



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO DE
RAY TRACING PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA
DE VEHÍCULOS EN UN ENLACE DE
COMUNICACIONES EN LA BANDA DE 28 GHZ”

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO/A EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

ROBERTO GERARDO BAYAS TORO

VERÓNICA MARIANELLA CONCHA QUISPILEMA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por su infinito amor y bondad hacia mí, por ser mi fortaleza no solo en el transcurso de mi carrera sino en toda mi vida, gracias por llenarme de sabiduría y discernimiento, este trabajo de titulación ha sido una gran bendición en todo sentido y te lo agradezco Padre, y no cesan mis ganas de decir que es gracias a ti esta meta cumplida.

Agradezco a mis padres y mis hermanos por ser los principales motores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí, gracias por cada consejo, por cada una de las palabras y enseñanzas, por el apoyo incondicional y sobre todo gracias por ser ellos el motivo de esta meta cumplida. Gracias a mi madre por estar dispuesta siempre a velar por mí y prepararme frutita y café en cada larga y agotadora noche de estudio. A mi padre, por muchas veces desvelarse debido a su preocupación, por estar siempre pendiente y dispuesto a ser mi ayuda y mi soporte. Gracias a mis padres por el amor recibido, la dedicación y la paciencia con la que cada día se preocupaban por el avance y desarrollo de la tesis, es simplemente único y se ve reflejado mis en logros cumplidos.

Agradezco a mi novio y compañero de proyecto, quien ha sido mi soporte y ayuda incondicional, con quien he compartido momentos difíciles y de felicidad, quien confió y creyó en mi desde el primer día que empezamos este sueño, gracias por cada consejo y palabra correcta, por siempre ponerle una enorme sonrisa a los problemas.

Verónica Concha Quispilema

AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a Dios por llenar mi vida de personas que siempre han estado presentes para brindarme su apoyo y ser el sustento emocional de mis estudios, también agradecerle por esta etapa que está culminando y por proveerme de la capacidad necesaria para afrontar cualquier dificultad que se presentó en el camino.

A mis padres que siempre me han enseñado que en el estudio es su mejor regalo para brindarme un buen futuro y sostenerme en cada una de mis frustraciones haciéndome entender que siempre estarán para brindarme su amor. A mi hermana le agradezco por aguantarme en todo momento y por apoyarme cuando me desvelaba. También a cada uno de mis tíos y primos que siempre han estado presente en mi vida regalándome por completo su apoyo y a cada uno de mis amigos que han aportado con un granito de arena para llegar a este momento.

A mi novia que desde el inicio de esta etapa de nuestras vidas fue un soporte para mí y con amor estuvo en las buenas y en las malas, gracias por aportar a mi vida en todo momento.

Finalmente, agradezco a mi tutor que me brindo la posibilidad de explorar nuevos campos de estudio para hacerme crecer de manera profesional.

Roberto Gerardo Bayas Toro

DEDICATORIA

Dedico mi tesis a Dios quien me ha permitido llegar hasta este momento, quien me ha llenado de sabiduría para continuar en lo adverso, le dedico mi esfuerzo y dedicación que es la forma más clara de demostrarle todo mi amor y agradecimiento a todas las bendiciones que pone en mi vida.

A mis padres Ángel y Estela por enseñarme que las metas son alcanzables y que una caída no es derrota sino el principio de una lucha diaria que con esfuerzo y dedicación siempre termina en logros y éxito. Esta meta cumplida es para ustedes los amo.

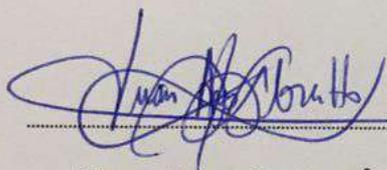
Verónica Concha Quispilema

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado para Dios y para mis padres Roberto Bayas y Sandra Toro, quienes cada día desde que inició esta etapa han soñado verme como un Ingeniero, quienes han sacrificado horas de su vida para proveerme lo necesario y poder cumplir en cada una de mis materias y proyectos. Esto es por ellos, mi logro es un regalo que se lo entrego a Dios y a ellos porque vale la pena haberse esforzado para ver en sus rostros una sonrisa de satisfacción por sus esfuerzos, los amo.

Roberto Gerardo Bayas Toro

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



Msc. Juan Carlos Áviles

PROFESOR EVALUADOR

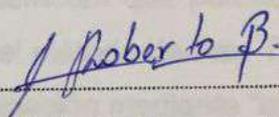


Msc. Miguel Giovanny Molina

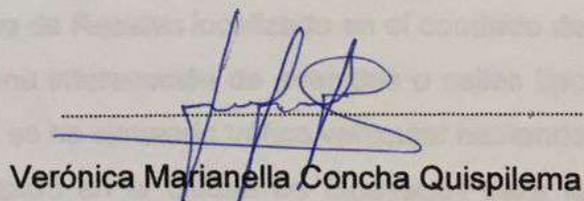
PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Roberto Gerardo Bayas Toro



Verónica Marianella Concha Quispilema

RESUMEN

La banda de 28 GHz actualmente es objeto de diversos estudios y análisis para el uso e implementación de diversas tecnologías en el campo de las telecomunicaciones, por ese motivo en el presente trabajo de titulación se decide realizar el diseño y la implementación de un método de modelamiento de canal milimétrico para determinar la influencia que tiene la presencia vehicular en un enlace de comunicaciones que trabaja en la banda mencionada considerando cuatro escenarios diferentes: ausencia vehicular, vehículos estacionarios, tránsito Este - Oeste y tránsito Norte - Sur.

Para esto se usa el software Wireless Insite de Remcom que permite el diseño y simulación de enlaces de comunicaciones usando el método de Ray Tracing el cual brinda la posibilidad de modelar los pasos de propagación mediante “rayos” o líneas con una paleta de colores que hacen referencia al valor de potencia que se obtiene. Además, este programa permite el modelamiento de ciudades, vehículos, estructuras y características de diseño.

El diseño de partida tiene como base el área de Rosslyn localizada en el condado de Arlington, Virginia, USA en donde se usa una intersección de avenidas o calles tipo cruz como lugar de trabajo. Sobre esta área se ha simulado tráfico vehicular haciendo referencia a un muestreo fotográfico realizado en la ciudad de Guayaquil para la obtención de información acerca de cantidad de vehículos y usuarios. El área de estudio comprende una cobertura máxima de 200 metros con 39 vehículos y 110 receptores que simulan los usuarios. El enlace de comunicaciones posee un transmisor con una antena direccional de 150° y cuatro grupos de receptores en malla equipados con antenas isotrópicas. Los resultados de simulación a analizar son: el modelamiento generado por Ray Tracing, Tablas comparativas de potencia con respecto a cada grupo de receptor y curvas estadísticas de potencia con la finalidad de determinar las influencias ocasionadas por la presencia vehicular en el entorno.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	ii
AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	iv
DEDICATORIA	v
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	vi
DECLARACIÓN EXPRESA.....	vii
RESUMEN	viii
ÍNDICE GENERAL.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Descripción del Problema	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Preguntas de Investigación.....	3
1.5 Limitaciones.....	3
1.6 Resultados Esperados	4
1.7 Aplicaciones del Proyecto	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Espectro Electromagnético	5
2.1.1 Radiofrecuencia	6
2.1.2 Radiocomunicación.....	8
2.2 Antenas	8
2.2.1 Antena Isotrópica	9
2.2.2 Antenas Omnidireccionales	10

2.2.3 Antena Direccional.....	10
2.3 Ray Tracing.....	11
2.3.1 Rayos.....	12
2.4 Wireless Insite: Introducción.....	13
2.4.1 Características de Wireless Insite.....	13
3. METODOLOGÍA.....	15
3.1 Procesos de Desarrollo.....	15
3.1.1 Planteamiento inicial.....	15
3.1.2 Toma de muestras Fotográficas.....	16
3.1.3 Establecimiento del terreno y área de estudio.....	18
3.1.4 Establecimiento de ciudades.....	20
3.1.5 Implementación de objetos.....	21
3.1.6 Modelación de Vehículos.....	22
3.1.7 Manipulación de Códigos.....	22
3.1.8 Colocación de Transmisores/Receptores.....	23
3.1.9 Implementación del método Ray Tracing.....	27
3.2 Parámetros de Simulación.....	27
3.2.1 Parámetros específicos de Simulación.....	28
3.3 Pruebas con la manipulación del código de WI.....	29
3.4 Prueba de Receptores rodeados de autos.....	31
3.5 Escenario Base: Ausencia Vehicular.....	32
3.5.1 Planteamiento del Escenario: Vehículos Estacionario.....	33
3.5.2 Planteamiento del escenario: Tránsito Este - Oeste.....	34
3.5.3 Planteamiento del escenario: Tránsito Norte - Sur.....	35
4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN.....	37
4.1 Análisis de Prueba.....	37
4.2 Análisis del método de Ray Tracing.....	38
4.2.1 Modelamiento de escenario: Ausencia Vehicular.....	38
4.2.2 Modelamiento de escenario: Vehículos Estacionarios.....	41
4.2.3 Modelamiento de escenario: Tránsito Este - Oeste.....	43

4.2.4 Modelamiento del escenario: Tránsito Norte - Sur	46
4.3 Análisis de las Tablas de potencia.....	48
4.3.1 Potencia recibida en el Grupo #1	48
4.3.2 Potencia recibida en el Grupo #2	49
4.3.3 Potencia recibida en el Grupo #3	50
4.3.4 Potencia recibida en el Grupo #4	51
4.4 Curvas Estadísticas de Potencia	53
4.4.1 Ausencia vehicular vs vehículos estacionarios	55
4.4.2 Ausencia Vehicular vs Tránsito Este – Oeste	56
4.4.3 Ausencia Vehicular vs Tránsito Norte - Sur.....	57
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Espectro Electromagnético de Frecuencias.	5
Figura 2.2 Patrón de radiación de una antena Isotrópica	9
Figura 2.3 Patrón de radiación de una antena Omnidireccional	10
Figura 2.4 Enlace de redes con antenas direccionales	10
Figura 2.5 Estrategia del algoritmo.....	11
Figura 2.6 Rayo de reflexión	12
Figura 2.7 Rayos de Reflexión y Refracción	13
Figura 3.1 Vista GPS de Rosslyn	16
Figura 3.2 Calle 9 de Octubre y Pedro Carbo	17
Figura 3.3 Calle Francisco Aguirre Abad y Malecón	17
Figura 3.4 Redondel Garzota	18
Figura 3.5 Terminal Terrestre	18
Figura 3.6 Ventana de creación del terreno	19
Figura 3.7 Ventana de creación del área de estudio	20
Figura 3.8 Rosslyn vista 2D	20
Figura 3.9 Rosslyn vista 3D	21
Figura 3.10 Jerarquía Poligonal	21
Figura 3.11 Diseño Vehicular Poligonal	22
Figura 3.12 Código de Rosslyn	23
Figura 3.13 Tx tipo Punto	24
Figura 3.14 Rx tipo mallado o polígono.....	24
Figura 3.15 Ventana de selección de parámetros del transmisor.....	25
Figura 3.16 Ventana de Parámetros de la Antena Direccional	25
Figura 3.17 Patrón de radiación de la Antena Direccional	26
Figura 3.18 Ventana de parámetros de la Antena Omnidireccional	26
Figura 3.19 Patrón de radiación de la Antena Omnidireccional.....	27

Figura 3.20 Diseño en Excel para manipulación de código	30
Figura 3.21 Dos vehículos añadidos Por Matlab.....	30
Figura 3.22 Tres autos añadidos mediante Matlab	31
Figura 3.23 Escenario de transmisor/receptores tipo punto	31
Figura 3.24 Escenario con Ausencia Vehicular.....	32
Figura 3.25 Escenario principal	33
Figura 3.26 Tiempo de simulación 02:31	34
Figura 3.27 Escenario: Tránsito Este - Oeste	34
Figura 3.28 Tiempo de simulación 02:27	35
Figura 3.29 Escenario: Tránsito Norte - Sur.....	35
Figura 3.30 Tiempo de simulación 02:47	36
Figura 4.1 Ray Tracing de prueba.....	37
Figura 4.2 Grupo #1 de Receptores.....	39
Figura 4.3 Grupo #2 de Receptores.....	39
Figura 4.4 Grupo #3 de Receptores.....	40
Figura 4.5 Grupo #4 de Receptores.....	40
Figura 4.6 Grupo #1 de Receptores.....	41
Figura 4.7 Grupo #2 de Receptores.....	42
Figura 4.8 Grupo #3 de Receptores.....	42
Figura 4.9 Grupo #4 de Receptores.....	43
Figura 4.10 Grupo #1 de Receptores.....	44
Figura 4.11 Grupo #2 de Receptores.....	44
Figura 4.12 Grupo #3 de Receptores.....	45
Figura 4.13 Grupo #4 de Receptores.....	45
Figura 4.14 Grupo #1 de Receptores.....	46
Figura 4.15 Grupo #2 de Receptores.....	47
Figura 4.16 Grupo #3 de Receptores.....	47
Figura 4.17 Grupo #4 de Receptores.....	48
Figura 4.18 Curva Estadística de Potencia: Ausencia Vehicular	53
Figura 4.19 Curva Estadística de Potencia: Vehículos Estacionarios	54

Figura 4.20 Curva Estadística de Potencia: Tránsito Este - Oeste.....	54
Figura 4.21 Curva Estadística de Potencia: Tránsito Norte - Sur	55
Figura 4.22 Curva Estadística de Potencia comparativo #1	56
Figura 4.23 Curva Estadística de Potencia comparativo #2	56
Figura 4.24 Curva Estadística de Potencia comparativa #3	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Espectro electromagnético (Rangos aproximados)	6
Tabla 2. División y Nomenclatura del espectro de Radiofrecuencia.....	6
Tabla 3. Designación de Banda CCIR	7
Tabla 4. Rangos del Espectro de Microondas.	7
Tabla 5. Parámetros generales de trabajo	28
Tabla 6. Antenas.....	28
Tabla 7. Vehículos	29
Tabla 8. Escenarios de Prueba	38
Tabla 9. Potencias Recibidas para receptores del Grupo #1.....	49
Tabla 10. Potencias Recibidas para receptores del Grupo #2	49
Tabla 11. Potencias Recibidas para receptores del Grupo #3	50
Tabla 12. Potencias Recibidas para receptores del Grupo #4	51

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Debido al incremento acelerado de los dispositivos móviles existe una saturación de las bandas de frecuencia en uso por lo que se requiere que las comunicaciones móviles amplíen estándares mundiales para incorporar nuevas generaciones tecnológicas que eviten el colapso futuro de las redes celulares. Empresas de alto prestigio a nivel mundial como Samsung, Nokia, Verizon, entre otras se encuentran realizando estudios para identificar nuevas bandas de frecuencias que permitan ampliar la capacidad que demandan las nuevas tecnologías celulares.

Aunque las tecnologías celulares como la 2G, 3G y 4G le han brindado a la humanidad una mayor evolución y eficiencia en lo que concierne a comunicaciones móviles, actualmente se busca dar otro avance que permita llegar a la implementación de la Telefonía Móvil 5G. Entidades como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y 3GPP han elaborado en conjunto un plan de dos fases para las normas 5G (IMT-2020) donde se prevee dos períodos de investigación que incluyen frecuencias menores a 40GHz que está programado finalizar en el 2018 y otra fase para frecuencias que llegan hasta los 100GHz que se espera finalizar en 2019 [1].

Cabe recalcar, que en la última Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (WRC), realizado en Suiza en el 2015 entre las bandas que la ITU designó como viables para su estudio no incluyó la banda de 28GHz , razón por la cual muchas empresas y organizaciones internacionales continúan realizando sus propios estudios de manera independiente en razón de su gran interés futuro.

1.1 Planteamiento del Problema

En el campo de las telecomunicaciones existen dos ambientes a considerar, Internos (Indoor) y Externos (Outdoor), siendo este último el de mayor interés en

el presente trabajo de investigación del que se conoce poco sobre la influencia que ejercen elementos externos como personas, vehículos y vegetación en entornos de trabajo que se desarrollan en la banda de 28GHz Sin Línea de Vista (NLOS).

1.2 Descripción del Problema

El problema se basa en determinar la influencia que generan elementos externos (vehículos) en un enlace de comunicaciones establecido para la banda de 28 GHz, dentro de un escenario diseñado en el software Wireless Insite.

Con los valores obtenidos mediante la simulación usando Ray Tracing, se determinan las curvas estadísticas de potencia mediante el programa Matlab para conocer si los vehículos causan una influencia considerable en el ambiente previamente establecido.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Realizar el diseño y la implementación de un método de Ray Tracing para determinar los efectos que ocurren en un enlace de comunicaciones en la banda de 28GHz usando vehículos como elementos de influencia.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un modelo de vehículo de dimensiones realistas y características eléctricas definidas.
- Aprender el uso del software Wireless Insite y diseñar un área de estudio que trabaje en la banda de 28GHz definiendo parámetros, especificaciones adecuadas y tipos de antenas.
- Analizar el modelamiento de canal milimétrico (Ray Tracing) mediante el software Wireless Insite.

- Interpretar las curvas estadísticas de potencia recibida que se obtienen en el programa Matlab.

1.4 Preguntas de Investigación

Para un artículo de revista el autor Medina [2, p. 127] menciona que al iniciar un proyecto de investigación uno de los puntos más importantes que el autor debe tener en cuenta son las preguntas de investigación que pueden surgir durante el proceso de desarrollo del trabajo con la finalidad de darle una explicación a los diferentes planteamientos teóricos y prácticos que ocurren durante el proyecto.

Un proyecto no solo depende de los objetivos y los resultados que se espera conseguir, además se requiere de la elaboración de preguntas muy específicas por parte del investigador que brinden el soporte necesario a las diversas dudas que pueden existir durante la fase de desarrollo. Por lo que se requiere plantear las siguientes preguntas de investigación que le darán el enfoque y la guía adecuada al presente trabajo de titulación.

Las interrogantes que se hicieron son: ¿Cuáles y cuantos serán los escenarios posibles que se plantearan para representar de manera adecuada el proyecto?
¿Qué software brinda la facilidad al usuario de poder diseñar e implementar un área de trabajo en una banda de 28GHz con sus respectivos componentes?
¿Qué componentes son los adecuados para el ambiente externo establecido?
¿Qué representa el método de Ray Tracing para el modelamiento de señales?
¿Qué otras herramientas pueden aportar al análisis de los resultados obtenidos?

1.5 Limitaciones

Para el proyecto de investigación en curso, uno de los factores limitantes es el tiempo necesario para tener un conocimiento adecuado sobre el uso de las diferentes herramientas de simulación tales como Wireless Insite y MATLAB y al mismo tiempo obtener los datos de campo necesarios. Los últimos corresponden a las características físicas de las calles y los vehículos, así como el método necesario para su inclusión en la simulación.

1.6 Resultados Esperados

Con este proyecto se espera obtener información sobre la influencia de vehículos en la banda de 28GHz y adquirir los conocimientos apropiados sobre la herramienta Wireless Insite y las ventajas que ofrece al usuario en la simulación de entornos e implementación de Ray Tracing.

1.7 Aplicaciones del Proyecto

Las aplicaciones inmediatas del proyecto en situaciones reales en las bandas de frecuencias en el rango de 30 - 300 GHz se dificulta debido a la inexistencia de equipos comerciales . La aplicación del presente proyecto está enfocado en aportar información acerca de la influencia de elementos externos en esta banda para futuras investigaciones que sean realizadas por empresas encargadas de proveer servicios de comunicación.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

La presente sección describe conceptos relacionados con el Espectro Electromagnético y la banda de 28GHz. Además, se definen los tipos de antenas utilizadas en la implementación de escenarios y se estudia el comportamiento del Método de Ray Tracing en Wireless Insite.

2.1 Espectro Electromagnético

La energía electromagnética abarca un intervalo de proporciones casi infinitas formando así lo que en el campo de las comunicaciones se conoce como Espectro Electromagnético, el mismo que está regulado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) y distribuido de acuerdo a factores normativos que rigen en cada región o nación [3] (Ver Figura 2.1).

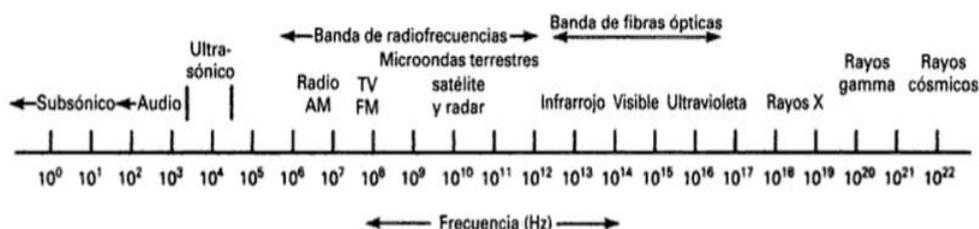


Figura 2.1 Espectro Electromagnético de Frecuencias [3].

El espectro electromagnético se encuentra dividido con respecto al tipo de ondas que poseen diferentes aspectos de medición que se detallan a continuación en la Tabla 1.

Región	Frecuencia (Hz)	Longitud de onda (m)	Energía del fotón (eV)
Rayos gamma	$10^{22} - 10^{19}$	$10^{-14} - 10^{-11}$	10^{10}
Rayos-X	$10^{19} - 10^{17}$	$10^{-11} - 10^{-8}$	10^5
Ultravioleta	$10^{17} - 10^{15}$	$10^{-8} - 10^{-6}$	10^3
Visible	$10^{15} - 10^{14}$	$4 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-6}$	1
Infrarrojo	$10^{14} - 10^{11}$	$10^{-5} - 10^{-3}$	10^{-3}
Microondas	$10^{11} - 10^9$	$10^{-3} - 10^{-1}$	10^{-5}
Ondas de radio	$10^9 - 10^3$	$10^{-1} - 10^5$	10^{-10}
Corriente alterna	$10^3 - 10^2$	$10^5 - 10^7$	10^{-15}

Tabla 1. Espectro electromagnético (Rangos aproximados) [4].

Se denomina Bandas de Frecuencias a las subsecciones de frecuencia que encontramos dentro del espectro que son naturales y renovables.

2.1.1 Radiofrecuencia

El espectro electromagnético está dividido en intervalos de frecuencia que se usan para diferentes aplicaciones donde la sección de Radiofrecuencia es la parte del espectro que se encuentra entre los 3Hz y 300GHz, abarcando la banda de 28GHz [5].

En las Tablas 2 y 3 se pueden observar los nombres de las divisiones que existen en la Radiofrecuencia, el número de bandas, los rangos de frecuencia y la cobertura / distancia que abarca:

Banda (N)	Símbolos	Significado
2	ELF	Frecuencias extremadamente bajas
3	VF	Frecuencias de voz
4	VLF	Frecuencias muy bajas
5	LF	Frecuencias bajas
6	MF	Frecuencias intermedias
7	HF	Frecuencias altas

8	VHF	Frecuencias muy altas
9	UHF	Frecuencias ultra altas
10	SHF	Frecuencias súper altas
11	EHF	Frecuencias extremadamente bajas

Tabla 2. División y Nomenclatura del espectro de Radiofrecuencia [3].

Símbolos	Frecuencias	Longitud de onda	Designación
ELF	30Hz-300Hz	100000 a 10000Km	
VF	0.3kHz-3kHz	10000 a 100Km	
VLF	3kHz-30kHz	100 a 10Km	Milimétricas
LF	30kHz-300kHz	10 a 1Km	Kilométricas
MF	0.3MHz-3MHz	1000 a 100m	Hectométricas
HF	3MHz-30MHz	100 a 10m	Decamétricas
VHF	30MHz-300MHz	10 a 1m	Métricas
UHF	300MHz-3GHz	1m a 10cm	Decimétricas
SHF	3GHz-30GHz	10 a 1cm	Centimétricas
EHF	30GHz-300GHz	10mm a 1mm	Milimétricas

Tabla 3. Designación de Banda CCIR [3].

Dentro de RF encontramos otras divisiones de acuerdo al uso que se le da a las diferentes bandas, entre estas se encuentra el intervalo correspondiente a Microondas como se muestra a continuación en la Tabla 4.

<i>Banda</i>	<i>Frecuencias (GHz)</i>
L	1 a 2
S	2 a 4
C	4 a 8
X	8 a 12
Ku	12 a 18
K	18 a 27

Ka	<i>27 a 40</i>
Q	<i>40 a 50</i>
V	<i>50 a 75</i>
W	<i>75 a 100</i>

Tabla 4. Rangos del Espectro de Microondas [6].

La banda de 28 GHz se encuentra dentro del rango de la Banda Ka, una de las características más notorias de esta banda es que parte de ella entra en el rango de las ondas milimétricas [7].

2.1.2 Radiocomunicación

La radiocomunicación es un tipo de telecomunicación que se efectúa por medio de ondas radioeléctricas, consiste en colocar la información que se desea transmitir en una onda electromagnética que hace de soporte a la que se denomina portadora. Los tipos de radiocomunicaciones son: espacial, astronómica y terrenal.

Cuando se habla de servicios de radiocomunicación se refiere a la acción de emitir y/o recibir información en forma de ondas electromagnéticas para cubrir las necesidades de comunicación. Los tipos servicios son:

- Servicios Fijos.- sucede entre puntos fijos determinados.
- Servicios Móviles.- ocurre entre una estación fija y una móvil, o entre varias estaciones móviles.
- Servicio de Radiodifusión.- la información que se emite se caracteriza por llegar de manera directa a un público en general [8].

2.2 Antenas

Las Antenas son dispositivos fundamentales que forman parte de un sistema de telecomunicaciones, pueden operar como transmisor o receptor y están construidas específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas. Para

condiciones esenciales es importante que una antena radie el máximo de potencial posible con un porcentaje de pérdidas mínimo [5].

Una antena es un dispositivo de funcionamiento recíproco; es decir, las características y desempeño de transmisor y receptor son iguales. Las antenas de transmisión deben ser capaces de manipular grandes potencias por lo que su diseño está conformado por materiales que soportan altos voltajes y potencias elevadas. Por el contrario, las antenas de recepción generan voltajes y corrientes considerablemente pequeñas. A pesar de ello la mayoría de los sistemas de Radiocomunicación utilizan la misma clase de antena para transmitir como para recibir [3].

2.2.1 Antena Isotrópica

Una antena Isotrópica se encuentra conformada por un patrón de radiación tridimensional sin pérdidas de radiación como se observa en la Figura 2.2. Se caracteriza por ser una antena puntual que irradia energía en todas las direcciones de manera uniforme con igual intensidad. A pesar de ser una antena hipotética es usada de referencia para manifestar las propiedades de directividad de antenas reales [9].

Considerada como una antena ideal por su patrón de radiación esférico, posee una amplitud de rayo de 360 grados tanto vertical como horizontal y por su aumento de 1 (0DB), lo que significa que posee cero aumento y cero pérdidas [10].

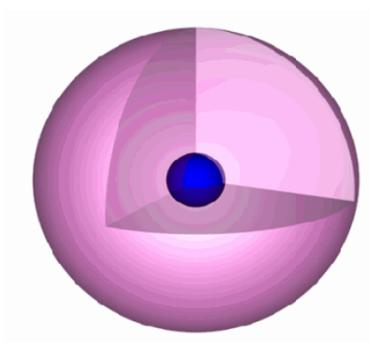


Figura 2.2 Patrón de radiación de una antena Isotrópica [10].

2.2.2 Antenas Omnidireccionales

Son antenas reales con un patrón de radiación horizontal de 360 grados y con grados de cobertura vertical variable. Se puede decir que es un tipo de antena utilizado para aumentar la cobertura y rendimiento de señales Wifi, esto la convierte en la mejor alternativa para cubrir amplias zonas de trabajo [10] (Ver Figura 2.3).

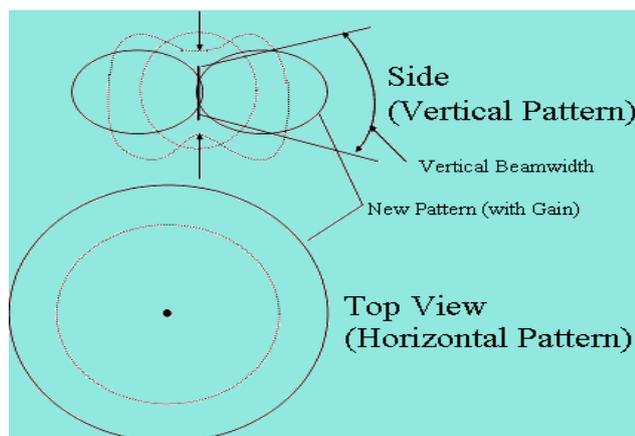


Figura 2.3 Patrón de radiación de una antena Omnidireccional [10].

2.2.3 Antena Direccional

Son antenas utilizadas para enlazar redes que se encuentren ubicadas geográficamente en diferentes lugares (Ver Figura 2.4). Su objetivo principal consiste en enfocar la mayor cantidad de energía RF en una dirección en particular aumentando así la potencia emitida hacia el receptor evitando interferencias introducidas por fuentes no deseadas [10].

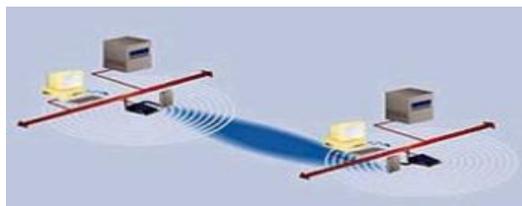


Figura 2.4 Enlace de redes con antenas direccionales

Un aspecto notable de las antenas direccionales es la relación de transformación de energía que la antena dirige hacia una dirección previamente establecida llamada “delantero-detrás”, esta es la encargada de medir la directividad de la antena dependiendo principalmente del patrón de irradiación de la energía que se deja detrás de la antena o que se pierde [10].

2.3 Ray Tracing

En 1637 Rene Descartes publica por primera vez un documento sobre el trazado de rayos o Ray Tracing, utilizando este método para darle explicación a la forma del arco iris con conceptos de óptica geométrica. A continuación, las siguientes definiciones fueron tomadas de diferentes puntos de vista acerca de Ray Tracing [11].

Ray Tracing es un método utilizado en la síntesis de imágenes tridimensionales. Se denomina con este nombre porque únicamente permite determinar la trayectoria de rayos conociendo la ubicación del emisor y receptor [12].

Este método consiste en proyectar una sucesión de rayos originados desde una fuente de luz, los mismos que serán rastreados en el momento en el que sean interceptados por algún objeto en el ambiente donde se desarrollan (Ver Figura 2.5). Se puede decir que Ray Tracing es un procedimiento matemático que permite generar imágenes foto-realistas partiendo de especificaciones dadas sobre una escena en particular modelando geoméricamente los rayos de luz que se originan. Desde un punto de vista artístico Ray Tracing es un método que permite crear arte visual transformando la descripción matemática de un objeto puesto en escena en un cuadro atractivo para la vista del espectador [13].

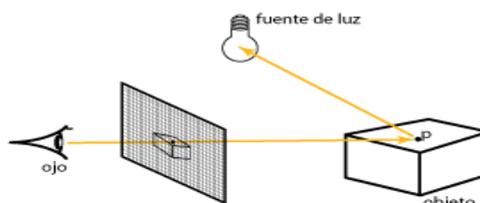


Figura 2.5 Estrategia del algoritmo

En resumen, Ray Tracing es un método que permite modelar imágenes con un nivel elevado de realidad porque utiliza algoritmos que permiten rastrear la trayectoria de los rayos que se originan en el ambiente de estudio, permitiendo que sea visible la reflexión y refracción tal como sucede en la realidad.

2.3.1 Rayos

Considerados como la estructura principal de Ray Tracing, son líneas paramétricas de 3 dimensiones conformadas por dos componentes principales: origen y dirección; los rayos pueden ser de diferentes modelos y la composición de los mismos será la que permita determinar el color de cada pixel en una escena.

- Rayos de reflexión. - Estos rayos se generan en el instante en el que otro rayo incide con un objeto cuya composición física le permite ser reflejante, lo que permitirá generar un nuevo rayo con diferentes propiedades que dependerán del tipo de material del objeto intersectado (Ver Figura 2.6).

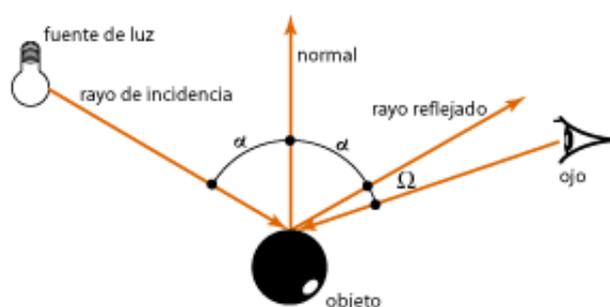


Figura 2.6 Rayo de reflexión.

- Rayos de Refracción.- Estos rayos se genera de la colisión de un rayo con un objeto que posee cierto índice de refracción, es decir que el objeto sea parcial o totalmente transparente; si ese es el caso se formara un nuevo rayo que atravesase el objeto con el cual colisionó, este poseerá nuevas propiedades dependiendo del tipo de material del objeto [14] (Ver Figura 2.7).

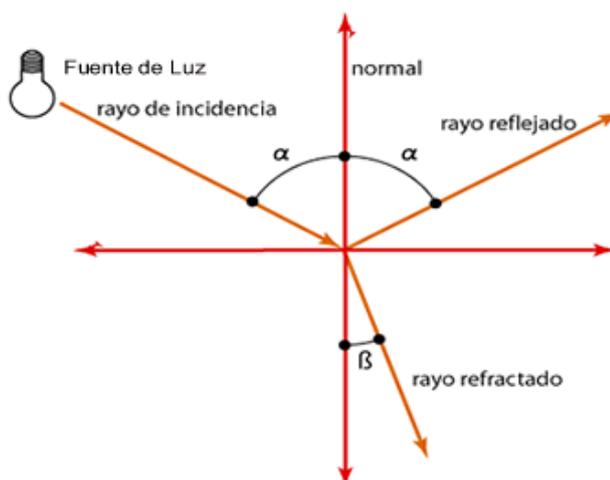


Figura 2.7 Rayos de Reflexión y Refracción

2.4 Wireless Insite: Introducción

Wireless Insite es un programa creado por la empresa REMCOM con sedes en Estados Unidos y Canadá. Esta organización ha sido desarrolladora y proveedora de software de simulación de ondas electromagnéticas por más de 20 años y ha brindado servicio a organizaciones como Siemens, Samsung, Huawei, entre otras, ganando un estándar de confianza alto a nivel mundial [15].

2.4.1 Características de Wireless Insite

La versión 2.7.0 de Wireless Insite fue lanzada en junio de 2013, la principal finalidad de este software es el modelamiento electromagnético de los posibles efectos que un entorno (edificaciones, terreno, follaje, etc.) pueda producir con respecto a la propagación de ondas electromagnéticas. Las características más importantes son:

- Predice los efectos que se tendrán con respecto a una señal emitida, basándose en la ubicación de los transmisores y receptores para ambientes internos y externos.

- Modelamiento del método de Ray Tracing para el análisis de propagación de ondas de radio y sistema de comunicaciones inalámbricas.
- Realiza diseños en otras herramientas virtuales para la implementación del entorno, importando los archivos correspondientes para luego ser convertidos. Todos los archivos de salida generados por Wireless Insite están en un formato ASCII legible.
- Entre las lecturas que este software es capaz de realizar están la intensidad de campo eléctrico y magnético, la potencia recibida, las medidas de interferencia, la pérdida de trayectoria, la propagación del retardo y los pasos de propagación [16].

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

La presente investigación es de tipo cualitativa puesto que permite describir y analizar la influencia vehicular en un enlace de comunicaciones en la banda de 28GHz sin línea de vista (NLOS). El propósito de este capítulo es presentar los procedimientos de diseño e implementación de un método de Ray Tracing usando el software Wireless Insite.

El escenario de trabajo está conformado por un enlace que posee una antena transmisora y un número determinado de receptores. En esta sección se detallan las diferentes pruebas realizadas y la presentación del escenario final con sus respectivas modificaciones.

3.1 Procesos de Desarrollo

3.1.1 Planteamiento inicial

El diseño inicial está enfocado en la ciudad de Guayaquil donde se realizaron muestras fotográficas para determinar los siguientes parámetros: el tipo de intersección de calles, la cantidad de vehículos y personas. Una de las primeras ideas fue recrear un escenario donde se pueda analizar los efectos que produce la influencia de vehículos y personas pero por ciertas circunstancias que se exponen en las pruebas se descartó la inclusión del cuerpo humano como objeto de intromisión en el enlace de comunicación.

A medida que se avanzó en el uso de la herramienta Wireless Insite se optó por usar un diseño predeterminado de una ciudad llamada Rosslyn ubicada en Estados Unidos como se observa en la Figura 3.1 donde se usaron como referencia de tráfico vehicular los ejemplos tomados en la ciudad de Guayaquil.

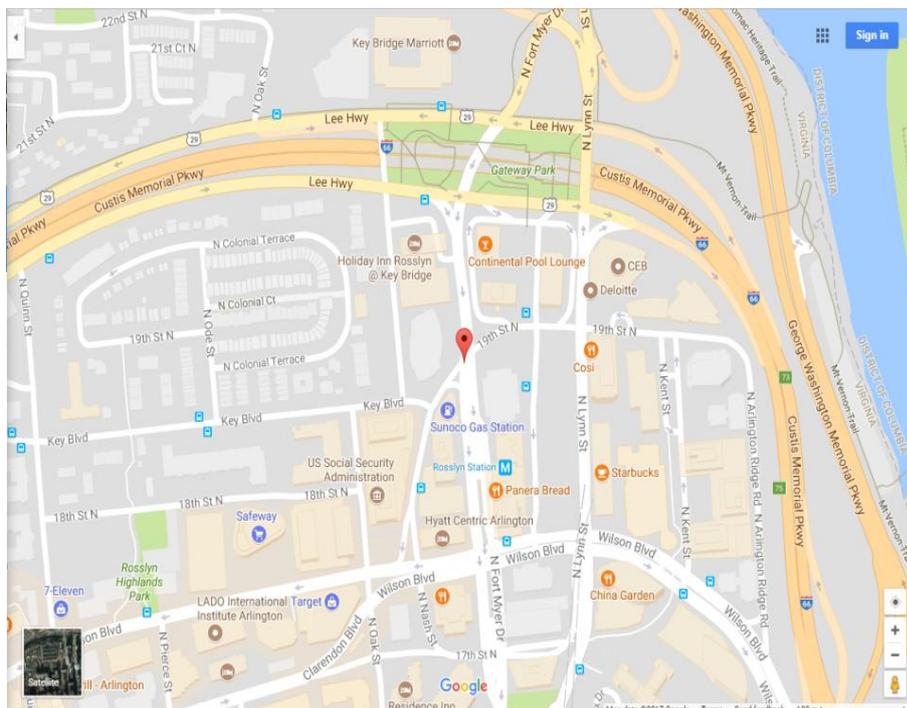


Figura 3.1 Vista GPS de Rosslyn

3.1.2 Toma de muestras Fotográficas

Se realizó un estudio de campo basado en fotografías con la finalidad de obtener un promedio del número de carros que se podría usar dentro del proyecto. Las muestras fueron tomadas en diferentes lugares de Guayaquil, en el centro y norte de la ciudad. La idea principal era la recopilación de información acerca de calles o avenidas que se interceptan unas con otras con un tránsito vehicular en diferentes sentidos.

Las Figuras 3.2 y 3.3 son de las calles del centro de Guayaquil que generalmente tienen una gran afluencia vehicular y poblacional, lo que permite tener un dato claro de la cantidad de elementos que transitan por ese sector. La zona de 9 de octubre y Pedro Carbo tiene dos sentidos, una que baja hacia el Malecón 2000 y otra que va en dirección a Las Peñas brindando una guía adecuada sobre el sentido que podrían tener nuestros escenarios con respecto al tránsito. Las calles Francisco Aguirre Abad y Malecón brindaron un ejemplo

acerca de los parqueos vehiculares y de la cantidad de vehículos que circulan en el sector.

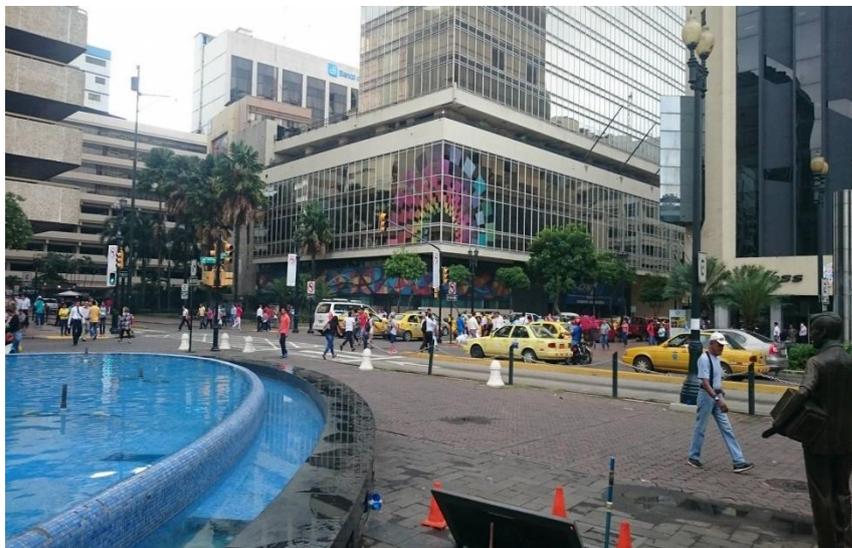


Figura 3.2 Calles 9 de Octubre y Pedro Carbo



Figura 3.3 Calles Francisco Aguirre Abad y Malecón

La zona del norte de Guayaquil también es conocida por la gran afluencia de vehículos, como ejemplos se tomó el sector de la Garzota y el terminal terrestre

con datos importantes acerca de la cantidad de vehículos que se pueden encontrar en los semáforos y en movimiento (Ver Figuras 3.4 y 3.5).



Figura 3.4 Redondel Garzota



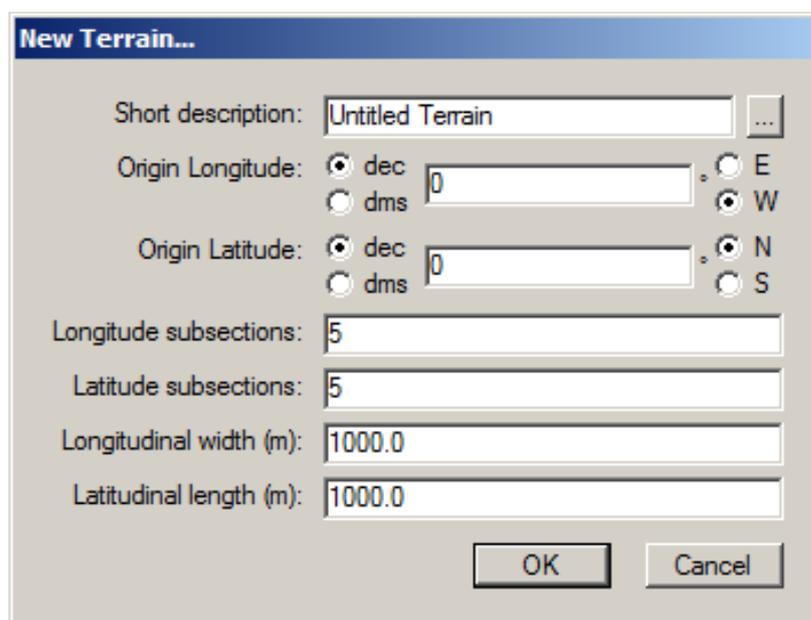
Figura 3.5 Terminal Terrestre

3.1.3 Establecimiento del terreno y área de estudio

La ventana principal de Wireless Insite posee una interfaz dinámica para el usuario, sus múltiples barras de trabajo y pestañas proveen un acceso

inmediato y preciso a los requerimientos del proyecto. Las ventanas de Wireless son visualización del proyecto y la ventana principal donde se observa la implementación y se detallan los elementos en uso respectivamente.

Todo proyecto creado en este programa requiere establecer un terreno y un área de estudio. El terreno representa el lugar geográfico con sus características físicas (planicies, elevaciones, etc.), mientras que el área de estudio representa la región de cobertura que debe coincidir con las coordenadas del terreno donde se establece una banda de frecuencia y un ancho de banda. Además, se establecen los límites dimensionales (base y altura), el tipo de coordenadas y la elevación del terreno. Transmisores, receptores y objetos que se encuentren fuera de los límites del área de estudio no son considerados. Para este proyecto se usó el terreno y el área de estudio que Wireless Insite provee al usuario con parámetros establecidos correspondientes a la ciudad de Rosslyn (Ver Figuras 3.6 y 3.7).



The image shows a dialog box titled "New Terrain...". It contains the following fields and options:

- Short description: ...
- Origin Longitude: dec E W
- Origin Latitude: dec N S
- Longitude subsections:
- Latitude subsections:
- Longitudinal width (m):
- Latitudinal length (m):

Buttons: OK, Cancel

Figura 3.6 Ventana de creación del terreno

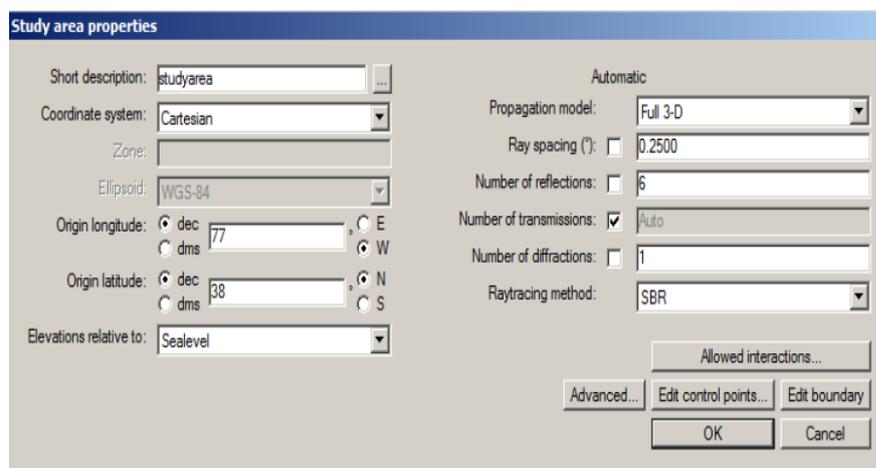


Figura 3.7 Ventana de creación del área de estudio

3.1.4 Establecimiento de ciudades

Wireless Insite posee dos ciudades predeterminadas para el usuario, Rosslyn y Ottawa. Se usa Rosslyn porque provee el espacio adecuado para la implementación de receptores y vehículos. En las Figuras 3.8 y 3.9 se muestra una vista de la ciudad desde el programa de trabajo en 2D y 3D.

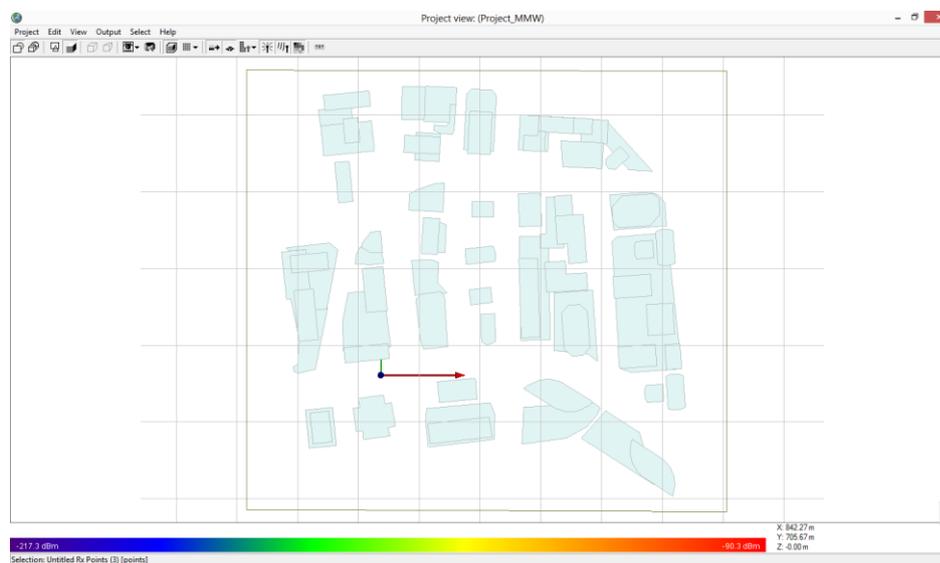


Figura 3.8 Rosslyn vista 2D

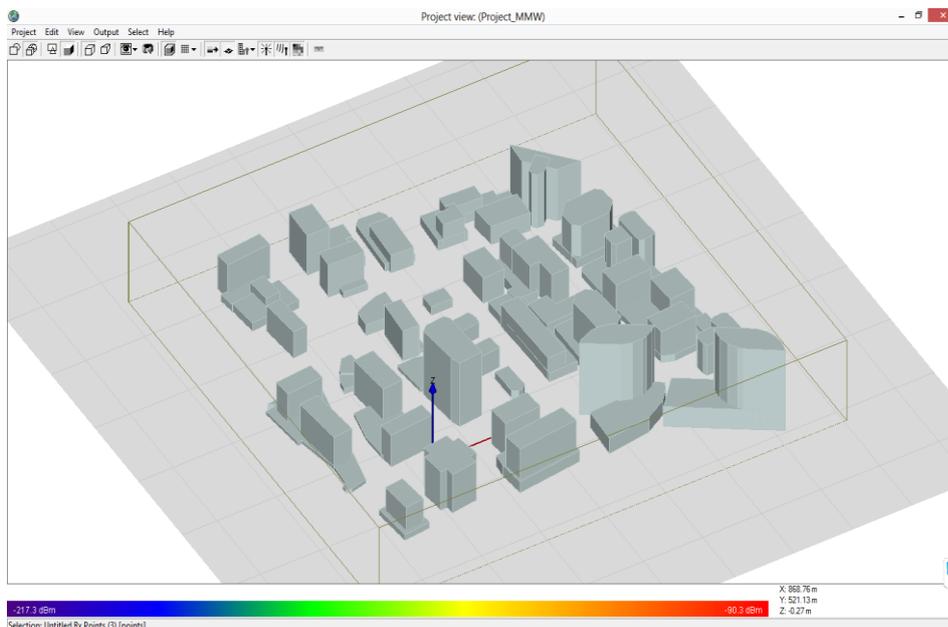


Figura 3.9 Rosslyn vista 3D

3.1.5 Implementación de objetos

En Wireless se denomina característica a todos los detalles visibles como el terreno, las ciudades, los objetos y cada uno de ellos tiene su propio formato de archivo: para ciudades (*.city), objetos (*.obj), y terreno (*.ter).

Los objetos representan elementos como equipo de oficina, vehículos, etc. El editor permite crear formas poligonales simples, además es posible insertar objetos mediante la importación de formatos compatibles entre los más populares tenemos el de AutoCAD (Ver Figura 3.10).

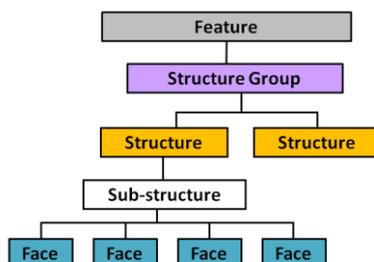


Figura 3.10 Jerarquía Poligonal

3.1.6 Modelación de Vehículos

Para un diseño más realista se tomaron medidas a diferentes modelos de autos que circulan en la ciudad de Guayaquil, los vehículos diseñados presentan las dimensiones de la Figura 3.11.

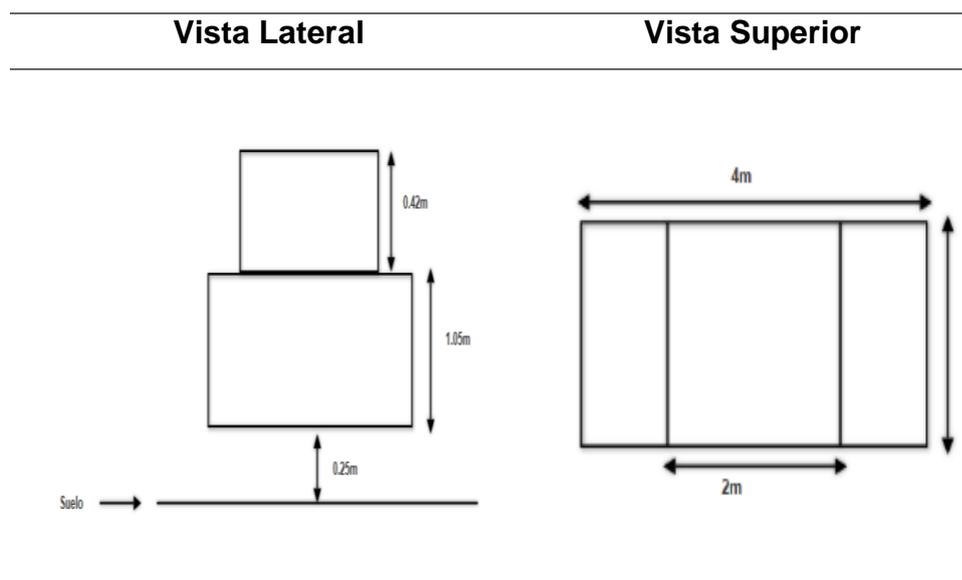


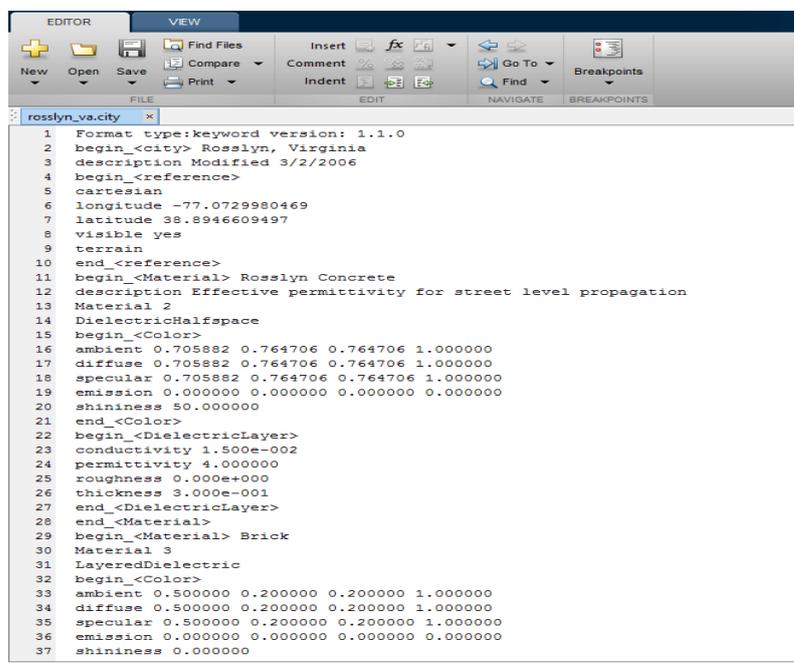
Figura 3.11 Diseño Vehicular Poligonal

El diseño del vehículo mostrado es realizado mediante el editor de ciudades que permite dibujar polígonos o estructuras con parámetros físicos y eléctricos. Se considera un vehículo totalmente metálico por facilidad de simulación.

3.1.7 Manipulación de Códigos

Cuando una característica se implementa dentro de Wireless Insite se genera un archivo que almacena toda la información detallando su textura, color, densidad, rugosidad, tipo de material y coordenadas. A este código es posible acceder mediante el software Matlab para manipular su contenido. Se intentó realizar el diseño de vehículos mediante el uso de su código fuente pero se

descartó esta opción debido a que la cantidad de líneas de código eran excesivas para un correcto manejo (Ver Figura 3.12).



```

1 Format type:keyword version: 1.1.0
2 begin_<city> Rosslyn, Virginia
3 description Modified 3/2/2006
4 begin_<reference>
5 cartesian
6 longitude -77.0729980469
7 latitude 38.8946609497
8 visible yes
9 terrain
10 end_<reference>
11 begin_<Material> Rosslyn Concrete
12 description Effective permittivity for street level propagation
13 Material 2
14 DielectricHalfspace
15 begin_<Color>
16 ambient 0.705882 0.764706 0.764706 1.000000
17 diffuse 0.705882 0.764706 0.764706 1.000000
18 specular 0.705882 0.764706 0.764706 1.000000
19 emission 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
20 shininess 50.000000
21 end_<Color>
22 begin_<DielectricLayer>
23 conductivity 1.500e-002
24 permittivity 4.000000
25 roughness 0.000e+000
26 thickness 3.000e-001
27 end_<DielectricLayer>
28 end_<Material>
29 begin_<Material> Brick
30 Material 3
31 LayeredDielectric
32 begin_<Color>
33 ambient 0.500000 0.200000 0.200000 1.000000
34 diffuse 0.500000 0.200000 0.200000 1.000000
35 specular 0.500000 0.200000 0.200000 1.000000
36 emission 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
37 shininess 0.000000

```

Figura 3.12 Código de Rosslyn

3.1.8 Colocación de Transmisores/Receptores

Para colocar un transmisor o un receptor, Wireless Insite provee las siguientes formas de ubicación: por puntos, por trayectorias, por rutas, formas circulares, poligonales y cilíndricas. En este proyecto se usa un transmisor de tipo punto y cuatro mallados o polígonos de receptores (Ver Figuras 3.13 y 3.14).

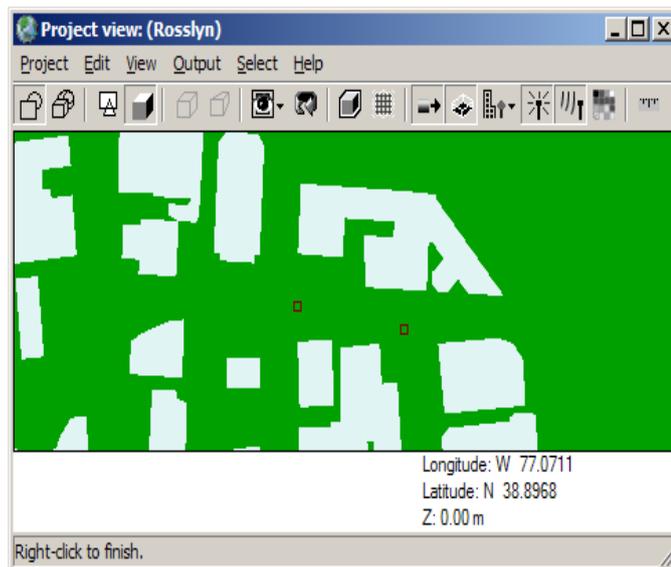


Figura 3.13 Tx tipo Punto

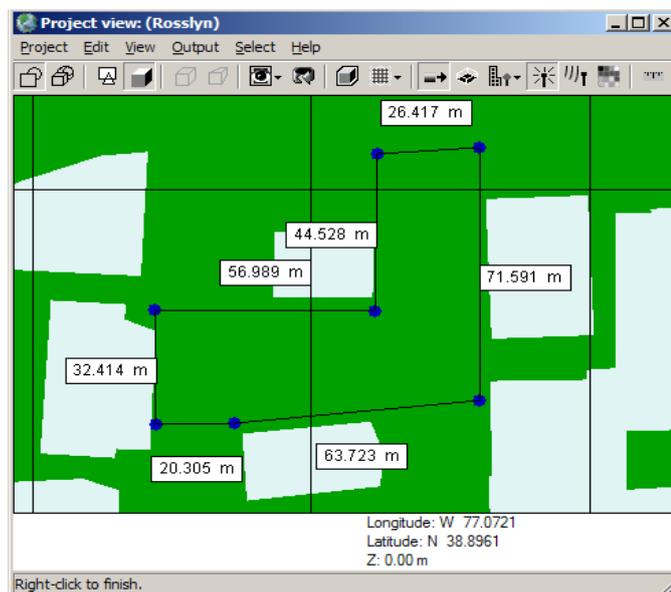


Figura 3.14 Rx tipo mallado o polígono

Luego de seleccionar la opción de transmisor/receptor, se abre una pequeña ventana en la que se selecciona el tipo de antena. Se utiliza una antena

direccional en el transmisor que apunta al área de trabajo y antenas omnidireccionales para cada receptor por facilidad de simulación. En las Figuras 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 se mostrarán las ventanas de selección y los patrones de radiación.

Transmitter properties (ID# = 29)

Short description: TX_POINT

Coordinate system: Cartesian

Zone:

Ellipsoid: WGS-84

Origin longitude: dec dms 77.0729883903 E W

Origin latitude: dec dms 38.8961864481 N S

Elevations relative to: Terrain

Show origin when active

Rotation (°): 0.00

Antenna: Directional_150grad

Waveform: Sinusoid_28GHz

Rotate antenna about X axis (°): 0.00

then rotate about Y axis (°): 0.00

finally, rotate about Z axis (°): 0.00

Input power (dBm): 0.0000

Spacing (m): N/A

Figura 3.15 Ventana de selección de parámetros del transmisor

Directional antenna properties

Short description: Directional_150grad

Automatic

Waveform: Sinusoid_28GHz

Maximum gain (dBi): Auto

Polarization: Vertical

E-plane half-power beamwidth (°): 20.0000

E-plane first null beamwidth (°): 30.0000

H-plane half-power beamwidth (°): 150.0000

H-plane first null beamwidth (°): 180.0000

Receiver Threshold (dBm): -250.0000

Transmission line loss (dB): 0.0000

VSWR: 1.00

Temperature (K): 293.00

Figura 3.16 Ventana de Parámetros de la Antena Direccional

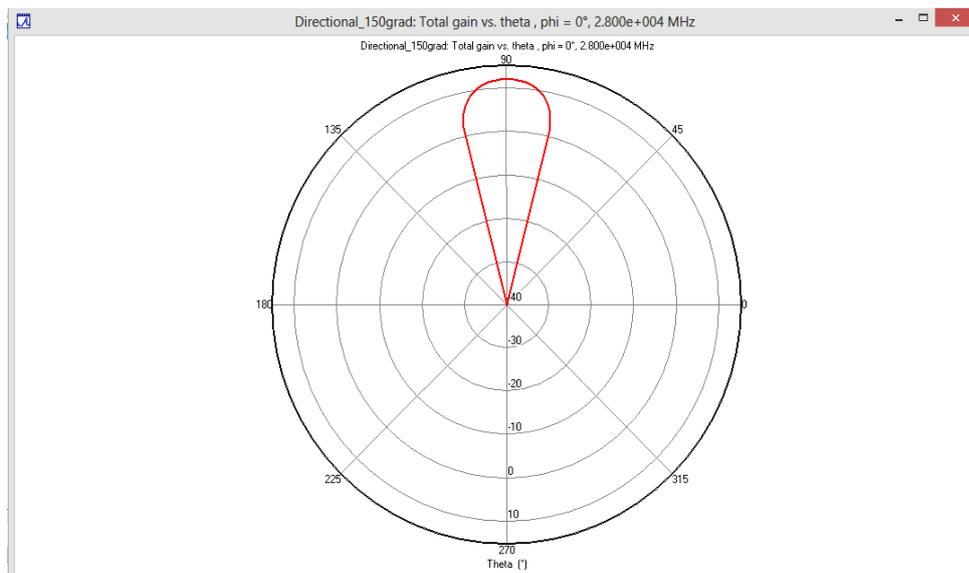


Figura 3.17 Patrón de radiación de la Antena Direccional

A dialog box titled "Isotropic antenna properties" with the following fields and controls:

- Short description: ...
- Automatic
- Waveform: ...
- Maximum gain (dBi):
- Polarization: ...
- Receiver Threshold (dBm):
- Transmission line loss (dB):
- VSWR:
- Temperature (K):
-
-

Figura 3.18 Ventana de parámetros de la Antena Omnidireccional

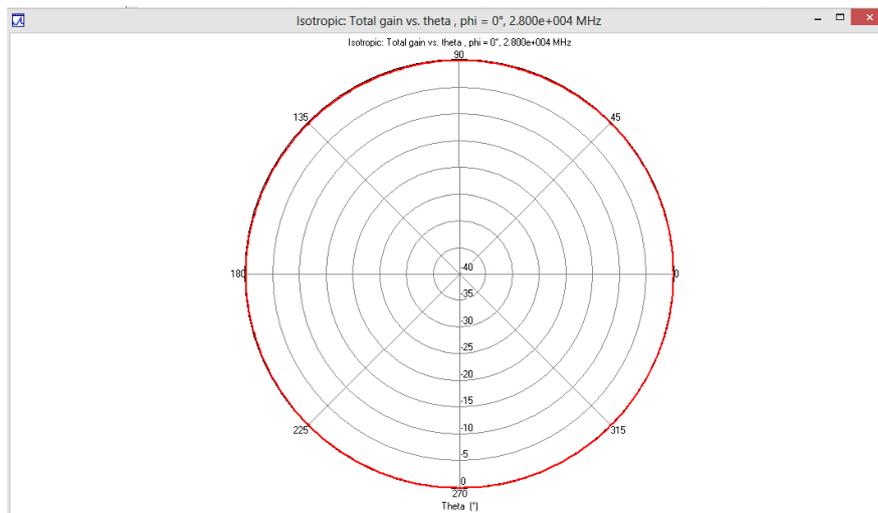


Figura 3.19 Patrón de radiación de la Antena Omnidireccional

3.1.9 Implementación del método Ray Tracing

Wireless Insite implementa el método de Ray Tracing mediante sus propios algoritmos caracterizados por su alta fidelidad en sus resultados. Se denomina X3D al modelo de propagación basado en Ray Tracing, diseñado por Remcom que proporciona modelos de propagación en 3D totalmente precisos, capaz de funcionar en una unidad de procesamiento gráfico (GPU) y tiempos de ejecución rápidos. X3D no tiene problemas con la geometría o la altura para la lectura de transmisor/receptor.

3.2 Parámetros de Simulación

Con el propósito de garantizar una simulación adecuada se consideraron diferentes parámetros que intervienen de manera directa en el proceso. En la Tabla 5 se muestran los parámetros generales para las pruebas y escenarios principales.

Parámetros	Argumento
Potencia de Transmisión (Pt)	30dBm
Ganancia Tx	12.025dBi
Ganancia Rx	0dBi
Ancho de Banda	500Mhz
Radio de Cobertura	200m
Banda de Frecuencia	28GHz
Tipo de Onda	Sinusoidal
Antena Tx	Antena Direccional de 150°
Antena Rx	Antena Omnidireccional
Número de vehículos Norte-Sur	14
Número de vehículos Este-Oeste	25
Número de receptores Grupo #1	12 receptores
Número de receptores Grupo #2	14 receptores
Número de receptores Grupo #3	22 receptores
Número de receptores Grupo #4	62 receptores
Número de transmisores	1 transmisor
Tipo de material del vehículo	Conductor perfectamente eléctrico

Tabla 5. Parámetros generales de trabajo

3.2.1 Parámetros específicos de Simulación

En las Tablas 6 y 7 se detallan las especificaciones para antenas, edificaciones y vehículos correspondientes a los diferentes planteamientos del proyecto.

Dimensiones referentes al Suelo	Valores
Altura de la Antena Transmisora	8m
Altura de la Antena Receptora	1.5m

Tabla 6. Antenas

Dimensiones	Valores
Altura	1.47m
Largo	4m
Ancho	2m
Espesor de paredes	1.000e-002
Rugosidad de paredes	1.100e-002
Espesor de Techo	1.000e-002
Rugosidad de techo	1.100e-002

Tabla 7. Vehículo

3.3 Pruebas con la manipulación del código de WI

La lectura de los archivos que se generan al crear alguna Característica resulta sencilla, los datos que se almacenan están bien ordenados y se especifica claramente lo que cada línea de código hace dentro del programa. Razón por la cual se intentó insertar vehículos copiando y pegando las coordenadas del código fuente y luego desplazándolos con la opción llamada desplazamiento con respecto al origen.

Wireless Insite solo establece las coordenadas en X/Y de manera individual para el suelo, paredes y techo de los polígonos. Con la ayuda de Excel se creó un formulario con las coordenadas del vehículo original. La variación de dichas coordenadas (por ejemplo un desplazamiento) permite la creación de un nuevo vehículo (Ver Figura 3.20).

PRUEBA								
Techo			cara 1			cara 2		
x	y	altura	x	y	altura	x	y	altura
115,0000000000	114,0000000000	1,4700000286	115,0000000000	114,0000000000	1,4700000286	115,0000000000	112,0000000000	1,4700000286
115,0000000000	112,0000000000	1,4700000286	117,0000000000	114,0000000000	1,4700000286	115,0000000000	114,0000000000	1,4700000286
117,0000000000	112,0000000000	1,4700000286	117,0000000000	114,0000000000	1,0499999523	115,0000000000	114,0000000000	1,0499999523
117,0000000000	114,0000000000	1,4700000286	115,0000000000	114,0000000000	1,0499999523	115,0000000000	112,0000000000	1,0499999523
cara 3			cara 4					
x	y	altura	x	y	z			
117,0000000000	112,0000000000	1,4700000286	117,0000000000	114,0000000000	1,4700000286			
115,0000000000	112,0000000000	1,4700000286	117,0000000000	112,0000000000	1,4700000286			
115,0000000000	112,0000000000	1,0499999523	117,0000000000	112,0000000000	1,0499999523			
117,0000000000	112,0000000000	1,0499999523	117,0000000000	114,0000000000	1,0499999523			
NUEVO TECHO			N CARA1			N CARA2		
X	Y	ALTURA	X	Y	ALTURA	X	Y	ALTURA
110,0000000000	121,0000000000	1,4700000286	110,0000000000	121,0000000000	1,4700000286	110,0000000000	119,0000000000	1,4700000286
110,0000000000	119,0000000000	1,4700000286	112,0000000000	121,0000000000	1,4700000286	110,0000000000	121,0000000000	1,4700000286
112,0000000000	119,0000000000	1,4700000286	112,0000000000	121,0000000000	1,0499999523	110,0000000000	121,0000000000	1,0499999523
112,0000000000	121,0000000000	1,4700000286	110,0000000000	121,0000000000	1,0499999523	110,0000000000	119,0000000000	1,0499999523
N CARA3			N CARA4			suma x	suma y	suma altura
X	Y	ALTURA	X	Y	ALTURA	-5	7	
112,0000000000	119,0000000000	1,4700000286	112,0000000000	121,0000000000	1,4700000286			
110,0000000000	119,0000000000	1,4700000286	112,0000000000	119,0000000000	1,4700000286			
110,0000000000	119,0000000000	1,0499999523	112,0000000000	119,0000000000	1,0499999523			
112,0000000000	119,0000000000	1,0499999523	112,0000000000	121,0000000000	1,0499999523			

Figura 3.20 Diseño en Excel para manipulación de código

Los datos que se extraían continuamente de Excel eran colocados en el código mediante el uso de Matlab para después abrir el nuevo código en Wireless Insite y desde la ventana principal visualizar los vehículos añadidos (Ver Figuras 3.21 y 3.22).

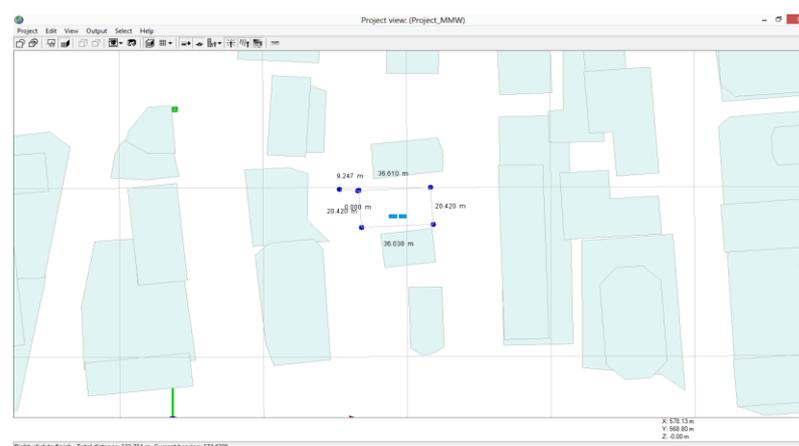


Figura 3.21 Dos vehículos añadidos Por Matlab

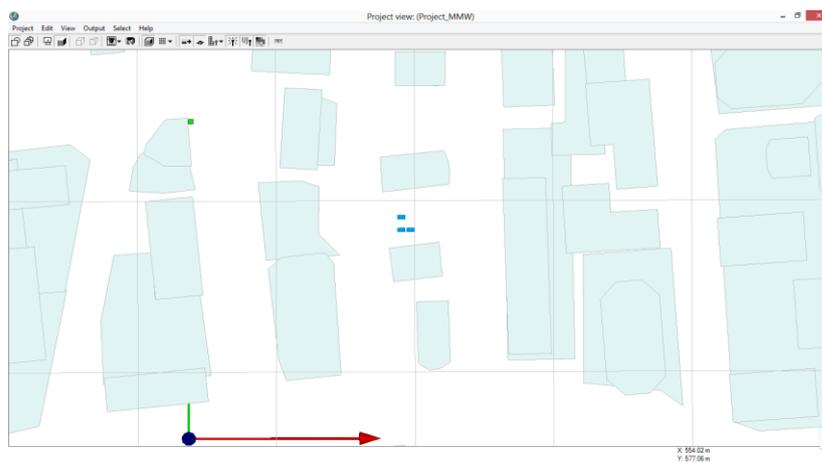


Figura 3.22 Tres autos añadidos mediante Matlab

3.4 Prueba de Receptores rodeados de autos

Para esta prueba se establece dentro de Rosslyn un enlace con un transmisor y cuatro receptores todos de tipo punto. Los vehículos añadidos se colocaron de tal manera que rodeen las antenas e incluso aislándolas de la señal que se trasmitía. Pevio a esto se realizó una medición con el mismo escenario pero sin vehículos con la finalidad de comparar valores de potencia y apreciar el Ray Tracing de ambas situaciones (Ver Figura 3.23).

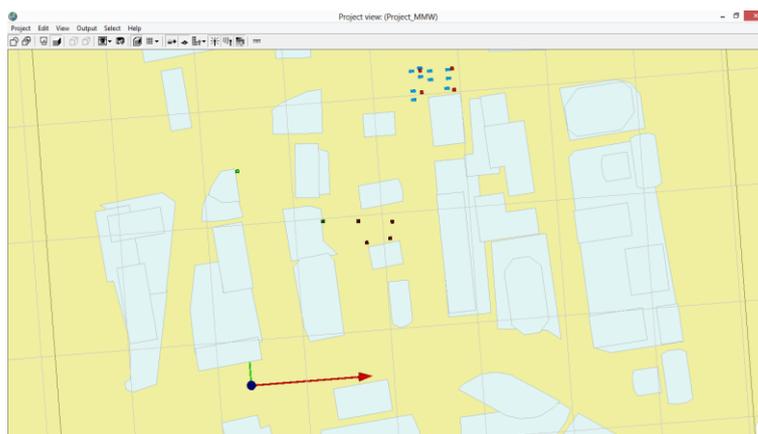


Figura 3.23 Escenario de transmisor/receptores tipo punto

3.5 Escenario Base: Ausencia Vehicular

El escenario base posee las siguientes características: un enlace sin línea de vista (NLOS) conformado por un transmisor tipo punto que posee una antena Direccional de 150°, cuatro grupos de receptores de tipo poligonal con un espaciado entre cada receptor de 5m y conectados a antenas isotrópicas. Cada grupo posee la siguiente cantidad de receptores:

Grupo 1: 12

Grupo 2: 14

Grupo 3: 22

Grupo 4: 62

Cada receptor hace referencia a un individuo o usuario. La cantidad de usuarios hace referencia a las muestras fotográficas realizadas en la ciudad de Guayaquil. La ubicación de la antena transmisora puede ser colocada en un radio máximo de cobertura de 200 con respecto a las antenas receptoras (Ver Figura 3.24).

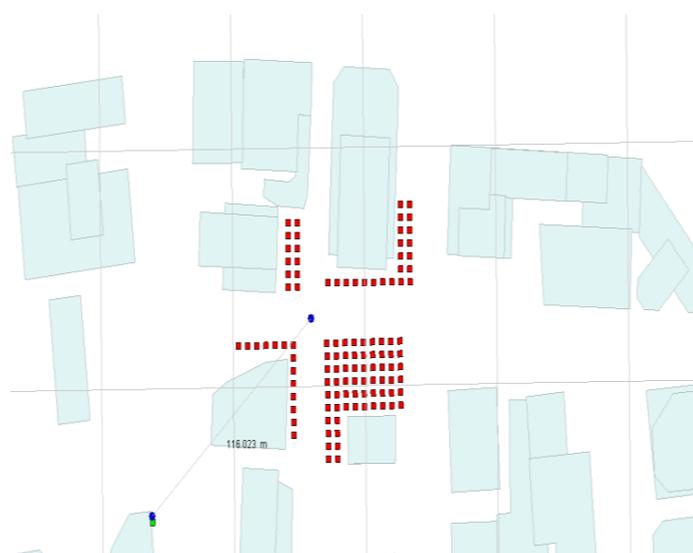


Figura 3.24 Escenario con Ausencia Vehicular

3.5.1 Planteamiento del Escenario: Vehículos Estacionario

Para este escenario se han colocado de forma horizontal y sentido de Este a Oeste 20 vehículos frente a un supuesto semáforo y 5 vehículos estacionados a los alrededores. De forma vertical con sentido de Norte a Sur se colocan 10 vehículos frente a un semáforo y 4 vehículos estacionados a un lado de la calle ubicados dentro de la ciudad de Rosslyn. La cantidad de vehículos hace referencia a las muestras fotográficas realizadas en la ciudad de Guayaquil (Ver Figuras 3.25 y 3.26).

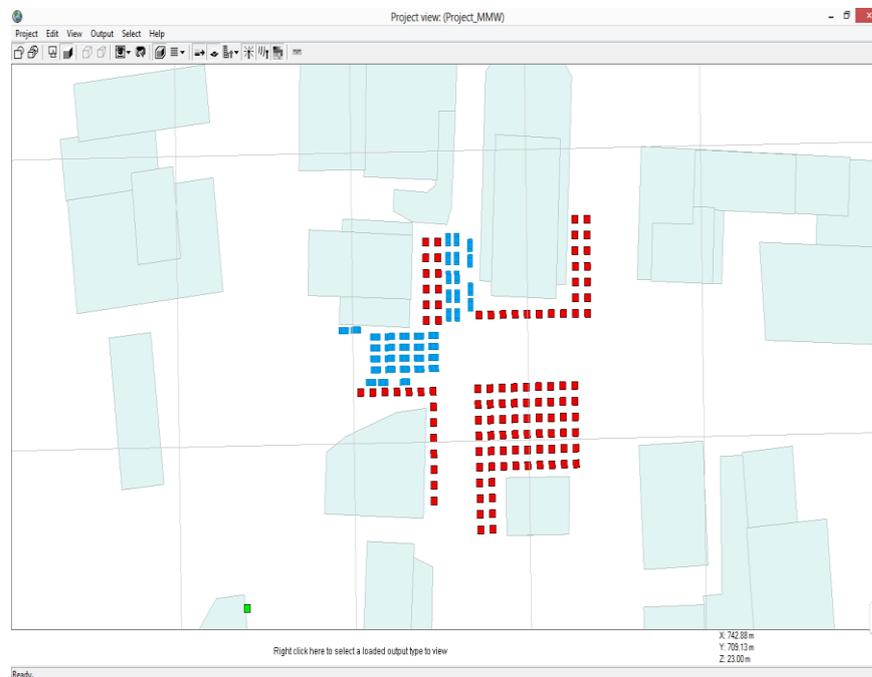


Figura 3.25 Escenario principal

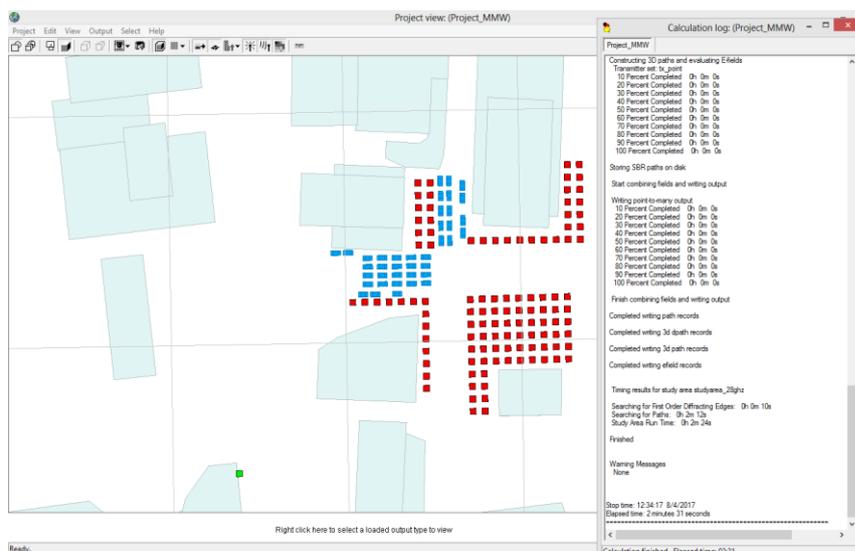


Figura 3.26 Tiempo de simulación 02:31

3.5.2 Planteamiento del escenario: Tránsito Este - Oeste

Para este escenario se asume que la luz rojo del semáforo cambio a verde y con sentido de Este a Oeste produciendo el tránsito de vehículos que se observa donde los 25 vehículos de manera aleatoria cambian su ubicación debido al supuesto desplazamiento que estos realizaron (Ver Figura 3.27 y 28).

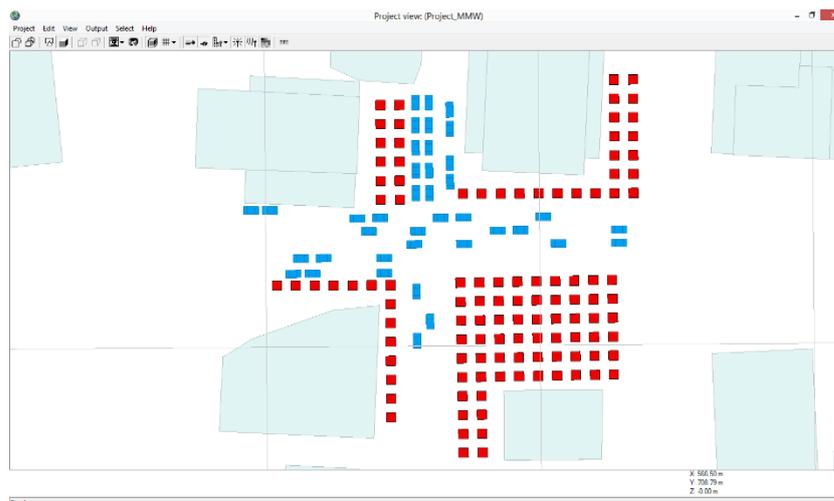


Figura 3.27 Escenario: Tránsito Este - Oeste

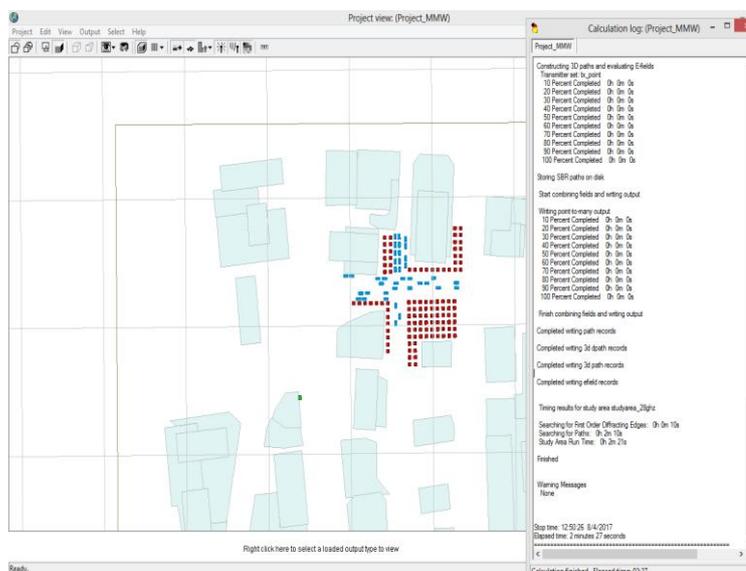


Figura 3.28 Tiempo de simulación 02:27

3.5.3 Planteamiento del escenario: Tránsito Norte - Sur

Para este escenario se asume que la luz rojo del semáforo cambio a verde y con sentido de Norte a Sur produciendo el tránsito de vehículos que se observa donde los 14 vehículos de manera aleatoria cambian su ubicación debido al supuesto desplazamiento que estos realizaron (Ver Figuras 3.29 y 3.30).

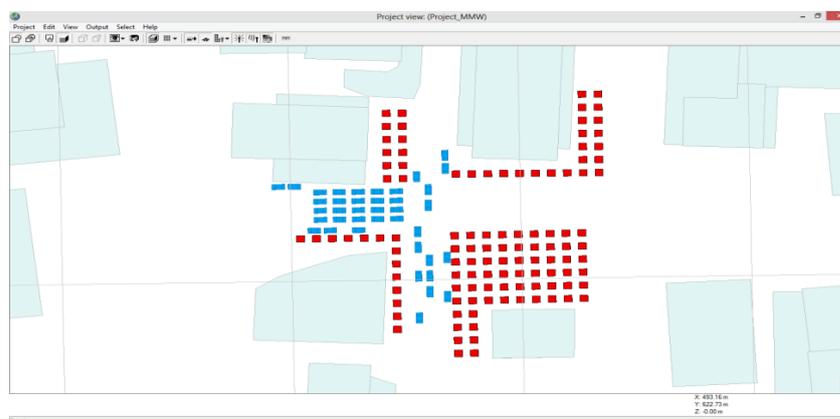


Figura 3.29 Escenario: Tránsito Norte – Sur

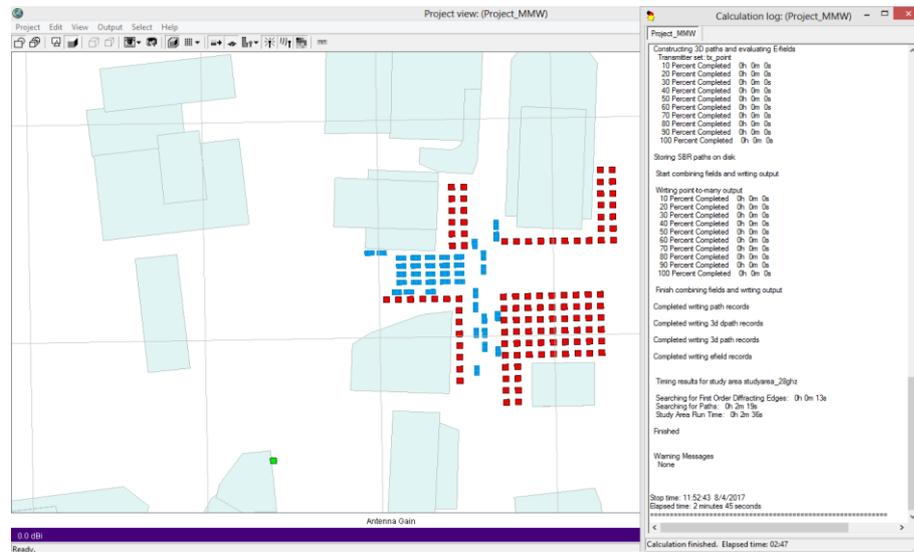


Figura 3.30 Tiempo de simulación 02:47

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se presentan los resultados de la prueba y de los escenarios de trabajos expuestos anteriormente obtenidos mediante el software Wireless Insite. A partir de los datos de cada escenario se procede a la interpretación del método de Ray Tracing y al análisis de Tablas en las cuales se comparan los valores de potencia recibida para cada grupo de receptores. Posterior a esto los resultados son ingresados al software Matlab del cual se obtienen curvas estadísticas de potencia.

4.1 Análisis de Prueba

La Figura 4.1 y Tabla 8 corresponden a la prueba realizada en el capítulo 3 sobre el diseño de un escenario donde se trabaja con un transmisor y cuatro receptores, esta prueba fue previa al planteamiento de los escenarios de trabajo. Con respecto al gráfico de Ray Tracing se puede observar en la Tabla 8 que los únicos receptores que reciben una señal son el #2 y #4, mientras tanto los receptores #1 y #3 solo muestran el valor del umbral de recepción de -250 dBm medida que viene predeterminada en la simulación del programa.

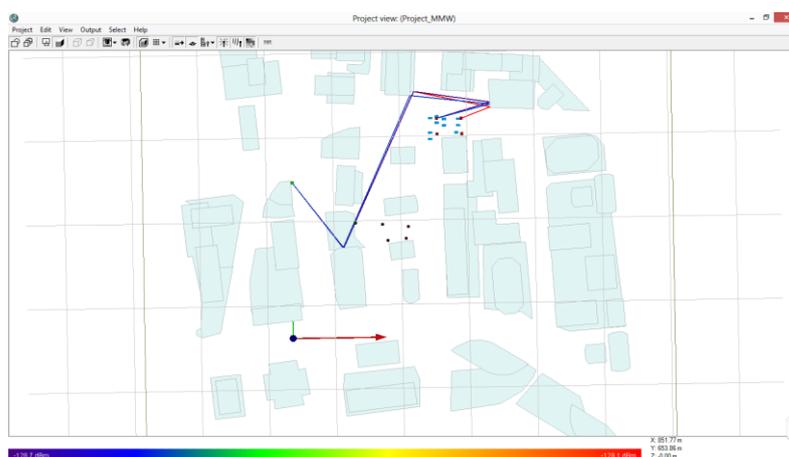


Figura 4.1 Ray Tracing de prueba

Sin Vehículos		Con vehículos	
Receptor	Power (dBm)	Receptor	Power (dBm)
1	-194.97	1	-250.00
2	-126.82	2	-128.10
3	-250.00	3	-250.00
4	-127.53	4	-129.51

Tabla 8. Escenarios de prueba

4.2 Análisis del método de Ray Tracing

Wireless Insite implementa Ray Tracing mediante algoritmos propios. El trazado de rayos se realiza con respecto a los pasos de propagación de las ondas electromagnéticas y se asigna un tono de color diferente a cada trayectoria que representa la calidad de potencia recibida, mientras más rojizo sea mejor calidad y mientras más se oscurece la calidad recibida es menor.

4.2.1 Modelamiento de escenario: Ausencia Vehicular

En las Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 se muestra el método de Ray Tracing obtenido de la simulación del escenario que no cuenta con vehículos, el trazado de rayos que se observa corresponde a los pasos de propagación que resultan al transmitir una señal en un enlace de comunicaciones.



Figura 4.2 Grupo #1 de Receptores

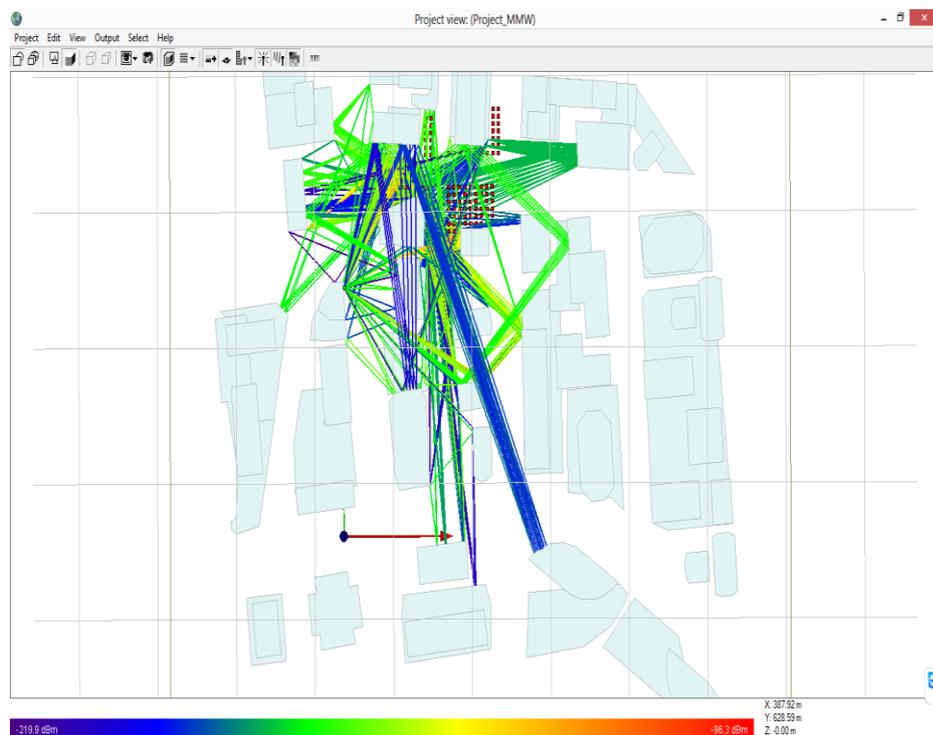


Figura 4.3 Grupo #2 de Receptores

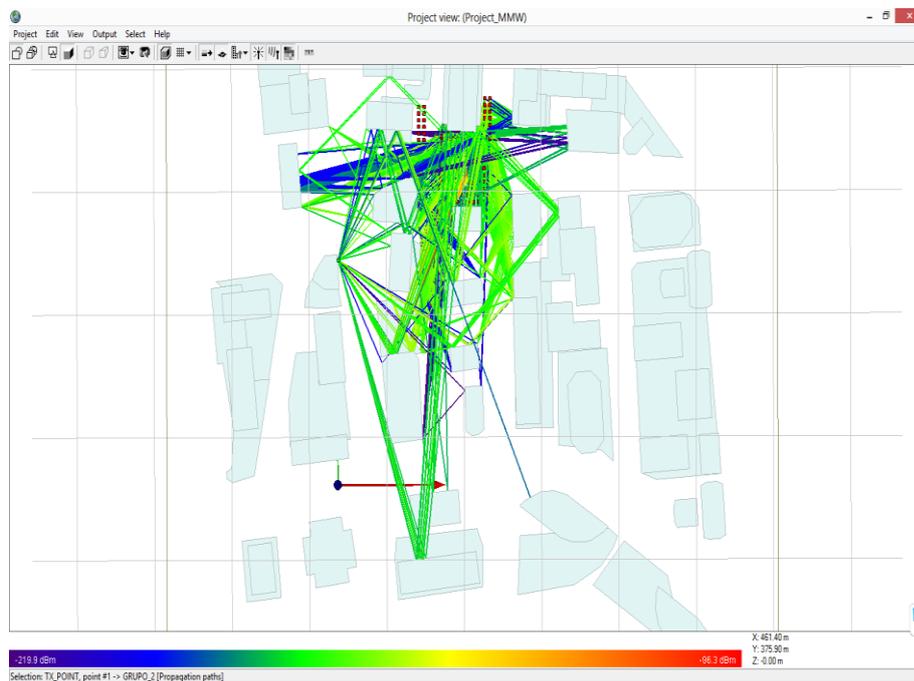


Figura 4.4 Grupo #3 de Receptores

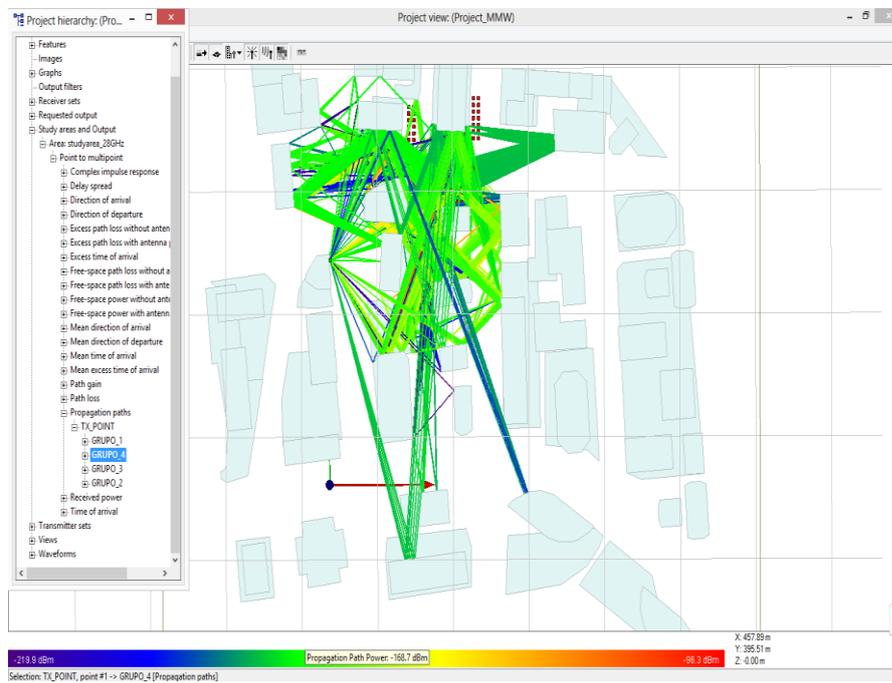


Figura 4.5 Grupo #4 de Receptores

4.2.2 Modelamiento de escenario: Vehículos Estacionarios

En las Figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 se presenta el modelamiento del método de Ray Tracing obtenido de la simulación donde se incorpora vehículos estacionarios en el cruce de vías, el trazado de rayos que se observa corresponde a los pasos de propagación que resultan al transmitir una onda en un enlace de comunicaciones.

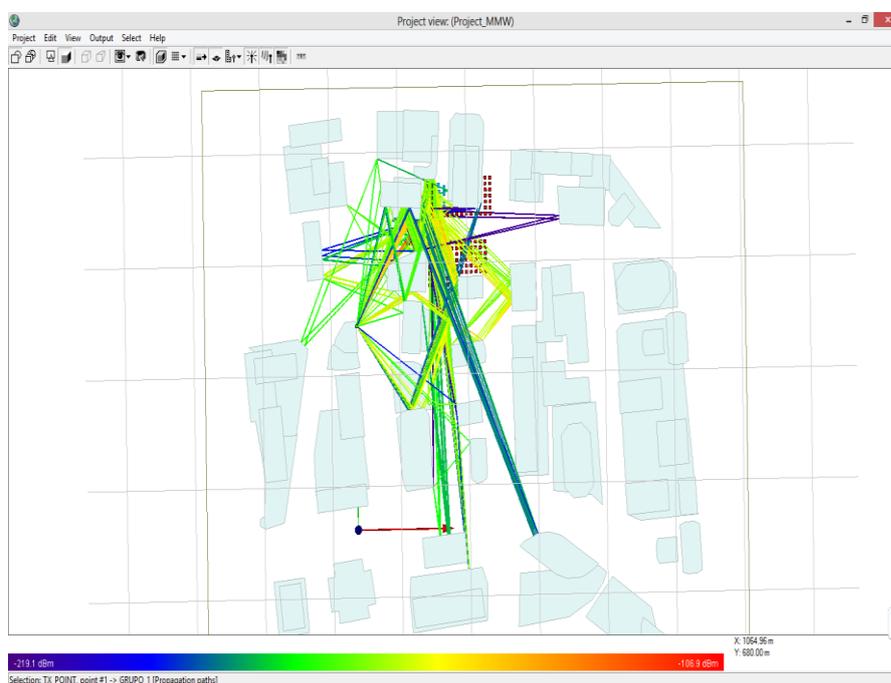


Figura 4.6 Grupo #1 de Receptores

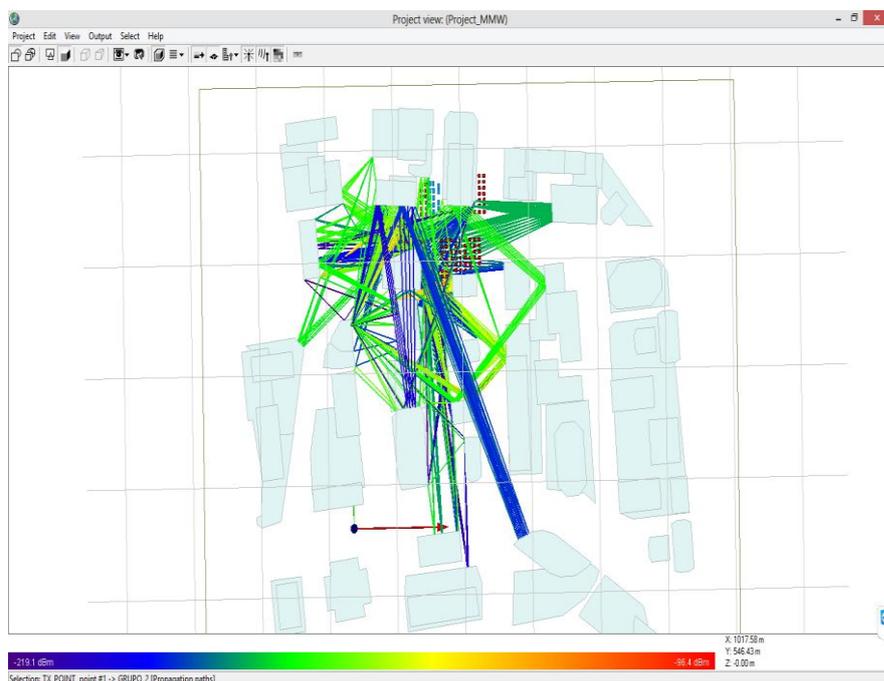


Figura 4.7 Grupo #2 de Receptores

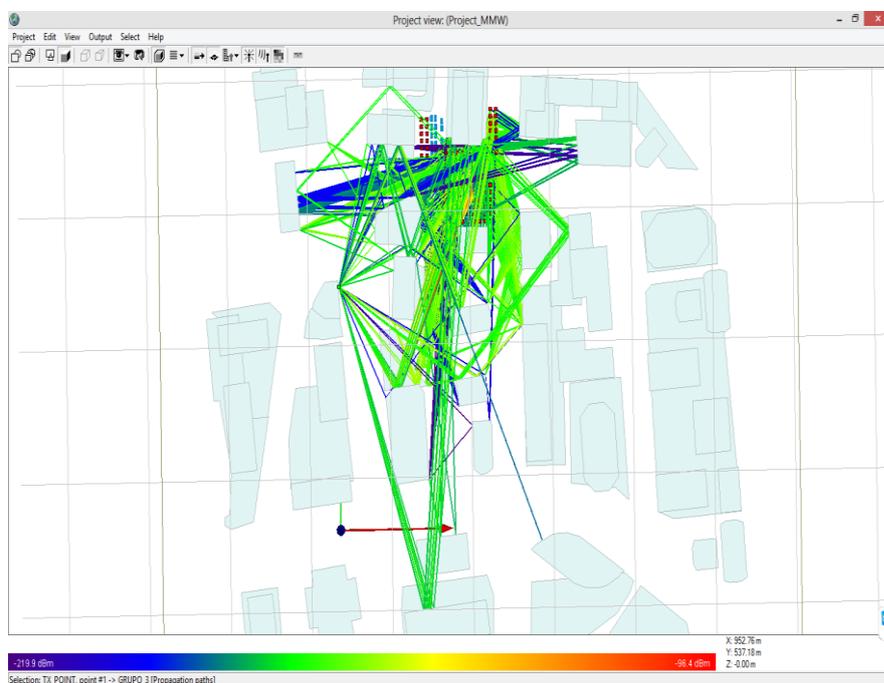


Figura 4.8 Grupo #3 de Receptores

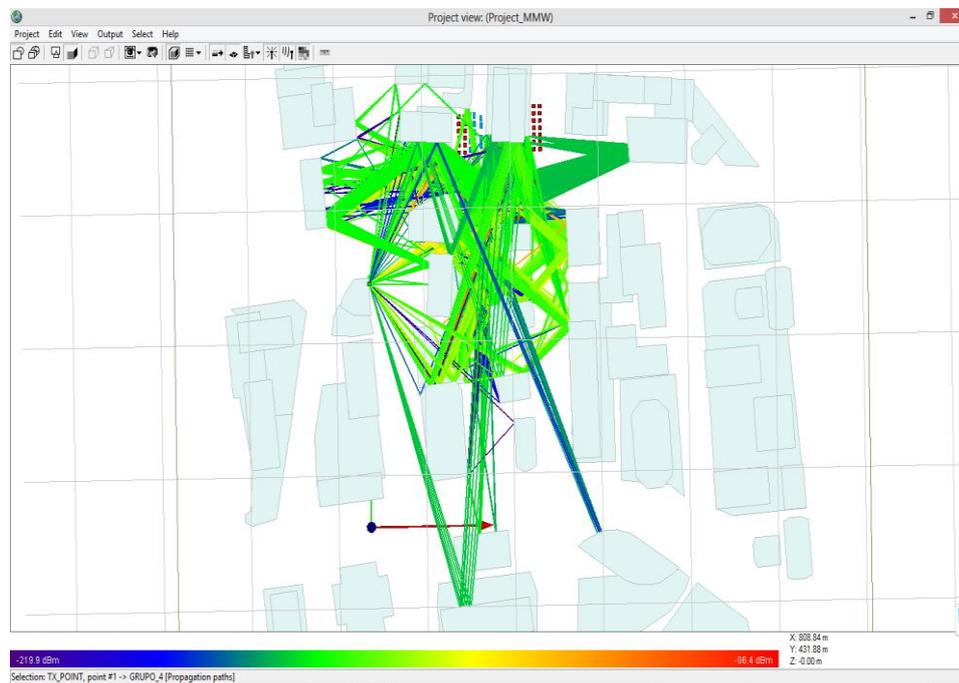


Figura 4.9 Grupo #4 de Receptores

4.2.3 Modelamiento de escenario: Tránsito Este - Oeste

Las Figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13 presentan el modelamiento del método de Ray Tracing obtenido de la simulación donde se establece un tránsito vehicular con dirección Este - Oeste, el trazado de rayos que se observa corresponde a los pasos de propagación que resultan al transmitir una onda en un enlace de comunicaciones.

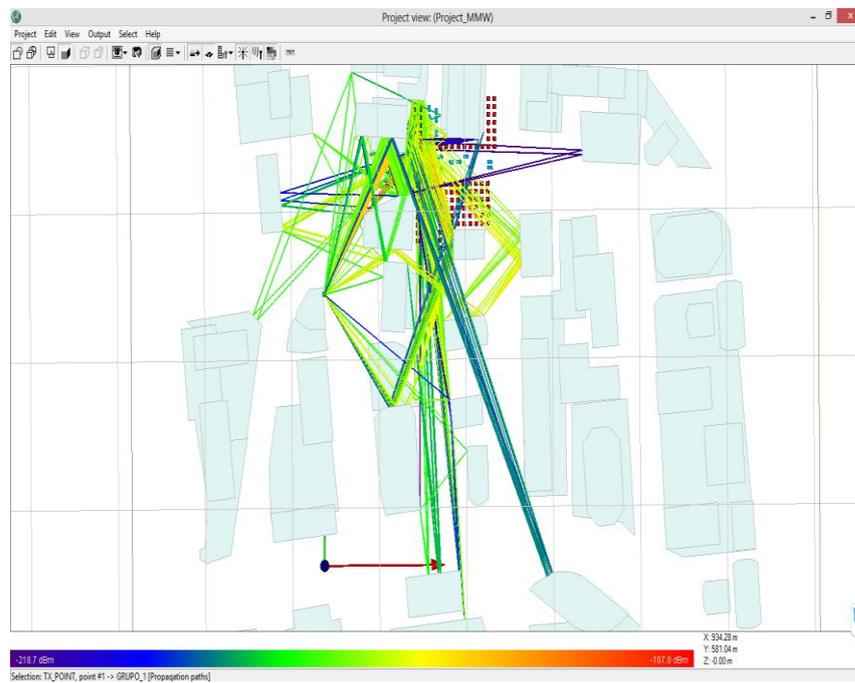


Figura 4.10 Grupo #1 de Receptores

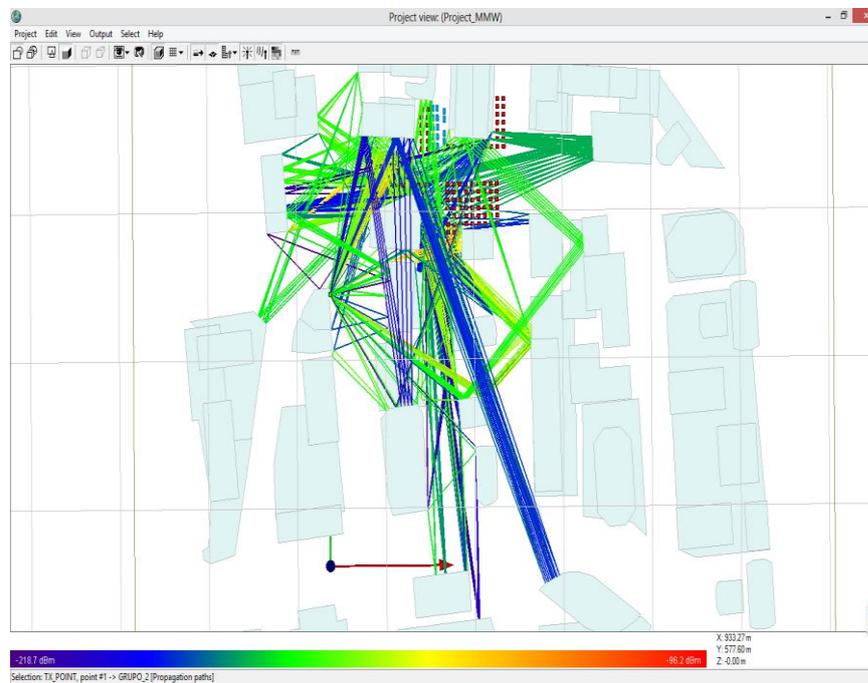


Figura 4.11 Grupo #2 de Receptores

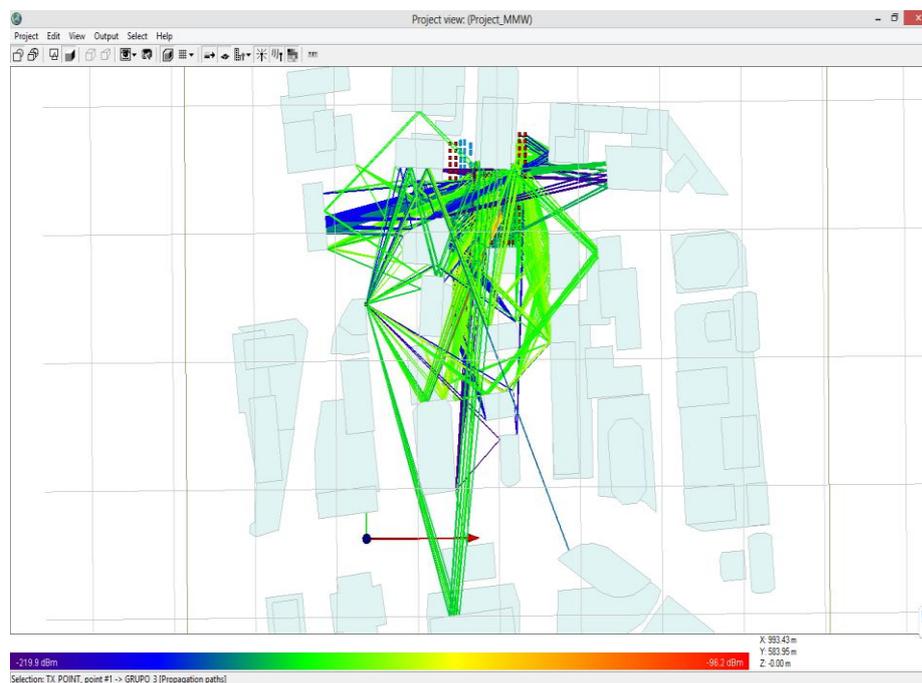


Figura 4.12 Grupo #3 de Receptores

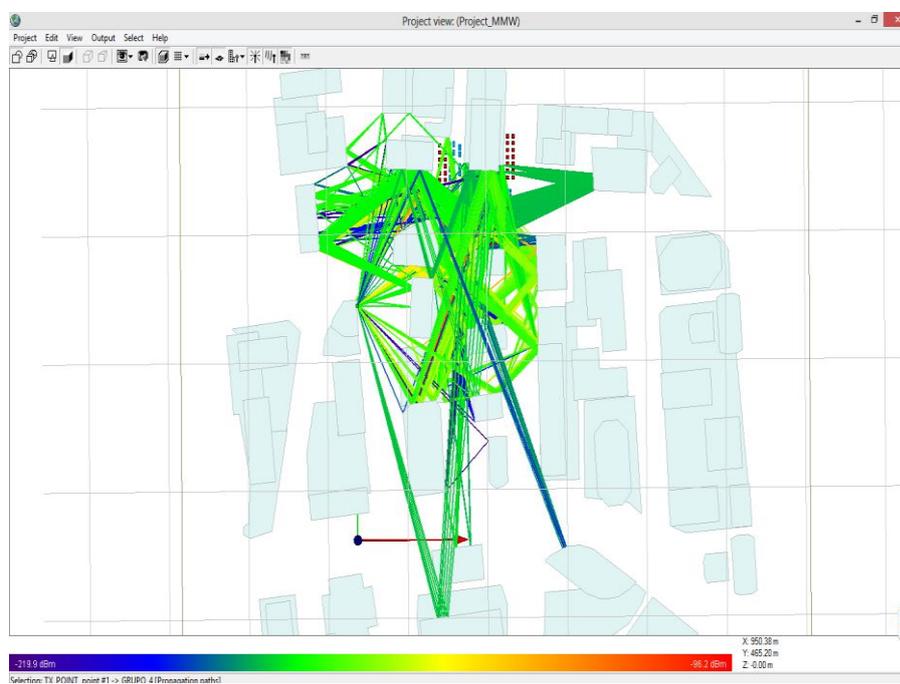


Figura 4.13 Grupo #4 de Receptores

4.2.4 Modelamiento del escenario: Tránsito Norte - Sur

En las Figuras 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17 se muestra el modelamiento del método de Ray Tracing obtenido de la simulación donde se asume un tránsito vehicular con dirección Norte - Sur, el trazado de rayos que se observa corresponde a los pasos de propagación que resultan al transmitir una onda en un enlace de comunicaciones.

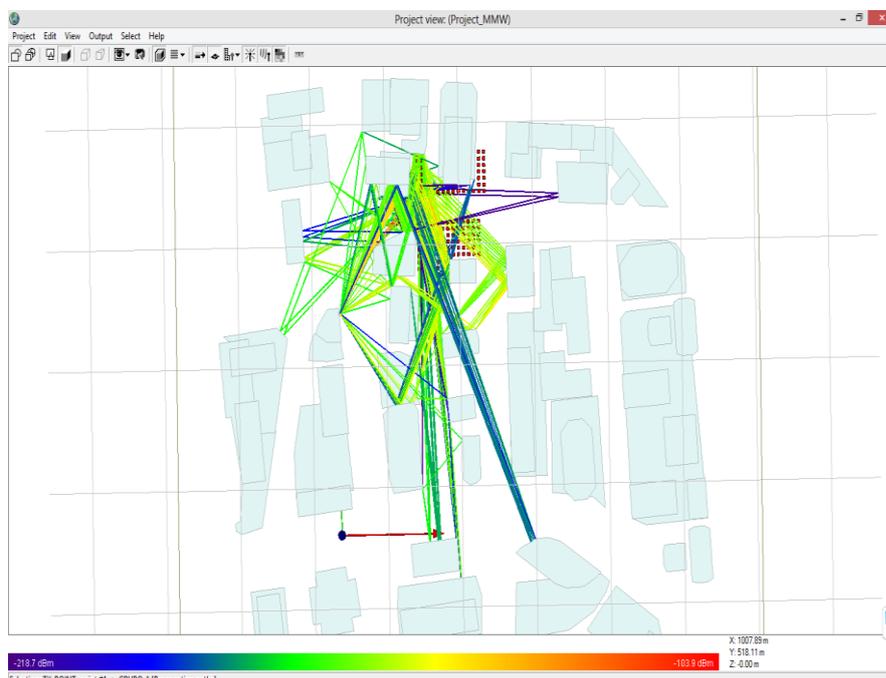


Figura 4.14 Grupo #1 de Receptores

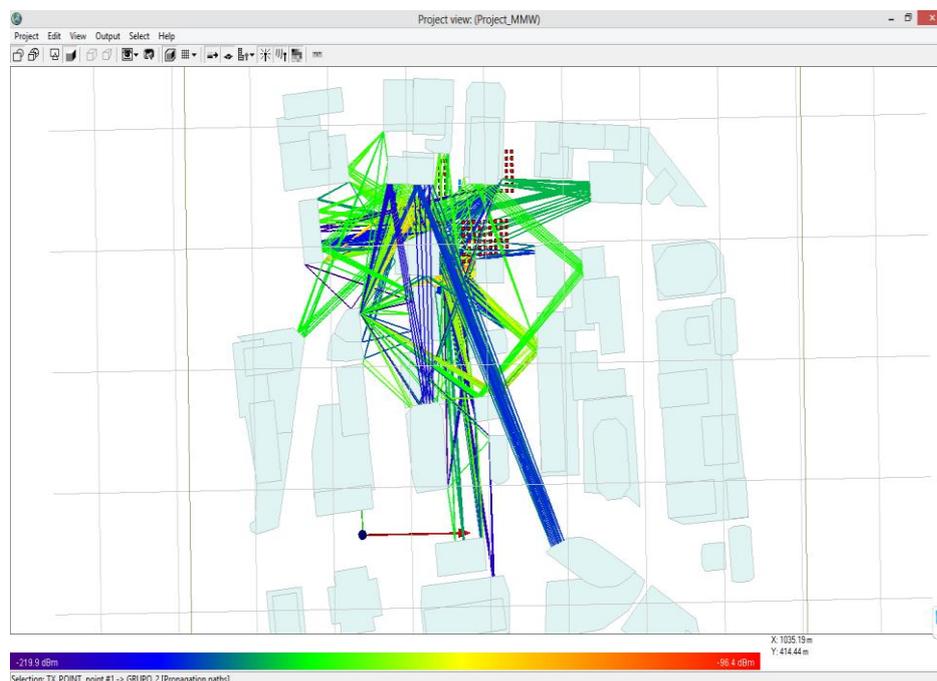


Figura 4.15 Grupo #2 de Receptores

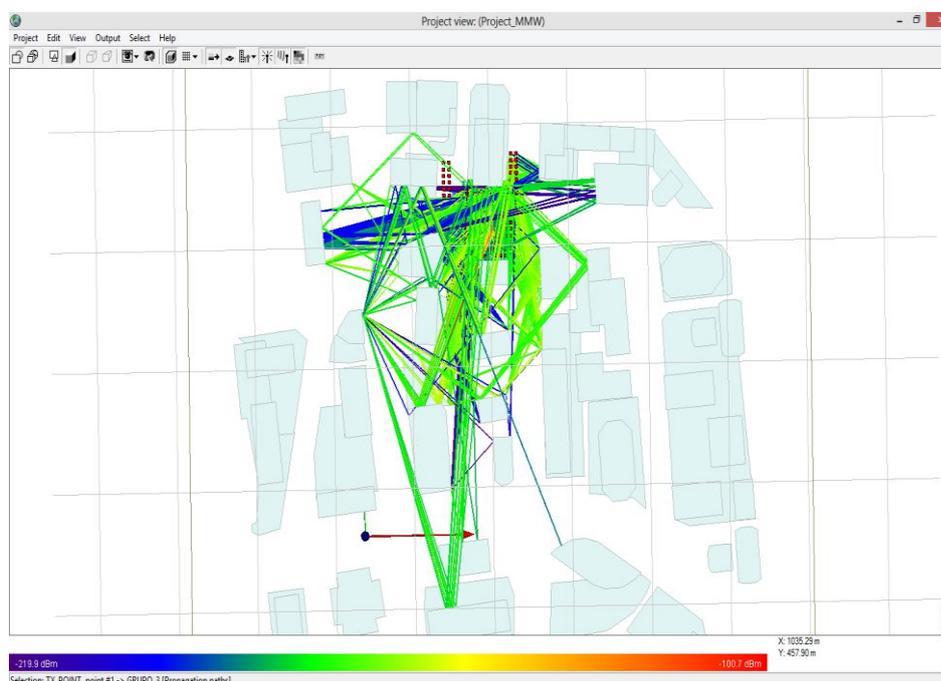


Figura 4.16 Grupo #3 de Receptores

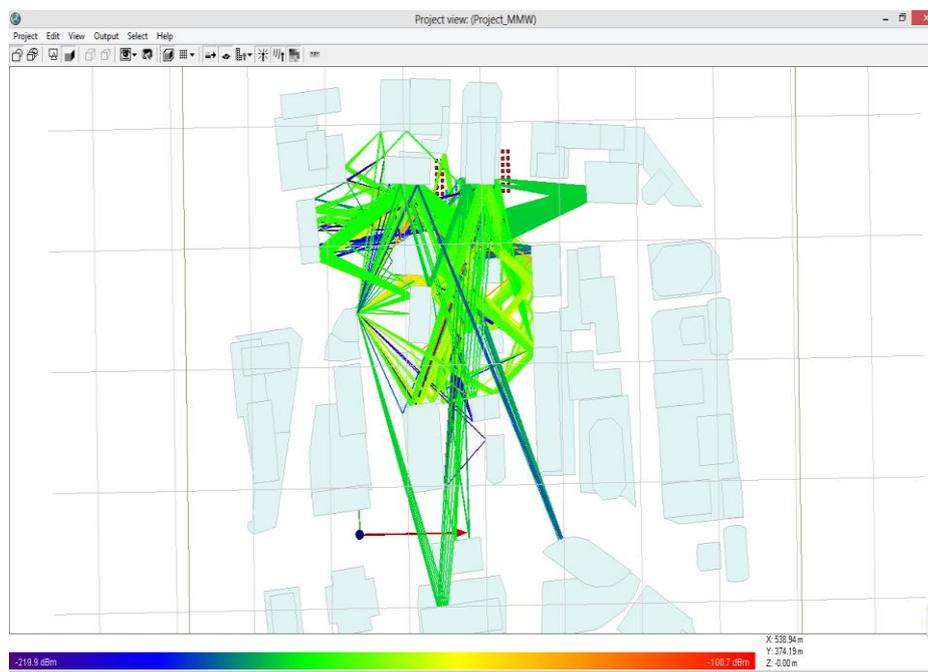


Figura 4.17 Grupo #4 de Receptores

4.3 Análisis de las Tablas de potencia

A continuación mediante tablas se puede observar las variaciones de potencia para diferentes escenarios que se obtuvieron con Wireless Insite para realizar la comparación de los cuatro escenarios.

4.3.1 Potencia recibida en el Grupo #1

En la Tabla 9 se observa que los valores recibidos en el receptor #1 tienen una calidad de potencia mejor cuando existe presencia de vehículos en los tres escenarios expuestos, esto es debido a que la onda al momento de incidir en un vehículo recorre una trayectoria más corta con respecto al escenario sin vehículos. De manera opuesta, en el caso del receptor #12 la presencia vehicular en los tres escenarios posee una menor calidad.

Ausencia Vehicular (dBm)	Vehículos Estacionarios (dBm)	Tránsito Este-Oeste (dBm)	Tránsito Norte-Sur (dBm)
-115.29	-113.14	-114.87	-113.15
-113.56	-112.93	-113.63	-112.98
-109.84	-109.31	-109.94	-114.18
-107.04	-106.94	-110.58	-114.11
-108.04	-114.04	-112.75	-114.04
-113.97	-112.13	-110.94	-112.13
-114.04	-113.95	-114.08	-113.95
-113.6	-113.58	-113.63	-113.59
-113.68	-114.04	-113.65	-114.11
-114.1	-112.58	-114.1	-112.67
-107.02	-107.24	-113.55	-112.44
-107.8	-112.2	-113	-112.2

Tabla 9. Potencias Recibidas para receptores del Grupo #1

4.3.2 Potencia recibida en el Grupo #2

El escenario de la Tabla 10 muestra que el receptor #1 recibe una menor calidad en su potencia en los tres escenarios que se incluye vehículos a diferencia del escenario sin vehículos donde la diferencia es alrededor de 10 dBm. Para el receptor #3 se aprecia valores iguales en los cuatro escenarios, esto se debe a que las trayectorias de la onda no tienen incidencia con vehículos. En el receptor #14 los datos en los escenarios con vehículos son iguales pero poseen una menor calidad de potencia que el escenario sin vehículos con una diferencia de décimas.

Ausencia Vehicular (dBm)	Vehículos Estacionarios (dBm)	Tránsito Este-Oeste (dBm)	Tránsito Norte-Sur (dBm)
-123.15	-122.08	-121.5	-122.11
-118.3	-118.3	-118.3	-118.3
-124.17	-124.17	-124.16	-124.16
-120.7	-120.7	-120.7	-124.81
-117.23	-117.23	-117.23	-125.46
-119.99	-119.99	-119.95	-119.98

-111.94	-111.94	-111.94	-111.93
-96.27	-99.33	-96.23	-99.33
-97.85	-116.96	-97.26	-116.96
-99.25	-117.63	-101.12	-117.63
-105.95	-118.3	-104.66	-118.3
-108.55	-108.25	-108.19	-108.25
-96.79	-96.39	-96.39	-96.39

Tabla 10. Potencias Recibidas para receptores del Grupo #2

4.3.3 Potencia recibida en el Grupo #3

En la Tabla 11 se aprecia que los receptores del #1 al #6 poseen valores iguales en todos los escenarios, esto ocurre cuando la trayectoria de una onda no encuentra a su paso la presencia vehicular. La presencia de vehículos o su ausencia no influye de manera significativa en los datos obtenidos para este grupo, sus valores oscilan entre décimas o de 1 a 3 dBm aproximadamente.

Ausencia Vehicular (dBm)	Vehículos Estacionarios (dBm)	Tránsito Este-Oeste (dBm)	Tránsito Norte-Sur (dBm)
-143.57	-143.57	-143.57	-143.57
-129.19	-129.19	-129.19	-129.19
-139.85	-139.85	-139.85	-139.85
-105.06	-105.06	-105.06	-105.06
-131.03	-131.03	-131.03	-131.03
-116.62	-116.62	-116.62	-116.62
-116.09	-116.09	-114.22	-116.09
-132.03	-132.03	-132.18	-132.03
-113.48	-113.48	-113.47	-113.48
-133.29	-133.29	-133.22	-133.29
-129.13	-129.22	-129.18	-129.21
-141.8	-141.35	-140.43	-141.3
-140.99	-142.83	-140.8	-142.42
-145.92	-146.1	-144.94	-147.41
-148.97	-151.06	-149.19	-157.74
-133.09	-133.65	-130.8	-134.53
-132.02	-131.66	-127.01	-131.79

-123.95	-123.94	-123.23	-123.95
-120.85	-120.8	-118.94	-120.8
-124.22	-124.14	-114.58	-124.16
-127.6	-127.48	-126.97	-127.51
-150.05	-154.33	-152.51	-154.23

Tabla 11. Potencias Recibidas para receptores del Grupo #3

4.3.4 Potencia recibida en el Grupo #4

El grupo #3 y #4 son los grupos que se encuentran más alejados del transmisor, la Tabla 12 muestra los resultados del grupo #4 y posee similitud con la Tabla 11. Los valores marcados de color rojo resaltan ejemplos de lo similar que son los valores obtenidos en los receptores del #59 al #62.

Los datos enmarcados con color azul representan una muestra de los valores que si tienen cambios significativos debido a la presencia vehicular. En el receptor #18 se puede observar que el escenario con tránsito Norte – Sur posee una diferencia de 20 dBm con respecto al resto de escenarios y el receptor #40 posee una diferencia aproximada de 6 a 7 dBm en el tránsito Este – Oeste.

Ausencia Vehicular (dBm)	Vehículos Estacionarios (dBm)	Tránsito Este-Oeste (dBm)	Tránsito Norte-Sur (dBm)
-116.08	-116.05	-116.09	-116.08
-106.37	-106.38	-106.38	-106.37
-102.57	-102.58	-102.57	-102.57
-117.6	-117.57	-117.65	-117.57
-116.37	-116.31	-116.35	-116.37
-116.73	-116.74	-116.75	-116.78
-122.91	-123	-122.72	-122.98
-116.42	-116.45	-116.35	-116.41
-103.09	-103.09	-103.08	-103.09
-101.8	-101.81	-101.86	-101.8
-117.36	-117.37	-116.78	-117.38
-116.82	-116.84	-117.23	-116.8
-129.81	-129.71	-127.44	-129.89

-122.79	-122.77	-120.25	-122.72
-104.57	-104.54	-104.31	-104.56
-103.84	-103.81	-103.8	-103.83
-133.36	-132.78	-132.7	-133.3
-155.9	-154.21	-157.42	-175.74
-124.9	-125.04	-125.23	-125.14
-147.41	-145.99	-147.11	-146.67
-126.4	-126.09	-126.11	-126.09
-103.57	-103.57	-103.56	-103.57
-103.6	-103.62	-103.59	-103.6
-145.25	-143.72	-144.15	-143.44
-122.27	-122.27	-122.17	-122.42
-128.53	-128.41	-127.85	-127.66
-127.64	-127.38	-127.71	-127.39
-131.24	-131.27	-131.84	-131.89
-103	-103.01	-102.99	-103
-145.12	-144.88	-143.44	-142.81
-131.84	-132.27	-131.56	-131.63
-130.56	-130.34	-130.35	-130.4
-130.4	-130.17	-130.41	-130.25
-130.24	-130.01	-130.47	-130.09
-102.8	-102.81	-102.8	-102.83
-102.04	-102.04	-102.04	-102.02
-136.82	-136.54	-136.46	-135.89
-126.21	-126.25	-126.1	-126.37
-130.21	-129.86	-129.97	-129.97
-132.72	-132.19	-138.45	-131.77
-135.22	-134.53	-134.96	-133.57
-102.49	-102.48	-102.52	-102.48
-135.82	-136.14	-134.59	-135.92
-139.31	-139.99	-138.69	-139.4
-138.29	-139.15	-137.64	-137.03
-137.26	-138.32	-136.59	-134.65
-126.93	-127.54	-126.92	-127.29
-102.35	-102.35	-102.31	-102.33
-101.35	-101.37	-101.35	-101.35
-125.39	-124.81	-125.39	-125.43
-121.06	-121.16	-121.06	-121.16
-122.01	-122.01	-122.01	-122.01
-149.49	-147.74	-145.85	-148.25

-132.16	-131.87	-133.25	-134.89
-125.77	-125.46	-125.54	-133.96
-125.13	-125.76	-128.93	-133.03
-125.08	-125.48	-124.72	-124.78
-123.05	-122.67	-123.05	-122.53
-101.65	-101.65	-101.65	-101.66
-102.52	-102.52	-102.52	-102.52
-110.1	-110.1	-110.1	-110.1
-112.78	-112.78	-112.78	-112.78

Tabla 12. Potencias Recibidas para receptores del Grupo #4

4.4 Curvas Estadísticas de Potencia

En esta sección se puede apreciar las diferentes curvas de función de distribución acumulada (CDF) en las Figuras 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21 que usa los valores de potencia recibida que se obtienen a partir de cada grupo de receptores, promediando los valores de sus múltiples pasos de propagación.

Las curvas estadísticas de potencia fueron realizadas por medio del software Matlab que hace una lectura de los archivos de potencia recibida en Wireless Insite obteniendo así el porcentaje de los valores de potencia debido a la influencia vehicular para cada escenario.

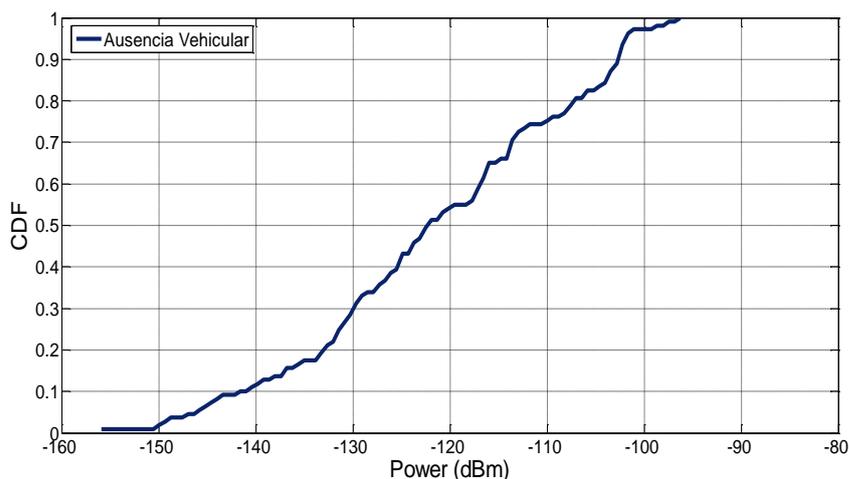


Figura 4.18 Curva Estadística de Potencia: Ausencia Vehicular

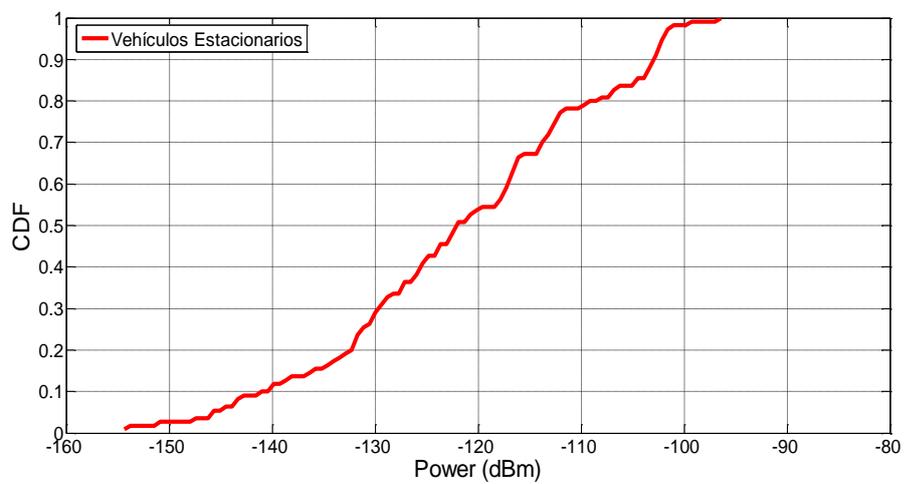


Figura 4.19 Curva Estadística de Potencia: Vehículos Estacionarios

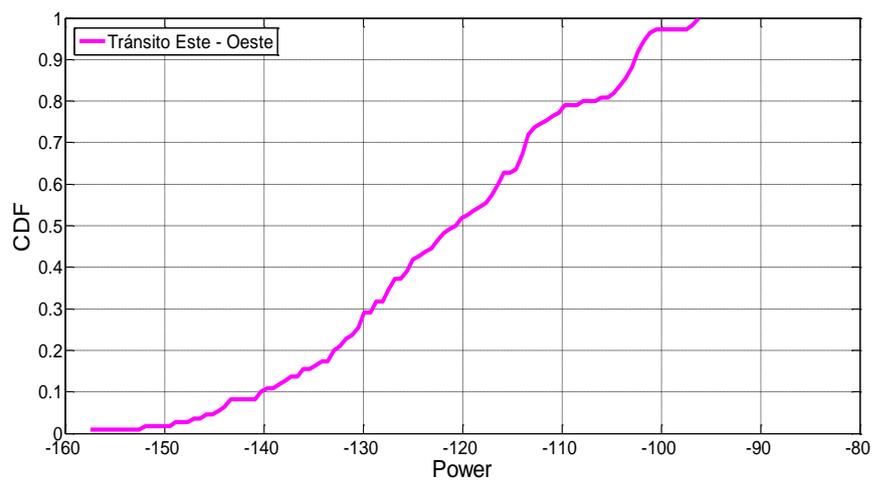


Figura 4.20 Curva Estadística de Potencia: Tránsito Este - Oeste

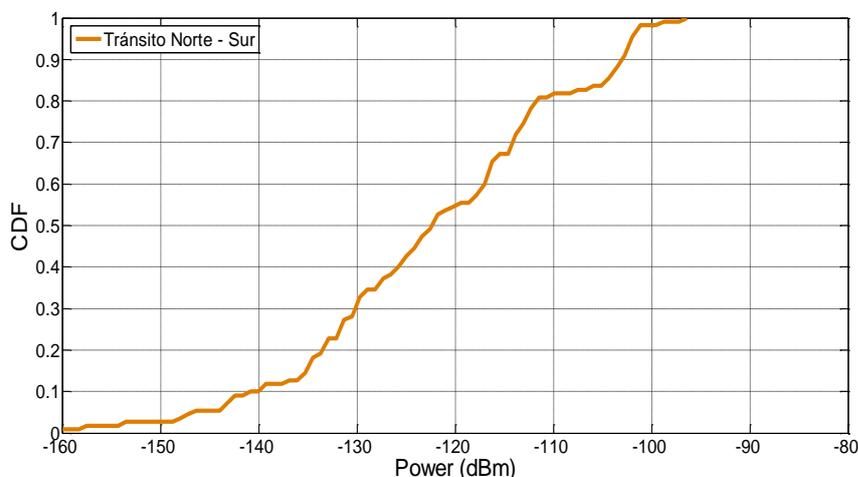


Figura 4.21 Curva Estadística de Potencia: Tránsito Norte – Sur

4.4.1 Ausencia vehicular vs vehículos estacionarios

En la Figura 4.22 se observa que ambas curvas presentan un comportamiento similar, se ha enmarcado dos situaciones para dar un análisis de lo que ocurre en esta gráfica. El primer tramo entre [-150 a -135] dBm aproximadamente muestra que la probabilidad acumulada es mejor en el escenario con vehículos estacionarios y a su vez la diferencia entre ambas curvas es mínima. El valor de -145 dBm es un ejemplo que denota que la curva de los vehículos estacionarios presenta un porcentaje aproximado del 5%, mientras que la curva de ausencia de vehículos alcanza un 6 a 7% de valores acumulados.

Para el siguiente recuadro resaltado entre [-117 a -104] dBm se observa que existe una mayor diferencia de porcentajes entre ambas curvas con un máximo de 3 dBm aproximadamente, esto demuestra que en ciertas ubicaciones la presencia de los vehículos influye pero esta diferencia es mínima.

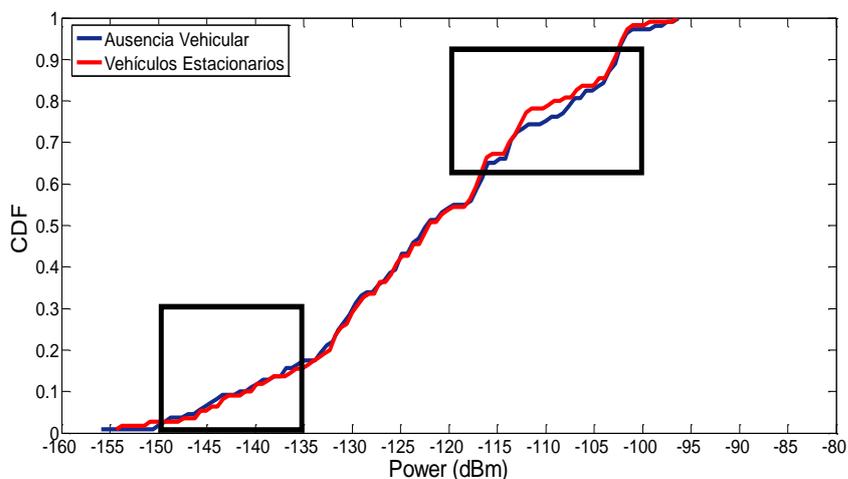


Figura 4.22 Curva Estadística de Potencia comparativo #1

4.4.2 Ausencia Vehicular vs Tránsito Este – Oeste

En la Figura 4.23 se observa las curvas de los escenarios de ausencia vehicular y tránsito Este – Oeste. En el cuadro marcado entre los [-120 y -110] dBm se observa dos situaciones, un tramo de la curva del escenario que no posee vehículos se ubica por encima de la de tránsito Este - Oeste siendo esta situación la que ocurre en la mayor parte de la gráfica y en otra ocurre de manera viceversa. Se aprecia que la influencia que ejercen los vehículos sigue siendo mínima para el enlace de comunicaciones.

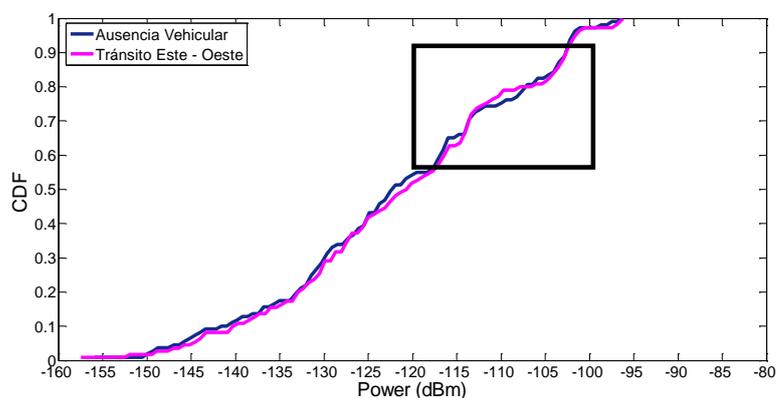


Figura 4.23 Curva Estadística de Potencia comparativo #2

4.4.3 Ausencia Vehicular vs Tránsito Norte - Sur

En la Figura 4.24 se presenta las curvas de los escenarios sin vehículos y con tránsito Norte - Sur, se han marcado dos secciones para su respectivo análisis. El primer tramo que abarca los $[-150$ a $-130]$ dBm se aprecia como la diferencia entre ambas curvas es mínima siendo la de tránsito vertical la que posee menor probabilidad acumulada de presentar valores de menor calidad de potencia.

Para el segundo tramo se ha escogido entre $[-120$ a $-100]$ dBm donde la diferencia máxima entre curvas que se observa es de 5 dBm siendo esta grafica la de que resalta una mayor diferencia con respecto a las dos anteriores.

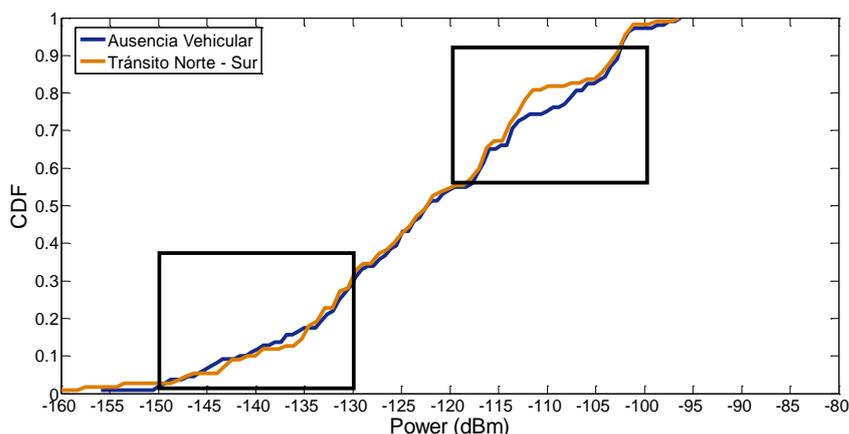


Figura 4.24 Curva Estadística de Potencia comparativa #3

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Haciendo una comparación entre tablas y curvas estadísticas de potencia obtenidas para los diferentes escenarios se puede decir que la potencia recibida varía dependiendo de la ubicación de los vehículos o la ausencia de los mismos. La potencia recibida varía debido principalmente a las reflexiones de los pasos de propagación según sea la posición del receptor, esto es, dependiendo de la longitud del enlace.

El escenario donde se compara la ausencia vehicular y el tránsito Norte - Sur presenta una diferencia máxima de 5dBm, que es la mayor en relación al resto de gráficas comparativas, esto es, los gráficos de Ausencia vehicular versus tránsito este-oeste y Ausencia vehicular versus vehículos estacionarios. Este efecto sucede debido a una mayor presencia de vehículos cerca del grupo #4 de receptores.

Basados en lo analizado en los distintos resultados se puede concluir que la influencia producida por la presencia vehicular es pequeña. Denotando que los vehículos no causan un impacto considerable en la potencia recibida que requiera de cierto cuidado al momento de trabajar en una banda de 28 GHz.

Realizar un mejor diseño del vehículo que incluya componentes con diferentes características eléctricas y formas geométricas más realistas.

Las simulaciones usando antenas direccionales tanto en el lado del Tx y Rx toman un tiempo largo respecto de aquellas en las cuales se usan antenas solamente omnidireccionales en ambos lados del enlace.

Realizar nuevas simulaciones con intersecciones de calles o avenidas que tengan diferente geometría y con diferente densidad vehicular.

Nuevas simulaciones con antenas netamente direccionales que especialicen las iluminaciones en ciertas direcciones para darle realismo a los valores de potencia recibida obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ITU, Provisional Final Acts World Radio Communications Conference (WRC-15), Ginebra, Suiza, 2015.
- [2] L. Medina Carrillo, Como plantear un problema de investigación y seleccionar un diseño de estudio apropiado., Archivos en Medicina Familiar, vol. 9, nº 3, p. 127, Julio-Septiembre 2007.
- [3] W. Tomasi, Sistema de Comunicaciones Electrónicas, Phoenix, Arizona: Prentice Hall, 2003, p. 4.
- [4] B. e. a. Fontal, El espectro electromagnético y sus aplicaciones, Mérida, 2005.
- [5] M. Faúndes Zanuy, Sistema de Comunicaciones, 2001.
- [6] S. R. Saunders y A. A. Zavala, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems, 2007.
- [7] P. Miller, TELE-satellite, Agosto 2007. [En línea]. Disponible en: <http://www.tele-satellite.com/TELE-satellite-0709/eng/feature.pdf>.
- [8] Hernando, Riera y Mendo, de Transmisión por Radio, Madrid, Centro de Estudios Ramón Areces. S.A., 2013, pp. 19-23.
- [9] C. A. Balanis, Antenna Theory, Jhon Wiley & Sons., 2005.
- [10] Cisco, 27 Febrero 2007. [En línea]. Disponible en: http://www.cisco.com/c/es_mx/support/docs/wireless-mobility/wireless-lan-wlan/82068-omni-vs-direct.html.

- [11] J. Monge, Tecdigital, [En línea]. Disponible en: <https://tecdigital.tec.ac.cr/revistamatematica/ContribucionesV4n22003/jorgemonge/jmonge/pag1.htm>.
- [12] Khafaji, Saadane, Belkasmi y Abbadi, Semantic Scholar, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/1059/377beafa54bc5fa5d17ab33bcd68085c8029.pdf>.
- [13] C. A. Pickover, Computers, Pattern, Chaos, and Beauty., 1990.
- [14] A. S. Glassner, An introduction to Ray Tracing, Academic Press Limited, 1991.
- [15] REMCOM, 2017. [En línea]. Available: <https://www.remcom.com/customers>.
- [16] REMCOM, Wireless Insite Reference Manual, 2013.
- [17] A. S. R. E. A. J. & B. M. Khafaji, Ray tracing technique based 60 GHz band propagation modelling and influence of people shadowing, International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering, p. 2.
- [18] National Instruments, 09 Junio 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/53096/en/#toc3>.
- [19] Schiavoni, Leoni, Arena y Lanzo, IEEE Xplore, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7481332/>.
- [20] P. S. y Morley, Realistic Ray Tracing, Canadá, 2000.
- [21] T. W., Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Pearson Educación, 2003.