se establece los valores con los que se va a trabajar.

**Tabla 15**

*Parámetros de trabajo para el modelo JT5-6.*

Parámetro	Definición	Limites
Frecuencia	Frecuencia de operación	600-2000[MHz]
Distancia	Distancia desde la antena transmisora/ de base hasta el receptor /terminal	Los limites se definen en los anexos de la recomendación ITU-R P.1546-4 de Hasta 1000km.

Nota. En la tabla se especifica los parámetros básicos para obtener la pérdida de ruta.

Después de haber simulado el modelo de propagación JTG5-6, se obtienen las pérdidas de propagación para escenarios urbanos, suburbanos, rurales como se puede ver en la Tabla 16.

**Tabla 16**

*Perdidas de propagación en escenarios urbanos, rurales, suburbanos de 0 a 2[km]*

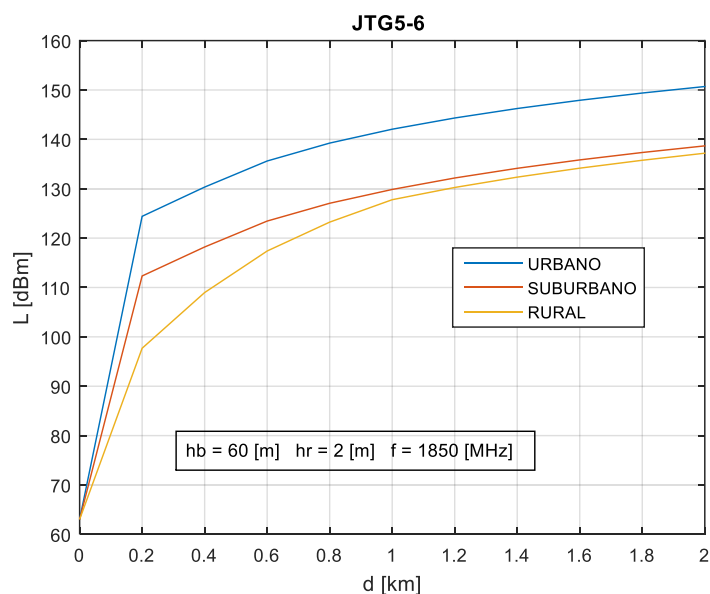
Distancia[m]	L_urbano[dBm]	L_suburbano[dBm]	L_rural[dBm]
200	124,41196	112,33304	97,69288
400	130,33534	118,20240	108,97362
600	135,61656	123,45201	117,38869
800	139,24273	127,05576	123,23836
1000	142,05540	129,85105	127,77572
1200	144,32401	132,17314	130,25348
1400	146,24498	134,13645	132,34840
1600	147,91083	135,83714	134,16310
1800	149,38144	137,33726	135,76378
2000	150,69780	138,67916	137,19563

Nota. Los datos se obtienen de la simulación del modelo JTG5-6 en escenarios, urbanos, suburbanos y rurales.

En la Figura 10 se observa, el comportamiento de la pérdida, a medida que la distancia entre el Tx y Rx aumenta, y en tres escenarios urbano, suburbano, rural.

**Figura 10**

*Perdidas de propagación para el modelo JTG5-6*



### Potencia de Recepción

Para el presente proyecto se establece que la potencia de recepción está dada por la ecuación 3.1

$$Pr(dB) = Pt(dB) + Gt(dB) + Gr(dB) - Lr(dB) - Lt(dB) - Lp(dB) \quad (3.1)$$

Los valores de la ganancia del transmisor y recepción se establece que será de 9 dB según en punto 3.1.4.1. El valor de las pérdidas por cable de transmisor y receptor se establece de 0.2dB tanto para el Tx y Rx. El valor de la pérdida por propagación se calcula dependiendo del modelo con el que se esté trabajando.

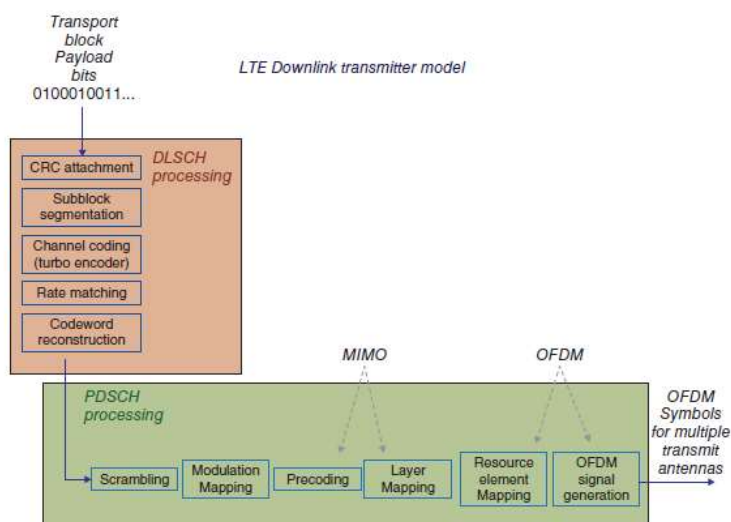
### ***Procedo de Downlink***

En la Figura 11, se muestra el proceso de transmisión para downlink, el primer paso es DLSCCH donde se multiplexan y codifican los datos, adicional se adjunta un código CRC para detectar errores. Luego se segmenta los datos en subbloques y se realiza la codificación turbo, se añade bits para reflejar una tasas de codificación deseada, finalmente se reconstruye los bloques en palabras de código.

Para el segundo bloque se presenta el procesamiento conocido como canal físico compartido en el enlace descendente, ya que se tiene las palabras de código, estas pasan por un cifrado y luego por un mapeo de modulación dando como resultado un conjunto de símbolos modulados. Seguidamente pasa por el proceso MIMO en donde este conjunto de símbolos se subdivide en múltiples subconjuntos para la transmisión por medio de múltiples antenas.

**Figura 11**

*Especificación de la capa física LTE.*



Nota. Recuperado de Understanding LTE with MATLAB with the Copyright 2014.

## Capítulo IV

### Desempeño del Modelo Cost 231 Hata

Para el cálculo de la potencia de recepción se utiliza la ecuación 3.1. Los valores de las pérdidas para los diferentes escenarios se toman de la Tabla 12. Luego de realizar el cálculo se obtiene la potencia de recepción para el modelo Cost 231 Hata para zonas urbanas, suburbanas y rurales con una distancia entre el Tx y Rx variada desde 200m-2000m, como se muestra en la Tabla 17.

**Tabla 17**

*Potencia de recepción con el Modelo Cost 231 Hata*

Potencia de Rx con el Modelo Cost 231 Hata			
Distancia	Pr(dBm)-urbano	Pr(dBm)-suburbano	Pr(dBm)-rural
200	-59,46588	-42,36916	-42,36916
400	-72,38857	-52,37934	-52,37934
600	-79,94786	-58,23492	-58,23492
800	-85,31126	-62,38952	-62,38952
1000	-89,47144	-65,61208	-65,61208
1200	-92,87055	-68,24510	-68,24510
1400	-95,74446	-70,47129	-70,47129
1600	-98,23395	-72,39971	-72,39971
1800	-100,42984	-74,10069	-74,10069
2000	-102,39413	-75,62226	-75,62226

### ***Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs SNR con el***

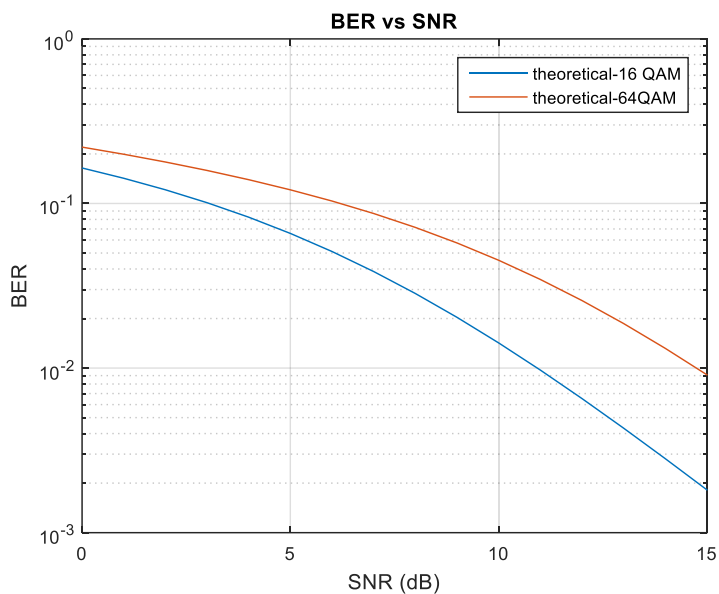
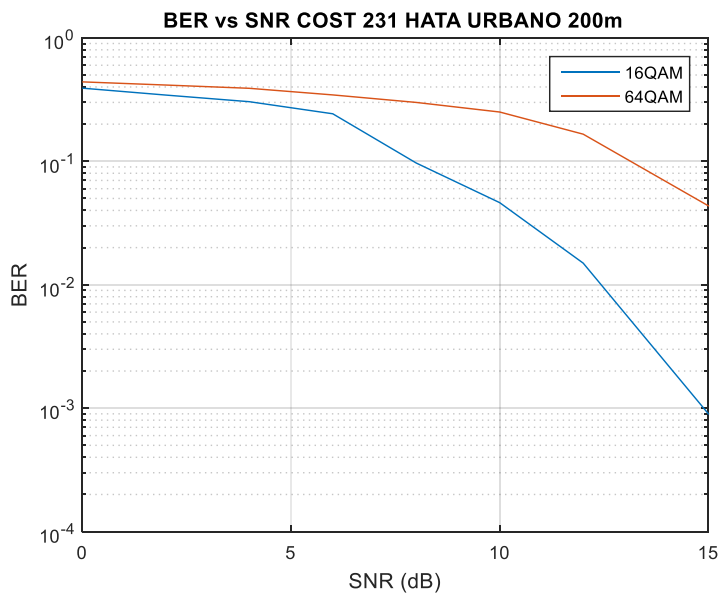
#### ***modelo Cost 231 Hata urbano***

En primera instancia se procede a simular mediante la herramienta BerTool de Matlab, un escenario en donde se tiene el tipo de canal Rician, un esquema de modulación 16QAM y 64QAM, diversidad de transmisión 2. Para poder obtener las curvas de BER vs SNR, las que permitirán analizar cómo tiende a caracterizarse el comportamiento de un sistema y poder así establecer que los resultados obtenidos son

los adecuados. Estas curvas del BER vs SNR para 16QAM y 64QAM, se pueden observar en la Figura 12.

En la Figura 13, se puede apreciar que se logra llegar a niveles de BER de  $10^{-3}$  a medida que SNR aumenta hasta 15dB con un esquema de modulación de 16QAM, mientras que para 64QAM solo se llega a un nivel de BER de  $10^{-1}$  con un SNR de 13dB debido a que este esquema de modulación es más propenso a errores ya que la constelación tiene mayor cantidad de puntos y requiere de una relación señal/ruido más alta. Se puede decir que este escenario con una distancia de 200m es aceptable tanto en 16QAM y 64QAM ya que el comportamiento del BER tiende a bajar, asemejándose al comportamiento del BER vs SNR obtenido en la Figura 12. Al tener mayor distancia entre el Tx y Rx en este caso de 1000m, se observa que el nivel del BER de  $10^{-1}$  se logra para 16QAM cuando este tiene una relación señal/ruido (SNR) de 13dB, mientras que para 64QAM con SNR es de mayores a 15dB como se muestra en la Figura 14. Al aumentar la distancia entre el Tx y Rx de 2000m el valor del BER más bajo es de 0dB para 16QAM, con un SNR de 15. Para el caso de 64QAM el valor más bajo del BER es de 0.35 con 2000m, el valor del SNR es de 15B. Lo que implica que la distancia entre el TX y RX, influye en el resultado del desempeño del sistema 4G.

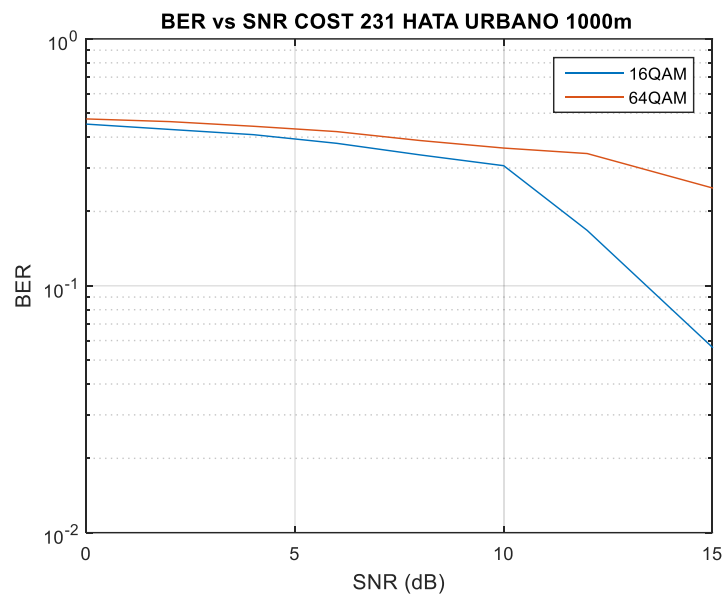
Dando como resultado que el sistema 4G presenta una tasa de bits erróneos (BER) que disminuye a medida que el SNR aumenta ya sea con esquema de modulación 16QAM o 64QAM, tomando en cuenta que se está trabajando con un Modelo Cost 231 Hata urbano. Sin duda al tener una menor distancia entre el Tx y RX, la curva del BER en este sistema, tiende a bajar al igual que la curva del BER de la Figura 12. Se tiene mejores resultados con 16QAM ya que se requiere de un valor del SNR mucho menor, que el que se requiere para 64QAM para llegar a los diferentes niveles de BER.

**Figura 12***BER vs SNR.***Figura 13***Grafica de BER vs SNR, distancia entre el Tx y Rx a 200m, COST231 HATA- Urbano*

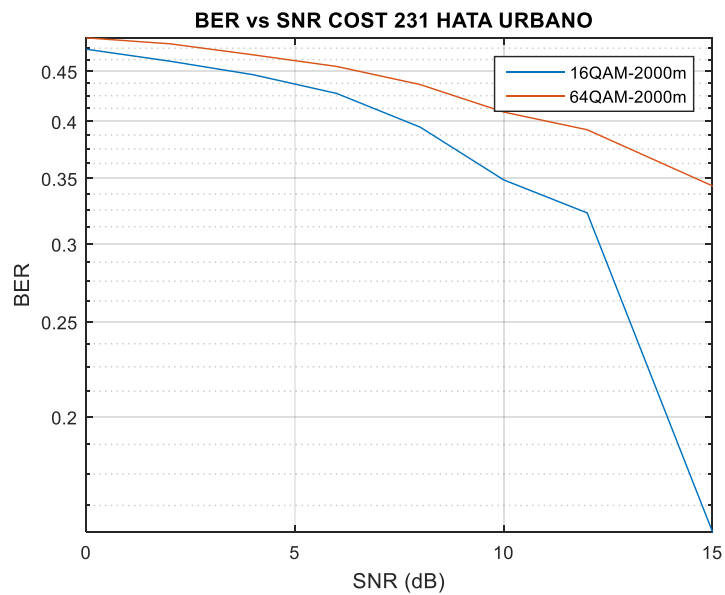
Nota. Esta grafica se representa el desempeño de un sistema 4G, con el Modelo de propagación Cost 231 Hata en un escenario Urbano, con una distancia entre el Rx y Tx de 200m.

**Figura 14**

Grafica de BER vs SNR, distancia entre el Tx y Rx a 1000m, COST231 HATA- Urbano

**Figura 15**

Grafica de BER vs SNR, distancia entre el Tx y Rx a 2000m, COST231 HATA- Urbano



Las gráficas de las simulaciones para las distancia de 400, 600, 800, 1200, 1400, 1600, 1800 se encuentran en el anexo C.

### ***Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs Distancia con Cost 231 Hata urbano***

Para las Figuras 16, 17,18 se aplicó un método de suavización de Matlab conocido como ***smoth***, para este caso se usó el método ***lowess*** que es una regresión local con mínimos cuadrados lineales ponderados y un modelo polinomio de primer grado. Así pues se puede observar que las gráficas presentadas tienen una curva continua que representa los datos suavizados y otra con asteriscos que representa los datos originales. El objetivo de aplicar este método es para poder obtener una curva con mejor ajuste, para su respectivo análisis.

En la Figura 16 con los valores de SNR de 0dB, 1dB, 2dB, 3dB, 4dB el desempeño del sistema 4G se considera de bajo rendimiento, ya que el BER más bajo que se logra obtener es de 0.26 cuando la relación señal/ruido(SNR) es de 4dB y la distancia del Tx y Rx es de 200m. Lo que permite establecer que el modelo Cost 231 Hata para escenarios urbanos y con una distancia de 200m entre el Tx y Rx, hace que el sistema 4G funcione, pero con un bajo desempeño. En la Figura 17 y 18, dado que el ruido disminuye, el desempeño del sistema 4G mejora, presentando una tasa de bits erróneos (BER) en el orden de  $10^{-2}$  cuando el SNR es de 15dB como se muestra en la Figura 18, siendo este el nivel aceptable para que el sistema 4G tenga un mejor desempeño.

En la Figura 19, se observa que a mayor distancia entre el Tx y Rx mayor será el BER, tanto para 16QAM como para 64QAM, el valor del BER con un esquema de modulación 16QAM es de 0.38 si la distancia es de 200m, y a medida que la distancia aumenta hasta 2000m se espera que el BER aumenta, siendo así se obteniendo un

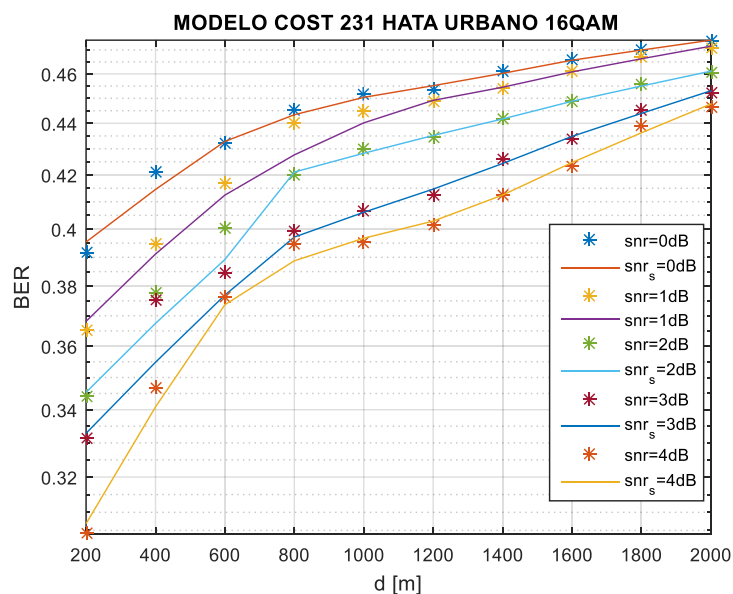


valor de 0.42. Con un esquema de modulación de 64QAM se tiene un BER de 0.42 cuando la distancia es de 200m, y cuando se llega a una distancia de 2000m el BER es de 0.475, y se puede observar que el aumento del BER no es tan brusco como se tiene en la modulación 16QAM, los valores del BER son bastante altos debido a que se establece un SNR de 0dB que quiere decir que la potencia de la señal transmitida es la misma que la potencia de la señal de ruido.

En la Figura 20, al establecer que la relación señal/ruido es de 8dB, el valor del BER en 200m, con una modulación de 16QAM se encuentra entre 0.15 y 0.43, siendo mucho menor que el que se obtuvo en la Figura 19, y con 2000m el valor está entre 0.3 y 0.43 para la modulación de 64QAM a una distancia de 200m el valor del BER, es de 0.3, y aumenta a 0.43 ya que la distancia aumenta a 2000m.

**Figura 16**

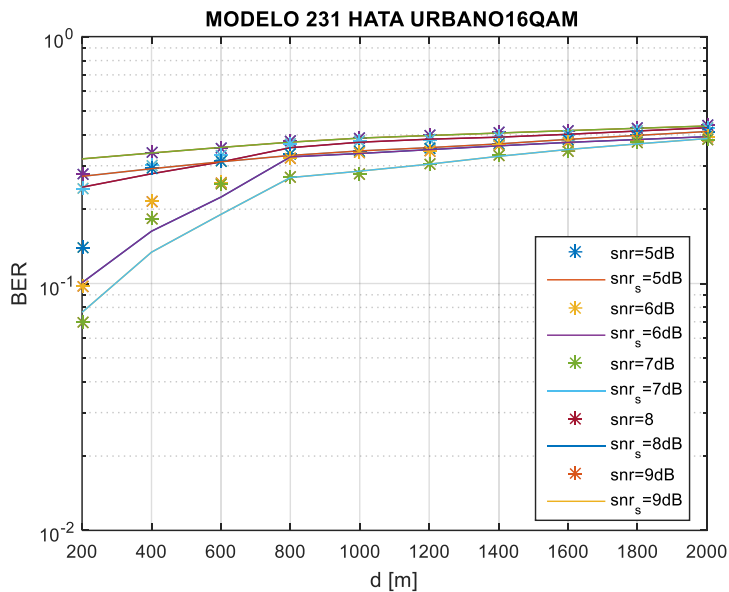
*Grafica del BER vs Distancia para el modelo Cost 231 Hata Urbano*



Nota. En la Figura 16 se observa el comportamiento del sistema 4G, al tener un SNR de 0dB, 1dB, 2dB, 3dB, 4dB y una distancia entre el Tx y Rx de 200-2000 m.

**Figura 17**

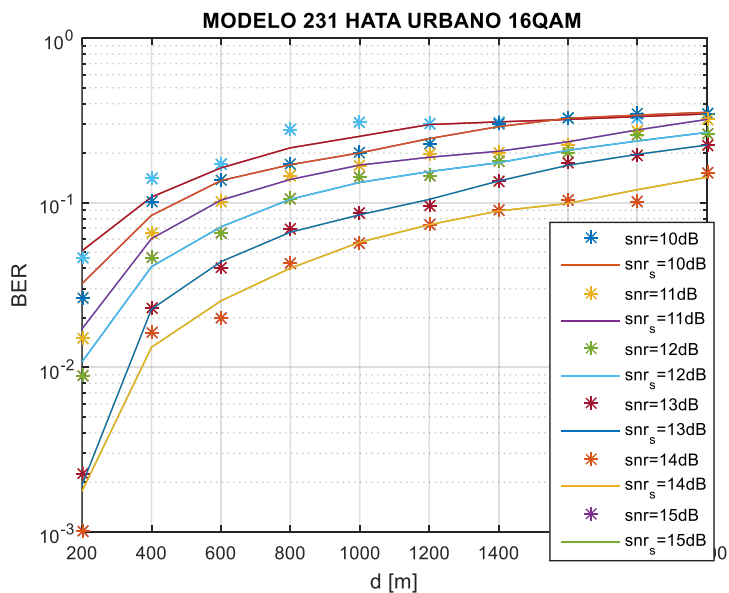
*Grafica del BER vs Distancia para el modelo Cost 231 Hata Urbano*



Nota. En la Figura 17 se observa el comportamiento del sistema 4G, al tener un SNR de 5dB, 6dB, 7dB, 8dB, 9dB y una distancia entre el Tx y Rx de 200-2000 m.

**Figura 18**

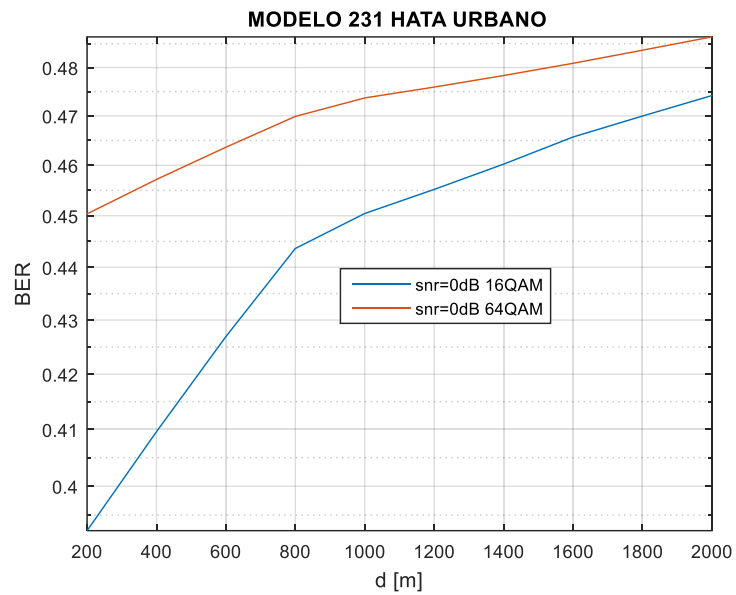
*Grafica del BER vs Distancia para el modelo Cost 231 Hata Urbano*



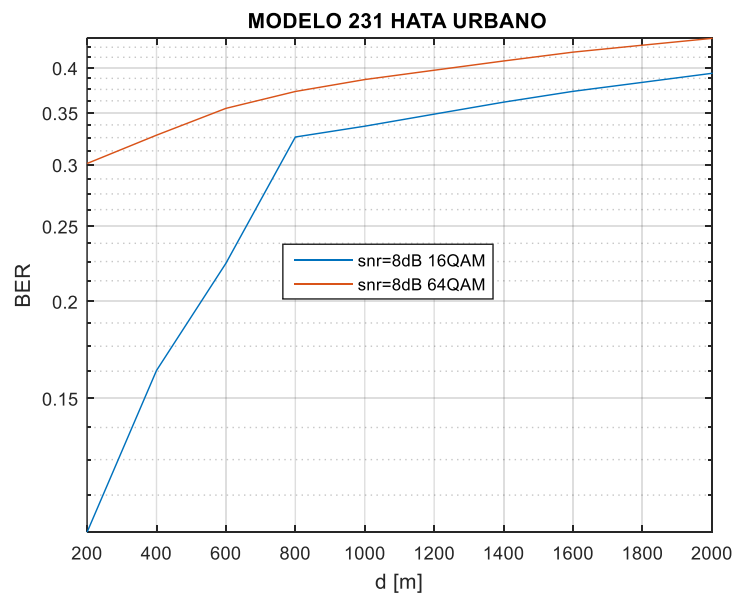
Nota. En la Figura 18 se observa el comportamiento del sistema 4G, al tener un SNR de 10dB, 11dB, 12dB, 13dB, 14dB, 15dB y una distancia entre el Tx y Rx de 200-2000m.

**Figura 19**

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 0dB.*

**Figura 20**

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 8dB.*



**Tabla 18**

Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	0	1	2	3	4
200	0,39147	0,37952	0,34403	0,33132	0,30403
400	0,42128	0,41303	0,37761	0,37530	0,34672
600	0,43231	0,42361	0,40063	0,38455	0,37650
800	0,44529	0,44006	0,42023	0,39919	0,40083
1000	0,45167	0,44455	0,42980	0,40658	0,40935
1200	0,45356	0,44865	0,43419	0,41229	0,41481
1400	0,46099	0,45408	0,44199	0,42612	0,42541
1600	0,46570	0,46099	0,44881	0,43373	0,43002
1800	0,47039	0,46730	0,45556	0,44524	0,43899
2000	0,47392	0,47098	0,46079	0,45248	0,44638

Nota. En la Tabla 18, se muestra los valores del BER vs SNR para distancias desde 200-2000m, con un valor de SNR de 0dB-4dB.

**Tabla 19**

Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	5	6	7	8	9
200	0,27644	0,24269	0,13919	0,09685	0,06992
400	0,33853	0,30015	0,29096	0,21577	0,18369
600	0,35339	0,32983	0,31178	0,25634	0,25366
800	0,37692	0,36691	0,33377	0,32311	0,27036
1000	0,39001	0,37757	0,34549	0,33885	0,27884
1200	0,39630	0,38315	0,35268	0,34342	0,30326
1400	0,40719	0,39153	0,36761	0,36507	0,33160
1600	0,41712	0,39981	0,38279	0,37288	0,34586
1800	0,42383	0,41593	0,40074	0,38057	0,37162
2000	0,43522	0,42718	0,41149	0,39471	0,38469

Nota. En la Tabla 19, se muestra los valores del BER vs Distancia, con un valor de SNR de 5dB-9dB.

**Tabla 20**

Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	10	11	12	13	14	15
200	0,04624	0,02639	0,01497	0,00889	0,00226	0,0012
400	0,14006	0,10089	0,06552	0,04600	0,02313	0,01614
600	0,17308	0,13668	0,10111	0,06518	0,04010	0,01994

800	0,28102	0,17090	0,14641	0,10554	0,07004	0,04252
1000	0,30645	0,20254	0,16760	0,14364	0,08650	0,05633
1200	0,30017	0,22645	0,19595	0,14634	0,09584	0,07432
1400	0,30564	0,30012	0,20193	0,17744	0,13611	0,08942
1600	0,32589	0,33010	0,22363	0,19980	0,17424	0,10342
1800	0,32730	0,34455	0,27483	0,25807	0,19371	0,10191
2000	0,34879	0,35089	0,32278	0,26329	0,22491	0,15283

Nota. En la Tabla 20, se muestra los valores del BER vs SNR para distancias desde 200-2000m, con un valor de SNR de 10dB-15dB.

### ***Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs SNR Cost 231***

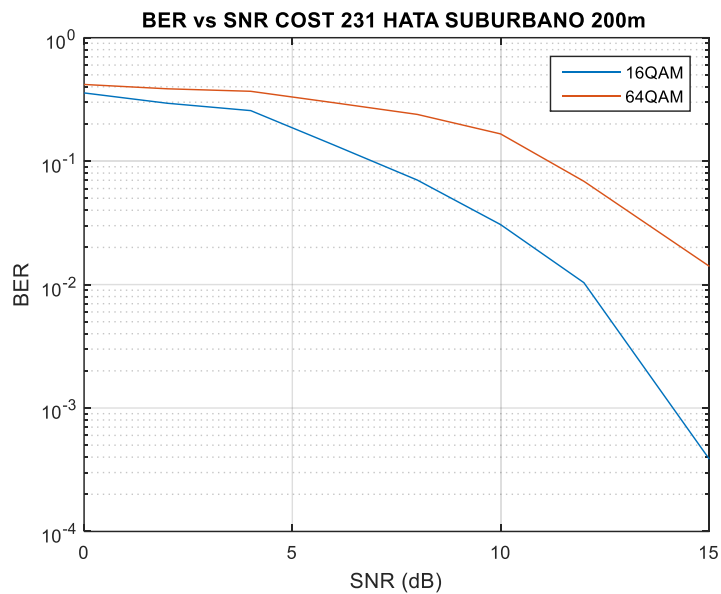
#### ***Hata Suburbano***

En las Figuras 21, 22 y 23 se presentan el desempeño de un sistema 4G, con el modelo de propagación Cost 231 Hata Suburbano, para distancias entre el Tx y Rx de 200m, 1000m, 2000m respectivamente.

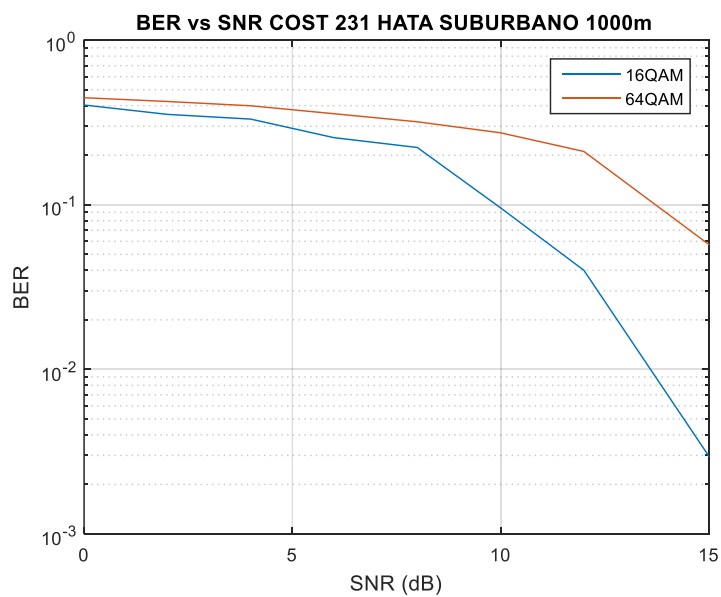
Cuando se tiene una distancia entre el Tx y Rx de 200m se puede identificar que el BER llega a tener valores en el orden de  $10^{-2}$  con 16QAM y un SNR de 12dB y para 64QAM con un SNR mayor a 15dB de como se observa en la Figura 21. A medida que la distancia aumenta a 1000m el BER toma valores de orden  $10^{-2}$  para 16QAM si el SNR es de 13dB y para 64QAM si el SNR es mayor a 15dB como se observa en la Figura 22 y ya para distancias de 2000m, el BER aumenta tomando valores en el orden de  $10^{-1}$  para 16 QAM con un SNR de 11.5dB y para 64QAM con un SNR mayor a 15dB como se observa en la Figura 23. Si se compara los resultados obtenidos en este escenario con respecto al escenario analizado en la sección 4.1.1 en donde se emplea el modelo Cost 231 Hata Urbano, podemos concluir que el sistema 4G presenta un mejor desempeño al emplear el modelo Cost 231 Hata para escenarios urbanos, una modulación 16QAM, y distancias entre el Tx y Rx de 200m, 1000m, mientras que para 2000m los resultados obtenidos indican que el sistema 4G tiene una tasa de error muy alta.

**Figura 21**

Grafica de BER vs SNR, distancia de Tx y Rx a 200m, COST231 HATA- Suburbano

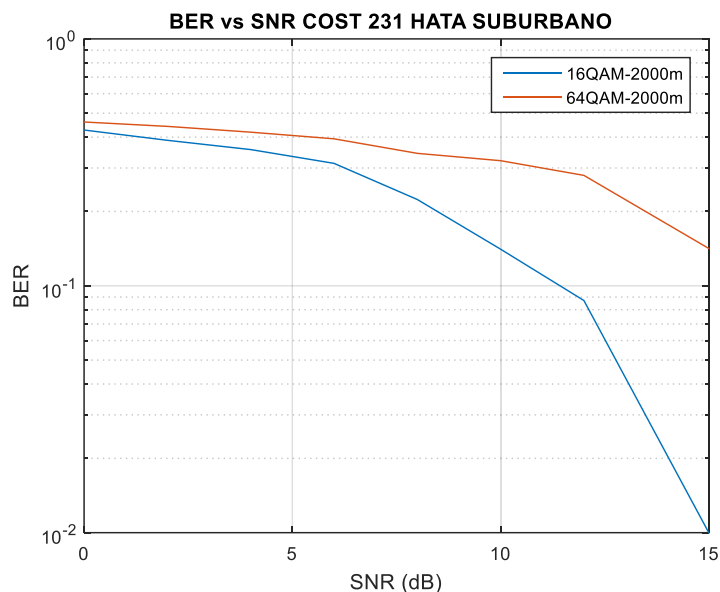
**Figura 22**

Grafica de BER vs SNR, distancia de Tx y Rx a 1000m, COST231 HATA- Suburbano



**Figura 23**

Grafica de BER vs SNR, distancia de Tx y Rx a 2000m, COST231 HATA- Suburbano



Las gráficas de las simulaciones para las distancia de 400, 600, 800, 1200, 1400, 1600, 1800 se encuentran en el anexo D.

### ***Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs Distancia***

Para las Figuras 24, 25,26 se aplicó un método de suavización de Matlab conocido como ***smoth***. Como se puede observar la curva continua representa los datos suavizados y la de asteriscos los datos originales.

En la Figura 24, se observa que cuando la relación señal/ruido es 0dB el valor del BER es de 0.36 cuando el Tx y Rx tienen una distancia de 200m y con mayor distancia entre el Tx y Rx es prudente esperar que el BER aumente dando un valor de 0.42 a 2000m. Al tener una potencia de señal mayor que la de ruido se prevé que la tasa de bits erróneos (BER) se reduzca, siendo este el caso tenemos que cuando el SNR es de 4dB, el valor del BER cuando la distancia entre el TX y Rx es de 200m es de 0.26 y para 2000m es de 0.345.

En la Figura 25, se observa que a pesar de aumentar el valor del SNR de 5dB a 9dB, los valores del BER se mantienen en el orden de  $10^{-1}$ . Por lo tanto el comportamiento del sistema 4G tiene poco mejoramiento.

En la Figura 26, se puede apreciar dos comportamientos importantes del sistema 4G. Primero se observa independientemente del SNR con el que se trabaje que el comportamiento del BER va tener una tendencia a aumentar debido que la distancia entre el Tx y Rx aumenta de 200m a 2000m, quiere decir que mientras más lejano se encuentre el Tx del Rx, la tasa de bits erróneos aumentara, debido a obstrucciones, bajo rendimiento del enlace o simplemente que la configuración del sistema y el modelo de propagación ya no son los adecuados. Segundo se puede apreciar que el aumento del SNR tiene un cambio significativo ya que al tener un SNR de 10dB los valores del BER están en el orden de  $10^{-1}$  con una distancia de 2000m, mientras que si tenemos un SNR de 15dB, el BER se reduce en gran cantidad hasta llegar a valores en el orden de  $10^{-3}$  cuando la distancia entre el Tx y Rx es de 400m.

En las Figura 27 y 28 se observa que a medida que el ruido disminuye, el comportamiento del BER mejora y esto se ve más destacado en un esquema de modulación 16QAM.

Las Tablas 21, 22 y 23 muestran los datos del BER vs Distancia con valores de SNR de 0dB-15dB.



Figura 24

Grafica del BER vs Distancia para el modelo Cost 231 Hata Suburbano

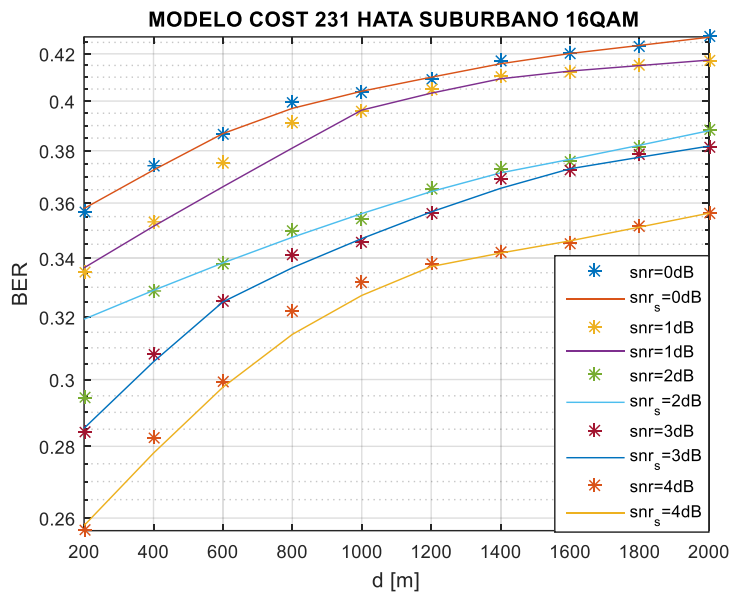


Figura 25

Grafica del BER vs Distancia para el modelo Cost 231 Hata Suburbano

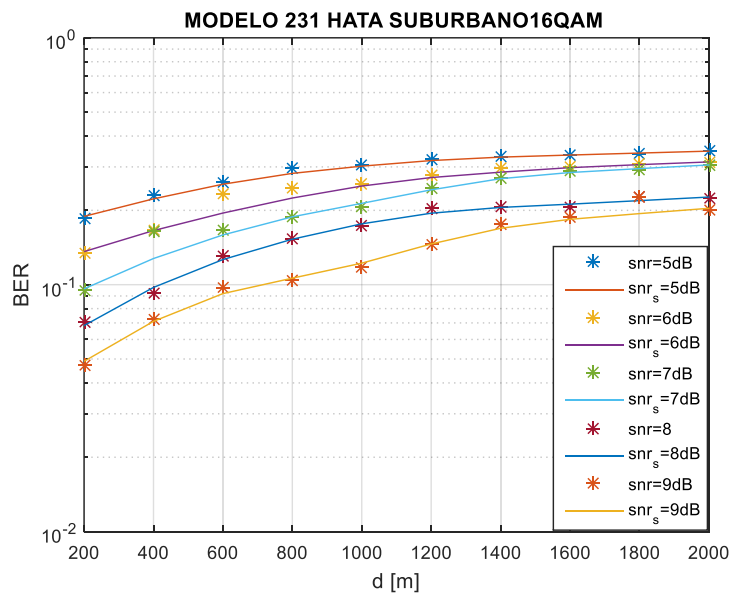


Figura 26

Grafica del BER vs Distancia para el modelo Cost 231 Hata Suburbano

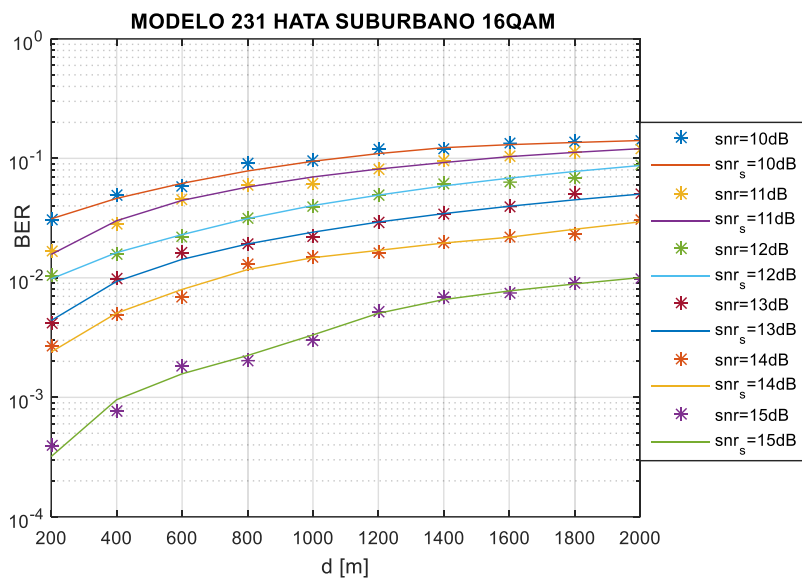
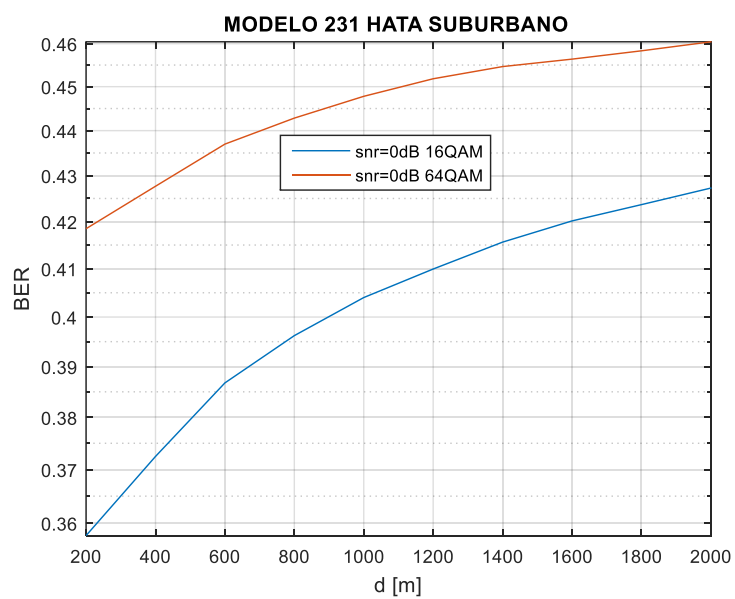


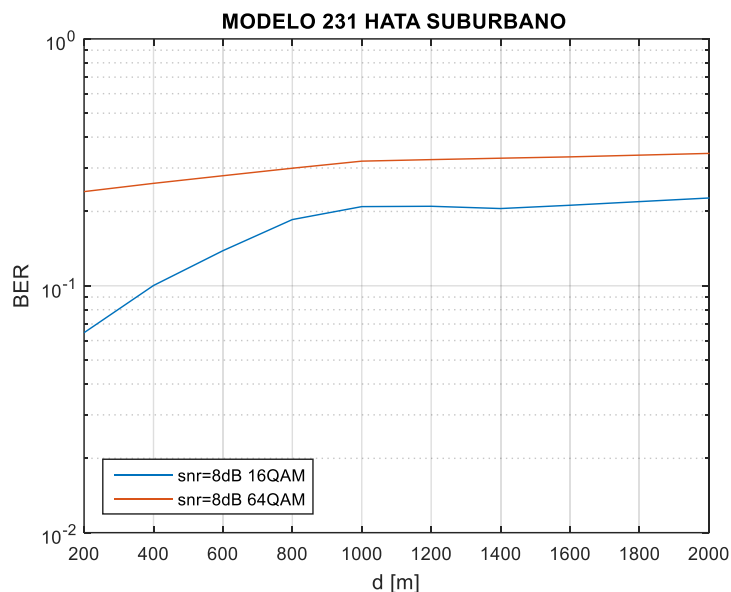
Figura 27

BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 0dB



**Figura 28**

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 8dB.*

**Tabla 21**

*Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.*

SNR[dB] \ D [m]	0	1	2	3	4
200	0,35690	0,33531	0,29431	0,28425	0,25664
400	0,37434	0,35323	0,32885	0,30800	0,28239
600	0,38667	0,37504	0,33815	0,32538	0,29937
800	0,39940	0,39105	0,34986	0,34104	0,32191
1000	0,40376	0,39595	0,35425	0,34600	0,33161
1200	0,40926	0,40468	0,36509	0,35604	0,33795
1400	0,41725	0,41039	0,37289	0,36893	0,34230
1600	0,41988	0,41238	0,37577	0,37236	0,34516
1800	0,42348	0,41513	0,38172	0,37841	0,35156
2000	0,42742	0,41722	0,38831	0,38137	0,35618

**Tabla 22**

Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	5	6	7	8	9
200	0,18621	0,13497	0,09456	0,07025	0,04708
400	0,23091	0,16688	0,16442	0,09247	0,07274
600	0,26053	0,23232	0,16629	0,13130	0,09750
800	0,29766	0,24750	0,18798	0,19653	0,10443
1000	0,30623	0,25576	0,20596	0,22291	0,11814
1200	0,32059	0,27678	0,24622	0,20438	0,14556
1400	0,32917	0,29687	0,27125	0,20591	0,17529
1600	0,33568	0,29893	0,28735	0,20602	0,18856
1800	0,33978	0,30751	0,29411	0,22656	0,22817
2000	0,34819	0,31322	0,30563	0,22362	0,26951

**Tabla 23**

Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	10	11	12	13	14	15
200	0,03061	0,01652	0,01036	0,00416	0,00270	0,00039
400	0,04871	0,02822	0,01564	0,00974	0,00493	0,00077
600	0,05839	0,04487	0,02189	0,01647	0,00682	0,00180
800	0,09149	0,05940	0,03181	0,01908	0,01284	0,00204
1000	0,09578	0,06140	0,03999	0,02233	0,01495	0,00297
1200	0,11824	0,08139	0,04935	0,02909	0,01638	0,00516
1400	0,12141	0,09691	0,06224	0,03442	0,01992	0,00697
1600	0,13253	0,10344	0,06253	0,03997	0,02221	0,00743
1800	0,13576	0,11301	0,06809	0,05036	0,02330	0,00908
2000	0,14069	0,12020	0,08717	0,05013	0,03068	0,00999

### Desempeño del modelo Ericsson

Luego de simular el modelo Ericsson para los 3 escenarios Urbano, Suburbano y Rural.

Se obtienen las pérdidas para cada escenario como se muestra en la Tabla 24.

**Tabla 24**

*Potencias en escenarios urbano, Suburbano y rural*

Potencia de Rx con el Modelo Ericsson			
Distancia	Pr(dBm)-urbano	Pr(dBm)-suburbano	Pr(dBm)-rural
200	-16,56634	3,50477	22,89115
400	-25,71098	-17,29876	-7,44600
600	-31,06024	-29,46804	-25,19209
800	-34,85561	-38,10228	-37,78314
1000	-37,79952	-44,79952	-47,54952
1200	-40,20488	-50,27157	-55,52924
1400	-42,23857	-54,89811	-62,27599
1600	-44,00024	-58,90581	-68,12029
1800	-45,55414	-62,44085	-73,27533
2000	-46,94416	-65,60305	-77,88667

***Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs SNR con el modelo Ericsson Urbano***

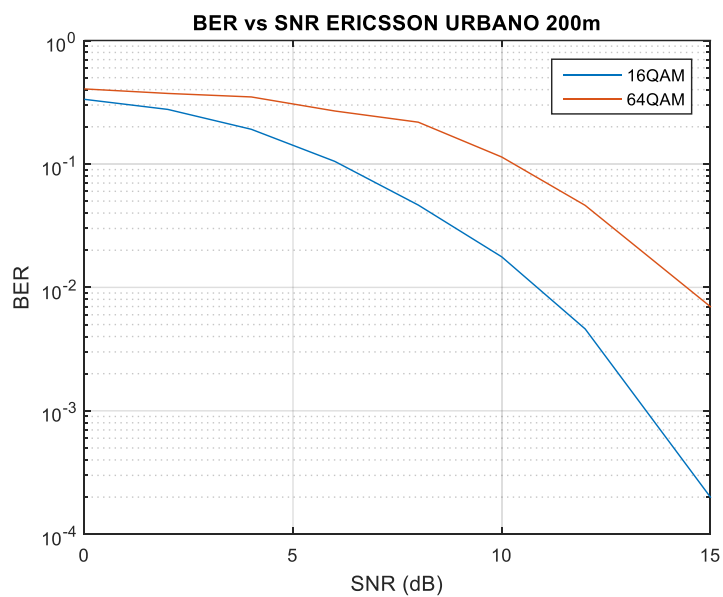
En la Figura 29, se puede apreciar que al tener una distancia entre el Tx y Rx de 200m la curva del comportamiento del BER, se asemeja la curva de BER que se observa en la Figura 12, el desempeño del sistema mejora a medida que el ruido disminuye. Así pues, el mejor resultado se tiene con un esquema de modulación de 16QAM por las características antes expuestas.

En la Figura 30, se observa que el comportamiento del BER, con una distancia entre el Tx y Rx de 1000m, es muy similar al que se obtuvo con 200m. Estos resultados permiten establecer que el modelo Ericsson en un escenario urbano, permite mejor rendimiento al sistema 4G que un modelo Cost 231 Hata en un escenario urbano, tomando en cuenta la Figura 14. Se puede identificar que es más notorio el mejoramiento del BER cuando tenemos un esquema de modulación 16QAM.

En la Figura 31, al tener una distancia entre el Tx y Rx de 2000, se espera que el rendimiento del sistema sea menor, siendo este el caso vemos que para un nivel del BER de  $10^{-2}$ , el valor del SNR es de 12.5dB al utilizar un esquema de modulación 16QAM, mientras que con un modulación de 64QAM el ruido de la señal tiene que ser mucho menor en este caso el valor del SNR es de más de 15dB.

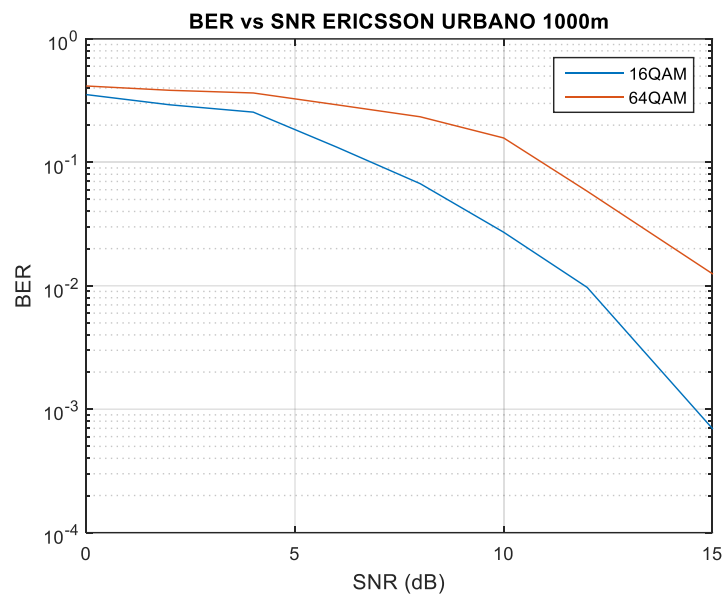
### Figura 29

*Grafica de BER vs SNR, distancia entre el Tx y Rx a 200m, Ericsson-Urbano*

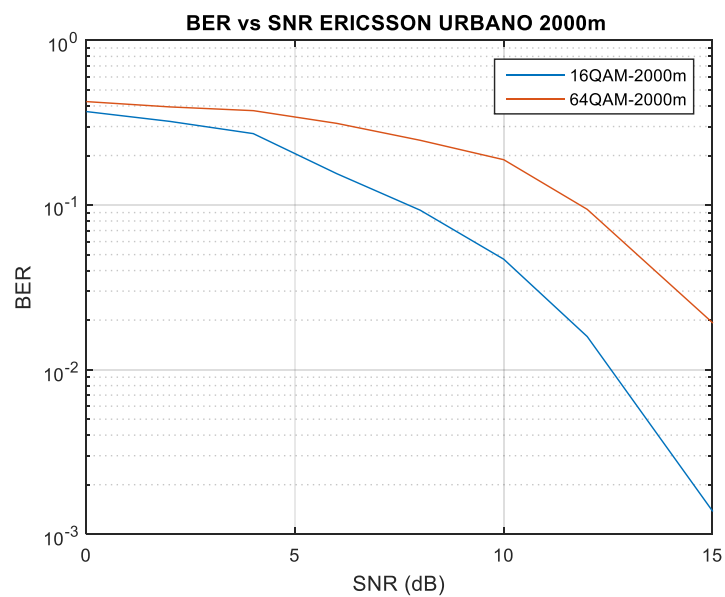


**Figura 30**

*Grafica de BER vs SNR, distancia entre el Tx y Rx a 1000m, Ericsson- Urbano*

**Figura 31**

*Grafica de BER vs SNR, distancia entre el Tx y Rx a 2000m, Ericsson- Urbano*



Las gráficas de las simulaciones para las distancia de 400, 600, 800, 1200, 1400, 1600, 1800 se encuentran en el anexo E.

### ***Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs Distancia con el modelo Ericsson Urbano***

En la Figura 32, se observa como a medida que la distancia entre el Tx y Rx aumenta, el valor del BER tiende a ser más alto, mientras menor sea el ruido se puede observar que el BER disminuye de 0.35 a 0.17.

En la Figura 33 se observa que, a pesar que el ruido disminuye significativamente, el BER, no tiende a aumentar tan pronunciadamente como en la Figura 32, esto implica que con los valores de la relación señal/ruido SNR de 5dB, 6dB, 7dB, 8dB, 9dB el comportamiento del sistema se mantiene estable, es decir presente un cambio significativo de mejoramiento.

En la Figura 34, se observa que con un SNR de 14dB, 15dB se llega a valores del BER en el orden  $10^{-3}$ , lo que nos indica que el desempeño del sistema 4G es aceptable con una distancia entre el Tx y Rx de 200m-2000m, siempre y cuando el ruido sea mucho menor que la señal.

En la Figura 33, 34, se puede observar que la distancia no es un factor que influya en el comportamiento del sistema 4G, ya que se tiene valores similares del BER cuando la distancia entre Tx y Rx es de 200m y de 2000m.

En las Figuras 35, se observa dos particularidades, la primera es que los valores del BER aumentan a medida que la distancia entre el Tx y Rx aumenta, un comportamiento que se esperaba tanto para un esquema de modulación de 16QAM y 64QAM. La segunda particularidad es que el esquema de modulación 16QAM presenta valores del BER mucho más bajos que el del 64QAM, siendo notorio como se muestra



en la Figura 35. Los valores del BER son bastante altos debido a que el ruido es igual a señal.

En la Figura 36, al tener un ruido menor que la señal, se observa que el comportamiento del sistema es adecuado ya que mantiene valores del BER en el orden de  $10^{-1}$  para 16QAM y  $10^{-0}$  para 64QAM.

Las Tablas 25, 26 y 27 muestran los datos del BER vs Distancia con valores de SNR de 0dB-15dB.

### Figura 32

*Grafica del BER vs Distancia para el modelo Ericsson Urbano*

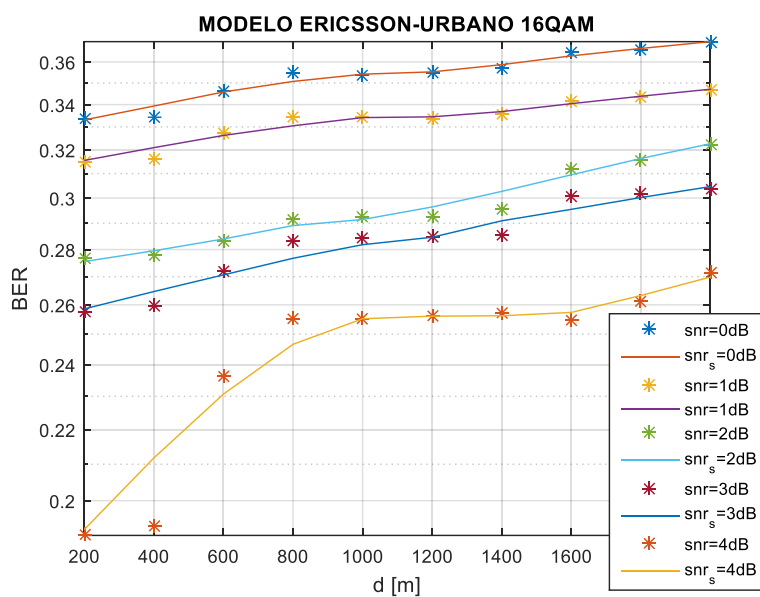


Figura 33

Grafica del BER vs Distancia para el modelo Ericsson Urbano

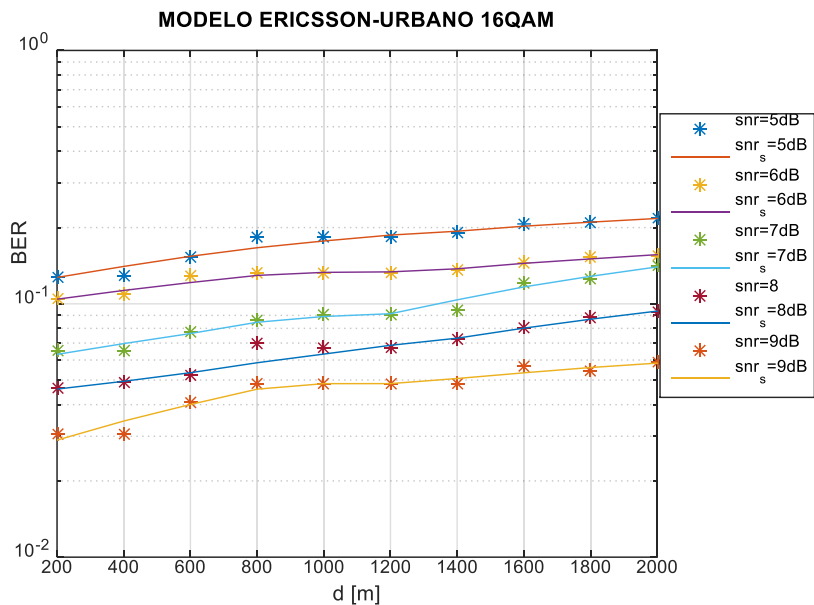


Figura 34

Grafica del BER vs Distancia para el modelo Ericsson urban

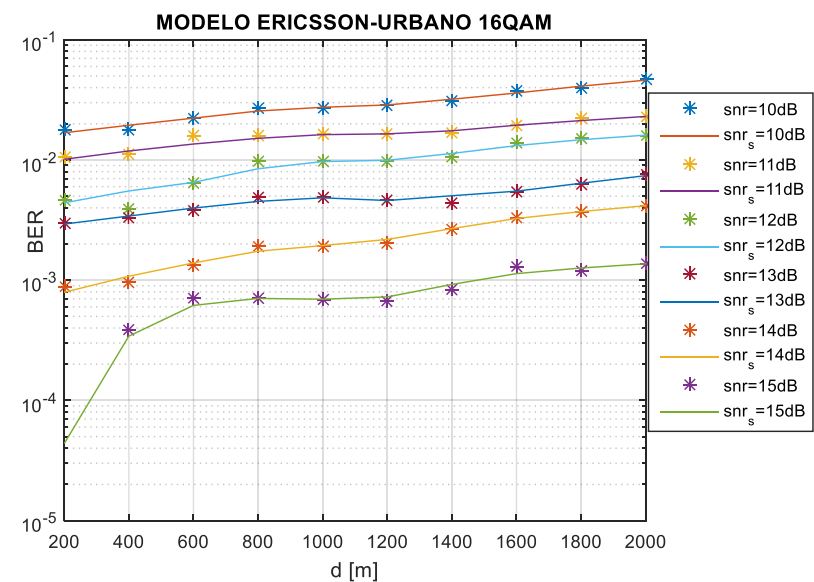


Figura 35

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 0dB.*

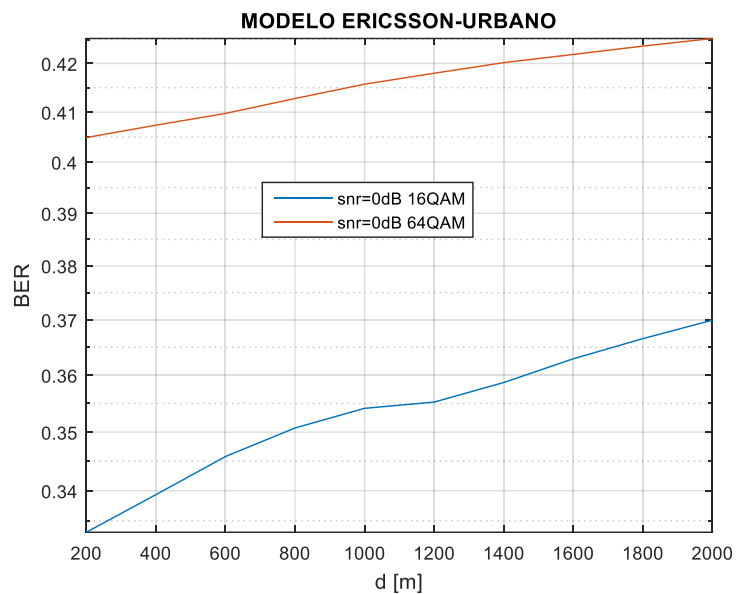
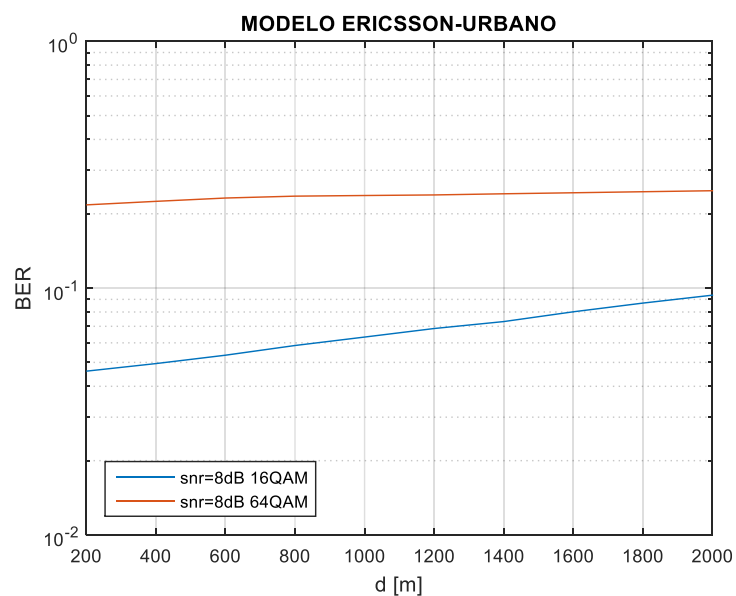


Figura 36

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 8dB.*



**Tabla 25**

Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	0	1	2	3	4
200	0,33380	0,31518	0,27653	0,25774	0,19090
400	0,33452	0,31592	0,27784	0,25953	0,19313
600	0,34618	0,32718	0,28325	0,27177	0,23633
800	0,35504	0,33442	0,29154	0,28343	0,25497
1000	0,35373	0,33414	0,29245	0,28414	0,25505
1200	0,35491	0,33381	0,29249	0,28464	0,25597
1400	0,35727	0,33580	0,29539	0,28560	0,25729
1600	0,36458	0,34134	0,31187	0,30040	0,25487
1800	0,36632	0,34372	0,31575	0,30166	0,26100
2000	0,36981	0,34701	0,32236	0,30365	0,27164

**Tabla 26**

Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	5	6	7	8	9
200	0,12802	0,10493	0,06511	0,04647	0,03059
400	0,12860	0,10950	0,06555	0,04919	0,03072
600	0,15395	0,12932	0,07724	0,05208	0,04078
800	0,18395	0,13296	0,08562	0,06959	0,04808
1000	0,18403	0,13279	0,09029	0,06715	0,04852
1200	0,18415	0,13297	0,09064	0,06740	0,04856
1400	0,19131	0,13568	0,09467	0,07242	0,04810
1600	0,20606	0,14427	0,12075	0,08012	0,05670
1800	0,20869	0,15367	0,12498	0,08794	0,05445
2000	0,21744	0,15515	0,14110	0,09303	0,05877

**Tabla 27**

Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	10	11	12	13	14	15
200	0,01769	0,01049	0,00461	0,00300	0,00087	0,00290
400	0,01804	0,01116	0,00395	0,00333	0,00096	0,00039

600	0,02199	0,01605	0,00644	0,00384	0,00134	0,00071
800	0,02706	0,01596	0,00961	0,00494	0,00190	0,00071
1000	0,02714	0,01643	0,00970	0,00491	0,00191	0,00070
1200	0,02834	0,01624	0,00981	0,00460	0,00203	0,00068
1400	0,03084	0,01696	0,01046	0,00433	0,00269	0,00083
1600	0,03744	0,01945	0,01377	0,00553	0,00334	0,00131
1800	0,03922	0,02199	0,01498	0,00618	0,00372	0,00118
2000	0,04689	0,02266	0,01589	0,00749	0,00415	0,00139

### ***Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs SNR para***

#### ***Ericsson suburbano***

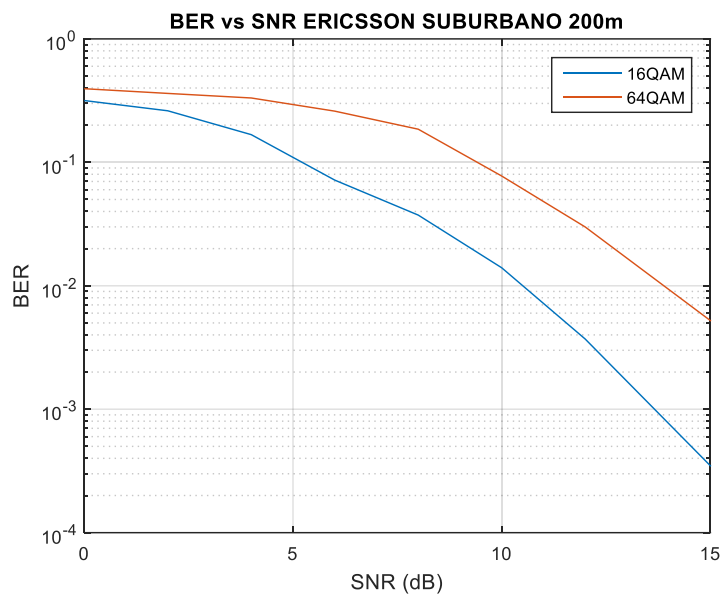
En la Figura 37, se muestra el desempeño de un sistema 4G al utilizar un modelo Ericsson- Suburbano y una distancia entre el Tx y Rx de 200m, alcanzando valores del BER en el orden e  $10^{-3}$  para 16QAM con un SNR de 14dB, y para 64QAM con un SNR mayor a 15dB, siendo estos valores muy similares a los que se obtiene teóricamente como se observa en la Figura 12.

En la Figura 38, a pesar de que la distancia aumento a 1000m se mantiene los valores del BER en el orden de  $10^{-3}$  con 16QAM, sin embargo para 64QAM los valores del BER aumenta hasta el orden de  $10^{-1}$ .

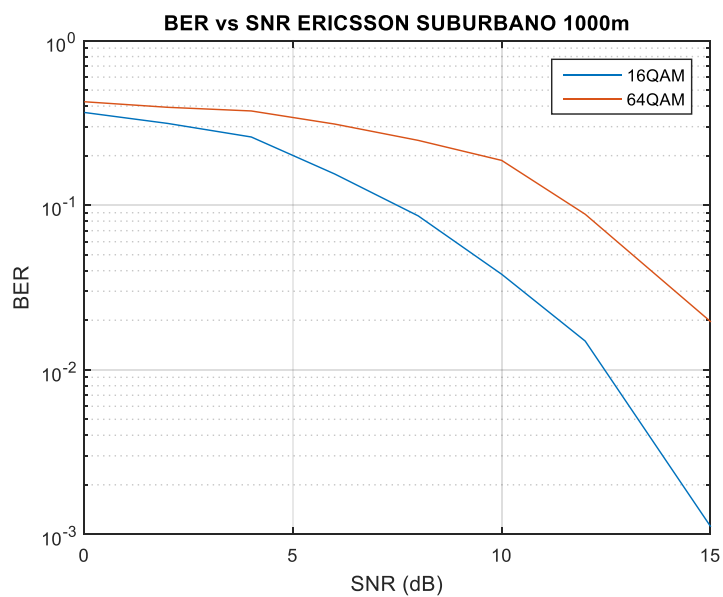
En la Figura 39, ya que se cuenta con una distancia de 2000m, se observa que es necesario que el ruido se mucho menor, para obtener mejor valores del BER.

**Figura 37**

*BER vs SNR, Modelo Ericsson-Suburbano, distancia entre Tx y Rx 200m.*

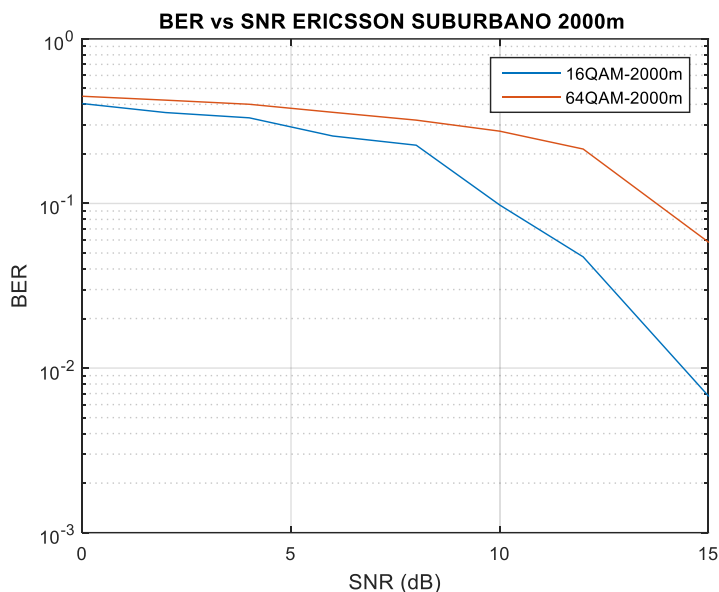
**Figura 38**

*BER vs SNR, Modelo Ericsson-Suburbano, distancia entre Tx y Rx 1000m.*



**Figura 39**

*BER vs SNR, Modelo Ericsson-Suburbano, distancia entre Tx y Rx 2000m.*



Las gráficas de las simulaciones para las distancia de 400, 600, 800, 1200, 1400, 1600, 1800 se encuentran en el anexo F.

### ***Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs distancia para Ericsson Suburbano***

Las Tablas 28, 29 y 30 muestran los datos del BER vs Distancia con valores de SNR de 0dB-15dB.

En la Figura 40 y 41, se observa que a medida que la distancia aumenta, los valores del BER también aumentan, a pesar de que el valor de SNR aumenta hasta 4dB en la Figura 40 y hasta 9dB en la Figura 41 los valores del BER no se reducen al orden de  $10^{-3}$ . En la Figura 42 se puede observar que solo con un SNR de 15dB los valores del BER, se mantienen en el orden de  $10^{-3}$  con una distancia entre el Tx y Rx de 200m a 2000m.

En la Figura 43, se presenta los valores del BER vs Distancia para un SNR de 0dB, tanto para 16QAM y 64QAM, como se observa la curva para 16QAM presenta valores del BER mucho más bajos del en comparación con la curva de 64QAM.

En la Figura 44, se puede observar que los valores del BER disminuye hasta el orden de  $10^{-1}$  con un esquema de modulación de 16QAM y un SNR de 8dB, de igual forma sucede con 64QAM reduciéndose a valores del BER en el orden de  $10^{-0}$ .

### Figura 40

*Grafica del BER vs Distancia para el modelo Ericsson Suburbano.*

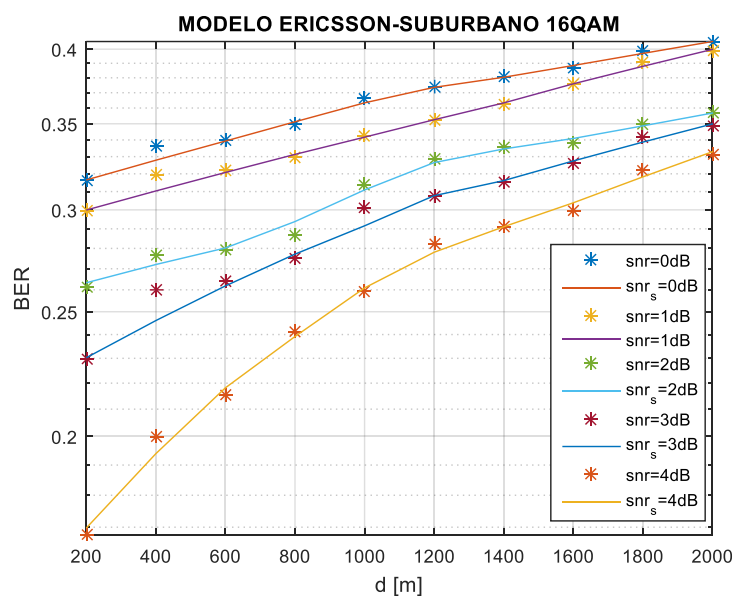




Figura 41

Grafica del BER vs Distancia para el modelo Ericsson Suburbano

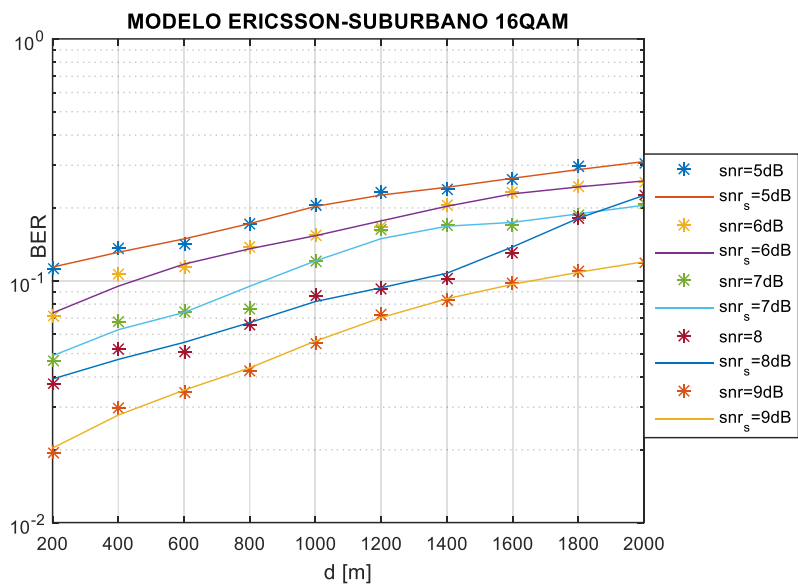
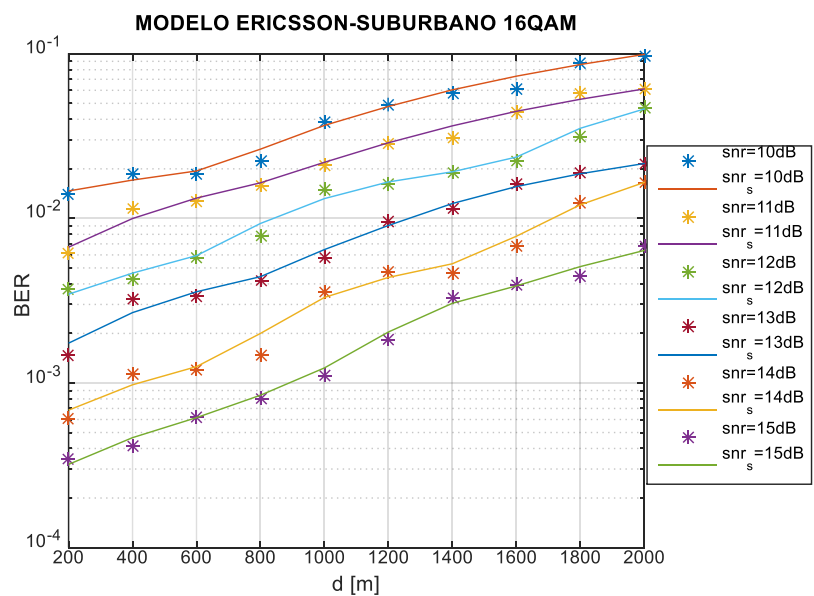


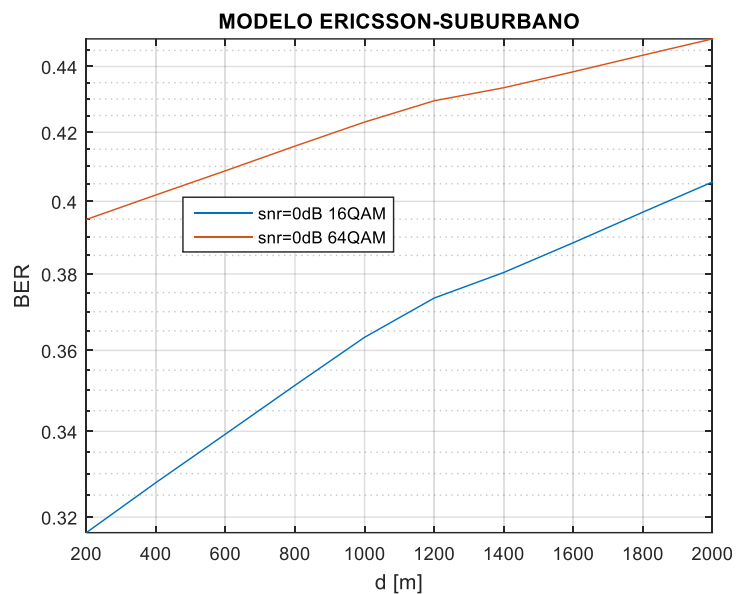
Figura 42

Grafica del BER vs Distancia para el modelo Ericsson Suburbano

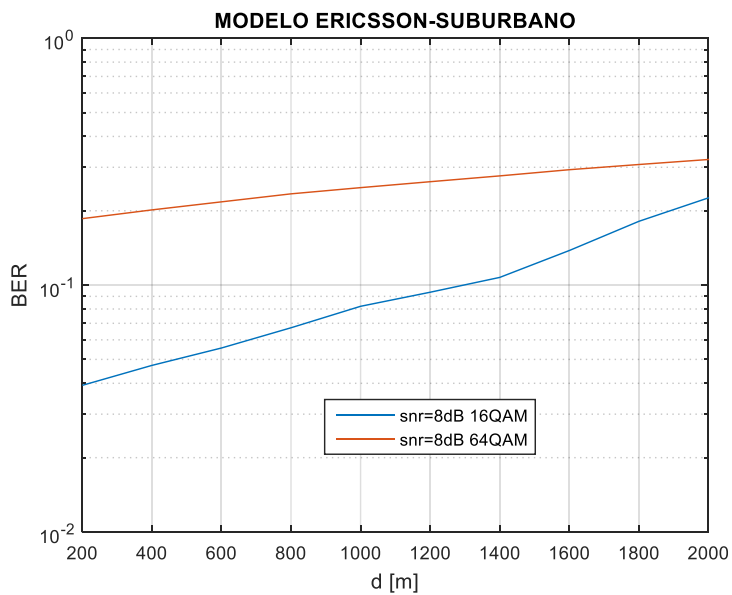


**Figura 43**

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 0dB.*

**Figura 44**

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 8dB.*



**Tabla 28**

Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	0	1	2	3	4
200	0,31654	0,29964	0,26155	0,22975	0,16755
400	0,33679	0,31919	0,27634	0,26029	0,19974
600	0,33961	0,32190	0,27911	0,26385	0,21534
800	0,34927	0,32937	0,28691	0,27539	0,24140
1000	0,36586	0,34247	0,31380	0,30135	0,25963
1200	0,37421	0,35281	0,32884	0,30772	0,28245
1400	0,38021	0,36216	0,33574	0,31503	0,29102
1600	0,38682	0,37538	0,33842	0,32618	0,29976
1800	0,39916	0,39075	0,34952	0,34203	0,32225
2000	0,40462	0,39867	0,35668	0,34851	0,33142

**Tabla 29**

Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	5	6	7	8	9
200	0,11216	0,07178	0,04665	0,03738	0,01950
400	0,13625	0,10610	0,06724	0,05251	0,02966
600	0,14156	0,11408	0,07486	0,05041	0,03448
800	0,17072	0,13708	0,07692	0,06587	0,04220
1000	0,20573	0,15466	0,12107	0,08610	0,05481
1200	0,23084	0,16740	0,16319	0,09274	0,07284
1400	0,23959	0,20579	0,16974	0,10235	0,08295
1600	0,26195	0,23293	0,16865	0,13019	0,09772
1800	0,29684	0,24598	0,18698	0,18201	0,10881
2000	0,30763	0,25699	0,20726	0,22595	0,11939

**Tabla 30**

Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	10	11	12	13	14	15
200	0,01399	0,00610	0,00370	0,00146	0,00060	0,00035
400	0,01866	0,01148	0,00429	0,00326	0,00113	0,00042
600	0,01842	0,01281	0,00578	0,00338	0,00119	0,00062
800	0,02218	0,01593	0,00786	0,00423	0,00148	0,00080

1000	0,03803	0,02090	0,01494	0,00579	0,00358	0,00112
1200	0,04872	0,02822	0,01628	0,00962	0,00473	0,00184
1400	0,05749	0,03071	0,01899	0,01137	0,00465	0,00326
1600	0,06128	0,04458	0,02241	0,01615	0,00684	0,00394
1800	0,08832	0,05742	0,03164	0,01895	0,01233	0,00444
2000	0,09790	0,06123	0,04738	0,02130	0,01657	0,00677

### ***Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs SNR para***

#### ***Ericsson Rural***

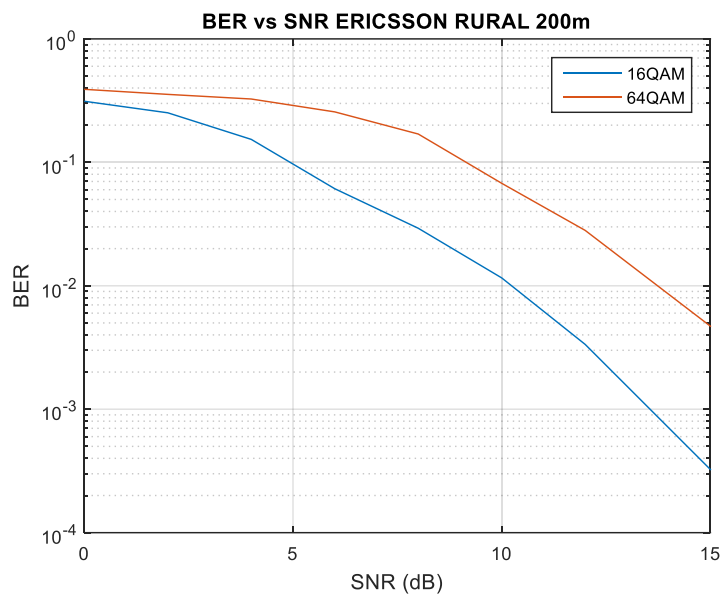
En la Figura 45, al tener una distancia entre el TX y Rx de 200m, se observa que a medida que el SNR aumenta los valores del BER se reducen hasta llegar al orden de  $10^{-3}$ , este resultado se obtiene tomando en cuenta que el esquema de modulación es 16QAM, y para un esquema de modulación de 64QAM los valores del BER se reducen solo hasta un orden de  $10^{-2}$ .

En la Figura 46, con una distancia de 1000m y una modulación de 16QAM, se llega a valores del BER en el orden de  $10^{-2}$ , pero con valores del SNR desde 12dB hasta 15dB únicamente, y al tener una modulación de 64QAM solo se llega a valores del BER en el orden de  $10^{-1}$ .

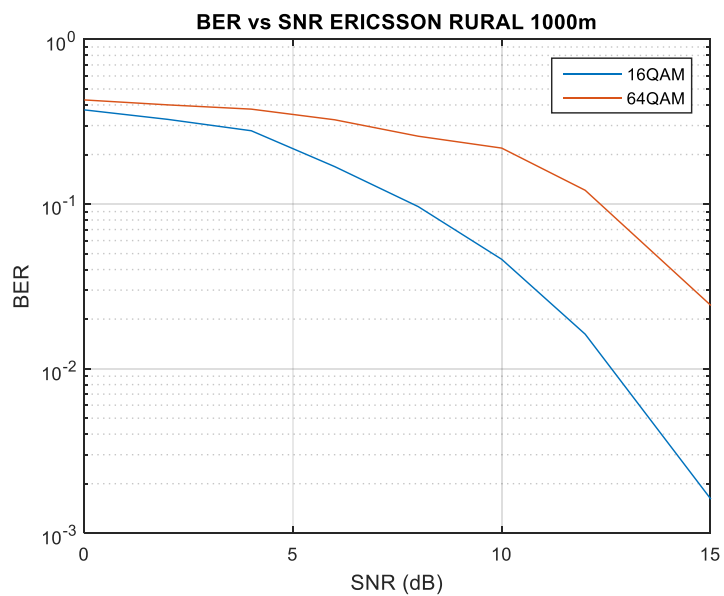
En la Figura 47, al establecer una distancia de 2000m, los valores del BER para 16QAM es de  $10^{-1}$  con un SNR de 11.5dB y para 64QAM con un SNR mucho mayor a 15dB, se observa que se va a obtener valores en el orden de  $10^{-1}$ .

**Figura 45**

*BER vs SNR, Modelo Ericsson-Rural, distancia entre Tx y Rx 200m.*

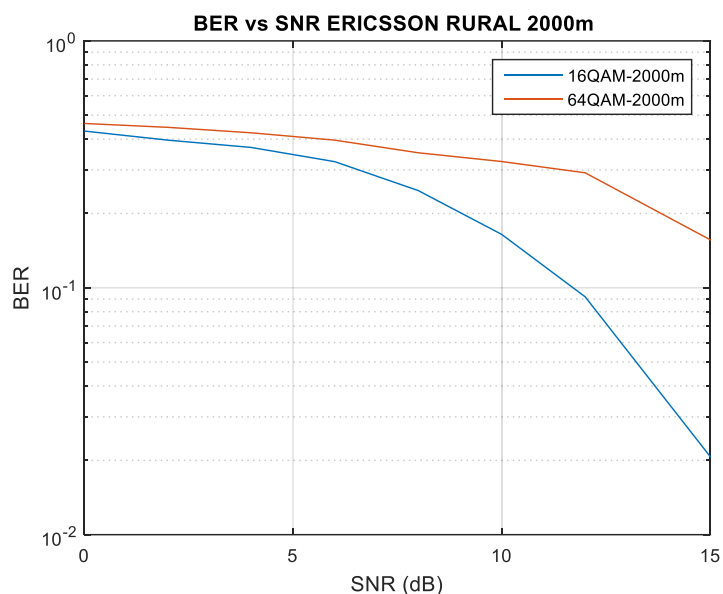
**Figura 46**

*BER vs SNR, Modelo Ericsson-Rural, distancia entre Tx y Rx 1000m.*



**Figura 47**

*BER vs SNR, Modelo Ericsson-Rural, distancia entre Tx y Rx 2000m.*



Las gráficas de las simulaciones para las distancia de 400, 600, 800, 1200, 1400, 1600, 1800 se encuentran en el anexo G

### ***Análisis del desempeño del sistema 4G según BER vs Distancia con Ericsson Rural***

Las Tablas 31, 32 y 33 muestran los datos del BER vs Distancia con valores de SNR de 0dB-15dB.

En la figura 48, se puede observar que el BER adquiere valores de 0.15 hasta 0.37 cuando la relación señal/ruido es de 4dB, siendo este un valor bastante alto a pesar que se utiliza un esquema de modulación 16QAM.

A medida que el ruido disminuye el comportamiento del sistema mejora, como se puede observar en la Figura 49, con un SNR de 9dB, los valores del BER están en el orden de  $10^{-1}$  hasta una distancia entre el Tx y Rx de 1400m, y con distancias mayores a 1400m

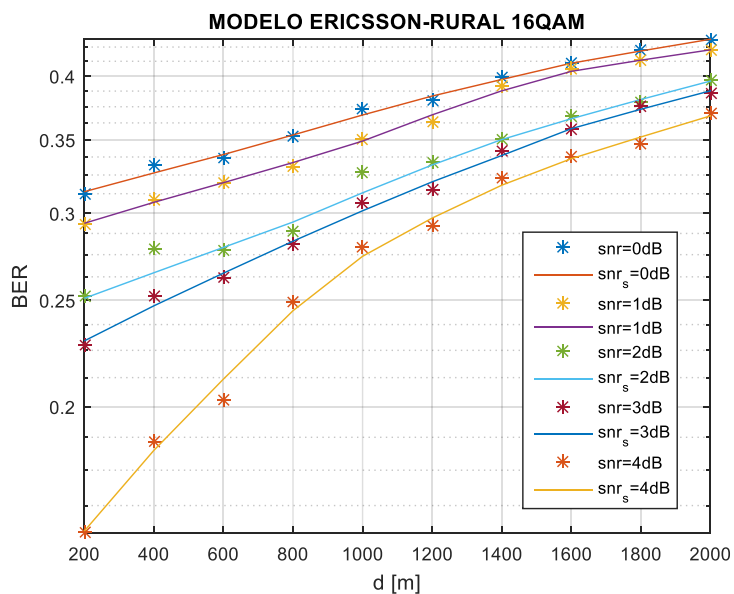
se obtiene valores del BER en el orden de  $10^{-0}$ . Estos valores son mejores en comparación con los obtenidos en la Figura 48.

En la figura 50, se observa que el aumento de la distancia entre Tx y Rx, produce que la tasa de bits erróneos (BER) también aumente. Al tener una relación señal/ruido 15dB, se observa como el sistema tiene un mejor desempeño que con SNR menores a este valor.

En la figura 51 y 52, se puede observar que al utilizar un esquema de modulación 16QAM se tiene un mejor desempeño del sistema 4G, que al utilizar un esquema de modulación 64QAM, este comportamiento se mantiene con un ruido alto como se muestra en la Figura 51 o bajo como se muestra en el Figura 52.

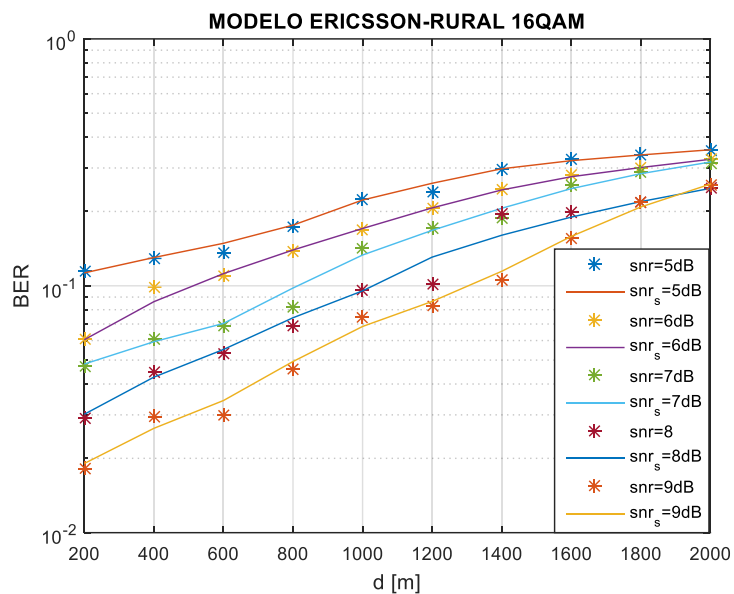
**Figura 48**

*Grafica del BER vs Distancia para el modelo Ericsson Rural*



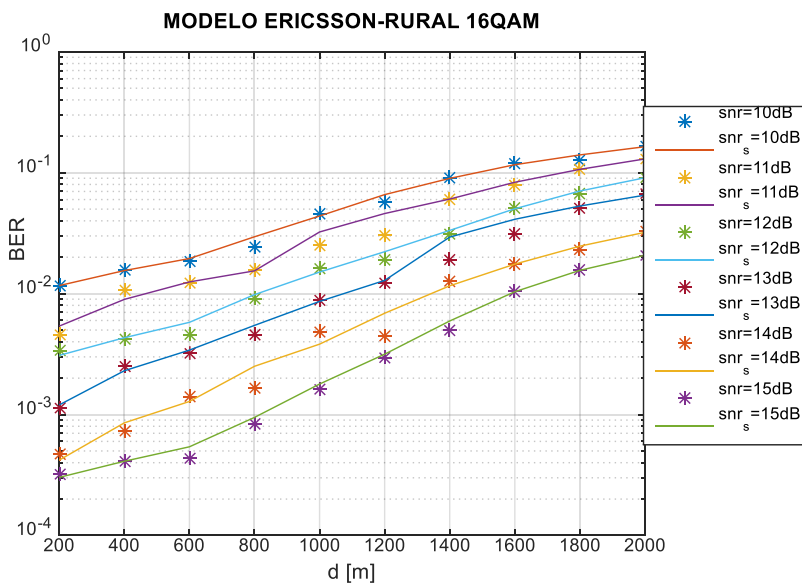
**Figura 49**

*Grafica del BER vs Distancia para el modelo Ericsson Rural*



**Figura 50**

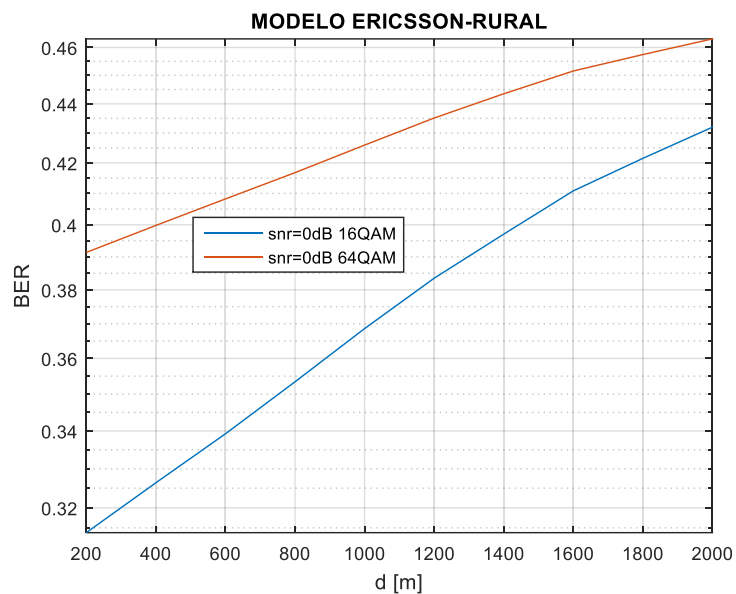
*Grafica del BER vs Distancia para el modelo Ericsson Rural.*



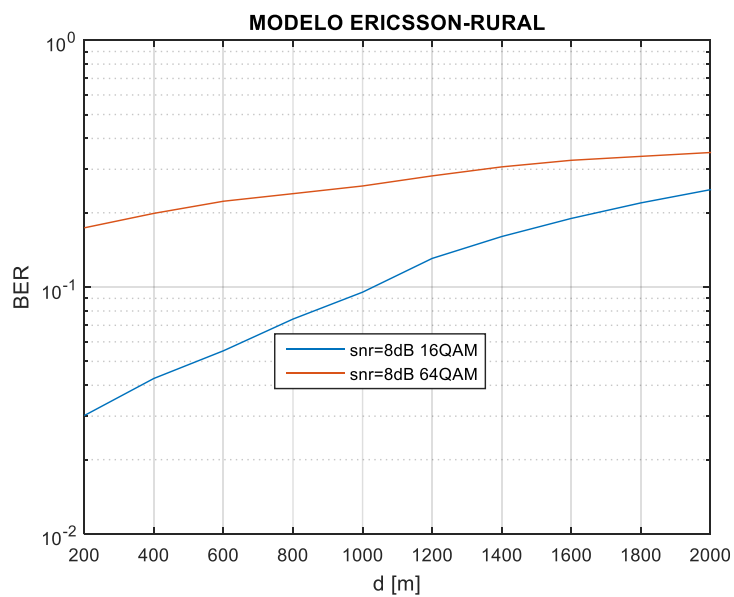


**Figura 51**

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 0dB.*

**Figura 52**

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 8dB.*



**Tabla 31**

Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	0	1	2	3	4
200	0,31244	0,29284	0,25188	0,22743	0,15340
400	0,33141	0,30832	0,27871	0,25191	0,18577
600	0,33657	0,32002	0,27770	0,26195	0,20254
800	0,35190	0,33093	0,28884	0,28125	0,24907
1000	0,37340	0,35069	0,32695	0,30647	0,27886
1200	0,38034	0,36262	0,33402	0,31468	0,29185
1400	0,39884	0,39106	0,34979	0,34176	0,32245
1600	0,41097	0,40605	0,36721	0,35724	0,33794
1800	0,42260	0,41334	0,37939	0,37593	0,34755
2000	0,43131	0,42228	0,39626	0,38623	0,37011

**Tabla 32**

Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	5	6	7	8	9
200	0,11391	0,06115	0,04731	0,02924	0,01817
400	0,12942	0,09873	0,06126	0,04495	0,02928
600	0,13615	0,11013	0,06909	0,05307	0,02979
800	0,17390	0,13843	0,08218	0,06913	0,04573
1000	0,22250	0,16878	0,14089	0,09648	0,07470
1200	0,23939	0,20544	0,17027	0,10171	0,08272
1400	0,29781	0,24670	0,18818	0,19501	0,10506
1600	0,32429	0,27988	0,25530	0,19950	0,15596
1800	0,33971	0,30228	0,29037	0,21833	0,21726
2000	0,35446	0,32422	0,31309	0,24759	0,25473

**Tabla 33**

Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	10	11	12	13	14	15
200	0,01158	0,00455	0,00335	0,00112	0,00047	0,00032
400	0,01586	0,01056	0,00421	0,00249	0,00073	0,00041
600	0,01874	0,01232	0,00460	0,00323	0,00140	0,00043
800	0,02447	0,01561	0,00905	0,00460	0,00167	0,00084
1000	0,04616	0,02487	0,01620	0,00892	0,00487	0,00162

1200	0,05745	0,03064	0,01892	0,01226	0,00441	0,00298
1400	0,09142	0,06093	0,03142	0,01907	0,01259	0,00495
1600	0,11808	0,07925	0,05105	0,03132	0,01735	0,01038
1800	0,12790	0,10629	0,06792	0,05121	0,02279	0,01577
2000	0,16449	0,13050	0,09191	0,06658	0,03332	0,02066

### Desempeño del modelo JTG56

**Tabla 34**

*Potencia de recepción para el modelo JTG5-6.*

Distancia	Potencia de Rx con el Modelo Jtg5-6		
	Pr(dBm)-urbano	Pr(dBm)-urbano	Pr(dBm)-urbano
200	-59,03196	-46,95304	-32,31288
400	-64,95534	-52,82240	-43,59362
600	-70,23656	-58,07201	-52,00869
800	-73,86273	-61,67576	-57,85836
1000	-76,67540	-64,47105	-62,39572
1200	-78,94401	-66,79314	-64,87348
1400	-80,86498	-68,75645	-66,96840
1600	-82,53083	-70,45714	-68,78310
1800	-84,00144	-71,95726	-70,38378
2000	-85,31780	-73,29916	-71,81563

### ***Análisis del desempeño del sistema 4G según BER vs SNR con un modelo JTG5-6 Urbano***

En la Figura 53, al tener una distancia entre el Tx y Rx de 200m, se puede observar que el comportamiento del BER, es similar al comportamiento del BER de la Figura 12, tanto para un esquema de modulación 16QAM y 64QAM. Lo que implica que el desempeño del sistema 4G está correcto.

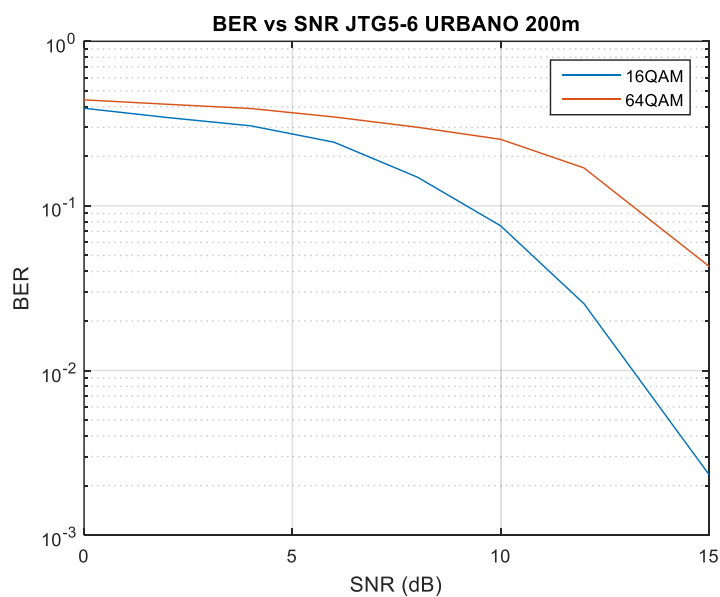
En la Figura 54, al tener una distancia entre en Tx y Rx de 1000m, la curva del BER mantiene un comportamiento aceptable, pero con la diferencia que presenta valores del BER en el orden de  $10^{-1}$  con un SNR de 11dB, para 16QAM y un SNR

mayor a 15dB para 64QAM, siendo estos valores mucho más altos que los que se obtuvo en la Figura 53, esto se debe a que el Tx y Rx se encuentran más alejados.

En la Figura 55, se puede observar que el comportamiento del sistema es similar tanto para 16QAM y 64QAM, hasta un valor de SNR de 10dB, luego de este valor se observa que el BER disminuye de manera drástica cuando se tiene una modulación 16QAM, mientras que con una modulación de 64QAM, el BER disminuye más lento.

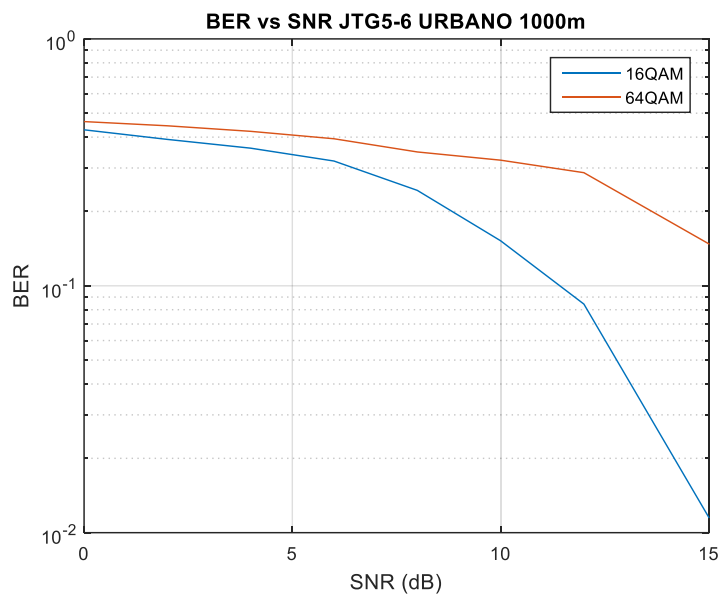
### Figura 53

*BER vs SNR, Modelo JTG5-6, distancia entre Tx y Rx 200m.*

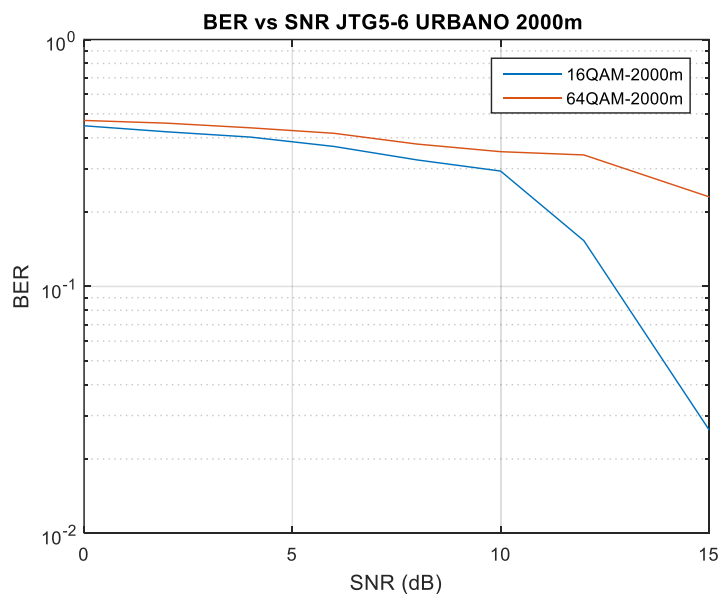


**Figura 54**

*BER vs SNR, Modelo JTG5-6, distancia entre Tx y Rx 1000m.*

**Figura 55**

*BER vs SNR, Modelo JTG5-6, distancia entre Tx y Rx 2000m.*



Las gráficas de las simulaciones para las distancia de 400, 600, 800, 1200, 1400, 1600, 1800 se encuentran en el anexo H.

**Análisis del desempeño de un sistema 4G según BER vs distancia con un modelo JTG5-6 Urbano**

Las Tablas 35, 36 y 37 muestran los datos del BER vs Distancia con valores de SNR de 0dB-15dB.

En la Figura 56, se observa que el valor de BER, tiende a aumentar, cuando la distancia entre el Tx y Rx aumenta, algo que llama la atención al aplicar este modelo de propagación es que, presenta valores de tasas de bits erróneos mucho más altos que en el modelo Cost 231 Hata Urbano y el modelo Ericsson Urbano. A pesar de que el ruido disminuye teniendo un SNR de 4dB el valor del BER obtiene valores bastante altos.

En la Figura 57, se puede observar que cuando se tiene una distancia entre el Tx y Rx de 2000m, el comportamiento del sistema 4G se asemeja a pesar de que el ruido se reduce con un SNR de 5db, 6db, 7dB, 8dB hasta 9dB. Este resultado solo se obtuvo para este modelo de propagación. Por lo que se puede concluir que al utilizar este modelo de propagación el comportamiento del sistema 4G, cuando se tenga distancias superiores a 2000m va a ser el mismo a pesar de reducir el ruido.

En la Figura 58, se puede observar que con los distintos SNR que se simula desde 10dB hasta 15dB, tiene un comportamiento similar, a medida que la distancia entre el Tx y Rx aumenta, la tasa de bits erróneos (BER) aumenta.

En la Figura 59, se puede observar que como el valor de la señal/ruido (SNR) es 0, los valores del BER son bastante altos, también se establece que cuando se utiliza una modulación 16QAM se tiene un desempeño del sistema mucho mejor que con una modulación de 64QAM como era de esperarse.

En la Figura 60, como el ruido disminuye se observa que el comportamiento del sistema tiende a mejorar, y los mejores resultados se tienen con una modulación 16QAM.

Figura 56

Grafica del BER vs Distancia para el modelo JTG5-6 urbano

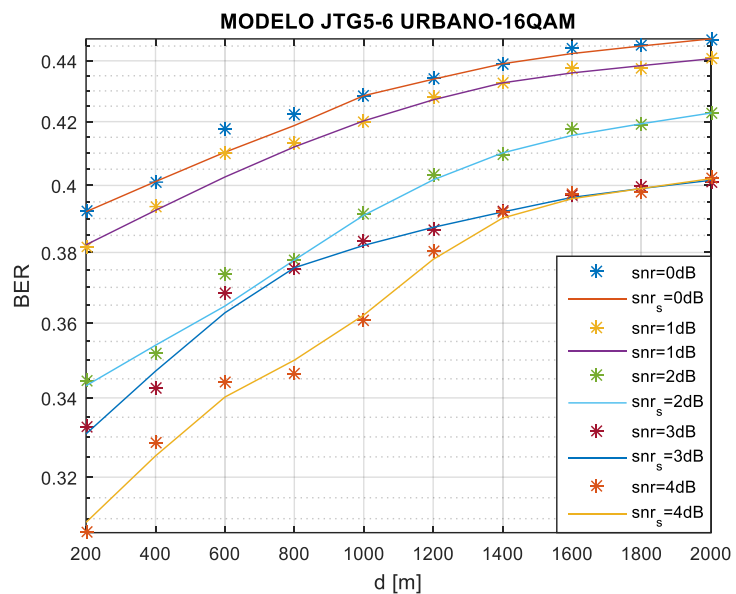


Figura 57

Grafica del BER vs Distancia para el modelo JTG5-6 urbano

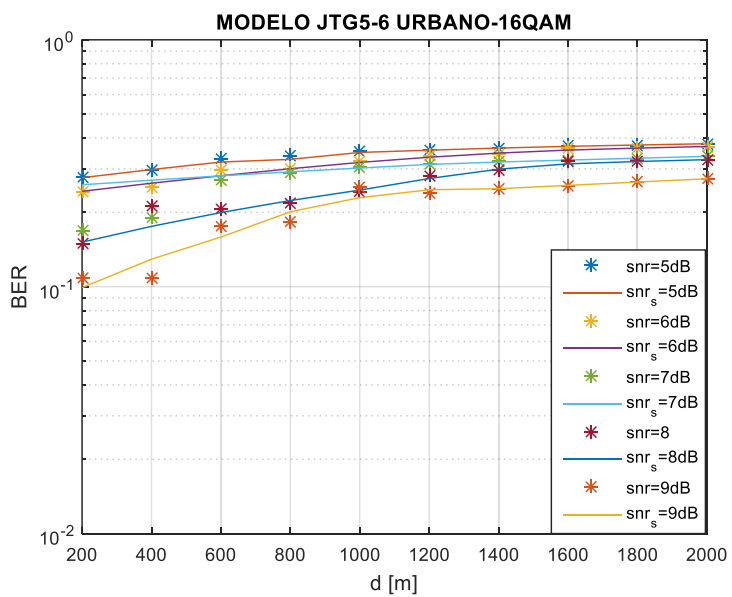


Figura 58

Grafica del BER vs Distancia para el modelo JTG5-6 urbano.

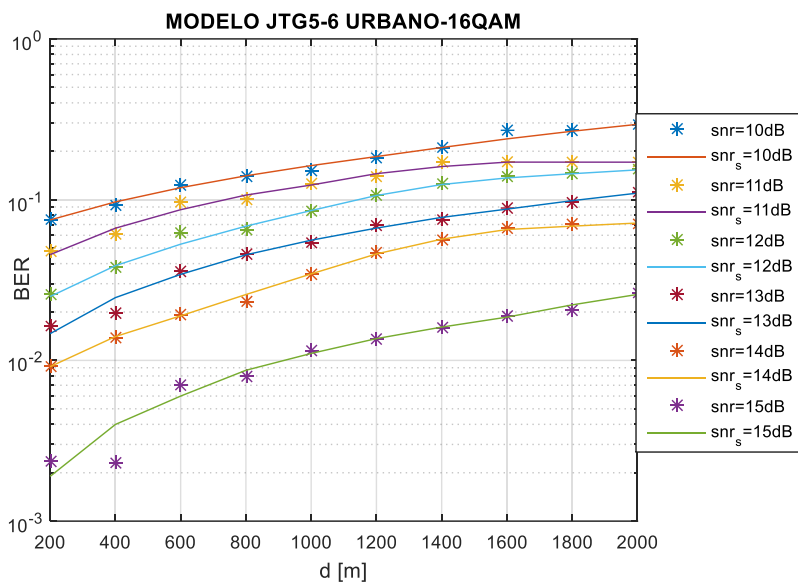
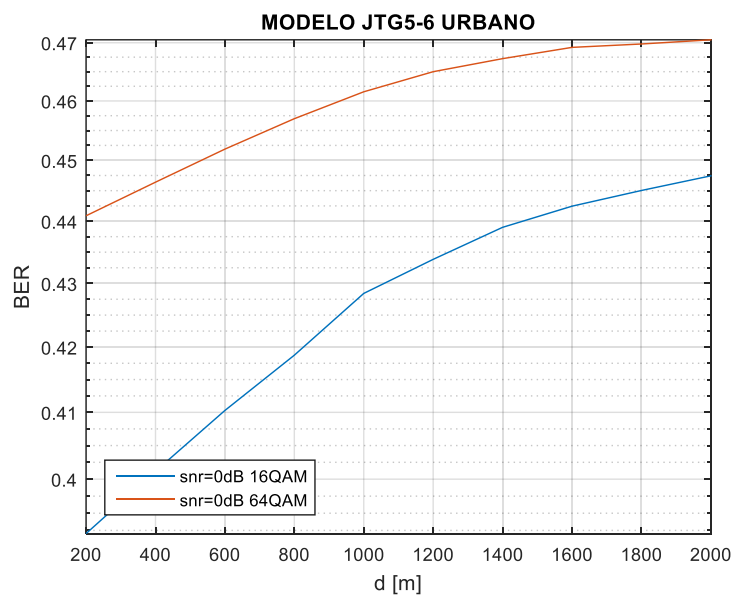


Figura 59

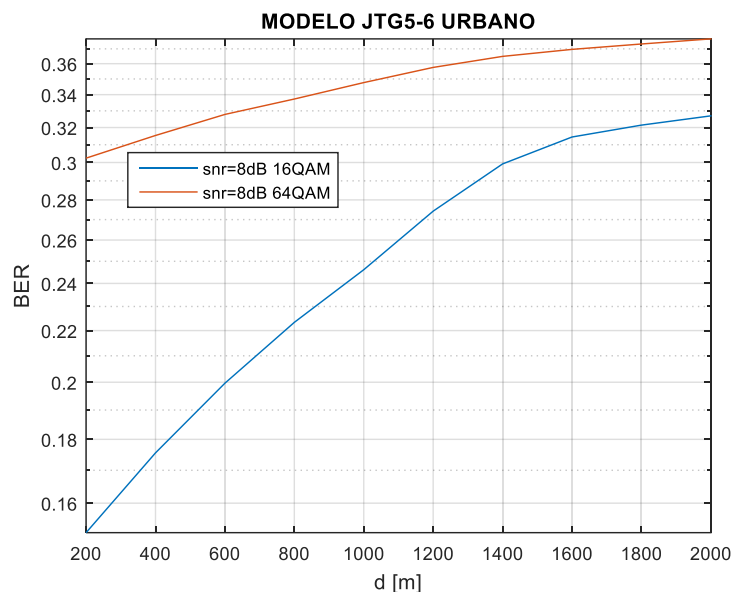
BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 0dB.





**Figura 60**

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 8dB.*

**Tabla 35**

*Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.*

SNR[dB] \ D [m]	0	1	2	3	4
200	0,39207	0,38145	0,34432	0,33252	0,30670
400	0,40112	0,39354	0,35170	0,34250	0,32857
600	0,41748	0,40993	0,37356	0,36823	0,34399
800	0,42244	0,41313	0,37778	0,37524	0,34646
1000	0,42828	0,42010	0,39160	0,38345	0,36085
1200	0,43414	0,42810	0,40322	0,38683	0,38035
1400	0,43888	0,43259	0,40966	0,39212	0,39181
1600	0,44425	0,43730	0,41763	0,39685	0,39741
1800	0,44511	0,43746	0,41884	0,39985	0,39793
2000	0,44729	0,44101	0,42274	0,40101	0,40248

**Tabla 36**

*Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.*

SNR[dB] \ D [m]	5	6	7	8	9
200	0,27630	0,24390	0,16874	0,14964	0,10807
400	0,29832	0,25134	0,19152	0,21295	0,10910

600	0,32844	0,29771	0,27122	0,20677	0,17620
800	0,33791	0,30067	0,29055	0,21654	0,18275
1000	0,35346	0,32008	0,30607	0,24345	0,25348
1200	0,35718	0,33726	0,31167	0,28021	0,24021
1400	0,36408	0,34494	0,32136	0,29689	0,25045
1600	0,37163	0,36261	0,32555	0,32216	0,25676
1800	0,37459	0,36448	0,33036	0,32234	0,26505
2000	0,37925	0,36890	0,33788	0,32524	0,27385

**Tabla 37**

Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	10	11	12	13	14	15
200	0,07574	0,04736	0,02550	0,01625	0,00925	0,00234
400	0,09275	0,06059	0,03821	0,01962	0,01376	0,00229
600	0,12262	0,09647	0,06302	0,03587	0,01938	0,00702
800	0,13973	0,10082	0,06549	0,04592	0,02316	0,00789
1000	0,15216	0,12671	0,08430	0,05398	0,03408	0,01153
1200	0,18367	0,14026	0,10739	0,06878	0,04672	0,01347
1400	0,21010	0,17250	0,12600	0,07585	0,05663	0,01609
1600	0,26877	0,16995	0,13829	0,08885	0,06710	0,01879
1800	0,26769	0,17228	0,14449	0,09635	0,07125	0,02069
2000	0,29329	0,17056	0,15315	0,11073	0,07002	0,02633

m

### **Análisis del comportamiento del sistema 4G según BER vs SNR JTG5-6**

#### **Suburbano**

En la Figura 61, al tener una distancia entre el Tx y Rx de solo 200m, se observa que los valores del BER son bastante aceptables en el orden de  $10^{-3}$  con un SNR de 14dB, tomando en cuenta que estos valores se obtiene cuando el esquema de modulación es de 16QAM, para el esquema de modulación 64QAM los valores del BER llegan a un orden de  $10^{-2}$  con un SNR mayor a 15dB.

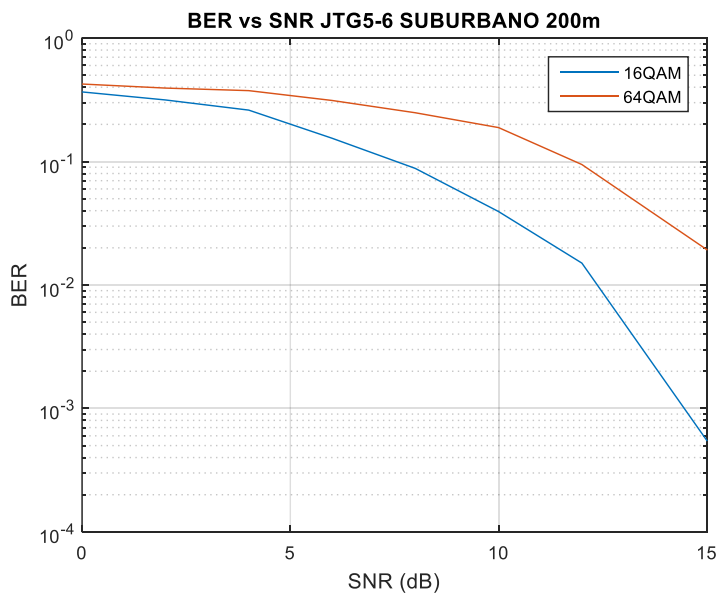
En la Figura 62, al tener una distancia entre el Tx y Rx de 1000m, se puede observar que el comportamiento del BER es muy similar al que se obtuvo en la Figura 61, tanto con un esquema de modulación de 16QAM y 64QAM. Con lo que se puede

establecer que es se obtiene resultados similares al usar el modelo de propagación JTG5-6 en escenarios urbanos y suburbanos.

En la Figura 63, al tener una distancia de 2000m era de esperarse que el rendimiento del sistema 4G sea más bajo, ya que el Tx se encuentra muy alejado del Rx, lo que provoca perdida de información y por ende una tasa de bits erróneos (BER) mucho más alta. Con un esquema de modulación 16QAM se puede tener mejores resultados que con una de 64QAM.

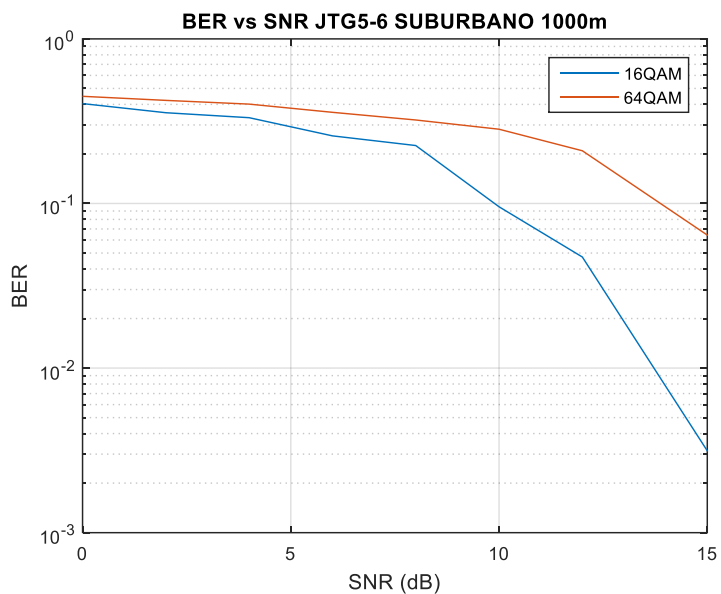
### Figura 61

*BER vs SNR, Modelo JTG5-6, distancia entre Tx y Rx 200m.*

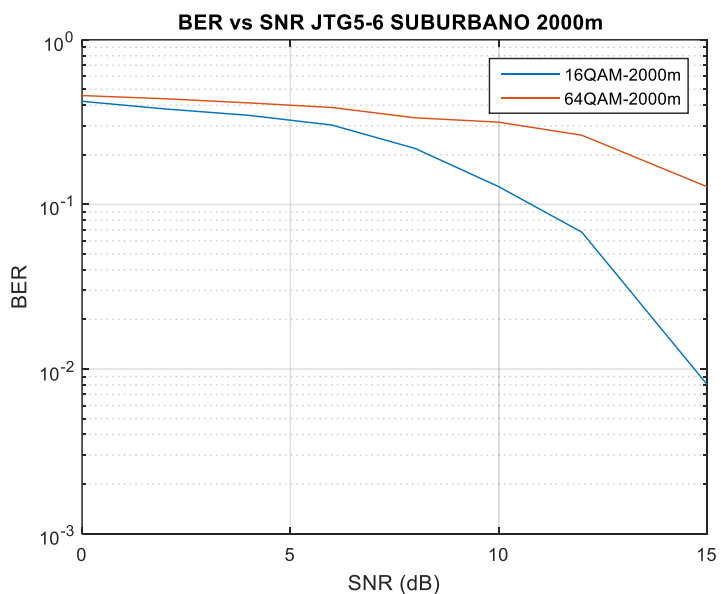


**Figura 62**

*BER vs SNR, Modelo JTG5-6, distancia entre Tx y Rx 1000m.*

**Figura 63**

*BER vs SNR, Modelo JTG5-6, distancia entre Tx y Rx 2000m.*



Las gráficas de las simulaciones para las distancia de 400, 600, 800, 1200,

1400, 1600, 1800 se encuentran en el Anexo I

**Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs Distancia con un modelo JTG5-6 Suburbano**

Las Tablas 38, 39, 40 muestran los datos del BER vs Distancia con valores de SNR de 0dB-15dB.

En la Figura 64, se observa que a medida que la distancia entre el transmisor aumenta de 200m a 2000m, la tasa de bits erróneos (BER) también aumenta. Se puede observar que al reducir el ruido o aumentar la relación señal/ruido (SNR) de 0dB a 4dB, el comportamiento del sistema mejor, ya que la curva del BER presenta valores cada vez más bajos.

En la Figura 65, se observa que los valores del BER disminuyen hasta el orden de  $10^{-1}$ , gracias a que el SNR va mejorando desde 5dB-9dB.

En la Figura 66, se identifica dos resultados, primero que el BER tiende a aumentar, a medida que la distancia entre el Tx y Rx aumenta de 200m a 2000m. Segundo se observa que la curva del BER presente valores cada vez más bajos, ya que el ruido disminuye progresivamente.

En las Figuras 67,68 se observa que se tiene mejor evolución del BER cuando se tiene un esquema de modulación de 16QAM.

Figura 64

Grafica del BER vs Distancia para el modelo JTG5-6 suburbano

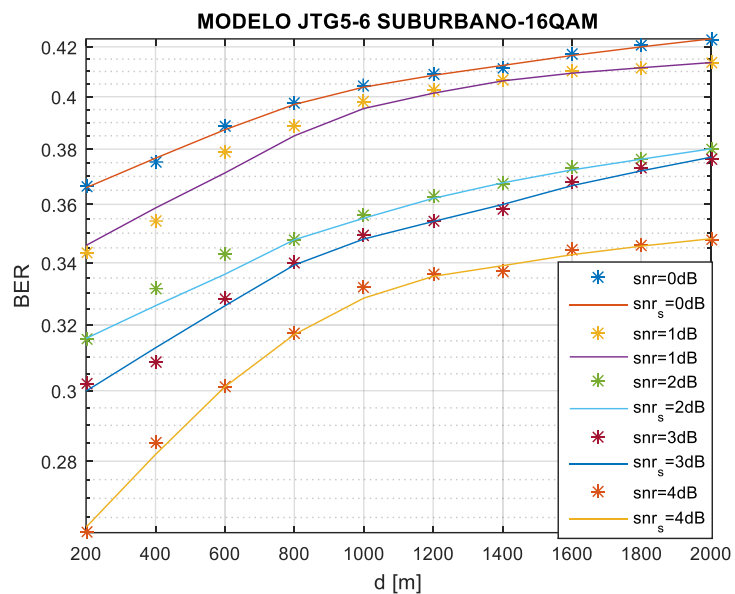
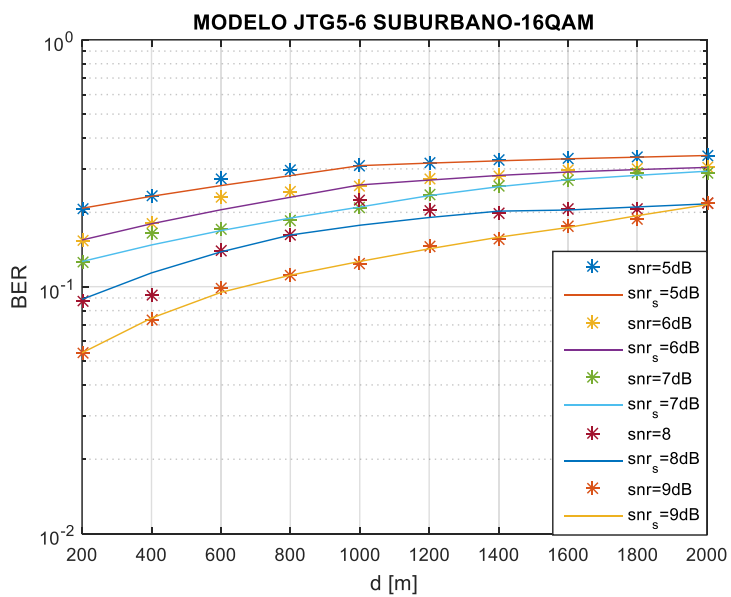


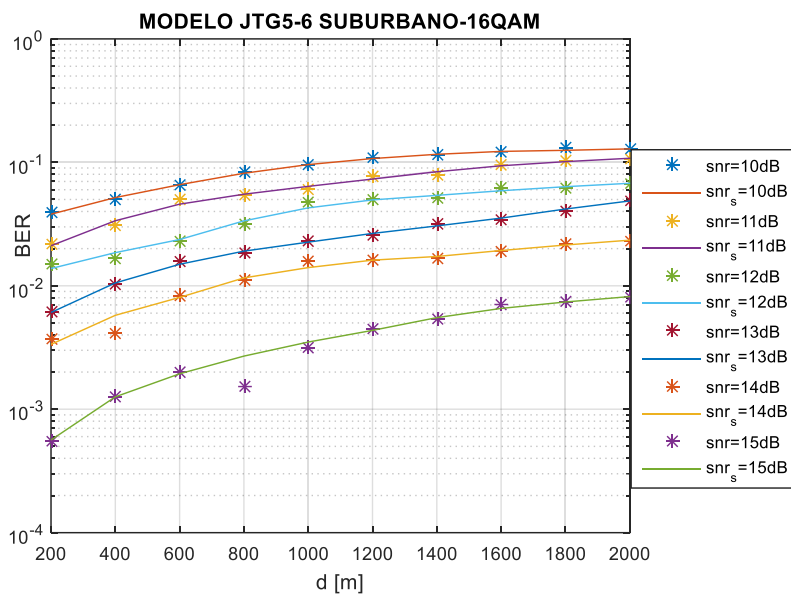
Figura 65

Grafica del BER vs Distancia para el modelo JTG5-6 suburbano



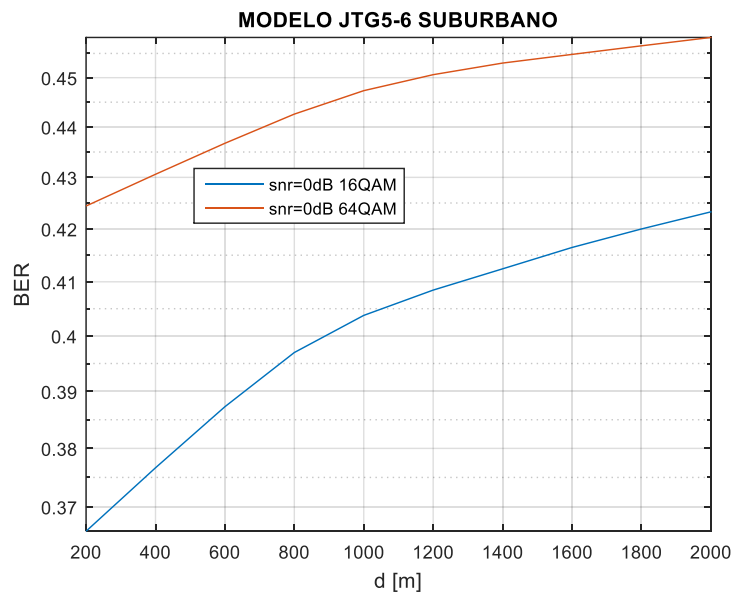
**Figura 66**

*Grafica del BER vs Distancia para el modelo JTG5-6 suburbano*



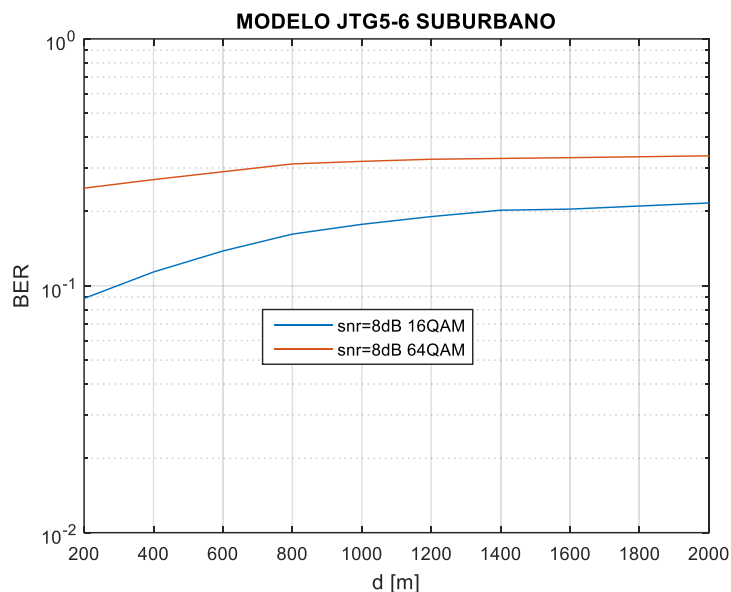
**Figura 67**

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 0dB.*



**Figura 68**

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 8dB.*

**Tabla 38**

*Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.*

SNR[dB] \ D [m]	0	1	2	3	4
200	0,36638	0,34330	0,31548	0,30214	0,26109
400	0,37524	0,35396	0,33145	0,30839	0,28510
600	0,38891	0,37913	0,34267	0,32835	0,30110
800	0,39733	0,38890	0,34757	0,34004	0,31735
1000	0,40445	0,39800	0,35595	0,34904	0,33202
1200	0,40919	0,40280	0,36259	0,35439	0,33644
1400	0,41130	0,40643	0,36758	0,35842	0,33704
1600	0,41722	0,40998	0,37290	0,36781	0,34439
1800	0,42048	0,41139	0,37637	0,37317	0,34594
2000	0,42288	0,41356	0,37996	0,37609	0,34763

**Tabla 39**

*Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.*

SNR[dB] \ D [m]	5	6	7	8	9
200	0,20695	0,15451	0,12550	0,08798	0,05413



400	0,23308	0,17971	0,16408	0,09193	0,07332
600	0,27479	0,23083	0,17220	0,14079	0,09828
800	0,29535	0,24340	0,18609	0,16224	0,11119
1000	0,30911	0,25753	0,20881	0,22493	0,12452
1200	0,31709	0,27235	0,23652	0,20289	0,14488
1400	0,32430	0,27974	0,25471	0,19948	0,15647
1600	0,32843	0,29769	0,27076	0,20650	0,17556
1800	0,33657	0,29871	0,28826	0,20608	0,18799
2000	0,33917	0,30328	0,29073	0,21848	0,21804

**Tabla 40**

Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.

SNR[dB] \ D [m]	10	11	12	13	14	15
200	0,03932	0,02182	0,01504	0,00616	0,00373	0,00055
400	0,04942	0,03129	0,01661	0,01020	0,00409	0,00126
600	0,06563	0,04984	0,02288	0,01562	0,00832	0,00199
800	0,08291	0,05500	0,03209	0,01869	0,01126	0,00154
1000	0,09549	0,06075	0,04727	0,02314	0,01595	0,00314
1200	0,10949	0,07740	0,04998	0,02558	0,01603	0,00445
1400	0,11636	0,07953	0,05106	0,03132	0,01669	0,00538
1600	0,12254	0,09653	0,06205	0,03428	0,01929	0,00700
1800	0,13231	0,10374	0,06261	0,04086	0,02194	0,00751
2000	0,12826	0,10601	0,06776	0,04941	0,02311	0,00808

**Análisis del desempeño del sistema 4G según el BER vs SNR con un modelo JTG5-6 Rural**

En la Figura 69, como se espera se tiene valores del BER bajos cuando se utiliza un esquema de modulación 16QAM, se puede observar que los valores del BER llegan a tener un orden de  $10^{-3}$ , cuando el SNR es de 14dB, mientras que para un esquema de modulación de 64QAM únicamente se reduce a valores en el orden de  $10^{-2}$  con un SNR de 15dB.

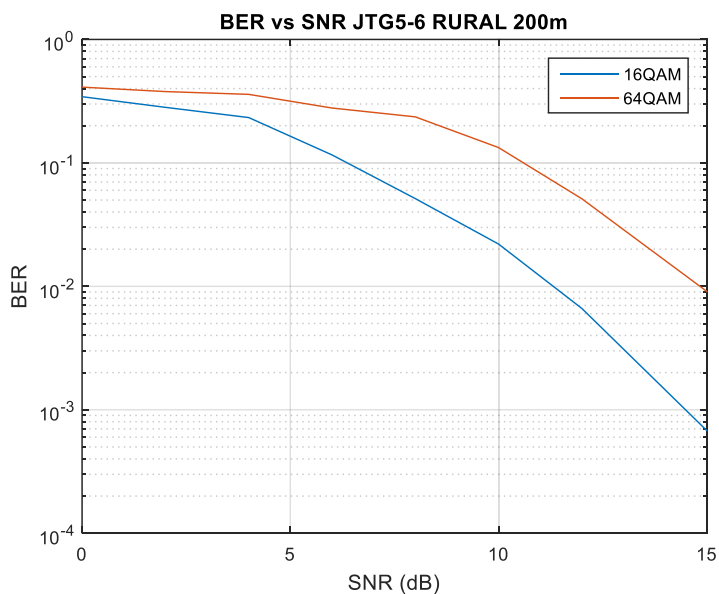
En la Figura 70 también se tiene valores del BER en el orden de  $10^{-2}$  con una modulación de 16QAM y un SNR de 14.5dB, sin embargo para una modulación de

64QAM, los valores del BER aumentan más llegando a valores en el orden de  $10^{-1}$  con un SNR de 13dB, esto debido a que se tiene una distancia de 1000m.

En la Figura 71, con una modulación de 16QAM se llega a valores del BER de orden  $10^{-1}$  con un SNR de 11dB, y con una modulación de 64QAM se llega a  $10^{-1}$ , con un SNR mayor a 15dB esto se debe a que la distancia entre el Tx y Rx es mucho mayor en este caso de 2000m.

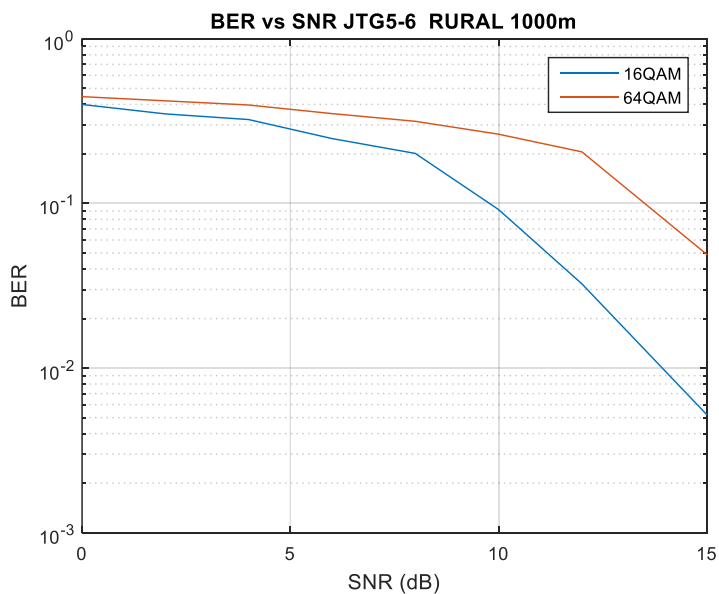
### Figura 69

*BER vs SNR, Modelo JTG5-6, distancia entre Tx y Rx 200m.*

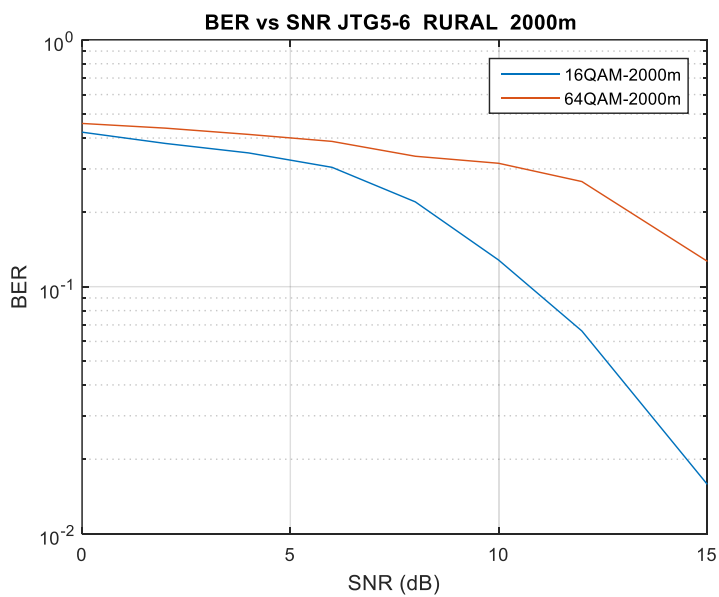


**Figura 70**

*BER vs SNR, Modelo JTG5-6, distancia entre Tx y Rx 1000m.*

**Figura 71**

*BER vs SNR, Modelo JTG5-6, distancia entre Tx y Rx 2000m.*



Las gráficas de las simulaciones para las distancia de 400, 600, 800, 1200, 1400, 1600, 1800 se encuentran en el anexo J.

***Análisis del desempeño de un sistema 4G según el BER vs distancia para el modelo JTG5-6 rural.***

Las Tablas 41, 42, 43 muestran los datos del BER vs Distancia con valores de SNR de 0dB-4dB, de 5dB-9dB, de 10dB-15dB respectivamente.

En la Figura 72, se puede apreciar a que el BER tiende a aumentar, a medida que las distancia entre el Tx y Rx aumenta, tomando en cuenta que se trabaja con un modelo de propagación JTG5-6 Rural, se puede establecer que este escenario presenta mejores valores del BER cuando se tiene un SNR de 4dB, en comparación con las Figuras 58 para escenarios urbanos y Figura 66 para escenario suburbano.

En la Figura 73, se observa que el valor del BER se mantiene con un nivel de  $10^{-1}$ , cuando se trabaja con valores del SNR de 5dB, 6dB, 7dB, 8dB, 9dB, y este comportamiento se presenta en los otros dos escenarios ya analizados, como se muestra en la Figura 65 para escenario suburbanos y en la Figura 57 para escenarios urbanos.

En la Figura 74, se observa que el aumento de la distancia entre Tx y Rx, produce que los valores del BER también aumenten. Al tener una relación señal/ruido 15dB, se observa como el sistema tiene un mejor desempeño que con SNR menores a este valor.

En la Figura 75,76 como es de esperarse se tiene que el mejor esquema de modulación es el de 16QAM, ya que se obtiene valores del BER mucho menores que con un esquema de modulación de 64QAM.

Figura 72

Grafica del BER vs Distancia para el modelo JTG5-6 Rural.

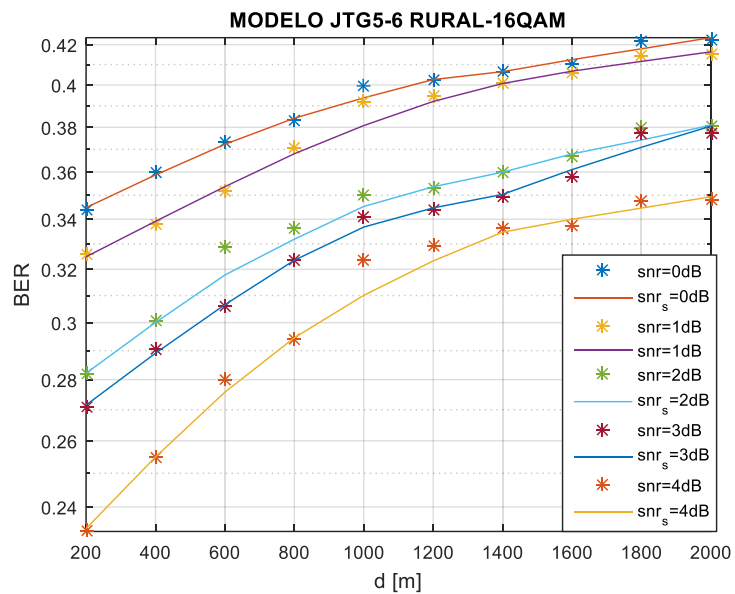


Figura 73

Grafica del BER vs Distancia para el modelo JTG5-6 Rural

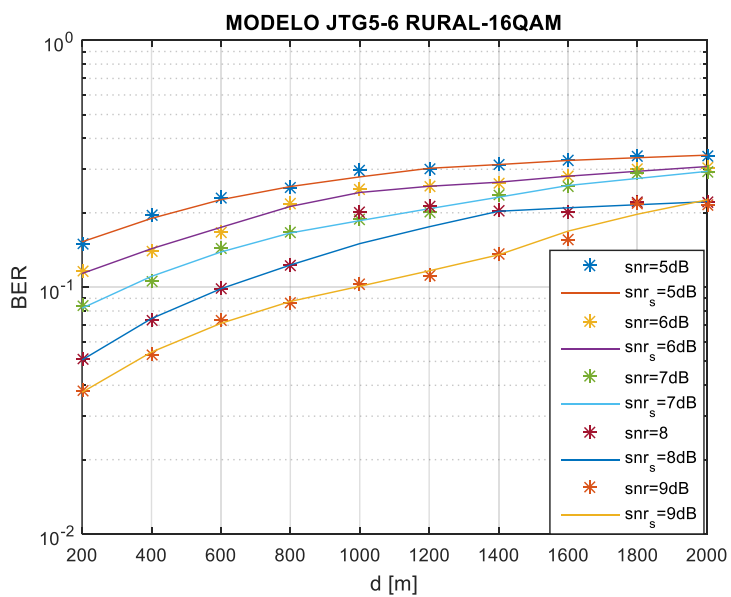


Figura 74

Grafica del BER vs Distancia para el modelo JTG5-6 Rural.

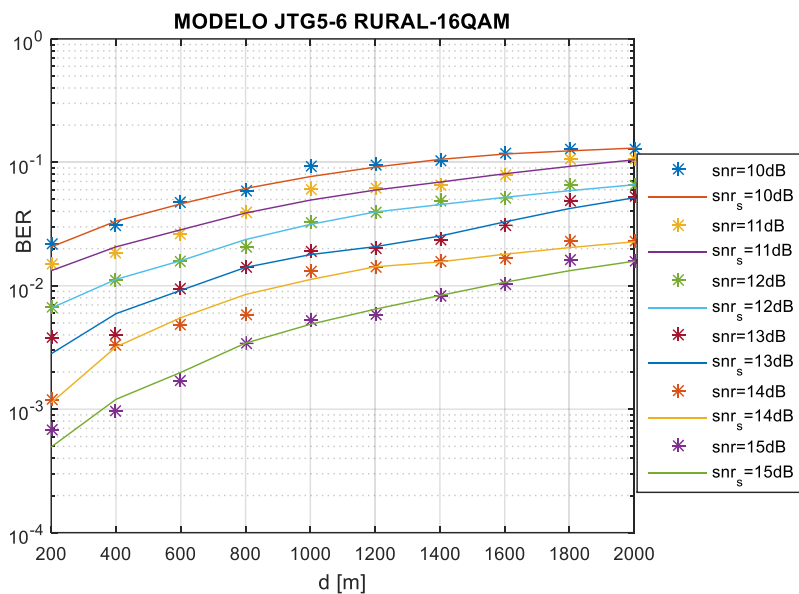
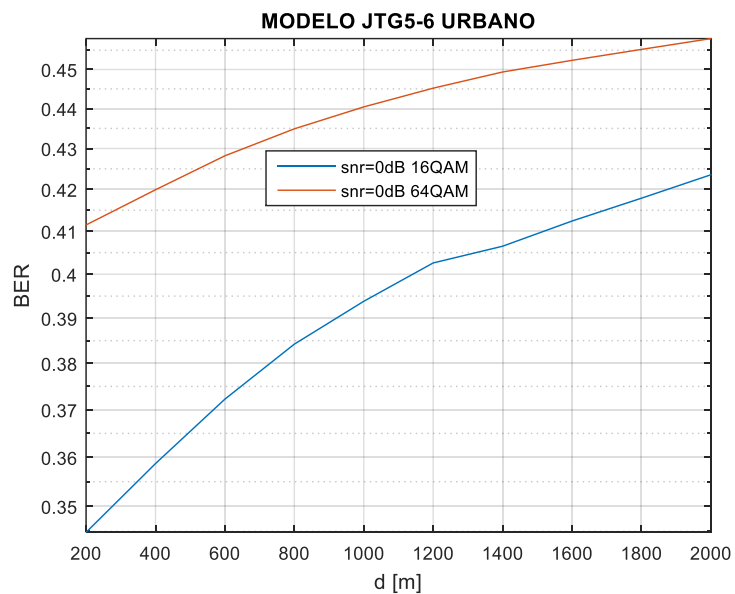


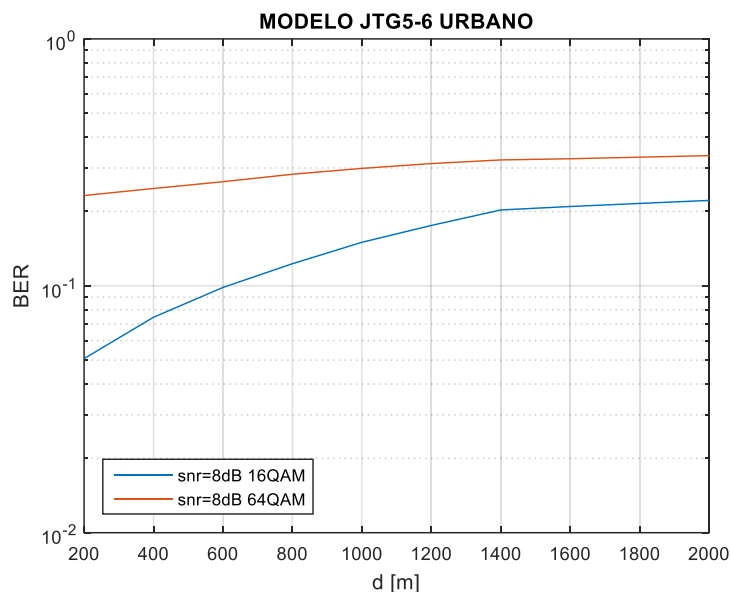
Figura 75

BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 0dB.



**Figura 76**

*BER vs Distancia para 16QAM y 64QAM para un SNR de 0dB.*

**Tabla 41**

*Valores del BER de 0dB-4dB, desde 200m hasta 2000.*

SNR[dB] \ D [m]	0	1	2	3	4
200	0,34380	0,32612	0,28184	0,27079	0,23300
400	0,36018	0,33798	0,30053	0,29046	0,25501
600	0,37315	0,35160	0,32850	0,30613	0,27988
800	0,38299	0,37066	0,33594	0,32342	0,29391
1000	0,39951	0,39200	0,35013	0,34105	0,32346
1200	0,40235	0,39493	0,35275	0,34380	0,32932
1400	0,40661	0,40089	0,35991	0,34966	0,33596
1600	0,41046	0,40571	0,36712	0,35801	0,33749
1800	0,42184	0,41414	0,37975	0,37693	0,34773
2000	0,42246	0,41514	0,38035	0,37749	0,34813

**Tabla 42**

*Valores del BER de 5dB-9dB, desde 200m hasta 2000.*

SNR[dB] \ D [m]	5	6	7	8	9
200					
400					
600					
800					
1000					
1200					
1400					
1600					
1800					
2000					

200	0,14867	0,11609	0,08410	0,05138	0,03803
400	0,19543	0,14020	0,10568	0,07349	0,05286
600	0,22892	0,16571	0,14298	0,09849	0,07391
800	0,25201	0,21827	0,16563	0,12275	0,08592
1000	0,29689	0,24798	0,18836	0,20146	0,10332
1200	0,30137	0,25665	0,20194	0,21136	0,11173
1400	0,31448	0,26297	0,23485	0,20350	0,13624
1600	0,32425	0,27967	0,25478	0,19993	0,15670
1800	0,33949	0,30263	0,29046	0,21936	0,21835
2000	0,33943	0,30441	0,29161	0,22056	0,21503

**Tabla 43**

*Valores del BER de 10dB-15dB, desde 200m hasta 2000.*

SNR[dB] \ D [m]	10	11	12	13	14	15
200	0,02200	0,01506	0,00661	0,00378	0,00119	0,00068
400	0,03048	0,01860	0,01125	0,00402	0,00332	0,00097
600	0,04751	0,02628	0,01594	0,00938	0,00489	0,00172
800	0,05899	0,03905	0,02082	0,01402	0,00579	0,00339
1000	0,09183	0,06101	0,03249	0,01892	0,01296	0,00521
1200	0,09515	0,06195	0,03914	0,02027	0,01413	0,00578
1400	0,10440	0,06572	0,04827	0,02336	0,01581	0,00838
1600	0,11774	0,07913	0,05094	0,03127	0,01664	0,01038
1800	0,12759	0,10589	0,06627	0,04891	0,02275	0,01608
2000	0,12821	0,10588	0,06615	0,05226	0,02285	0,01590

### **Factores que influyen en los resultados**

Se puede establecer que los factores que más influyeron en los resultados de las simulaciones son los siguientes: distancia entre el Tx y Rx, sin duda este es uno de los factores que ha permitido identificar cómo evoluciona el BER dependiendo de la distancia que se establezca entre el Tx y Rx, otro factor importante es la pérdida de propagación que se presenta en cada uno de los modelos de propagación, ya que para cada modelo y escenario se obtuvo diferentes valores haciendo que los resultados variaran, la relación señal/ruido (SNR) es un factor que permitió verificar que el sistema 4G tiende a mejorar a medida que el ruido disminuye.



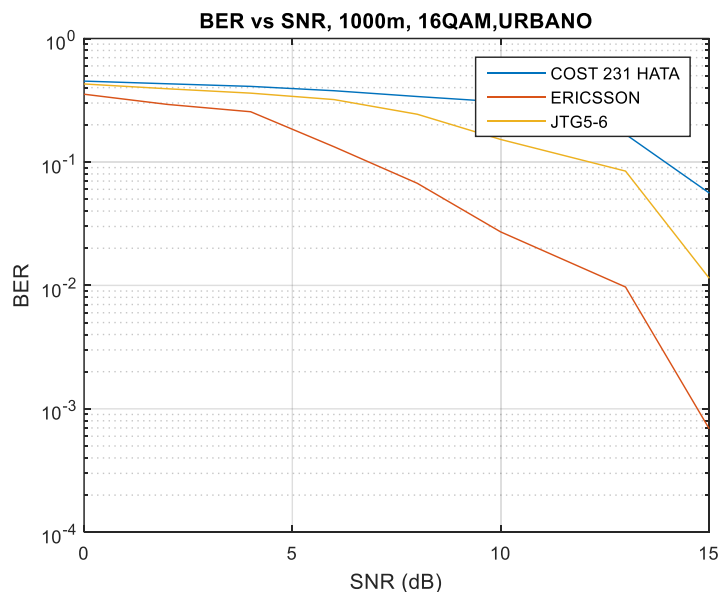
## Comparación de los modelos de propagación

### *Escenario Urbano*

En la Figura 77, se muestra el desempeño de un sistema 4G con un esquema de modulación 16QAM, en un escenario Urbano, y a una distancia entre el Tx y Rx de 1000m, para cada uno de los modelos en este caso se observa el desempeño al trabajar con el modelo Cost231 Hata, Ericsson 9999 y JTG5-6. Con los resultados obtenidos se muestra que el modelo Ericsson 9999 es el que presenta una curva del BER con gran similitud a la curva del BER presentada en la Figura 12, también se observa que el modelo que hace que el sistema tenga el más bajo desempeño es el modelo Cost 231 Hata.

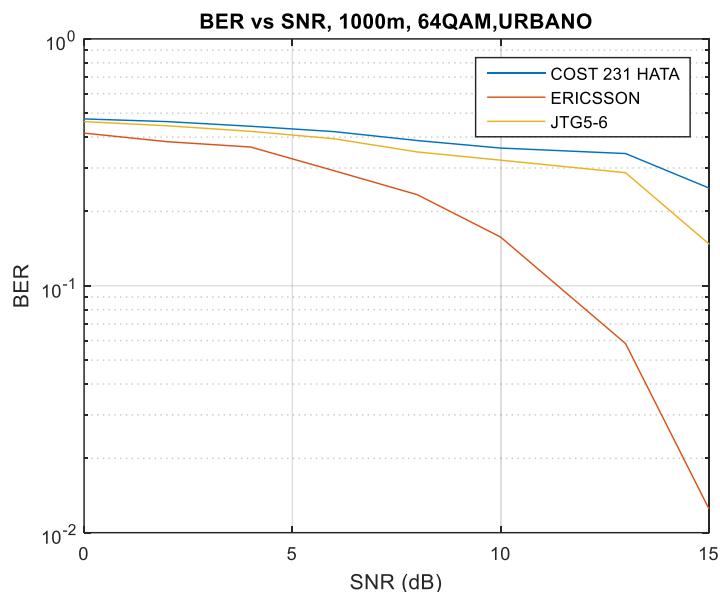
### Figura 77

*Grafica del BER vs SNR*



**Figura 78**

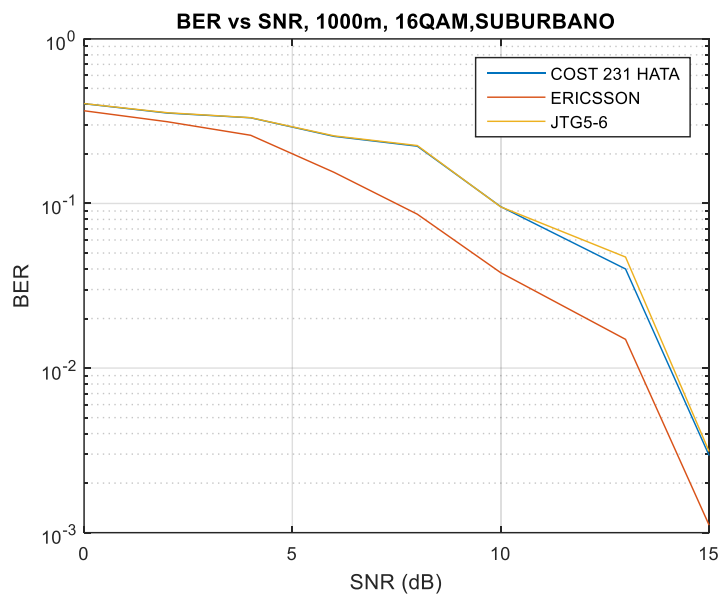
*Grafica del BER vs SNR*



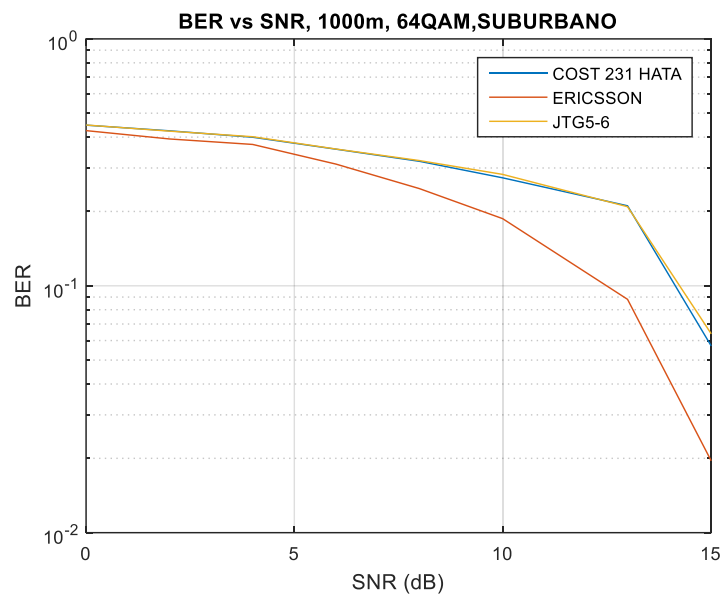
En la Figura 78, se presenta el desempeño de un sistema 4G, con un esquema de modulación de 64QAM, a una distancia entre el Tx y Rx es de 1000m, como podemos observar el mejor modelo es Ericsson, seguido JTG5-6 y finalmente Cost 231 Hata.

### ***Escenario Suburbano***

En la Figura 79, se presenta el comportamiento de un sistema 4G, con una distancia entre el Tx y Rx de 1000m, una modulación 16QAM y un escenario Suburbano, para los modelos de propagación Cost 231 Hata, Ericsson, Jtg5-6. Como se observa el modelo que permite que el sistema 4G tenga un mejor desempeño es el modelo Ericsson, ya que su curva del BER tiende a disminuir al igual que la curva del BER presentada en la Figura 12. Mientras que el modelo Cost 231 y JTG5-6, tienen un comportamiento muy similar.

**Figura 79***Grafica del BER vs SNR*

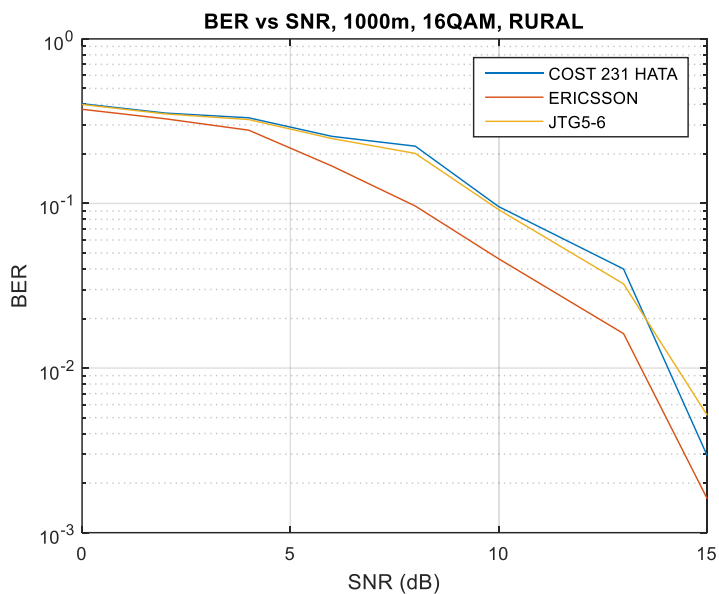
En la Figura 80, debido a que se trabaja con un esquema de modulación 64QAM, los valores del BER son altos, con los tres modelos de propagación, es importante resaltar que el que menos tasa de error de bits presenta es el modelo Ericsson.

**Figura 80***Grafica del BER vs SNR*

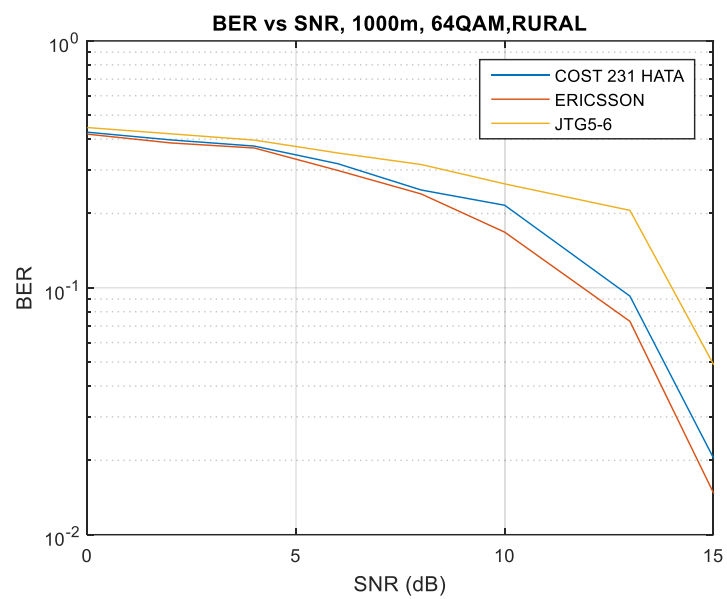
### ***Escenario Rural***

En la Figura 81, el modelo de propagación que permite que el sistema 4G tenga menos tasa de error de bits (BER), en un escenario rural, es el modelo Ericsson.

Seguidamente se puede observar que el modelo JTG5-6 y Cost 231 Hata tienen un comportamiento similar.

**Figura 81***Grafica del BER vs SNR*

En la Figura 82, se puede observar el desempeño de un sistema 4G con una distancia entre el Tx y Rx de 1000m, una modulación de 64QAM, y un escenario Rural para los tres modelos de propagación en estudio, Cost 231 Hata, Ericsson y JTG5-6. Se puede observar que el modelo Ericsson presenta menos penalización de pérdidas que el modelo Cost 2231 y JTG5-6.

**Figura 82***Grafica del BER vs SNR*

## Capítulo V

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

- Lo primero que se determina de cada modelo de propagación es la pérdida que estos presentan en cada uno de los escenarios, urbano, suburbano y rural a una distancia entre el Tx y Rx de 200m-2000m, tomando en cuenta las Tablas 12,14, 16, se establece que para escenarios urbanos, suburbanos y rurales el modelo que presenta menos pérdidas de propagación es el modelo Ericsson,
- Se determina que para escenarios urbanos el modelo de propagación que permite, que el sistema 4G tenga el mejor desempeño utilizando una modulación de 16QAM, y una distancia entre el Tx y Rx de 1000m, es el modelo Ericsson como se puede observar en la Figura 79.
- Luego de realizar el análisis del desempeño del sistema 4G para los diferentes modelos de propagación con un escenario suburbano, una modulación 16QAM y la distancia entre el Tx y Rx de 200m-2000m, se determina que el modelo Ericsson es el adecuado para el sistema 4G, ya que con este escenario la curva del BER vs SNR, tiene un comportamiento similar al teórico establecido en este trabajo.
- Al recopilar los resultados de cada uno de los modelos de propagación en un escenario rural, con una modulación 16QAM y una distancia entre el Tx y Rx de 200m-2000m, se puede identificar que el modelo JTG5-6 y Ericsson son los más adecuados para que el sistema 4G presente el mejor desempeño.

**Recomendaciones**

- Al determinar el comportamiento de todos los modelos de propagación se recomienda, emplear el modelo Ericsson 9999, para obtener una planificación de red 4G satisfactorio.



## Bibliografía

- Alfort, M. (2009). Comements on the JTG5-6 propagation model. *Electronin Communications Commite.*
- Arcotel. (2020). *Arcotel.com*. Retrieved from Agencia de regulacion y control de las telecomunicaciones :  
<https://www.arcotel.gob.ec/4g/#:~:text=En%20telecomunicaciones%2C%20las%20siglas%204G,el%20uso%20de%20los%20datos.&text=A%20diferencia%20de%203G%2C%204G,a%20mayor%20velocidad%20y%20capacidad.>
- Báez, D. P. (2016). *SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE DATOS INALÁMBRICA*. QUITO.
- Beciez, Flores y Perez. (2015, Enero 12). Aplicación de modelos de propagación en sistemas inalambricos de area extendida WWAN. Retrieved from  
<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/12163/1/aplicacionmodelos.pdf>
- Beltrán, J Fermín, J y Hernández, M. (2012). Comparación de los modelos de propagación electromagnética implementados en la telefonía móvil. *Redalyc*, 3-7. Retrieved from Comparación de los modelos de propagación electromagnética implementados en la telefonía móvil
- Beltran, S., Rea, E., & Bonilla, J. (2017). Modelo de propagación simplificado para LTE en la frecuencia de 2.1GHz. *Scielo*. Retrieved from  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-07052017000200083#:~:text=Un%20modelo%20de%20propagaci%C3%B3n%20es,radio%20de%20un%20ambiente%20dado.](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052017000200083#:~:text=Un%20modelo%20de%20propagaci%C3%B3n%20es,radio%20de%20un%20ambiente%20dado.)
- Boccardi, Heath, Lozano, Marzetta & Popovski. (2014). P. Five disruptive technology directions for 5G. *Communications Magazine*.

Catarina. (2018, Enero 12). Modelos de propagación. *Modelos de propagación*.

Retrieved from

[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lem/trevino\\_c\\_jt/capitulo5.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/trevino_c_jt/capitulo5.pdf)

Córdova, H Boets, P Biesen V. (2005). Insight Analysis into WI-MAX Standard and its trends. *Scielo*. Retrieved from

[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1683-](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-)

07892007000200009

European Broadcasting Union. (2001). Digital Video Broadcasting (DVB)B; Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. *ETSI EN 300*. Retrieved from

[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1683-](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-)

07892007000200009

Fernandez, A. (2014). *Estudio y simulación del canal móvil para bandas de LTE con distribuciones Rician y Rayleigh en el modelo de propagación Okumura-Hata en base a MATLAB*. Quito. Retrieved from

<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7322>

Fernandez, L. (2014). *Estudio y simulacion del canal movil para bandas LTE*. Quito.

Retrieved from <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7322/1/CD-5461.pdf>

Garcia, F. (2016). *Biblioteca universitaria politecnica*. Retrieved from Archivo digital UPM:

<http://oa.upm.es/cgi/export/44152/>

Garcias, F. (2016). *Modelos de propagacion para comunicaciones moviles 4G y 5G*.

Retrieved from

[http://oa.upm.es/44152/1/TFG\\_FRANCISCO\\_JAVIER\\_GARCIA\\_RUEDA.pdf](http://oa.upm.es/44152/1/TFG_FRANCISCO_JAVIER_GARCIA_RUEDA.pdf)

Guefry, A Jojoa, P y Almenar, V. (2015). Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica. *Scielo*. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/entra/v11n2/v11n2a19.pdf>

International Telecommunication Union. (1999). Channel Coding, Frame Structure and Modulation Scheme for Terrestrial Integrated Services Digital Broadcasting. *ISDB-T*). Retrieved from [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1683-07892007000200009](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892007000200009)

Iskander y Yun. (2002). Propagation prediction models for wireless communication systems. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*.

López, I. F. (2014). *PLANIFICACIÓN Y DIMENSIONADO DE*. Barcelona.

Mohamed R, Mustafa A y Osman A. (2015). Comparison between IEEE 802.11a, b, g, n and ac Standards. *IOSR Journal of Computer Engineering*.

Nohrborg, M. (2008, Junio 3). *3GPP Global Initiative*. Retrieved from <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>

Pedraza, L Hernández, C y Ballesteros, D. (2009). Análisis experimental para un modelo de propagación de la telefonía móvil de la universidad militar ciencia e ingeniería neogranadina. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*.

Raikel Bordón López, R. A. (2012). *Evaluación de modelos de propagación*. *Revista Cubana de Ingeniería*.

RESEARCH, R. (2018). *LTE TO 5G: THE GLOBAL IMPACT OF WIRELESS INNOVATION*.

- Reyes, J. D. (2013). *ESTUDIO TECNICO COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS INALAMBRICOS DE CUARTA GENERACION (4G), WIRELESS MAN-ADVANCED(IEE 802.16M)Y LTE-ADVANCED*. QUITO.
- Salazar, J. (2017). Redes Inalámbricas. *TechPedia*. Retrieved from [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01\\_R\\_ES.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/100918/LM01_R_ES.pdf)
- Saunders, S. (2007). *Antennas and propagation for wireless communication systems. Second Edition, UK Editorial Wilcy.*
- SUPERTEL. (2012). Evolución de la Telefonía Móvil en Ecuador. *SUPERTEL*, 5-6.
- Toledo, A. P. (2013). *Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniera en Electrónica y. Cuenca.*
- Universidad Internacional de Valencia. (2020). *Universidad Internacional de Valencia*. Retrieved from [https://www.universidadviu.com/int/actualidad/nuestros-expertos/evolucion-de-la-red-de-comunicacion-movil-del-1g-al-5g#:~:text=Red%20de%20comunicaci%C3%B3n%20m%C3%B3vil%20de,Noruega%20y%20Suecia%2C%20en%201981.&text=Est%C3%A1ndares%20%2D%20AMPS%20\(Advance](https://www.universidadviu.com/int/actualidad/nuestros-expertos/evolucion-de-la-red-de-comunicacion-movil-del-1g-al-5g#:~:text=Red%20de%20comunicaci%C3%B3n%20m%C3%B3vil%20de,Noruega%20y%20Suecia%2C%20en%201981.&text=Est%C3%A1ndares%20%2D%20AMPS%20(Advance)
- Vaca, J. (2015). *“SIMULACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN COST 231 WALFISCHIKEGAMI PARA EL CANAL MÓVIL DE BANDAS 4G*. Ambato. Retrieved from [https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/19382/1/Tesis\\_t1094ec.pdf](https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/19382/1/Tesis_t1094ec.pdf)
- Vaca, J. (2015). *simulación de modelo de propagación COST 231WALFISCHIKEGAMI para el canal móvil de banda 4G*. Ambato. Retrieved from

[https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/19382/1/Tesis\\_t1094ec.pdf](https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/19382/1/Tesis_t1094ec.pdf)

Vaca, J. (2015). *SIMULACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN COST 231 WALFISCHIKEGAMI PARA EL CANAL MÓVIL DE BANDAS 4G*. Proyecto para la obtención del título de ingeniería en electrónica, Universidad Técnica de Ambato, Ambato.

Vargas, C Lopez, W y da Rocha C. (2007). Sistemas de Comunicación Inalámbrica MIMO - OFDM. *SCIELO*. Retrieved from [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1683-07892007000200009](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892007000200009)

VILLENA, F. E. (2017). *ESTUDIO DE RECOMENDACION DE PARAMETROS TECNICOS A UTILIZARSE EN EL CONTROL DE REDES LTE 4G EN ECUADOR*. QUITO.

Zarrinkoub, H. (2014). *Understanding LTE with Matlab*. Chennai: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data.

## **Anexos**

**Anexo A.** Antena-Panorama-2x2-MiMo-4G-LTE

**Anexo B.** LTE\_Radio\_Access\_Rel\_FDD\_LTE\_16A\_Operative

**Anexo C.** Gráficas del BER vs SNR modelo Cost 231 Hata Urbano

**Anexo D.** Gráficas del BER vs SNR modelo Cost 231 Hata Suburbano

**Anexo E.** Gráficas del BER vs SNR modelo Ericsson Urbano

**Anexo F.** Gráficas del BER vs SNR modelo Ericsson Suburbano

**Anexo G.** Gráficas del BER vs SNR modelo Ericsson Rural

**Anexo H.** Gráficas del BER vs SNR modelo JTG5-6 Urbano

**Anexo I.** Gráficas del BER vs SNR modelo JTG5-6 Suburbano

**Anexo J.** Gráficas del BER vs SNR modelo JTG5-6 Rural