

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO RAY TRACING EN
LA BANDA DE 28GHZ PARA ESTIMAR LA ALTURA ÓPTIMA DE UNA
ESTACIÓN BASE QUE MITIGUE EL EFECTO DEL BLOQUEO
VEHICULAR EN LOS ENLACES DE COMUNICACIONES
ESTABLECIDOS EN UN CENTRO URBANO”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO/A EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

NICOLE CAROLINA DÍAZ GUEVARA

JORGE ISAAC GUERRA SOLÍS

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a Nuestro Padre Celestial, porque me ha ayudado a encontrar a las personas indicadas que han forjado mi porvenir, como ser humano y profesional. También dedico este proyecto a mi familia, especialmente a mi mamá, mis dos tías abuelas maternas, y a mi papá, que me han formado con mucho amor, con valores cristianos y morales que fortalecen mi diario vivir.

Nicole Carolina Díaz Guevara

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a Dios quien siempre me ha bendecido y ayudado a lo largo de toda mi vida y mi carrera universitaria, le dedico todo mi esfuerzo y horas de estudio por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

Le dedico este proyecto a mi familia, especialmente a mis padres quienes me han inculcado todos los valores que han forjado mi vida y me han enseñado que la perseverancia, la dedicación y el caminar junto a Dios son la clave para lograr nuestras metas y objetivos. Este logro se los dedico a ustedes a quienes tanto amo y admiro.

Jorge Isaac Guerra Solís

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Nuestro Padre Celestial, por las múltiples bendiciones recibidas durante el trayecto de mi vida, que me ha permitido destacar en diferentes áreas, como hija de Dios, como ser humano, como estudiante, como ayudante de docencia, y ahora como futura profesional.

Agradezco a mi querida mamá, Ab. Ingrid Carolina Guevara Saénz de Viteri, que me ha guiado en mi camino con valores cristianos y principios morales, y me ha orientado en cada meta trazada, con mucha amor, esfuerzo y dedicación, dándome el mejor ejemplo de hija de Dios. A quien amo mucho, y le debo lo que hoy soy. A mis amadas tías abuelas maternas, CPA. Srta. Fanny Guevara Naranjo y Srta. Yolanda Guevara Naranjo (QEPD), a quienes admiro mucho porque me brindaron con su ejemplo la tenacidad para cumplir las metas y trazar nuevos propósitos en mi vida, quienes me han apoyado incondicionalmente en mis estudios. Que son un pilar importante en mi vida, y siempre las llevaré en mi corazón.

A mi querido Sr. Padre, Ing. Nelson Félix Díaz Méndez, que con sus sabios consejos y apoyo me guía en la toma correcta de mis decisiones a la manera que Nuestro Padre Celestial quiere para mi mejor desempeño en las diferentes asignaciones encomendadas. A mi tía, Msc. Jessica Guevara Saénz de Viteri, que me ha apoyado en mi carrera universitaria. A mi tía, Dra. Hemplen Zambrano Sáenz de Viteri, junto con mis amados primos Ab. Hemplen Barahona e Ing. Isaías Barahona y abuelos maternos, por su gran cariño familiar e incondicional. Los amo mucho.

A la Universidad Escuela Superior Politécnica del Litoral, por darme la oportunidad de formar parte de una excelente institución como estudiante y ayudante académica, a mis profesores que me han impartido sus conocimientos para desempeñarme como excelente profesional, especialmente al PhD. Juan Carlos Avilés. A mis compañeros, especialmente a mi compañero de tesis, mejor amigo, y novio, Jorge Guerra Solís, quien me ha ayudado en mi toda mi carrera, apoyándome incondicionalmente. Te amo.

Nicole Carolina Díaz Guevara

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por estar siempre a mi lado y llenarme de bendiciones, por haberme dado esta vida y por llenarme de sabiduría y entendimiento para haber logrado culminar mi carrera. Le agradezco infinitamente a Dios por la familia que me ha dado y por todas las personas que ha puesto en mi vida para brindarme su ayuda y acompañarme a lo largo de mi carrera universitaria. Gracias Padre Celestial por todo lo que me has dado y por tu infinito amor hacia mí y mi familia.

Agradezco a mis padres Jorge Guerra y Sandra Solís por todo su esfuerzo y dedicación que han dado para permitirme conseguir este logro, por haberme apoyado en todas las etapas de mi vida y por todo lo que han hecho para que yo pudiera cumplir mis metas y objetivos. Les agradezco por ser uno de los principales motivos de inspiración para seguir adelante y ser mejor cada día ya que una de mis metas siempre ha sido hacerlos sentir orgullosos. Le agradezco a mi padre por haberme dado los estudios y por sus enseñanzas, por haberse desvelado junto a mi ayudándome en mis proyectos, por siempre apoyarme en mis decisiones y por sus consejos de vida que siempre me han servido, le agradezco por siempre estar ahí conmigo. Le agradezco a mi madre por el inmenso amor que me ha brindado, por siempre escucharme y darme sabios consejos, por enseñarme que todo se puede lograr con la ayuda de Dios y haciendo el bien, por su preocupación y por todo el tiempo que ha dedicado en mi para forjar mi futuro. Agradezco también a mi hermana quien me ha apoyado cuando más lo necesitaba, porque a pesar de todo siempre ha estado dispuesta a ayudarme con buen corazón. Los amo y siempre los amaré querida familia.

Agradezco a mi novia y compañera de proyecto Nicole Díaz, quien ha estado desde el inicio de mi carrera universitaria apoyándome en todo y avanzando a mi lado, le agradezco por su amor y su apoyo incondicional, por ayudarme en los momentos de tristeza o frustración solucionando todo con su hermosa sonrisa. Le agradezco por ser mi fuente de inspiración y por estar siempre conmigo en momentos de dificultad y felicidad. Te amo y te agradezco por ser quién eres.

Jorge Isaac Guerra Solís

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; NICOLE CAROLINA DÍAZ GUEVARA y JORGE ISAAC GUERRA SOLÍS 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”

Nicole Carolina Díaz
Guevara

Jorge Isaac Guerra
Solís

EVALUADORES

MSc. Washington A. Medina

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Juan C. Avilés

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La Tecnología 5G está próxima a ser lanzada a nivel mundial y se estima que para el año 2025 comience el despliegue de antenas transmisoras en Ecuador por parte de las operadoras móviles para brindar este servicio. Una de las principales bandas de frecuencias en las que operará esta tecnología es la banda de 28 GHz, la cual es objeto de múltiples estudios e investigaciones en el área de las telecomunicaciones debido al tamaño de sus ondas electromagnéticas. Esta banda, al pertenecer al grupo de ondas milimétricas, se prevé que sea afectada en mayor medida que las bandas de menor frecuencia por los obstáculos vehiculares en las zonas urbanas. Por lo cual se requiere realizar un estudio previo en los centros urbanos del país para determinar la altura óptima de una estación base de tecnología 5G teniendo en cuenta el efecto de la presencia vehicular en estas zonas.

Debido a esto, en el presente proyecto integrador, se realiza el diseño de un método Ray Tracing que permita estimar la altura óptima de una estación base que opere en la banda de 28 GHz en una zona urbana con presencia vehicular. Para esto se utiliza un software de alta fidelidad llamado Wireless Insite de Remcom para realizar simulaciones en un entorno 3D mediante el método de trazado de rayos.

La zona urbana seleccionada para el diseño de este proyecto es la Av. Machala y Luis Urdaneta, debido a que la empresa WitPro planea realizar la instalación de una antena transmisora en este lugar para que las operadoras móviles que la contraten puedan brindar el servicio de telefonía móvil de tecnología 5G a los usuarios de esta área. En el software se ha realizado el modelado 3D de los edificios de este centro urbano, se ha diseñado una distribución de vehículos, se ha desplegado grupos de receptores en las zonas peatonales y se ha colocado la antena transmisora para, mediante simulaciones, realizar un análisis de los resultados y de esta forma estimar la altura y ubicación óptima de la estación base.

Palabras Clave: Tecnología 5G, Banda 28 GHz, Ray Tracing, Ondas Milimétricas.

ABSTRACT

5G Technology is about to be launched worldwide and it is estimated that by 2025 the deployment of transmitting antennas in Ecuador by mobile operators will begin to provide this service. One of the main frequency bands in which this technology will operate is the 28 GHz band, which is the subject of multiple studies and research in the area of telecommunications due to the size of its electromagnetic waves. This band, being part of the group of millimeter waves, is expected to be affected to a greater extent than the lower frequency bands by vehicular obstacles in urban areas. Therefore, a previous study is required in the urban centers of the country to determine the optimum height of a 5G technology base station considering the effect of the vehicular presence in these areas.

Due to this, in the present integrating project, the design of a Ray Tracing method is carried out that allows to estimate the optimum height of a base station that operates in the 28 GHz band in an urban area with vehicular presence. For this, a high-fidelity software called Wireless Insite - Remcom is used to perform simulations in a 3D environment using the ray tracing method.

The urban area selected for the design of this project is Av. Machala and Luis Urdaneta, because the company WitPro plans to install a transmitting antenna in this place so that mobile operators that hire it can provide telephone service 5G mobile technology to users in this area. In the software, 3D modeling of the buildings of this urban center has been carried out, a distribution of vehicles has been designed, groups of receivers have been deployed in the pedestrian areas and the transmitting antenna has been placed to, through simulations, perform an analysis of the results and in this way estimate the height and optimal location of the base station.

Keywords: 5G Technology, 28 GHz Band, Ray Tracing, Millimeter Waves.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
AGRADECIMIENTOS	V
DECLARACIÓN EXPRESA.....	VI
EVALUADORES.....	VII
RESUMEN	VIII
<i>ABSTRACT</i>	IX
ÍNDICE GENERAL	X
ABREVIATURAS.....	XIII
SIMBOLOGÍA.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Estado del Arte	4
1.5 Alcance.....	5
1.6 Metodología.....	7
CAPÍTULO 2	9

2.	Marco teórico	9
2.1	Modelos de Propagación	9
2.2	Ray Tracing	11
2.3	Espectro Electromagnético	12
2.4	Radiocomunicación	14
2.5	Antenas	14
2.5.1	Antena Isotrópica	15
2.5.2	Antena Omnidireccional	16
2.5.3	Antena Direccional	16
2.5.4	Antena Sectorial	17
2.6	Ondas Milimétricas	17
2.7	Small Cell	18
2.8	Wireless Insite	19
CAPÍTULO 3		20
3.	Diseño	20
3.1	Planteamiento Inicial	20
3.2	Diagrama de Bloques	20
3.3	Creación del entorno en Wireless Insite	22
3.4	Modelado 3D de un Vehículo Promedio	23
3.5	Modelado 3D del Centro Urbano	25
3.6	Importación de Modelos 3D al Wireless Insite	28
3.7	Configuración de Parámetros Constitutivos	28
3.8	Creación del Área de Estudio	29
3.9	Diseño de Distribución de Vehículos	30
3.10	Creación de Antena Transmisora	32
3.11	Creación de Grupos de Receptores	33

CAPÍTULO 4	34
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	34
4.1 Criterio Determinante de Altura Óptima	34
4.2 Análisis del Trazado de Rayos	34
4.3 Análisis de las Tablas de Potencia	37
4.4 Análisis del Efecto de Presencia Vehicular en Zona Urbana	38
4.5 Estimación de la Altura Óptima para la Estación Base	42
4.6 Análisis de Potencias Recibidas para Altura Óptima de Estación Base	44
4.7 Estimación de ubicación óptima de Estación Base	45
4.8 Conclusiones	48
4.9 Recomendaciones	49
BIBLIOGRAFÍA	50

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ITU	International Telecommunication Union
ARCOTEL	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones
UIT	Unión Internacional de las Telecomunicaciones
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CDF	Función de Distribución Acumulativa
PDF	Función de Densidad de Probabilidad
LOS	Line of Sight
PEC	Perfect Electric Conductor
MMW	Millimeter Wave
5G	Fifth Generation
3D	Tres Dimensiones
MIMO	Multiple Input Multiple Output

SIMBOLOGÍA

GHz	Gigahertz
MHz	Megahertz
dB	Decibel
dBm	Decibel Milliwatts
m	Metro
mm	Milimetro
dBi	Decibel relative to Isotropic

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Modelos de propagación	10
Figura 2.2 Ray Tracing Indoor	11
Figura 2.3 Espectro Electromagnético	12
Figura 2.4 División del Espectro Radioeléctrico	13
Figura 2.5 Rango del Espectro de Microondas	13
Figura 2.6 Patrón de la Antena Isotrópica.....	15
Figura 2.7 Patrón de la Antena Omnidireccional.....	16
Figura 2.8 Patrón de la Antena Direccional.....	17
Figura 2.9 Patrón de Antena Sectorial	17
Figura 3.1 Diagrama de Bloques	21
Figura 3.2 Project View y Main Window.....	22
Figura 3.3 Ventana de Creación de Terreno.....	23
Figura 3.4 Dimensiones de Vehículo Promedio	23
Figura 3.5 Partes Metálica del Vehículo en Autocad.....	24
Figura 3.6 Parte de Vidrio del vehículo en Autocad	24
Figura 3.7 Modelo 3D Vehículo Completo	24
Figura 3.8 Av. Machala y Luis Urdaneta - Vista Superior Google Maps.....	25
Figura 3.9 Av. Machala y Luis Urdaneta - Vista Satelital Google Maps.....	26
Figura 3.10 Av. Machala y Luis Urdaneta – Street View Google Maps	26
Figura 3.11 Modelado de Edificios en el Editor de Ciudad	27
Figura 3.12 Av. Machala y Luis Urdaneta 3D - Wireless Insite	27
Figura 3.13 Vehículo Importado a Wireless Insite.....	28
Figura 3.14 Creación Área de Estudio	30
Figura 3.15 Área de Estudio	30
Figura 3.16 Av. Machala.....	31
Figura 3.17 Luis Urdaneta	31
Figura 3.18 Distribución de Vehículos en el Software	31
Figura 3.19 Enlace de 28 GHz.....	32
Figura 3.20 Estación Base (Cubo Amarillo)	32

Figura 3.21 Escenario Urbano en Wireless Insite	33
Figura 4.1 Ray Tracing $hB=4m$	35
Figura 4.2 Ray Tracing $hB=6m$	35
Figura 4.3 Ray Tracing $hB=8m$	36
Figura 4.4 Ray Tracing $hB=10m$	36
Figura 4.5 Presencia vs Ausencia de Carros CDF $hB=4m$	38
Figura 4.6 Presencia vs Ausencia de Carros CDF $hB=6m$	39
Figura 4.7 Presencia vs Ausencia de Carros CDF $hB=8m$	39
Figura 4.8 Presencia vs Ausencia de Carros CDF $hB=10m$	40
Figura 4.9 Diferencias de trayectoria de rayo entre Ausencia y Presencia Vehicular	41
Figura 4.10 Comparación CDF para $hB= 4m, 6m, 8m$ y $10m$ en Presencia Vehicular	42
Figura 4.11 Comparación CDF para $hB= 4m, 6m, 8m$ y $10m$ en Ausencia Vehicular	43
Figura 4.12 Potencia en los Grupos de Receptores para Altura Óptima en Ausencia Vehicular	44
Figura 4.13 Potencia en los Grupos de Receptores para Altura Óptima en Presencia Vehicular	45
Figura 4.14 Ubicaciones Alternativas para la Estación Base	46
Figura 4.15 Comparación de ubicaciones de la Estación Base	46
Figura 4.16 Comparación PDF para Altura Óptima.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Permitividad y Conductividad de Modelo Vehicular Outdoor [20]	29
Tabla 2 Potencias Recibidas $hB=3m$	37
Tabla 3 Porcentaje de Receptores con Potencia Aceptable	43

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se describe la problemática a resolver, la importancia de la realización de este proyecto integrador, el objetivo general y los objetivos específicos, la metodología a seguir y las limitantes de este proyecto. Además, se describe el estado del arte y las investigaciones por parte de la comunidad científica acerca de la banda de 28 GHz.

1.1 Descripción del problema

Se estima que para el año 2025 la Tecnología 5G comience a implementarse en Ecuador [1] para lo cual las operadoras móviles serán las principales interesadas en invertir capital para comenzar con el despliegue de su red de antenas alrededor del país.

En los centros urbanos del Ecuador existe una gran afluencia de vehículos los cuales tendrán que ser tomados en cuenta al momento de realizar las instalaciones de antenas por parte de las operadoras móviles. Esto es debido a que, al utilizar ondas milimétricas tal como la banda de 28 GHz, estos enlaces se encuentran más afectados por el bloqueo vehicular que las bandas de menor frecuencia. Por lo cual el efecto de la presencia de vehículos en las zonas urbanas dificulta la transmisión de ondas radioeléctricas de alta frecuencia para brindar el servicio de telefonía móvil 5G.

La empresa WitPro Ecuador, especializada en servicios, asesoría y soporte técnico en el área de las Telecomunicaciones y Electricidad, así como también instalación y soporte técnico de estaciones base para distintas empresas, planea realizar en años próximos la instalación de estaciones base en la ciudad de Guayaquil para brindar el servicio de telefonía móvil con la tecnología 5G. Una de las ubicaciones

en que se instalará una antena será en la Avenida Machala y Luis Urdaneta, para lo cual requiere un estudio y simulación previa para determinar los mejores parámetros que deberá tener su estación base para brindar el servicio a esa zona. El problema reside en que en esta zona existe una gran afluencia vehicular e incluso en determinadas horas puede llegar a ocurrir congestionamiento de vehículos, por lo cual los enlaces de comunicaciones de la banda de 28 GHz de esta antena se verán afectados reduciendo la calidad de su servicio y ocasionando molestias en sus clientes. Además, el cliente especificó que la instalación de la antena debería ser a una altura mínima de 2 metros para poder brindar el servicio de forma correcta y cobertura para los transeúntes. En este caso una de las variables de interés sería la altura óptima de la antena para obtener un mejor enlace teniendo en cuenta el bloqueo de los vehículos.

Es necesario resolver el problema que se le presenta a WitPro debido a que, sin un estudio previo de la zona en la que va a instalar la antena de 5G, la operadora móvil que la contrate podría no brindar un buen servicio para sus usuarios, causando así molestias y reclamos de estos, llegando a tener que terminar negociaciones con la empresa.

1.2 Justificación del problema

El comportamiento de las ondas milimétricas en escenarios urbanos debe tomarse en cuenta al momento de realizar la instalación de una antena para el servicio de telefonía móvil de quinta generación ya que es diferente al colocar una antena en una zona con ausencia vehicular.

La empresa WitPro, la cual espera ser una de las encargadas de la instalación de antenas 5G para varias operadoras móviles de Ecuador, requiere conocer los problemas que ocurrirán en escenarios con vehículos presentes, así como saber los mejores parámetros para realizar las instalaciones. WitPro necesita un diseño de una estación base en una zona con presencia de una gran cantidad de vehículos como se da en las calles del centro de Guayaquil, por lo cual la mejor forma de realizar este diseño es mediante un software de simulación de alta fidelidad con el cual se pueda recrear alguna calle de la zona mencionada. Mediante este programa

se podrán obtener resultados fiables del comportamiento de los rayos en una transmisión de ondas milimétricas, así como el impacto del bloqueo vehicular y mediante esto estimar la altura óptima para la estación base.

Sin el estudio del escenario y el diseño previo a la implementación, sería un desperdicio de tiempo y recursos la instalación de una antena de tecnología 5G ya que los técnicos encargados se verían obligados a colocar la estación base de una forma arbitraria y, mediante prueba y error, determinar la altura óptima para mitigar los efectos del bloqueo vehicular y obtener mayores niveles de recepción en las zonas peatonales. El problema es que esto sería totalmente antitécnico e impráctico ya que es tiempo y capital de la empresa que se desperdiciaría por cada antena a instalar en las zonas urbanas. Por lo cual este proyecto integrador será de gran ayuda para la empresa WitPro para el ahorro de tiempo y recursos.

Uno de los métodos de análisis de enlaces de comunicaciones, es el método Ray Tracing, el cual es el más preciso para interiores y ambientes outdoor microcelulares a diferencia de los modelos estadísticos, a cambio de una alta demanda de recursos computacionales. Por lo cual el diseño de un método Ray Tracing para determinar la altura óptima de la estación base a colocar en una zona urbana para mitigar el efecto del bloqueo vehicular, es de suma importancia para la empresa WitPro ya que con esto podrá realizar instalaciones eficientes de antenas para las diferentes operadoras móviles que apuesten por la tecnología 5G.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un método Ray Tracing para enlaces de comunicaciones de la banda 28 GHz.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar el método de análisis y el software para realizar la simulación de enlaces de 28 GHz.

2. Realizar modelado 3D de edificaciones de un centro urbano de la ciudad de Guayaquil y de vehículos con dimensiones promedio.
3. Importar los modelos 3D de edificaciones y vehículos dentro del software de simulación y configurar sus parámetros constitutivos.
4. Determinar la antena transmisora para enlaces de 28 GHz.
5. Diseñar el escenario urbano en el software de simulación.
6. Definir los criterios que determinarán la altura óptima de una estación base de tecnología 5G.
7. Simular los escenarios y analizar las gráficas estadísticas de los resultados.

1.4 Estado del Arte

Existe un gran interés por parte de la comunidad científica en lo relacionado con los enlaces de comunicaciones de la banda de 28 GHz para la telefonía móvil 5G ya que se han realizado varios estudios e investigaciones explorando y experimentando con estas ondas milimétricas, sus ventajas y desventajas, como lo es el caso del artículo “*Coverage and Capacity Impact of Mobility and Human Body Blocking at Millimeter Waves*” [2] en el que describe el efecto del bloqueo ocasionado por el cuerpo humano en estas transmisiones, así como la influencia de la geometría de las edificaciones cercanas, y obtuvieron resultados simulados mediante el software propietario *Bell Labs Ray Tracing tool WISE*.

En cuanto al efecto del bloqueo vehicular existen documentos científicos que describen este impacto, tales como “*Millimeter Wave Vehicular Blockage Characteristics Based on 28 GHz Measurements*” [3] y el artículo “*Millimeter-Wave V2X Channels: Propagation Statistics, Beamforming, and Blockage*” [4]. El artículo [3] describe el efecto del bloqueo de un vehículo que se encuentra en la línea de visión entre un transmisor y un receptor a la frecuencia de 28 GHz, mediante mediciones realizadas en un estacionamiento concluyeron que un vehículo puede provocar una pérdida de entre 5 a 20 dB dependiendo de la ubicación del receptor que se encuentre detrás del vehículo.

El artículo [4] describe el impacto de los efectos de bloqueo en cuanto a la calidad de los haces recibidos en la banda de 28 GHz para diferentes trayectorias de vehículos consideradas, este documento va principalmente destinado a la investigación de las redes V2X que consiste en comunicaciones entre un vehículo a distintas redes externas. También existe un proyecto integrador similar llamado *“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”* [5] en el cual se realizaron simulaciones en el mismo software, pero utilizando modelos 3D muy básicos de vehículos y compuestos completamente de metal.

A diferencia de los artículos [3] y [4], este proyecto integrador es enfocado hacia las comunicaciones móviles con la tecnología 5G para peatones que se encuentren en las aceras y el efecto del bloqueo de vehículos que se encuentren en las calles, mientras que la antena transmisora se encuentra en una posición elevada en el mismo escenario. Para este proyecto se utilizará el software de alta fidelidad *Wireless Insite* [5] de la compañía REMCOM el cual sirve para realizar simulaciones mediante Ray Tracing en escenarios indoor y outdoor. Además, a diferencia de [6], nuestro proyecto se utilizará modelos más avanzados en 3D de vehículos compuestos por metal y se incluirá objetos de vidrio para simular las ventanas de los vehículos. Además, se utilizará un escenario de Guayaquil ya que este proyecto será de utilidad para la instalación de una antena en esa ubicación para brindar el servicio de telefonía móvil 5G. Al utilizar un modelo más preciso de vehículo obtendremos mejores resultados y más cercanos a la realidad que serán de ayuda para determinar los parámetros óptimos que deberá tener una estación base que opere en la banda de 28 GHz en el centro de la ciudad y que cumpla con las limitantes especificadas previamente.

1.5 Alcance

En este proyecto se definen diferentes limitantes para realizar las simulaciones debido a los tiempos de ejecución y a especificaciones del cliente para la transmisión en la banda de 28GHz. El escenario de análisis será de una intersección en el centro de la ciudad de Guayaquil, que tendrá presencia vehicular,

de una calle escogida por el cliente, la ubicación de la estación base será cercana a las estaciones móviles que en este caso será el grupo de receptores, debido a que el enlace de transmisión será por línea de vista (LOS).

En el grupo de receptores no se tomará en cuenta el impacto que tiene el cuerpo humano al momento de la recepción de la potencia en la banda de 28GHz, debido a que el estudio de los parámetros físicos del cuerpo humano y su efecto de bloqueo es un tema de investigación aparte, por lo cual en este proyecto el escenario constará de edificios, vehículos, grupo de receptores y antena transmisora.

El modelado de los carros en el escenario tendrá dimensiones promedio de un vehículo mediano, no se tomará en cuenta camiones, buses, metrovía, entre otros vehículos grandes que circulen en las calles del centro de la ciudad de Guayaquil. El diseño del vehículo no será realista debido a que a mayor cantidad de detalles que tenga el objeto, el tiempo de corrida del programa incrementará demasiado siendo impráctico e innecesario, por lo cual se realizará un modelo básico el cual no tendrá las llantas incorporadas al vehículo, sin embargo, se tomará en cuenta la elevación del chasis con respecto al suelo.

Se realizará una distribución de vehículos en la intersección que simulará la presencia vehicular en un determinado instante. Debido a que el software tiene la limitante de realizar simulaciones de escenarios estáticos, no se tomará en cuenta la velocidad ni aceleración del vehículo, por lo cual tampoco se analizará el efecto Doppler en los enlaces de transmisión de la banda de 28GHz.

Las edificaciones de la zona a analizar tendrán los mismos parámetros constitutivos de una edificación promedio estimada, es decir no se especificará en el software las partes de la edificación como es el vidrio, puertas, alumbrado, etc., ni los elementos que tenga interiormente ya que es un escenario outdoor. Además, se configurará el método de Ray Tracing a 25 rayos por trayectoria de transmisor a receptor. Este número de rayos es referido a los 25 rayos de mayor potencia que lleguen al receptor.

1.6 Metodología

Para determinar los efectos del bloque vehicular y determinar la altura óptima de la estación base debemos utilizar alguno de los modelos de propagación, entre los cuales existen los modelos determinísticos y los modelos empíricos [7]. Los modelos empíricos se basan en datos históricos, es decir en mediciones realizadas en el pasado, son apropiados para ambientes macrocelulares y requieren simples operaciones computacionales. Para este proyecto integrador se hará uso del método de trazado de rayos o Ray Tracing el cual es un modelo determinístico que ofrece mayor precisión para interiores y ambientes outdoor microcelulares que los modelos empíricos estadísticos, a cambio de una alta demanda computacional.

Para la realización de este proyecto se hará un estudio en las calles del centro de la ciudad de Guayaquil con distribución de vehículos de la zona de interés por parte del cliente en donde planea realizar la instalación la estación base que opere en la banda de 28GHz para brindar el servicio de telefonía móvil de tecnología 5G. Posterior a ello, se elaborará el escenario formado por dichas partes mencionadas anteriormente para la simulación en el software *Wireless Insite*.

Se utilizará *Google Maps* para determinar las dimensiones estimadas de las edificaciones en la zona a analizar, se medirá un vehículo mediano promedio para obtener sus dimensiones. Las edificaciones y los vehículos serán modelados a escala mediante el software *Autocad*, los cuales posteriormente serán importados en el escenario del software *Wireless Insite*.

El vehículo tendrá un diseño básico compuesto de 2 elementos:

- Ventanas laterales y parabrisas
- Puertas, Capó y maletero

Estos dos elementos tendrán los parámetros constitutivos del vidrio y metal, respectivamente al momento de ser importados en el escenario.

La distribución de personas no será tomada en cuenta para efectos de simulación, sino que se desplegará grupos de receptores que rellenen por completo las aceras

adyacentes a los edificios, con una distancia de separación entre receptores de 1 metro y una altura de 1.5 metros. Además, se insertará una estación base en dicho escenario, el cual transmitirá al grupo de receptores mediante enlace LOS.

El análisis del recorrido de la transmisión con la potencia receptada será obtenido mediante el método Ray Tracing del software, los cuales se espera que sean afectados por el bloqueo de los vehículos. Para poder realizar gráficas estadísticas con los resultados obtenidos, también se simulará un escenario con ausencia vehicular y así determinar las diferencias y el impacto que ocasiona la presencia de estos.

Mediante los datos obtenidos en dichas simulaciones se obtendrán gráficas estadísticas, el cual por medio del análisis del recorrido de la señal se determinará la altura óptima para la estación base, planteando diferentes escenarios (altura de Transmisor) para mitigar el impacto de bloqueo vehicular hasta llegar a la solución más apropiada y que sea de conveniencia del cliente.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describen los conceptos básicos necesarios para un mejor entendimiento del proyecto integrador, entre los cuales se incluye definiciones de Espectro Electromagnético, Ray Tracing, Modelos de Propagación, entre otros. También se describe los diferentes tipos de antenas y sus propiedades.

2.1 Modelos de Propagación

Los modelos de propagación son un conjunto de algoritmos y expresiones matemáticas que tienen como objetivo el representar las características y predecir el comportamiento de un enlace de radiocomunicaciones en un ambiente determinado. Se dividen principalmente en modelos empíricos o estadísticos, y teóricos o determinísticos. Estos modelos son métodos matemáticos los cuales utilizan ecuaciones de propagación de las que se obtienen las pérdidas en función de distancia, frecuencia, y otras variables que dependen de los obstáculos del trayecto que tienen los enlaces de radiocomunicación [8]. Sirven para estimar pérdidas en decibels de la potencia de un enlace de radiocomunicación en un entorno específico bajo diversas condiciones [9].

Los modelos empíricos se basan en las aproximaciones teóricas fundamentadas por teoría electromagnética. Entre los modelos más conocidos se tienen los siguientes:

- Okumura
- Okumura – Hata
- Cost231

- Walfisch y Bertoni
- Walfisch y Ikegami
- Durkin
- Dual-Slope

Los modelos determinísticos se basan en mediciones y ajustes de curvas de los datos muestreados, dentro de este grupo existen los modelos semi-empíricos los cuales se basan en algoritmos teóricos y a su vez de mediciones [8]. Los modelos más conocidos son:

- Por propagación en el espacio libre
- De dos rayos
- Filo de cuchillo
- Log-distancia
- Trazado de rayo

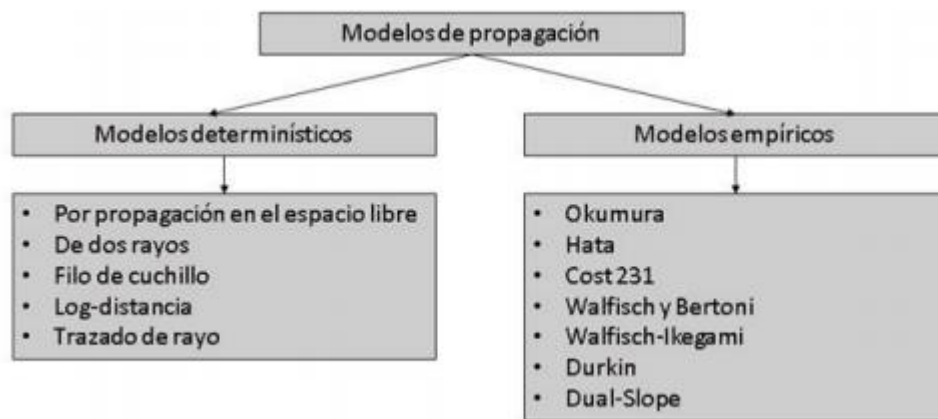


Figura 2.1 Modelos de propagación

En la *Figura 2.1* se muestran los modelos de propagación mencionados, de los cuales el método Ray Tracing es el más preciso para interiores y ambientes outdoor microcelulares a diferencia de los modelos estadísticos, a cambio de una alta demanda de recursos computacionales.

2.2 Ray Tracing

Es un método que consiste proyectar un grupo de rayos generados por una fuente de luz. [10] En el ámbito de las comunicaciones, esta fuente es el transmisor del enlace, el cual sigue la trayectoria de este, pasando por diferentes obstáculos, que cambian la dirección y magnitud del rayo debido a la reflexión, difracción, entre otros efectos naturales de la intersección de un rayo con un obstáculo.

Este método es utilizado frecuentemente en las herramientas de software, debido a que es el más preciso, sin embargo, se consume una gran cantidad de recursos del ordenador, por lo cual esta técnica toma un tiempo considerable en el análisis de la propagación en un entorno específico.

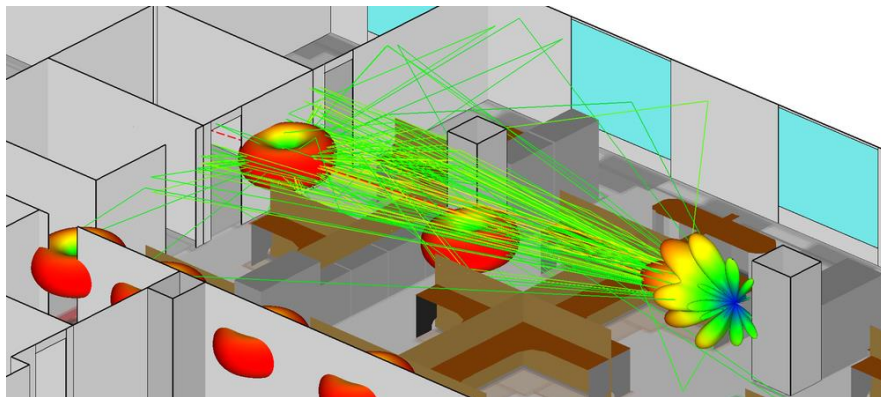


Figura 2.2 Ray Tracing Indoor

En la *Figura 2.2* se puede apreciar, este método en un ambiente indoor en el software *Wireless Insite*. Se visualiza la propagación de los rayos, partidos desde la fuente transmisora, que tiene un patrón direccional, a los receptores con patrones omnidireccionales. Estos patrones tienen regiones de colores, el cual representa el color rojo la mayor ganancia en la antena, los colores amarillo y verde representan una ganancia media y el color azul la menor ganancia. Así mismo se representan los rayos, siendo el color Rojo, el rayo que llega al receptor con mayor potencia, el color verde, el rayo que llega con potencia media, y de color amarillo el rayo que llega con menor potencia. Se puede apreciar el rayo de color Rojo, es el que no presenta obstáculos en el camino, este enlace se llama Línea de vista (LOS).

Por otro lado, los rayos amarillos y verdes son los que presentan obstáculos en su trayectoria, haciendo que el rayo se refleje o se difracte, provocando así una disminución de la potencia de llega al receptor.

El método Ray Tracing es el más usado actualmente, debido que se validan diferentes tipos de trayectorias desde una fuente al receptor en un escenario determinado.

2.3 Espectro Electromagnético

Es la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. *La Unión Internacional de Telecomunicaciones* (UIT) regula el espectro electromagnético el cual tiene el rango desde 10^3 Hz a 10^{24} Hz .

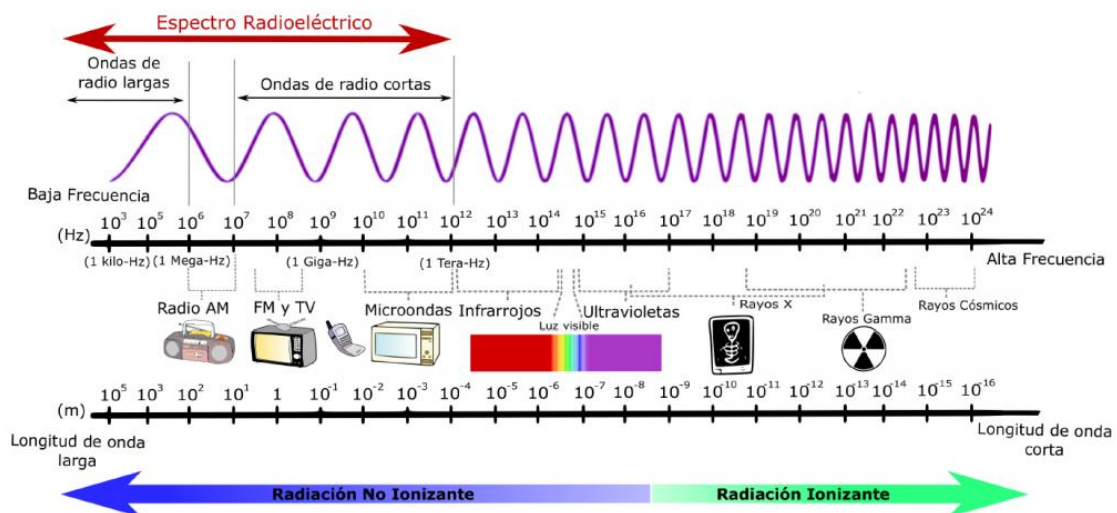


Figura 2.3 Espectro Electromagnético

En la *Figura 2.3*, se observa el espectro electromagnético en términos de frecuencia y longitudes de onda. Donde la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia. El espectro electromagnético está dividido en segmentos de frecuencia llamados *bandas*, para diferentes usos en el ámbito de telecomunicaciones como frecuencias AM, FM, microondas, entre otras. Se extiende desde frecuencias bajas utilizados en Radiofrecuencias (AM, FM), a frecuencias altas que son los rayos X, rayos gamma y rayos cósmicos.

En el Ecuador este espectro es regulado por la *Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones* (ARCOTEL), mientras que las bandas son establecidas por la UIT, mostradas en la *Figura 2.4*.

DISTRIBUCIÓN CONVENCIONAL DEL ESPECTRO RADIOELECTRICO					
SIGLA	DENOMINACION	LONGITUD DE ONDA	GAMA DE FRECUENC.	CARACTERISTICAS	USO TÍPICO
VLF	VERY LOW FRECUENCIES Frecuencias Muy Bajas	30.000 m a 10.000 m	10 KHz a 30 KHz	Propagación por onda de tierra, atenuación débil. Características estables.	ENLACES DE RADIO A GRAN DISTANCIA
LF	LOW FRECUENCIES Frecuencias Bajas	10.000 m. a 1.000 m.	30 KHz a 300 KHz	Similar a la anterior, pero de características menos estables.	Enlaces de radio a gran distancia, ayuda a la navegación aérea y marítima.
MF	MEDIUM FRECUENCIES Frecuencias Medias	1.000 m. a 100 m.	300 KHz a 3 MHz	Similar a la precedente pero con una absorción elevada durante el día. Prevalce propagación ionosférica durante la noche.	RADIODIFUSIÓN
HF	HIGH FRECUENCIES Frecuencias Altas	100 m. a 10 m.	3 MHz a 30 MHz	Prevalce propagación Ionosférica con fuertes variaciones estacionales y en las diferentes horas del día y de la noche.	COMUNICACIONES DE TODO TIPO A MEDIA Y LARGA DISTANCIA
VHF	VERY HIGH FRECUENCIES Frecuencias Muy Altas	10 m. a 1 m.	30 MHz a 300 MHz	Prevalce propagación directa, ocasionalmente propagación Ionosférica o Troposférica.	Enlaces de radio a corta distancia, TELEVISIÓN, FRECUENCIA MODULADA
UHF	ULTRA HIGH FRECUENCIES Frecuencias Ultra Altas	1 m. a 10 cm.	300 MHz a 3 GHz	Solamente propagación directa, posibilidad de enlaces por reflexión o a través de satélites artificiales.	Enlaces de radio, Ayuda a la navegación aérea, Radar, TELEVISIÓN
SHF	SUPER HIGH FRECUENCIES Frecuencias Superaltas	10 cm. a 1 cm.	3 GHz a 30 GHz	COMO LA PRECEDENTE	Radar, enlaces de radio
EHF	EXTRA HIGH FRECUENCIES Frecuencias Extra-Altas	1 cm. a 1 mm.	30 GHz a 300 GHz	COMO LA PRECEDENTE	COMO LA PRECEDENTE
EHF	EXTRA HIGH FRECUENCIES Frecuencias Extra-Altas	1 mm. a 0,1 mm.	300 GHz a 3.000 GHz	COMO LA PRECEDENTE	COMO LA PRECEDENTE

Figura 2.4 División del Espectro Radioeléctrico

Dentro de la Banda EHF, designada para las ondas de microondas [11], existe también una división de esta establecida por la IEEE US mostrada en la *Figura 2.5*.

Banda	Frecuencias (GHz)
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	27 a 40
Q	40 a 50
V	50 a 75
W	75 a 100

Figura 2.5 Rango del Espectro de Microondas

Donde la Banda de 28GHz es parte de la banda K, utilizada para las investigaciones de la futura implementación de la Tecnología 5G [12].

2.4 Radiocomunicación

Es un tipo de telecomunicaciones que utilizan ondas de radio para establecer un enlace. Existen servicios y sistemas donde se establece la comunicación por las ondas de radio entre 2 o más terminales, estos pueden ser terrestres, marítimos o satelitales [13].

Estos servicios se dividen en:

- Servicio fijo: Son comunicaciones que establecen un enlace punto a punto mediante el uso de terminales fijos. El sistema que utilizan son propiedad de la compañía u organismo que cumplen las recomendaciones de la UIT.
- Servicio móvil: Son comunicaciones que están compuestas de una estación base y una móvil o de varias estaciones móviles. El sistema más utilizado para este servicio es el Sistema GSM.
- Servicio de distribución: Son comunicaciones para varios usuarios, el servicio más utilizado es la televisión satelital. Los sistemas más utilizados son TDT y RTD.

2.5 Antenas

Las antenas sirven para emitir y recibir ondas electromagnéticas, y son utilizadas en el ámbito de las telecomunicaciones, como es radiocomunicación. Existe una amplia variedad de tipos de antenas.

La antena se caracteriza por su funcionamiento recíproco, lo que significa que en la recepción y transmisión se tiene el mismo desempeño a una frecuencia de operación. La dimensión de la antena tiene una relación inversa con la frecuencia de operación. La antena tiene como parámetros [14]:

- Frecuencia de operación
- Ganancia
- Patrón de radiación

- Directividad
- Ancho de Haz
- Eficiencia
- Polarización
- Impedancia
- Ancho de Banda

Las antenas se pueden clasificar de diferentes formas, una de ellas es mediante su parámetro de patrón de radiación. De esta forma las antenas se clasifican en:

2.5.1 Antena Isotrópica

Es una antena ideal, el cual tiene el patrón de radiación mostrado en la *Figura 2.6*, donde tiene uniformidad en todo el patrón esférico, es decir en todos los puntos tiene la misma intensidad de radiación (Ganancia). Esta antena no presenta pérdidas, y tiene una Ganancia de 0dB.

Es utilizada como referencia para la intensidad de radiación de otros tipos de antenas, y es expresado como dBi. [14]

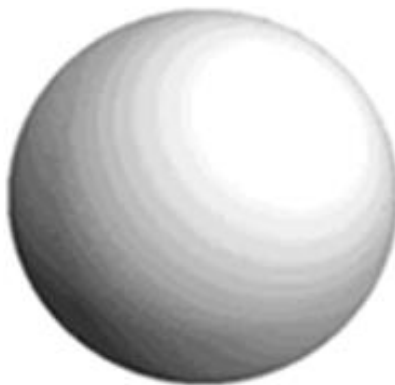


Figura 2.6 Patrón de la Antena Isotrópica

2.5.2 Antena Omnidireccional

Esta antena tiene un patrón de radiación mostrado en la *Figura 2.7*, donde el patrón horizontal xy es uniforme y el patrón vertical es variable. La Antena dipolo presenta este patrón Omnidireccional. Las antenas con este patrón comúnmente son utilizadas para las comunicaciones Wifi, es decir que operan a la frecuencia de 2.4 GHz o 5 GHz. [14]

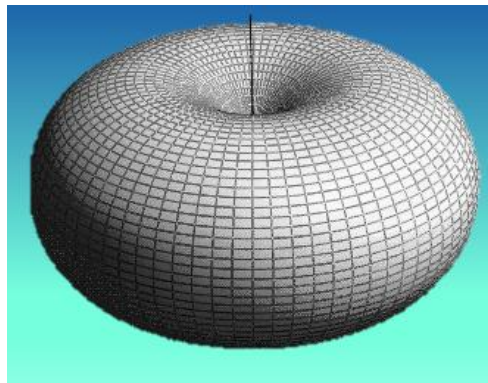


Figura 2.7 Patrón de la Antena Omnidireccional

2.5.3 Antena Direccional

Esta antena tiene el patrón direccional mostrado en la *Figura 2.8*, donde presenta un lóbulo principal, el cual contiene la mayor intensidad de radiación, lóbulos secundarios, y un lóbulo trasero, que por lo general presenta una radiación muy inferior con respecto al lóbulo principal. El uso común de estas antenas es para comunicaciones de enlace punto a punto. Donde toda la radiación se centra en el lóbulo principal, causando a así una cobertura limitada y seleccionada de comunicación. La antena que presenta esta radiación son las antenas de apertura, que son las antenas parabólicas, de corneta, piramidal, entre otras. [14]



Figura 2.8 Patrón de la Antena Direccional

2.5.4 Antena Sectorial

Esta antena es un tipo de Antena Directiva, el cual tiene un patrón mostrado en la *Figura 2.9*. Donde el patrón de radiación es una porción del Patrón direccional. Este tipo de antenas son utilizados para las estaciones base móviles celulares. [14]

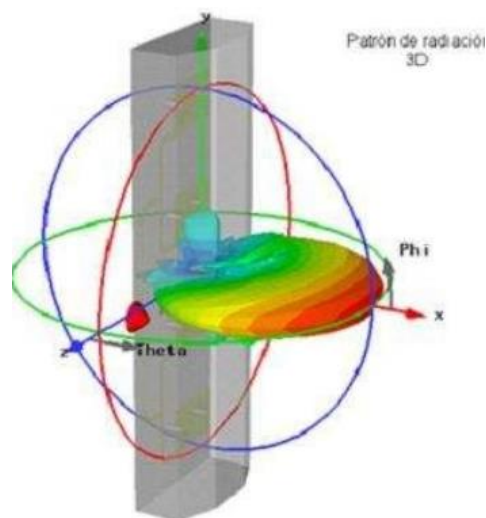


Figura 2.9 Patrón de Antena Sectorial

2.6 Ondas Milimétricas

Su nombre proviene del tamaño de longitud de onda la cual será en escala milimétrica, siendo así ondas de alta frecuencia debido a su relación inversa con la

longitud de la onda. Un ejemplo de estas ondas son las de la banda de 28 GHz la cual es una de las principales en temas de estudios de la tecnología 5G debido a la alta velocidad de datos que esta podrá proveer ya que a mayor frecuencia puede ofrecer un mayor ancho de banda lo que se traduce en una mayor tasa de datos.

No obstante, las ondas milimétricas presentan un problema el cual es de que al ser estas ondas de longitud muy estrecha conlleva a ser más susceptibles a los obstáculos móviles que en otras bandas por debajo de los 6 GHz, como por ejemplo el caso del bloqueo vehicular o el ocasionado por los cuerpos humanos. Esto es un gran problema para las ondas milimétricas ya que causaría interferencia e intermisión en las comunicaciones de esta banda de 28 GHz, por lo cual sigue en estudio y revisión esta banda. Además, son más susceptibles a la lluvia también ya que el diámetro de una gota de agua en promedio está en el rango de 0.1 a 12mm. [15]

2.7 Small Cell

Esto viene también influenciado en parte por los problemas de las ondas milimétricas, ya que al ser más susceptibles a los obstáculos y debido a su gran ancho de banda tiene una menor cobertura que las celdas de telefonía móvil actuales, por lo cual se requiere mayor cantidad de estaciones base que tengan una cobertura menor, y esto son las celdas pequeñas o Small Cells. Se espera que sean desplegadas cada 250 metros a través de las ciudades. Deberán instalarse miles de estas celdas para poder suplir el problema de caídas de señal e intermitencia.

Además, al tener mayor cantidad de estaciones bases, que vienen a ser estas Small Cells, se tiene menor cantidad de usuarios por estación base lo cual resulta una ventaja de tal forma que se pueda utilizar de forma más eficiente el espectro radioeléctrico. Para que estas celdas funcionen correctamente, se espera utilizar massive MIMO. [15]

2.8 Wireless Insite

Wireless Insite es un software desarrollado por la compañía REMCOM con sede en Canadá y Estados Unidos. Este programa es una poderosa herramienta de modelamiento electromagnético y predicciones de los efectos de edificios y terrenos en la propagación de ondas electromagnéticas.

Wireless Insite es un software de alta fidelidad para simular ambientes indoor y outdoor mediante la técnica de Ray Tracing en 3D. Este programa ha sido utilizado por grandes compañías debido a su alta precisión en sus resultados, como por ejemplo Samsung, Huawei, Siemens, entre otras.

Entre sus principales características se encuentran las siguientes:

- Ofrece herramientas de edición e importación de modelos 3D.
- Resultados precisos para frecuencias en el rango de 50 MHz a 100 GHz aproximadamente.
- Predicción de efectos de los bloqueos y el ambiente de la señal emitida para ambientes indoor y outdoor.
- Análisis de propagación mediante el uso del método Ray Tracing en un ambiente 3D.
- Modificación de parámetros constitutivos de cada objeto por separado en el programa.
- Análisis de cada trayectoria independiente para cada uno de los rayos.
- Vista 2D y 3D de los escenarios, así como visión sólida o de “wireframe”.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO

En la presente sección se explica el procedimiento a seguir para el diseño de un método Ray Tracing, mediante el uso de la herramienta Wireless Insite, para simular un escenario urbano del Centro de Guayaquil en el que se requiera estimar la altura óptima, previo a su instalación, de una antena transmisora que opere en la banda de 28 GHz.

3.1 Planteamiento Inicial

El escenario de simulación, el cual estará conformado con modelos 3D de cada elemento, contará con vehículos compuestos de metal y vidrio ubicados en una zona urbana con edificios. Cada uno de estos objetos serán modelados con dimensiones aproximadas a la realidad, en el caso de los carros se tomará las medidas de un vehículo promedio.

Se colocará una antena transmisora en la intersección de las calles Av. Machala y Luis Urdaneta, zona urbana modelada en 3D, y en las zonas peatonales cubiertas de grupos de antenas receptoras.

3.2 Diagrama de Bloques

El diseño de este proyecto integrador está dividido en varias etapas y pasos a seguir, los cuales son explicados resumidamente en el diagrama de bloques de la *Figura 3.1* presentada a continuación.

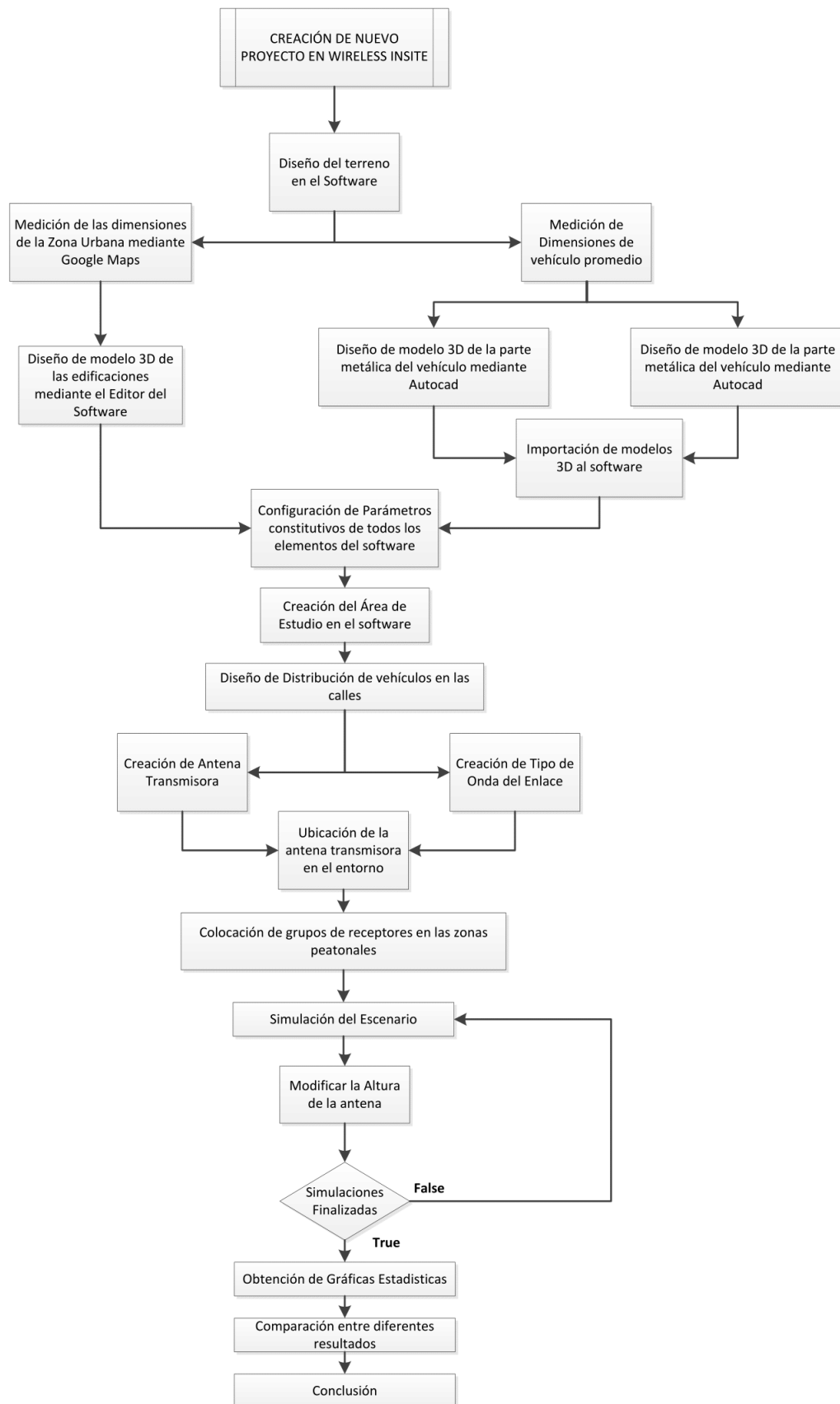


Figura 3.1 Diagrama de Bloques

3.3 Creación del entorno en Wireless Insite

Al abrir el software Wireless Insite se mostrará dos ventanas presentadas en la *Figura 3.2*, la de la izquierda corresponde a la Vista del Proyecto y la de la derecha a su Ventana Principal en la cual se pueden encontrar todos los componentes que se estén utilizando en el proyecto.

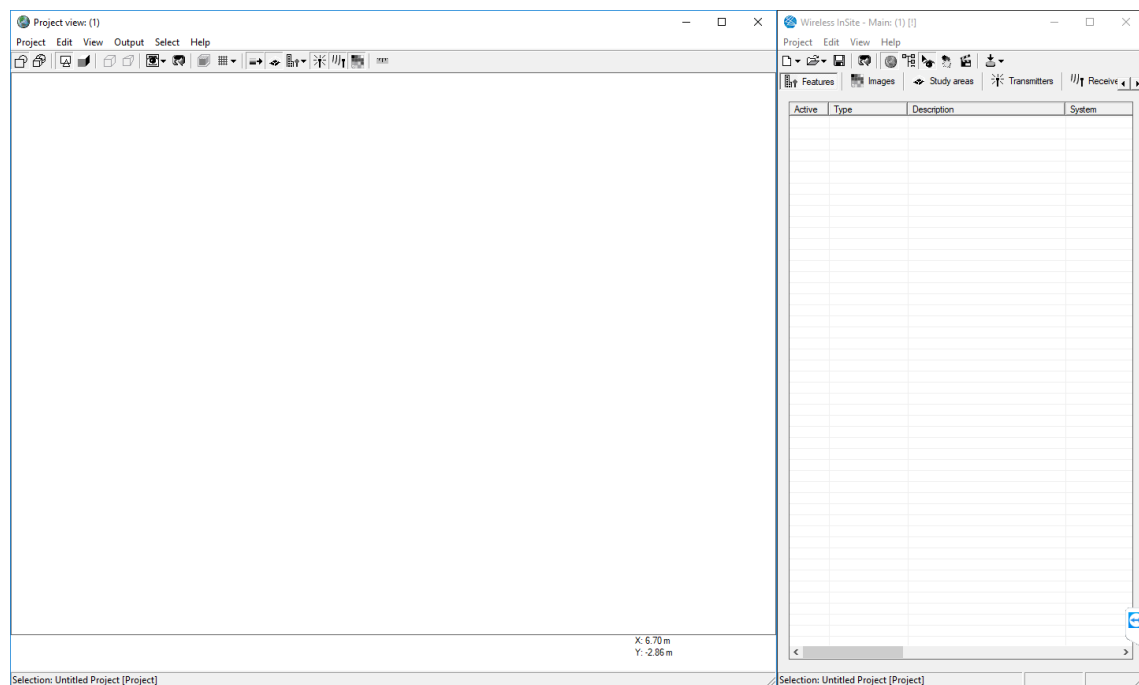


Figura 3.2 Project View y Main Window

En el *Project View* se encuentran diferentes herramientas y menús desplegables para la interacción con el entorno del proyecto y opciones de visualización de este. Mientras que en el *Main* se encuentran separados en secciones los diferentes elementos que forman parte del proyecto, como objetos, ciudad, entorno, entre otros. No obstante, ambas ventanas ofrecen la misma barra de menú para el manejo del proyecto, edición, importación y demás herramientas.

Wireless Insite requiere establecer un *Terreno* en cada proyecto [16] que se realice en él, por lo cual lo primero a realizar es la creación de un terreno con sus respectivas dimensiones, esto se presenta en la *Figura 3.3*.

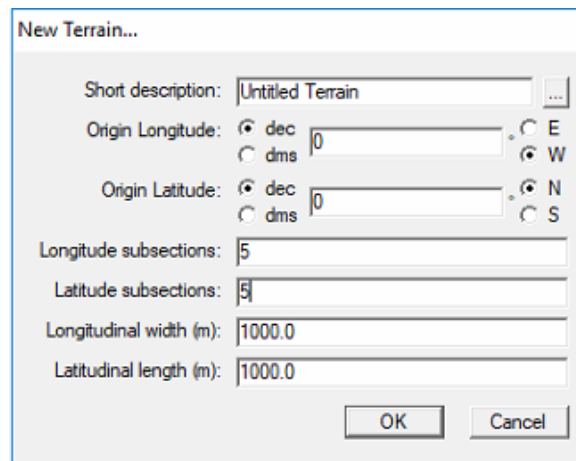


Figura 3.3 Ventana de Creación de Terreno

3.4 Modelado 3D de un Vehículo Promedio

Para la creación del modelo 3D del vehículo se utilizaron dimensiones promedio [17] las cuales se muestran en la *Figura 3.4*. Este modelo fue hecho en *Autocad* [18] para posteriormente ser importado al software Wireless Insite.

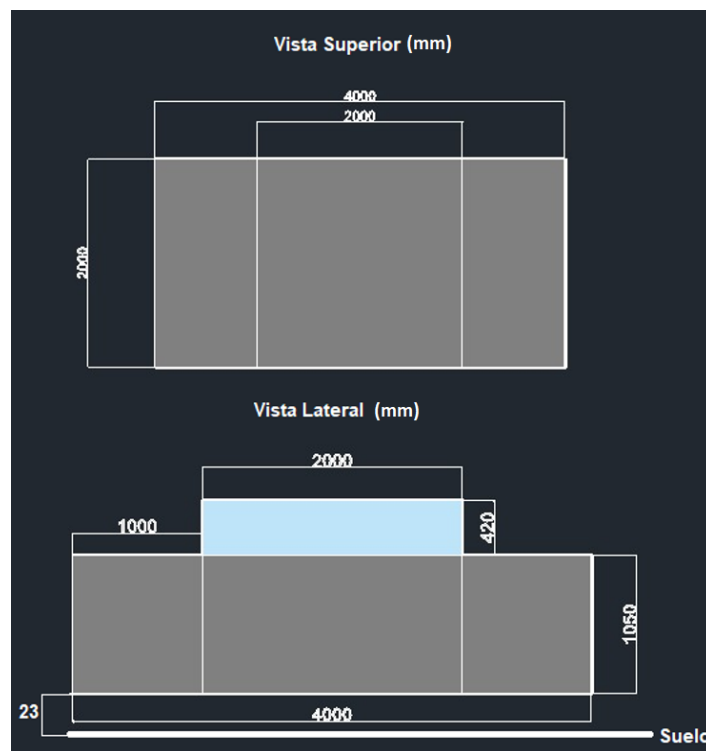


Figura 3.4 Dimensiones de Vehículo Promedio

Este modelo a su vez fue dividido en 2 partes: la parte metálica del vehículo y la parte de los vidrios. Esto se debe a que se debe configurar los parámetros constitutivos por separado de cada parte. En la *Figura 3.5* y *Figura 3.6* se presentan ambos modelos 3D en *Autocad*.

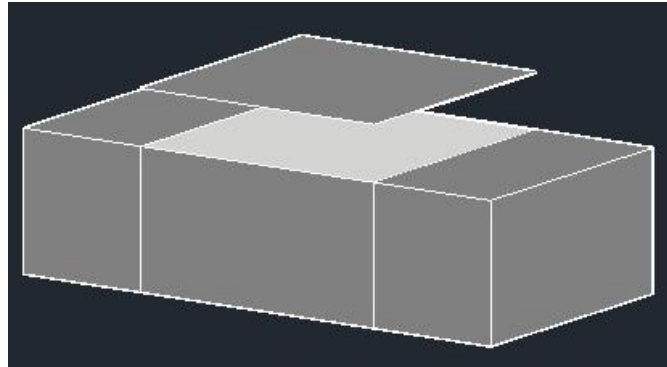


Figura 3.5 Partes Metálica del Vehículo en Autocad

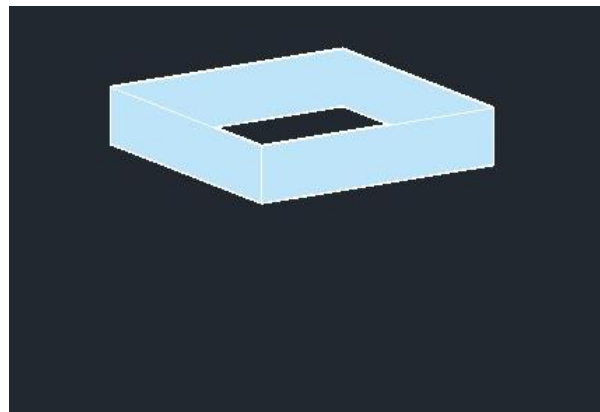


Figura 3.6 Parte de Vidrio del vehículo en Autocad

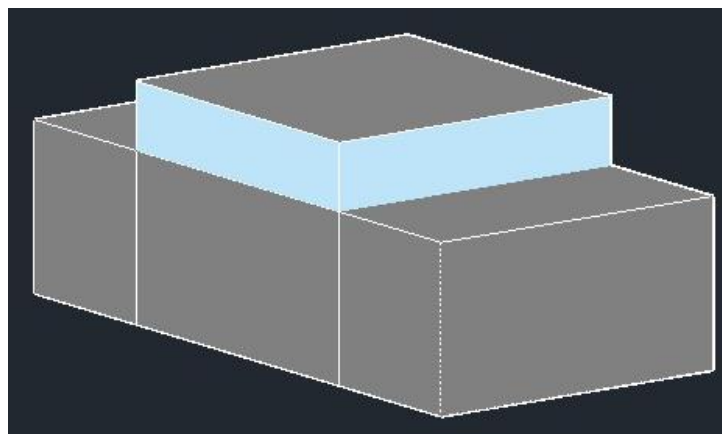


Figura 3.7 Modelo 3D Vehículo Completo

3.5 Modelado 3D del Centro Urbano

Para realizar el modelado 3D del centro urbano seleccionado se utilizó la herramienta de *Google Maps* [19] para obtener las dimensiones de las calles Av. Machala y Luis Urdaneta, las medidas de los edificios y zonas peatonales.

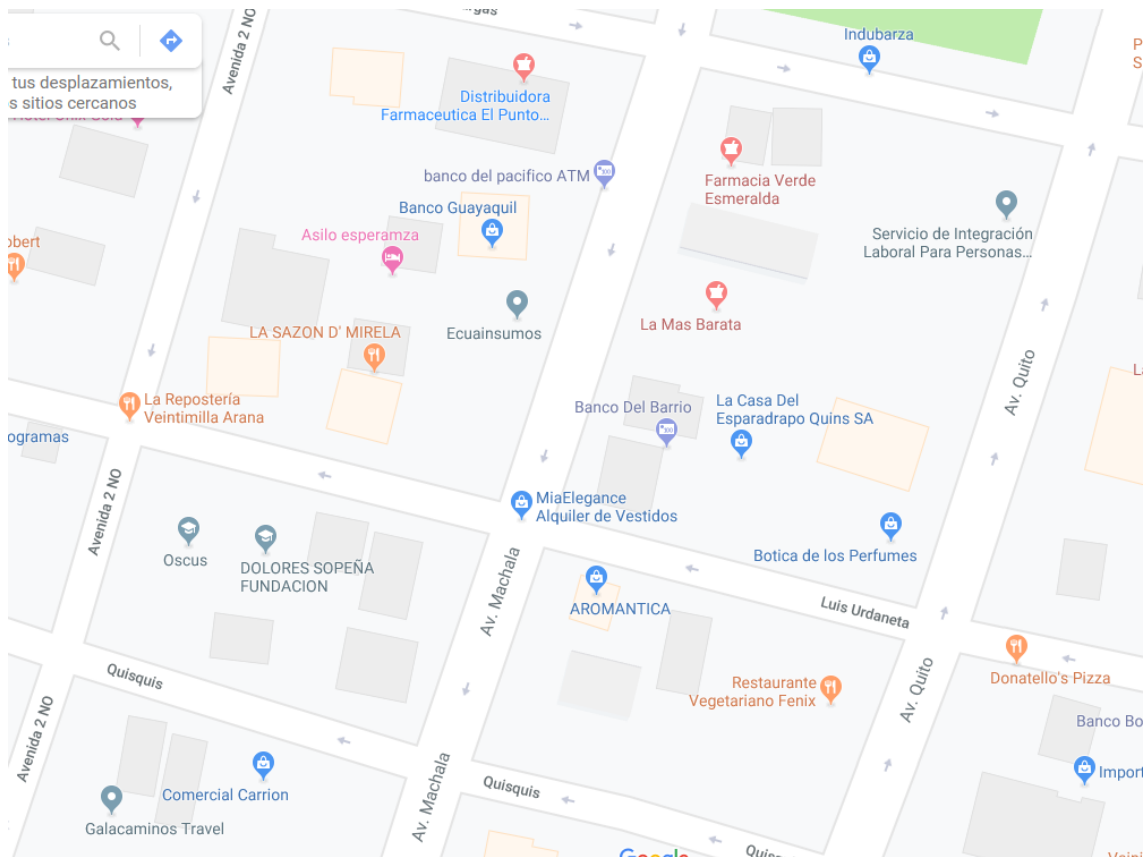


Figura 3.8 Av. Machala y Luis Urdaneta - Vista Superior Google Maps

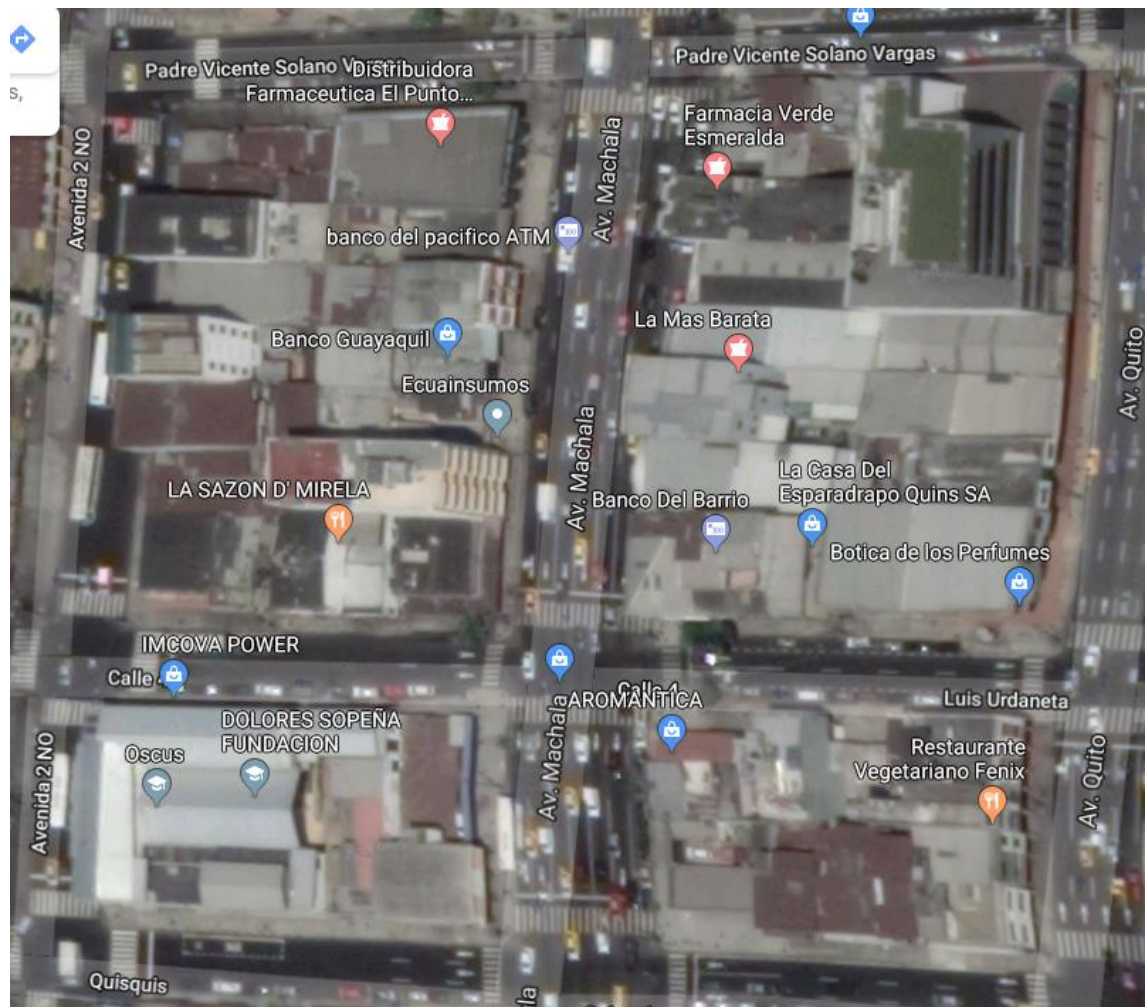


Figura 3.9 Av. Machala y Luis Urdaneta - Vista Satelital Google Maps



Figura 3.10 Av. Machala y Luis Urdaneta – Street View Google Maps

Posterior a la obtención de las dimensiones de todos los edificios del área escogida se realiza el modelado 3D de estos mediante el *Editor de Ciudad* del *Wireless Insite* como se muestra en la *Figura 3.11*. Finalmente se obtiene un entorno urbano 3D en la *Figura 3.12*.

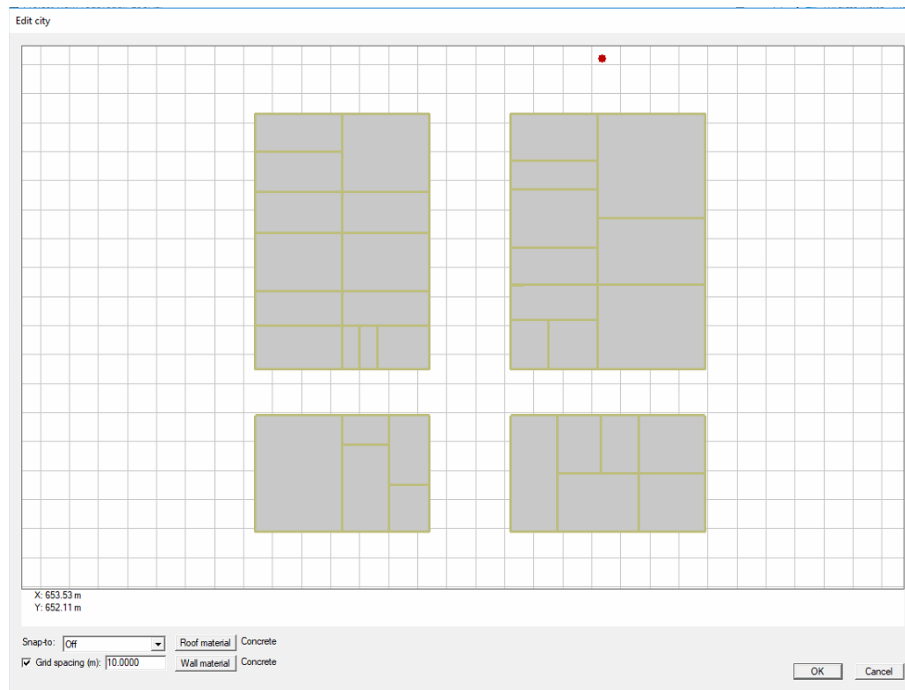


Figura 3.11 Modelado de Edificios en el Editor de Ciudad

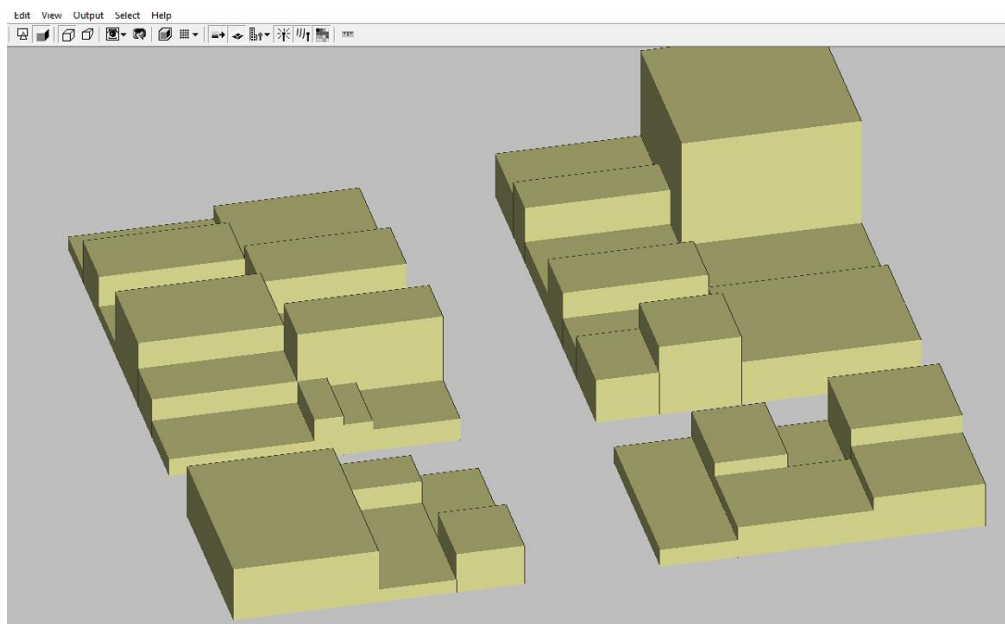


Figura 3.12 Av. Machala y Luis Urdaneta 3D - Wireless Insite

3.6 Importación de Modelos 3D al Wireless Insite

Los diseños de las partes del vehículo modeladas en 3D en *Autocad* deben ser importadas al *Wireless Insite* por lo cual es necesario guardarlos como archivo DXF [16] ya que de esta forma el software puede reconocer el modelo como un objeto. En la *Figura 3.13* se presenta un modelo de vehículo 3D importado al software de simulación.

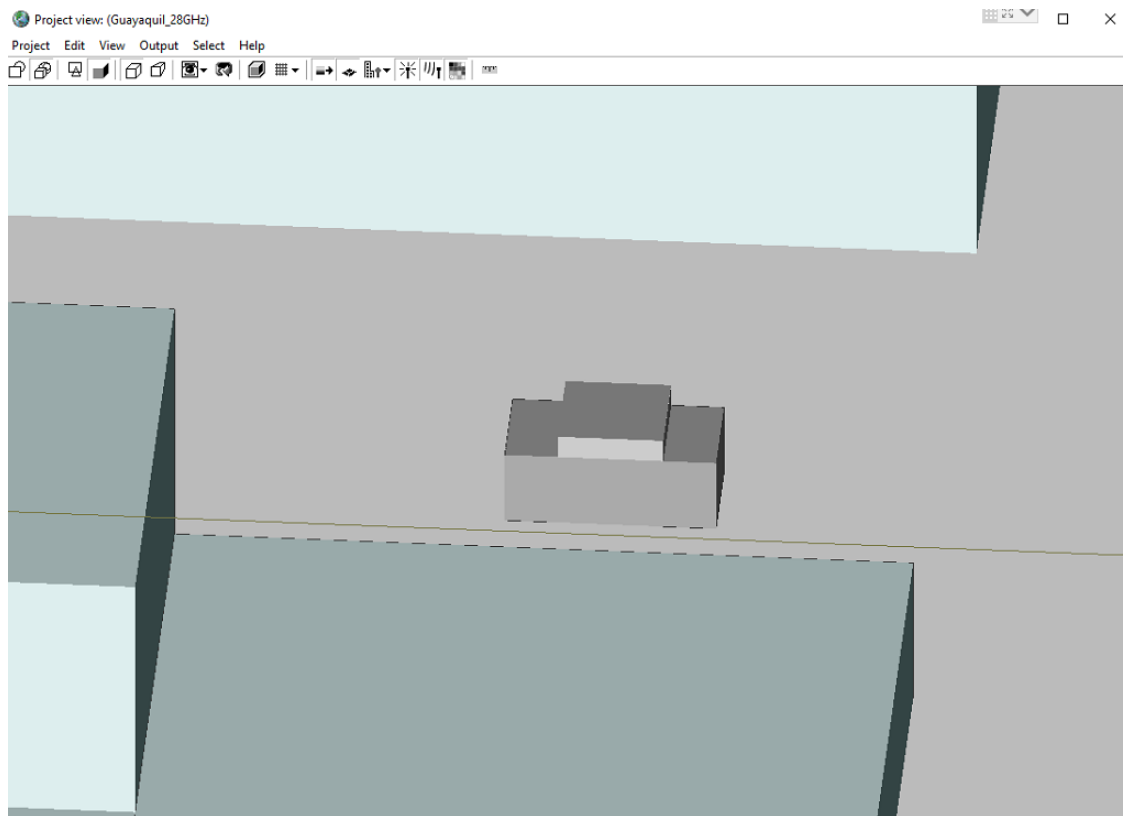


Figura 3.13 Vehículo Importado a Wireless Insite

3.7 Configuración de Parámetros Constitutivos

Todos los elementos que conforman el entorno urbano dentro del *Wireless Insite* deben tener correctamente configurado sus parámetros constitutivos para que los resultados de simulación sean consistentes con el entorno real. El software provee diferentes tipos de materiales comunes como el del terreno, edificios, madera, vidrio, entre otros, que pueden ser asignados a los elementos de este proyecto. En

este caso, se asigna *Concrete* para los edificios modelados en el software, *PEC* para la parte metálica del vehículo y *Earth* para el terreno del proyecto.

El material *Glass* del software no puede ser asignado a la parte de vidrio del vehículo de este proyecto debido a que sus parámetros constitutivos pertenecen al de un vidrio para frecuencias menores a 1 GHz, por lo cual se debe crear un nuevo material de vidrio para la frecuencia de 28 GHz para este proyecto. Para esto se hará uso de los datos proporcionados del documento "*Ray-tracing based analysis of channel characteristics and capacity improvement capabilities of spatial multiplexing and beamforming at 15 and 28 GHz*" [20] los cuales se presentan en la *Tabla 1*, estos parámetros sirven para el material de vidrio en un enlace de 28 GHz, tal como se requiere en este proyecto.

Tabla 1 Permitividad y Conductividad de Modelo Vehicular Outdoor [20]

Material	Dielectric constant		Conductivity <i>S/m</i>	
	15 GHz	28 GHz	15 GHz	28 GHz
Concrete	5.31		0.2919	0.4838
Brick	3.75		0.038	
Metal	1		10^7	
Glass (normal)	6.27		0.1086	0.2287
Glass (metallic)	6.27		15	
Wood	5		0	
Terrain (dry ground)	3		0.1380	0.6652

3.8 Creación del Área de Estudio

Para ejecutar el proyecto dentro del software es necesario definir el área que se tomará en cuenta para la simulación, esta es conocida como *Área de Estudio* se crea mediante la ventana que se muestra en la *Figura 3.14*. En la *Figura 3.15* se puede apreciar el entorno urbano encerrado en el área de estudio, todo lo que esté dentro será simulado.

Study area properties

Short description: studyarea	Automatic
Coordinate system: Cartesian	Propagation model: Full 3-D
Zone:	
Ellipsoid: WGS-84	Ray spacing (°): 0.2500
Origin longitude: dec 77.0728133744574 E	Number of reflections: 6
dms	Number of transmissions: Auto
Origin latitude: dec 38.8949219816694 N	Number of diffractions: 1
dms	Raytracing method: SBR
Elevations relative to: Terrain	

Advanced... Allowed interactions... Edit control points... Edit boundary OK Cancel

Figura 3.14 Creación Área de Estudio

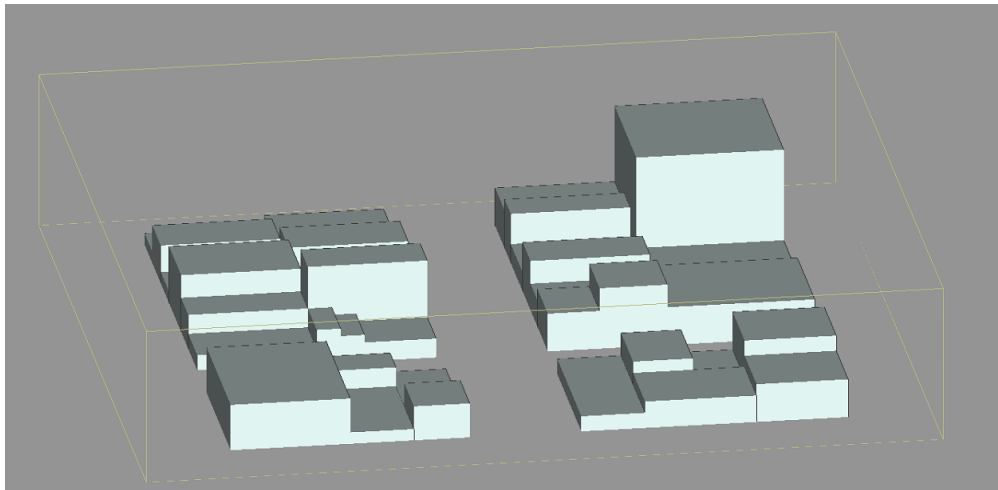


Figura 3.15 Área de Estudio

3.9 Diseño de Distribución de Vehículos

Para simular el escenario urbano cercano a la realidad se realizó una distribución de vehículos en el software acorde a fotografías realizadas por los autores de este proyecto y captura de *Google Maps* en Av. Machala y Luis Urdaneta, como se muestra a continuación.



Figura 3.16 Av. Machala



Figura 3.17 Luis Urdaneta

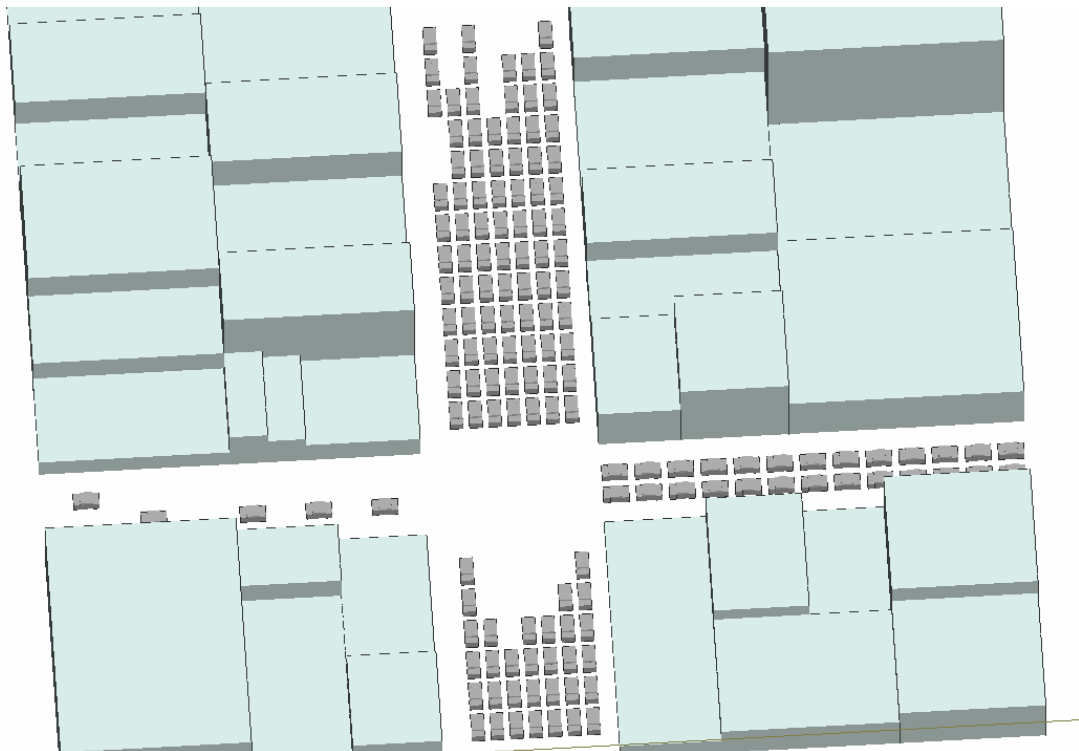


Figura 3.18 Distribución de Vehículos en el Software

3.10 Creación de Antena Transmisora

Se debe configurar la forma de onda del enlace de comunicaciones para realizar la simulación, en el caso de este proyecto sería una onda sinusoidal con frecuencia de 28 GHz.

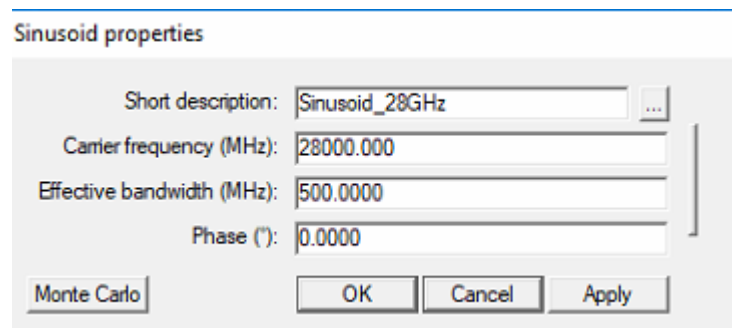


Figura 3.19 Enlace de 28 GHz

Una vez creado el tipo de onda dentro del software, este puede ser asignado a la antena transmisora. Para la estación base se eligió la antena HGSN28V1790 [21] la cual es sectorial de 90° con ganancia de 17dBi que opera a la frecuencia de 28 GHz. Inicialmente se coloca la estación base en la esquina de la intersección tal como se ve en la *Figura 3.20*, luego de realizar la simulación se probará variando la ubicación y la altura de la antena, lo cual será explicado en el siguiente capítulo de Análisis de Resultados.

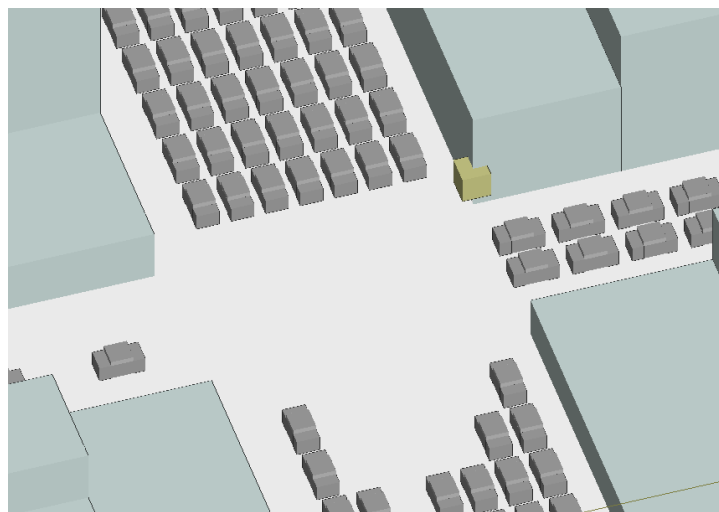


Figura 3.20 Estación Base (Cubo Amarillo)

3.11 Creación de Grupos de Receptores

En las zonas peatonales se realiza un despliegue de receptores separados en 4 grupos, uno para cada cuadra y cubriendo toda la zona peatonal. Estos receptores están separados entre ellos a 1 metro de distancia y tienen una elevación de 1.5 metros para simular la altura promedio de un móvil levantado durante su uso. [22]

En la *Figura 3.21* se muestra el escenario urbano completo dentro del software de simulación, con los grupos de receptores incluidos. Para efectos de simulación y obtención de las potencias recibidas se optó por elegir antenas isotrópicas para los receptores.

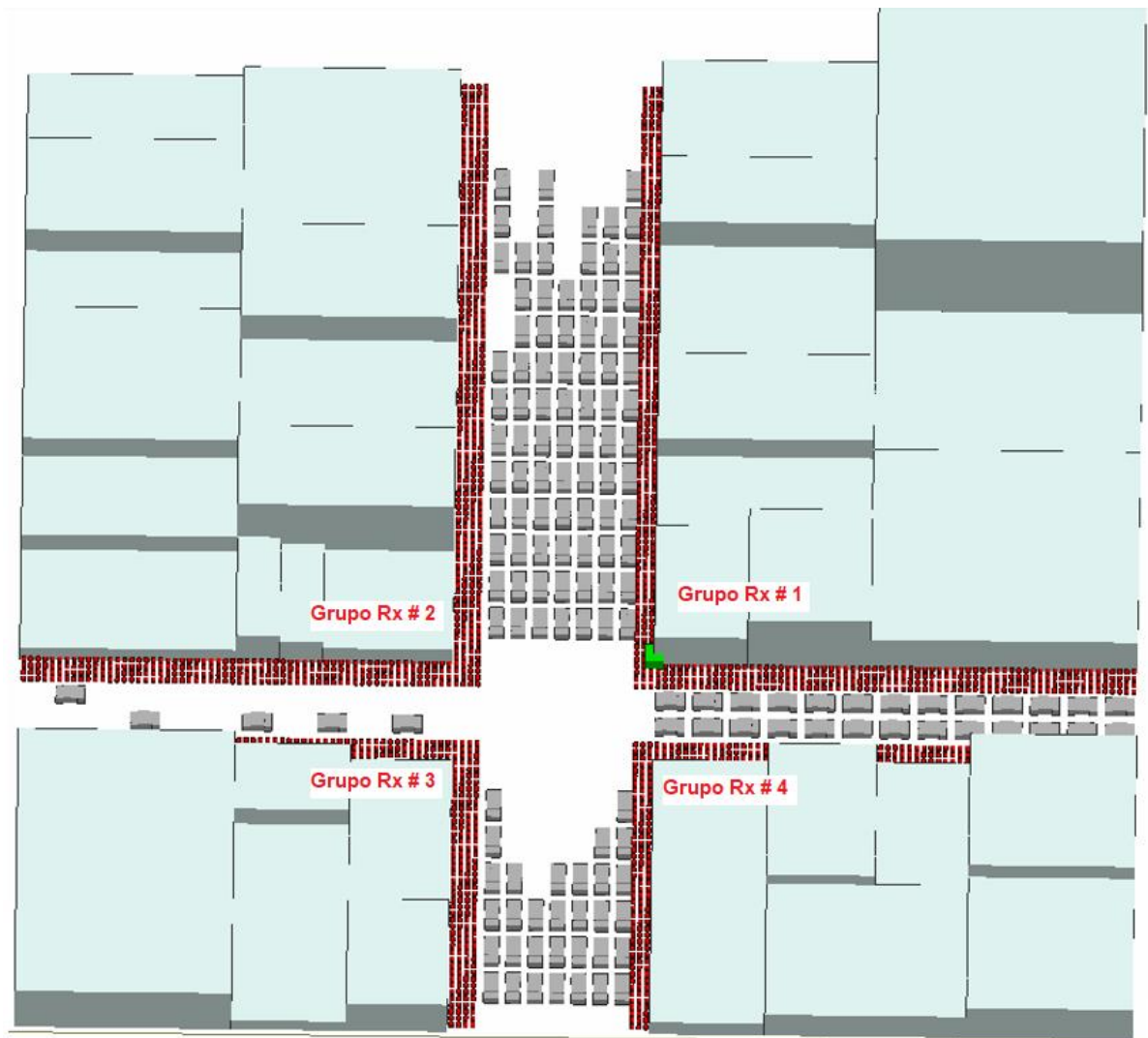


Figura 3.21 Escenario Urbano en Wireless Insite

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas del escenario urbano Av. Machala y Luis Urdaneta mediante el método de Trazado de Rayos. Se realiza un análisis de los niveles de potencia recibidos en los grupos de receptores de las zonas peatonales y se determina la altura óptima para la instalación de una estación base que opere en la banda de 28 GHz. Posterior a esto se describen las conclusiones de este proyecto integrador y se plantean recomendaciones para futuras mejoras.

4.1 Criterio Determinante de Altura Óptima

Para determinar la altura óptima de la estación base en el escenario urbano se utiliza la Función de Probabilidad Acumulativa (CDF) [23] para determinar la probabilidad que se reciba una potencia menor a -90dBm [24] en los grupos de receptores. El caso óptimo será aquel que tenga una menor probabilidad de que esto suceda, es decir el escenario en que se tenga un mayor porcentaje de receptores con una potencia de recepción mayor o igual a -90dBm será la mejor altura.

4.2 Análisis del Trazado de Rayos

Posterior al diseño del escenario urbano en el software, se realizaron múltiples simulaciones mediante el método de Ray Tracing para diferentes alturas de la antena transmisora (h_B). El resultado de las simulaciones se presenta a continuación con los rayos trazados sobre el entorno 3D.

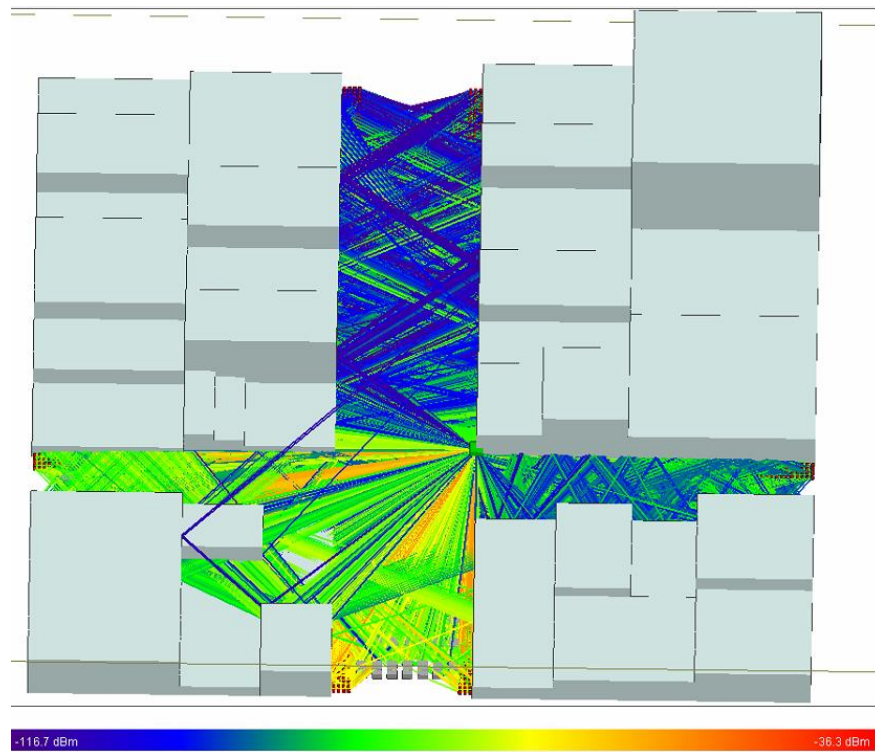


Figura 4.1 Ray Tracing $h_B=4\text{m}$

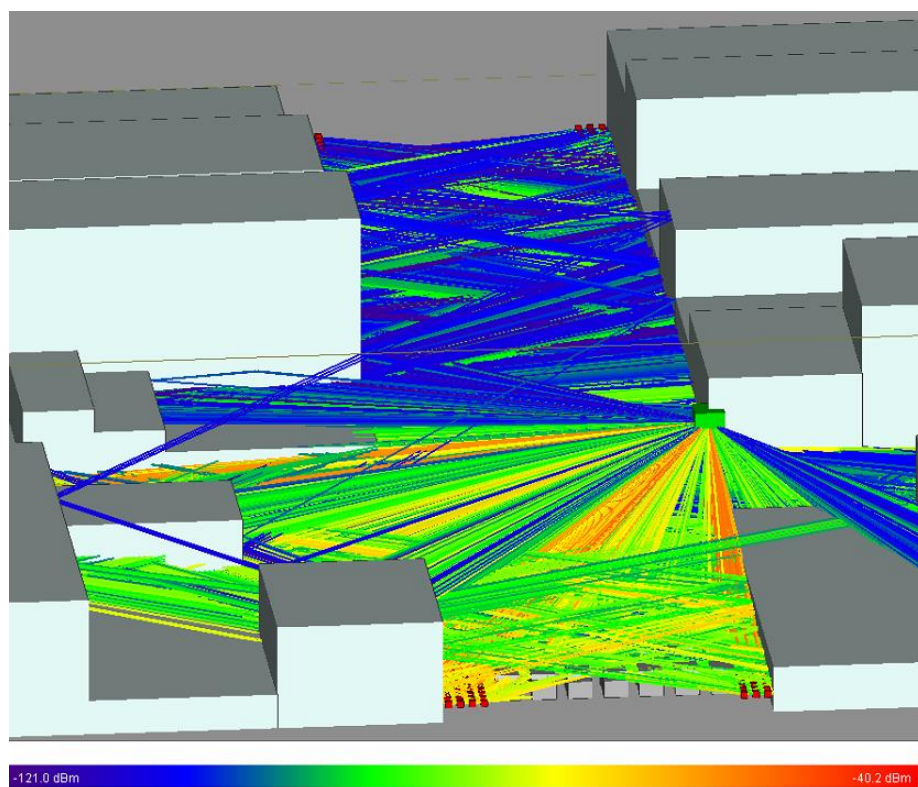


Figura 4.2 Ray Tracing $h_B=6\text{m}$

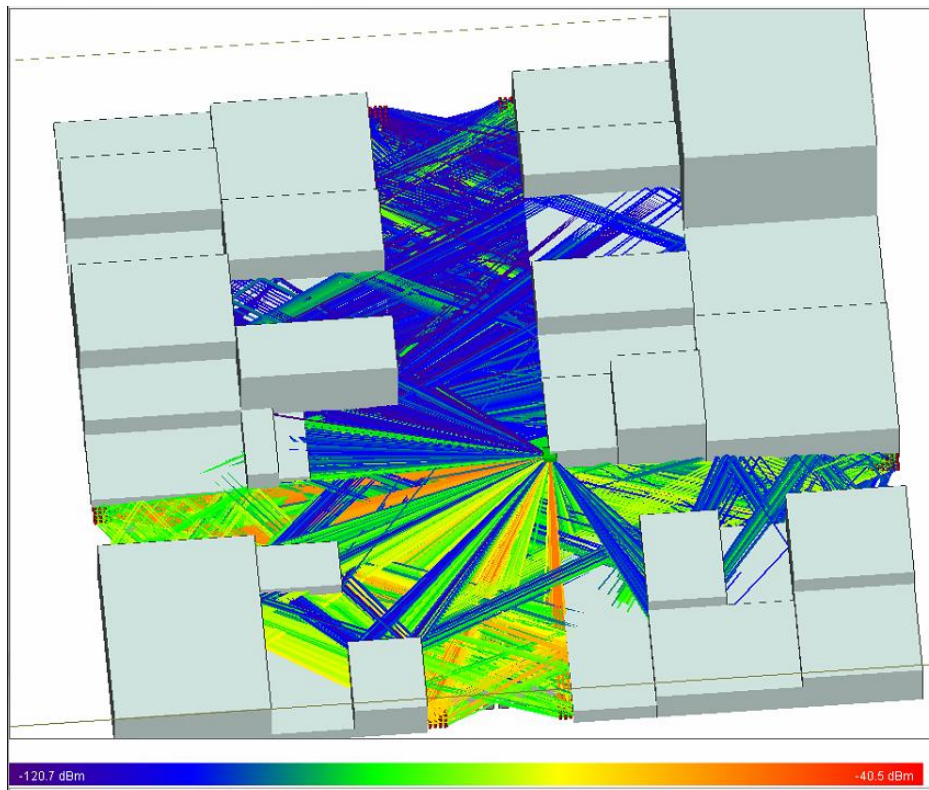


Figura 4.3 Ray Tracing $h_B=8\text{m}$

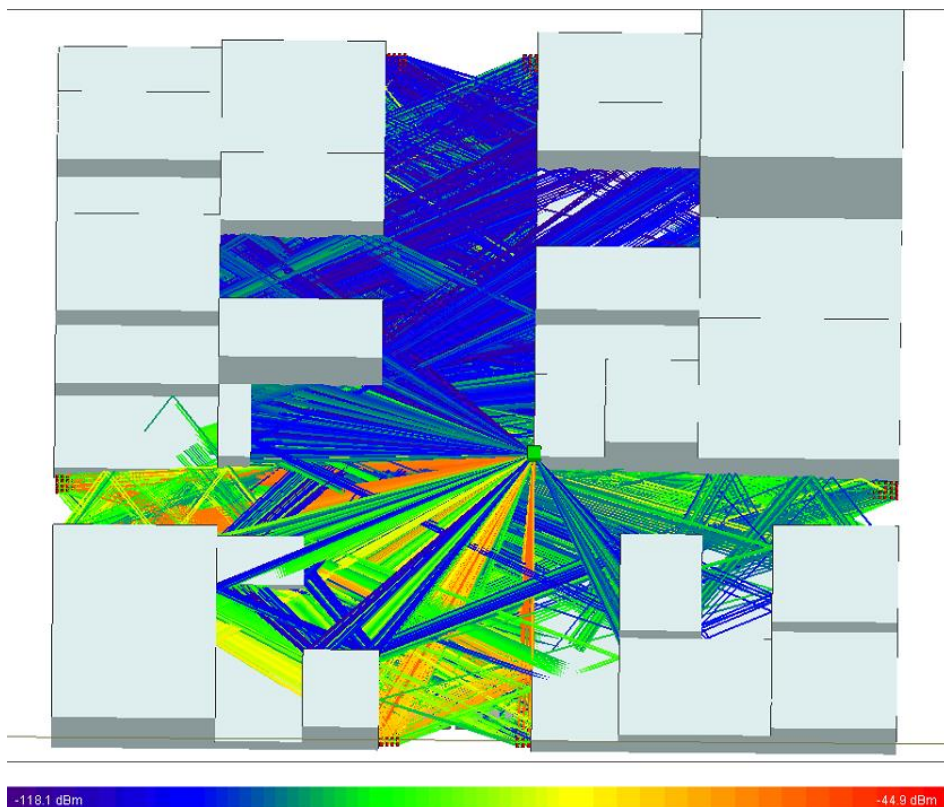


Figura 4.4 Ray Tracing $h_B=10\text{m}$

En las *Figura 4.1*, *Figura 4.2*, *Figura 4.3* y *Figura 4.4* se muestran las simulaciones finalizadas con el trazado de rayos sobre el entorno urbano 3D para alturas de la estación base de 4m, 6m, 8m y 10m respectivamente. El color de cada rayo trazado indica el valor de potencia recibida por el receptor al que llega. Los rayos de color azul indican una potencia aproximada de -120dBm, mientras que los rayos de color rojo indican los de mayor potencia, cercano a -40dBm. Para determinar con precisión las potencias recibidas por cada receptor es necesario consultar las Tablas de Potencia que se explican en la siguiente sección.

4.3 Análisis de las Tablas de Potencia

Una vez realizadas las simulaciones, *Wireless Insite* entrega una Tabla de Potencia en la cual presenta las potencias recibidas en cada receptor de los diferentes grupos de receptores en dBm. Para este proyecto se utilizó un total de 1968 receptores entre los 4 grupos de receptores desplegados por las zonas peatonales. Debido a la gran cantidad de receptores a continuación se presenta una tabla de potencias de los primeros 20 receptores del grupo 1 para una altura de transmisor de 3m.

Tabla 2 Potencias Recibidas $h_B=3m$

Rx#	X(m)	Y(m)	Z(m)	Distance (m)	Power (dBm)
1	4,93E-01	-5,03E-01	1,5	87,24	-78,87
2	1,49E+00	-5,03E-01	1,5	87,22	-73,26
3	2,49E+00	-5,03E-01	1,5	87,2	-79,75
4	4,93E-01	-1,50E+00	1,5	86,24	-84,29
5	1,49E+00	-1,50E+00	1,5	86,22	-73,98
6	2,49E+00	-1,50E+00	1,5	86,2	-77,03
7	4,93E-01	-2,50E+00	1,5	85,24	-74,31
8	1,49E+00	-2,50E+00	1,5	85,22	-74,31
9	2,49E+00	-2,50E+00	1,5	85,2	-90,21
10	4,93E-01	-3,50E+00	1,5	84,24	-87,64
11	1,49E+00	-3,50E+00	1,5	84,22	-85,24
12	2,49E+00	-3,50E+00	1,5	84,21	-79,79
13	4,93E-01	-4,50E+00	1,5	83,24	-80,07
14	1,49E+00	-4,50E+00	1,5	83,22	-80,88
15	2,49E+00	-4,50E+00	1,5	83,21	-86,18
16	4,93E-01	-5,50E+00	1,5	82,24	-75,28
17	1,49E+00	-5,50E+00	1,5	82,22	-73,59
18	2,49E+00	-5,50E+00	1,5	82,21	-82,48
19	4,94E-01	-6,50E+00	1,5	81,24	-73,5
20	1,49E+00	-6,50E+00	1,5	81,22	-80,8

Como se aprecia en la *Tabla 2* el software *Wireless Insite* entrega como resultado la ubicación exacta de cada receptor del grupo en coordenadas rectangulares y la distancia desde el transmisor hasta el mismo receptor en metros, además de la potencia recibida en dBm. Para el caso de la antena transmisora a una altura de 3 metros se obtienen potencias recibidas entre -73 dBm a -90 dBm por los primeros receptores del grupo 1, lo cual brinda una buena cobertura para esa zona. Para un análisis completo de todos los receptores se utilizan las gráficas CDF que se presentan en las siguientes secciones.

4.4 Análisis del Efecto de Presencia Vehicular en Zona Urbana

A continuación, se analizará el efecto provocado en las potencias de recepción debido a la presencia vehicular en el escenario urbano.

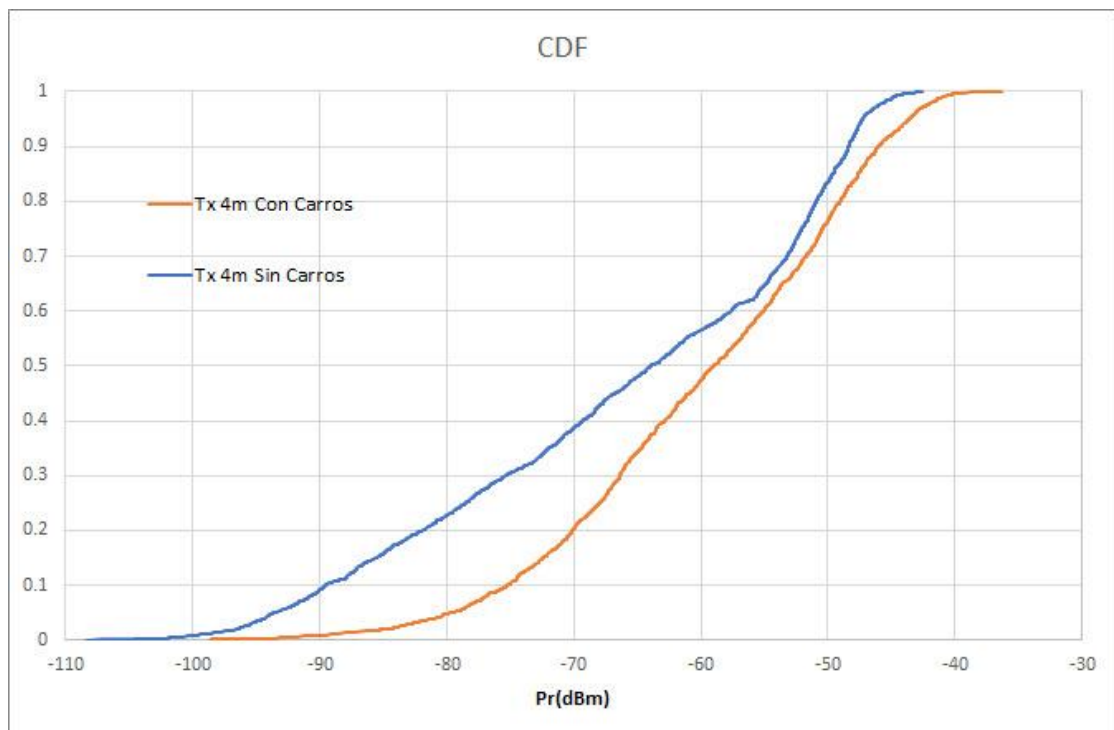


Figura 4.5 Presencia vs Ausencia de Carros CDF $h_B=4m$

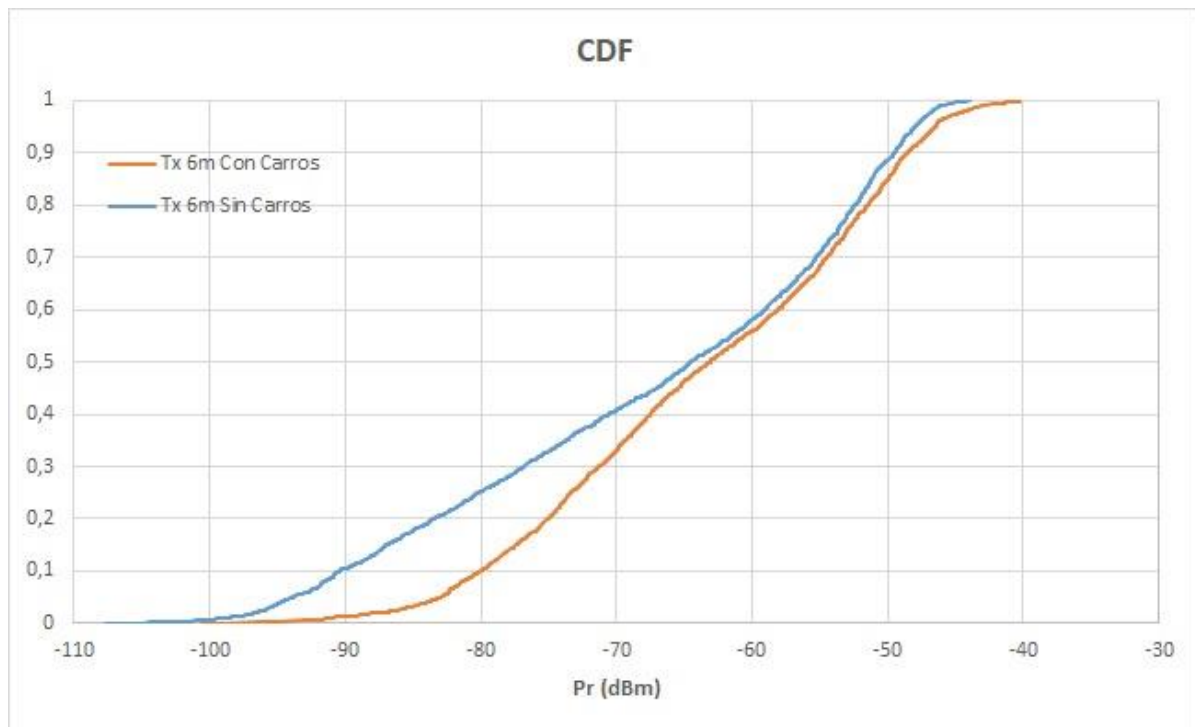


Figura 4.6 Presencia vs Ausencia de Carros CDF $h_B=6m$

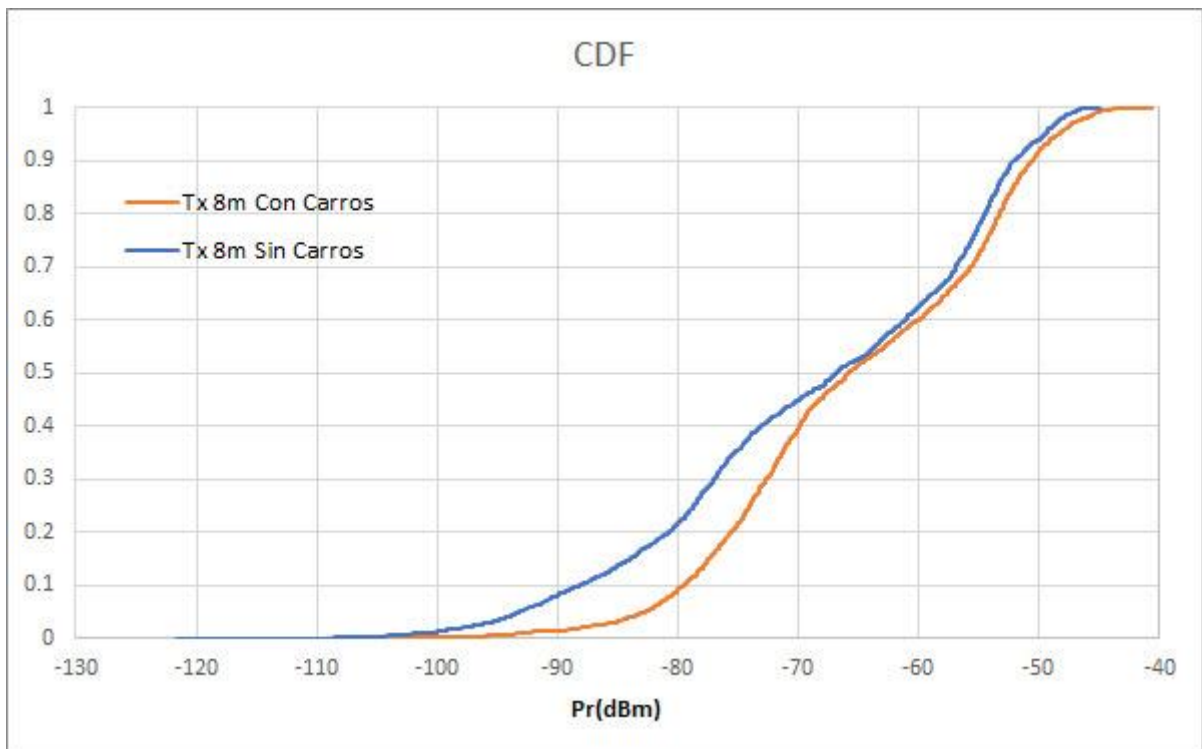


Figura 4.7 Presencia vs Ausencia de Carros CDF $h_B=8m$

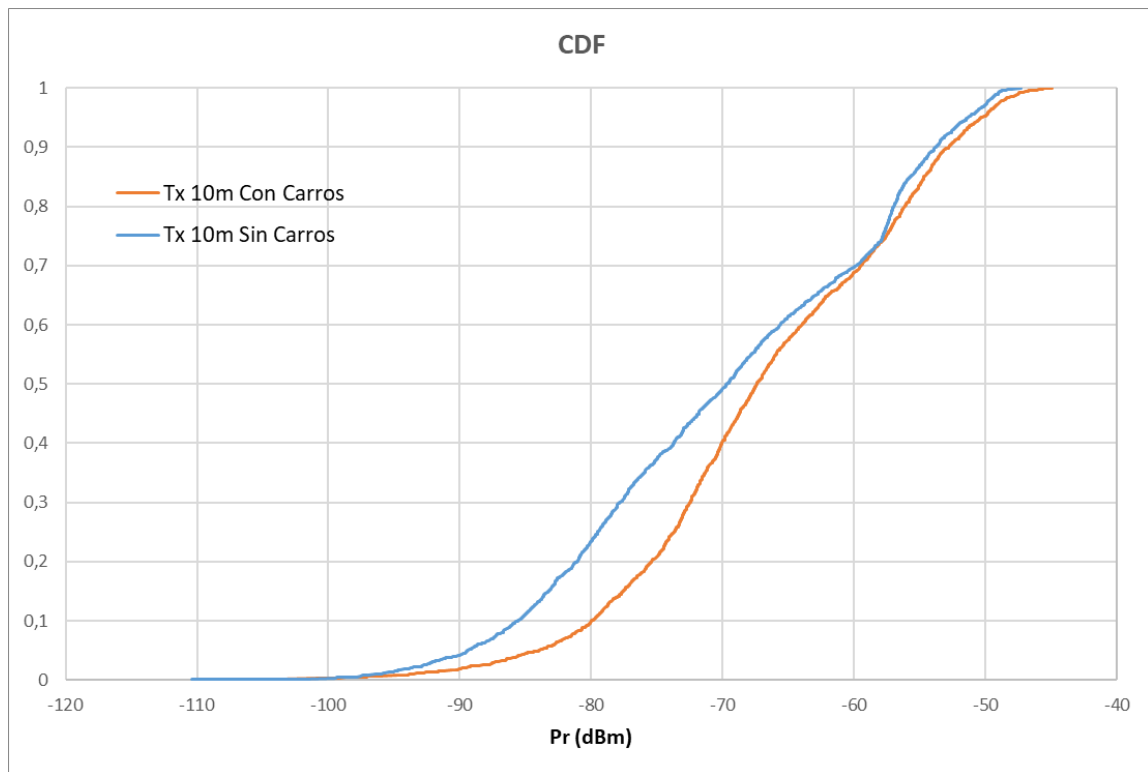


Figura 4.8 Presencia vs Ausencia de Carros CDF $h_B=10m$

De las gráficas presentadas se puede destacar que para una altura de transmisor de 4m existe una mayor diferencia entre la curva para un escenario con presencia y un escenario con ausencia vehicular. A mayor altura del transmisor la diferencia entre las potencias recibidas con presencia y ausencia vehicular tiende a ser menor.

Se observa que, para el caso específico de este proyecto, en la zona urbana Av. Machala y Luis Urdaneta la presencia de vehículos incrementa la potencia de recepción en los grupos de receptores comparado al escenario con ausencia vehicular, contrario a lo que se esperaba. Para esta zona urbana la presencia de vehículos beneficia la comunicación en la banda de 28 GHz debido a la posición de la antena transmisora, receptores, distribución de vehículos y de edificios. En la *Figura 4.5* se aprecia de mejor forma esto. Esta gráfica nos indica que la probabilidad de que en el grupo de receptores se reciba una potencia menor a -90 dBm es del 10% en ausencia vehicular, mientras que en presencia vehicular se tiene el 1% aproximadamente. En resumen, en esta simulación se obtuvo que el 99% de los receptores totales en presencia vehicular reciben una potencia mayor

a -90 dBm, es decir una cobertura aceptable, mientras que en ausencia vehicular se tiene un 90%. Este comportamiento se repite en la *Figura 4.6*, *Figura 4.7* y *Figura 4.8*.

La potencia recibida en los receptores se incrementa en presencia vehicular para este caso debido a que, en la mayoría de las ocasiones, durante la trayectoria los rayos en ausencia vehicular rebotaban únicamente sobre los edificios de concreto, mientras que en presencia vehicular estos mismos rayos rebotan sobre el metal de los carros y en algunas ocasiones reduce el recorrido del rayo desde el transmisor hasta su destino. Al verse reducida esta trayectoria se tiene una menor pérdida [25] por camino en espacio libre, por lo cual la potencia recibida es mayor. Adicionalmente, estos rayos al rebotar sobre los vehículos en lugar de rebotar sobre los edificios ocasionan que exista una menor pérdida por reflexión [26] debido a que el concreto tiene una mayor pérdida por reflexión que un metal. Esto se aprecia en la *Figura 4.9*, en ausencia de vehículos el receptor # 533 del segundo grupo recibe -63.15 dBm de potencia, mientras que en presencia vehicular el mismo receptor para un mismo rayo recibe -57.27 dBm debido a lo explicado previamente.

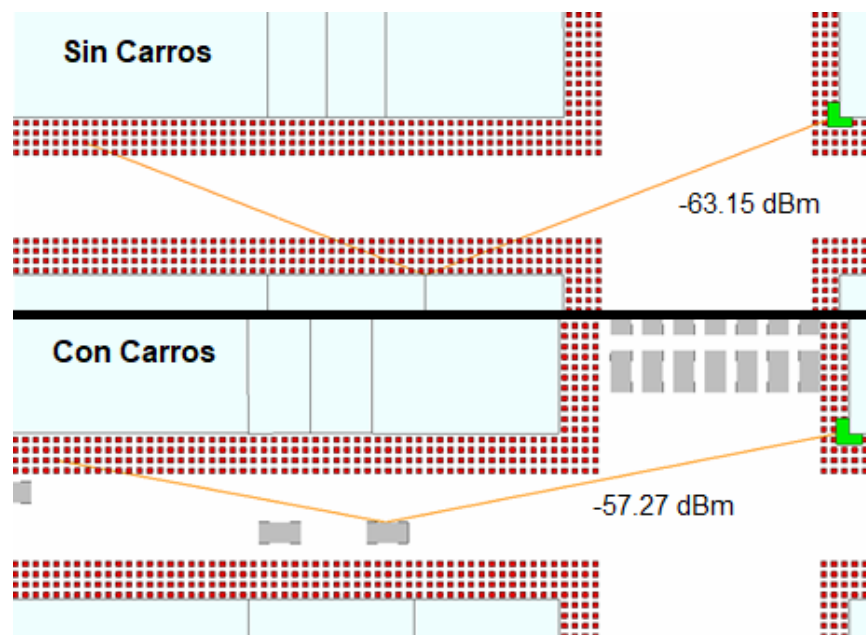


Figura 4.9 Diferencias de trayectoria de rayo entre Ausencia y Presencia Vehicular

4.5 Estimación de la Altura Óptima para la Estación Base

Para determinar la altura óptima de la antena transmisora en esta zona urbana se realiza una comparación entre las CDF de los resultados para las diferentes alturas simuladas. Esto se presenta a continuación en la *Figura 4.10*.

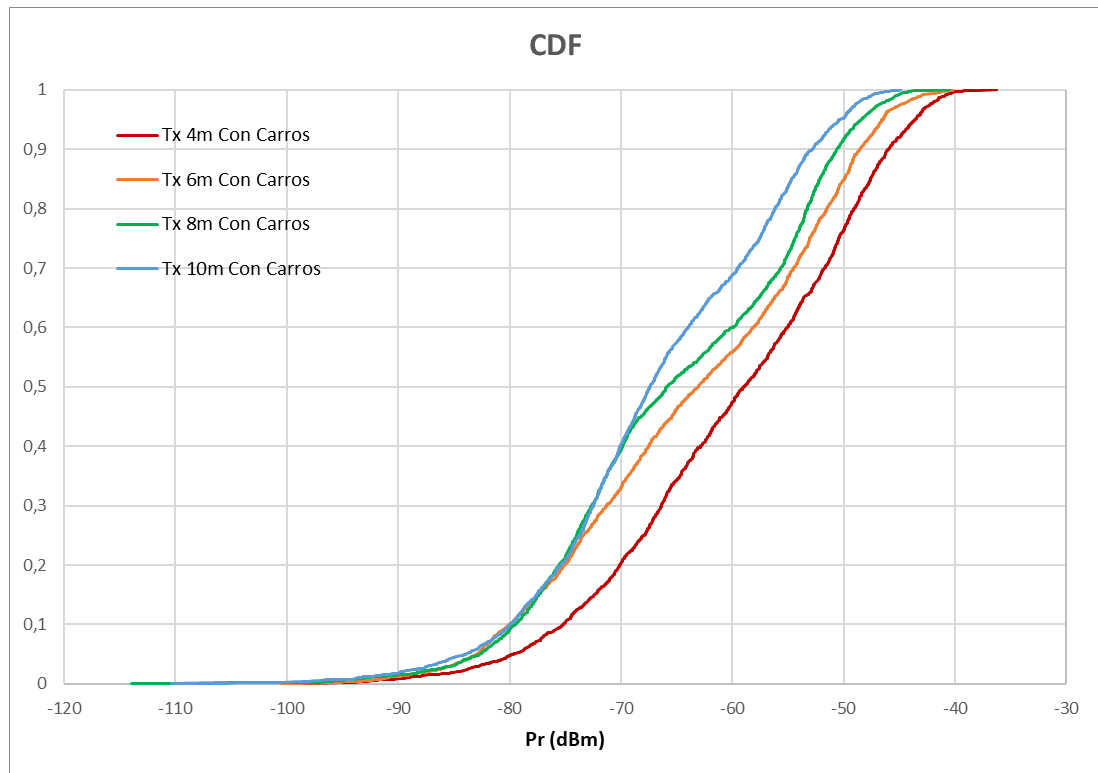


Figura 4.10 Comparación CDF para $h_B= 4m, 6m, 8m$ y $10m$ en Presencia Vehicular

De esta gráfica se puede concluir que la altura que ofrece mayor potencia recibida en los grupos de receptores en presencia vehicular es $h_B= 4m$. No obstante, la diferencia en la gráfica en -90 dBm con las curvas de las otras alturas no es grande. Por lo cual, para decidir correctamente la altura óptima también se debería analizar para el caso de ausencia vehicular. De esta forma se espera tener un alto porcentaje de receptores con potencia por encima de los -90 dBm en un escenario con y sin vehículos. Para esto se procede a analizar la *Figura 4.11*.

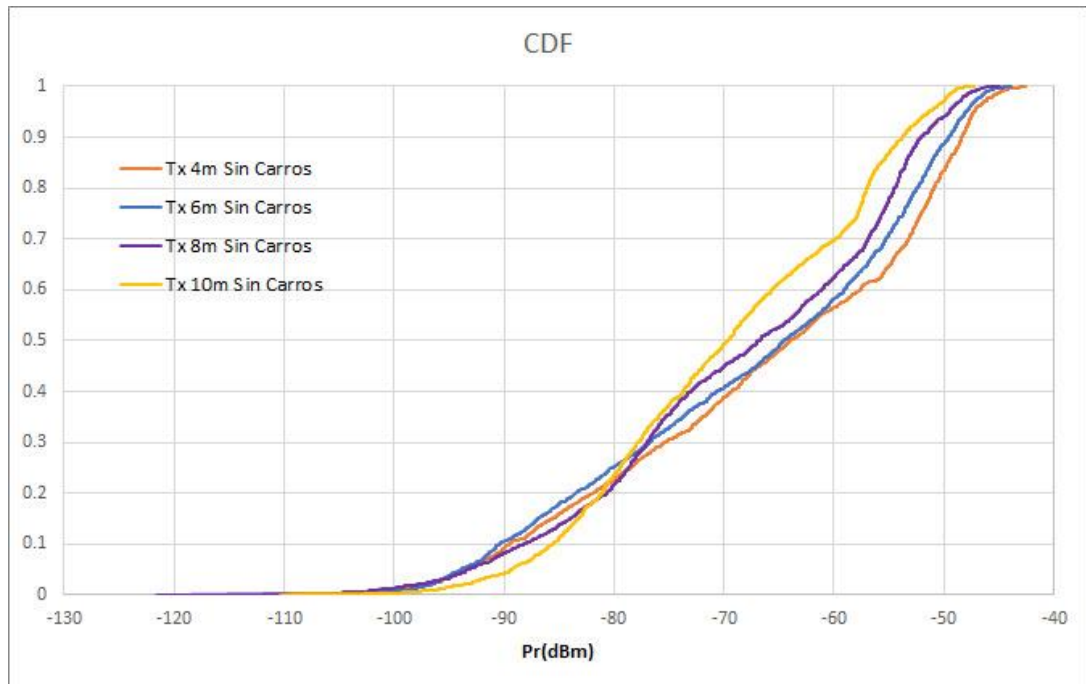


Figura 4.11 Comparación CDF para $h_B = 4\text{m}$, 6m , 8m y 10m en Ausencia Vehicular

En esta gráfica, claramente se observa que para una altura de la estación base de $h_B = 10\text{m}$ se tiene la menor cantidad de receptores con potencias por debajo de los -90 dBm . Para el caso de $h_B = 4\text{m}$ el porcentaje de receptores con mala cobertura es la mayor del resto de curvas, por lo cual tiene que ser descartada esta opción a pesar de que para el escenario con presencia vehicular era el óptimo. Debido a esto, se concluye que la altura óptima para este proyecto es de $h_B = 10\text{m}$. En la *Tabla 3* se aprecia de mejor forma la diferencia entre las alternativas de altura con y sin carros, junto con la altura óptima seleccionada.

Tabla 3 Porcentaje de Receptores con Potencia Aceptable

% Rx's > -90 dBm	Sin Carros	Con Carros	Promedio
$h_B = 4\text{m}$	90,80%	99,09%	94,94%
$h_B = 6\text{m}$	89,43%	98,68%	94,05%
$h_B = 8\text{m}$	91,77%	98,48%	95,12%
$h_B = 10\text{m}$	95,78%	98,12%	96,95%

4.6 Análisis de Potencias Recibidas para Altura Óptima de Estación Base

Con la altura óptima seleccionada para la antena transmisora seleccionada $h_B=10\text{m}$ se procede a graficar la CDF para los grupos de receptores por separados para determinar las zonas con mejor cobertura en la *Figura 4.12* en ausencia vehicular y en la *Figura 4.13* en presencia vehicular.

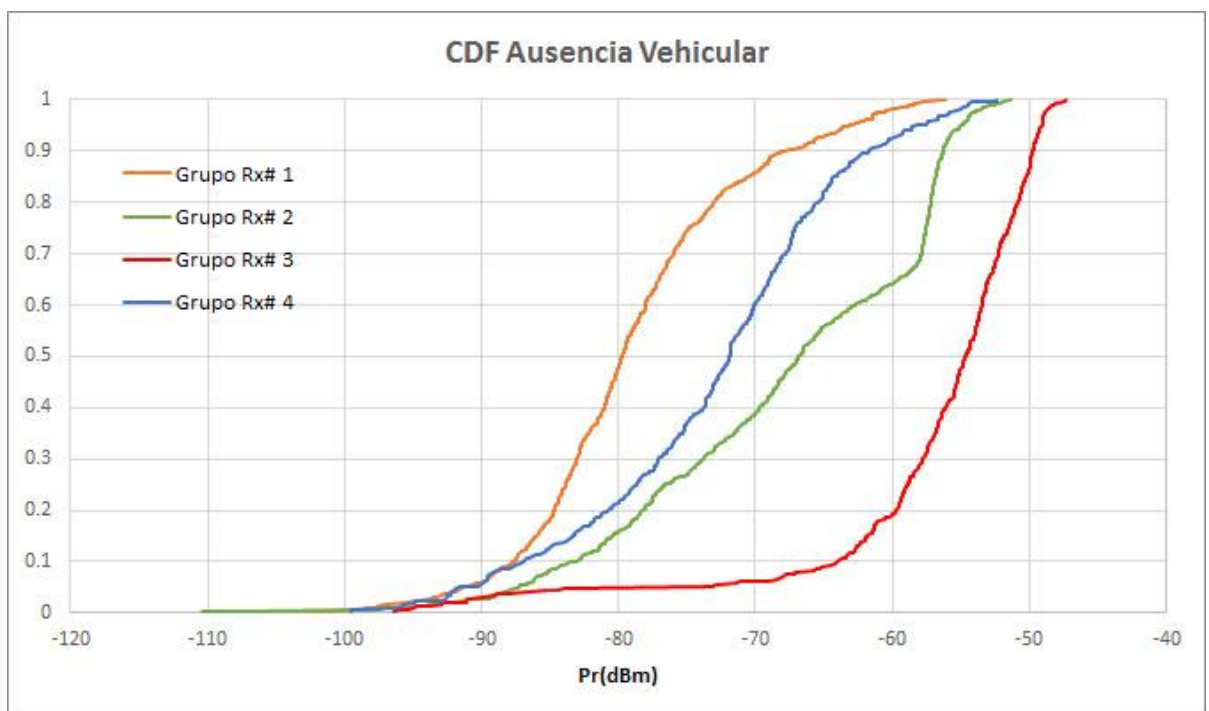


Figura 4.12 Potencia en los Grupos de Receptores para Altura Óptima en Ausencia Vehicular

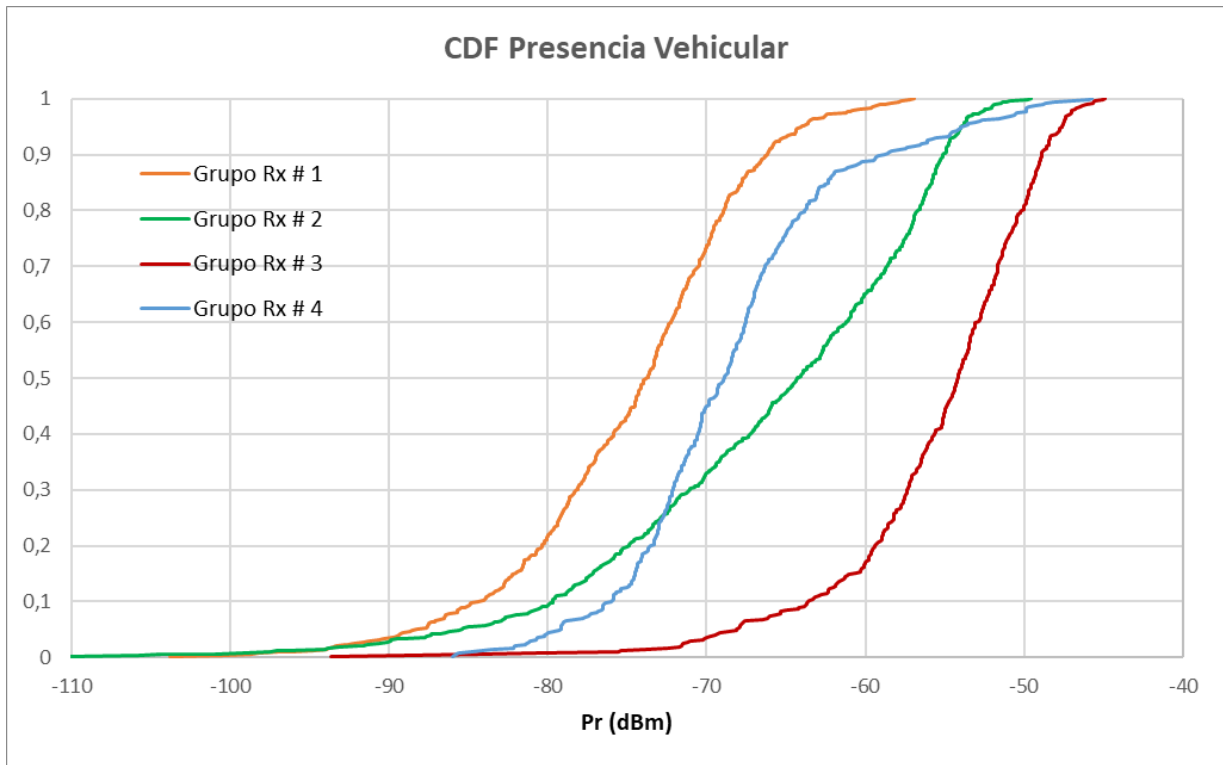


Figura 4.13 Potencia en los Grupos de Receptores para Altura Óptima en Presencia Vehicular

En ambas gráficas el grupo de receptores que mayor potencia recibe es # 3 como era de esperarse debido a que la antena transmisora está apuntando en la dirección donde se ubica ese grupo. El orden de las curvas se mantiene tanto en ausencia como en presencia vehicular, con la excepción de que en -73 dBm aproximadamente ocurre un cruce entre las curvas del grupo # 2 y # 4, y para potencias menores a ese valor, el grupo # 4 supera al # 3 en presencia vehicular.

4.7 Estimación de ubicación óptima de Estación Base

Una vez obtenida la altura óptima para la estación base de $h_B = 10\text{m}$ en este escenario urbano, lo siguiente es determinar si efectivamente la ubicación de la antena transmisora es la óptima o desplazarla hacia uno de los lados del edificio proveería de un mayor rendimiento. En las simulaciones realizadas anteriormente se ha colocado la antena transmisora siempre en la esquina del edificio mostrado en la *Figura 3.20*. Posteriormente, se simula el escenario con la altura óptima pero

desplazada la estación base 5 metros en dirección contraria de la calle Luis Urdaneta y 5 metros en dirección contraria de Av. Machala, como se muestra en la *Figura 4.14*, ambas en ausencia vehicular para evitar la extensa duración de simulación en presencia de vehículos.

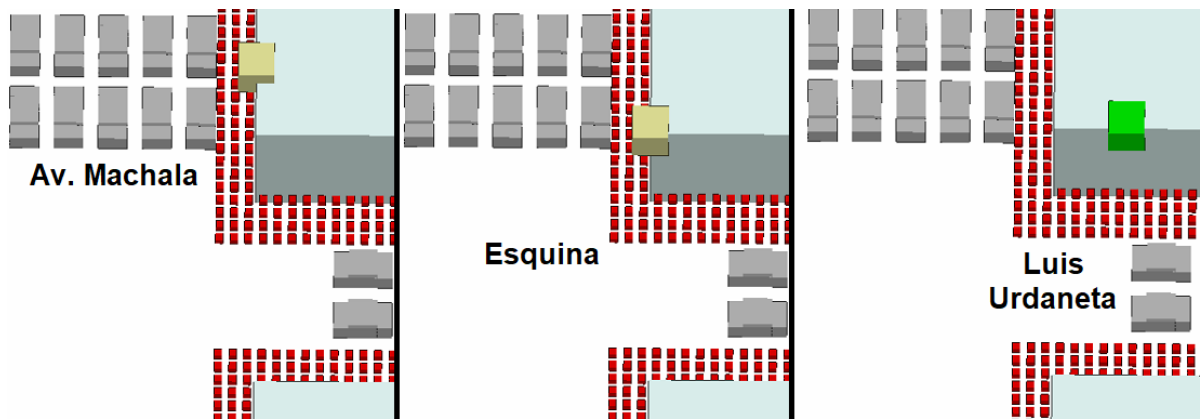


Figura 4.14 Ubicaciones Alternativas para la Estación Base

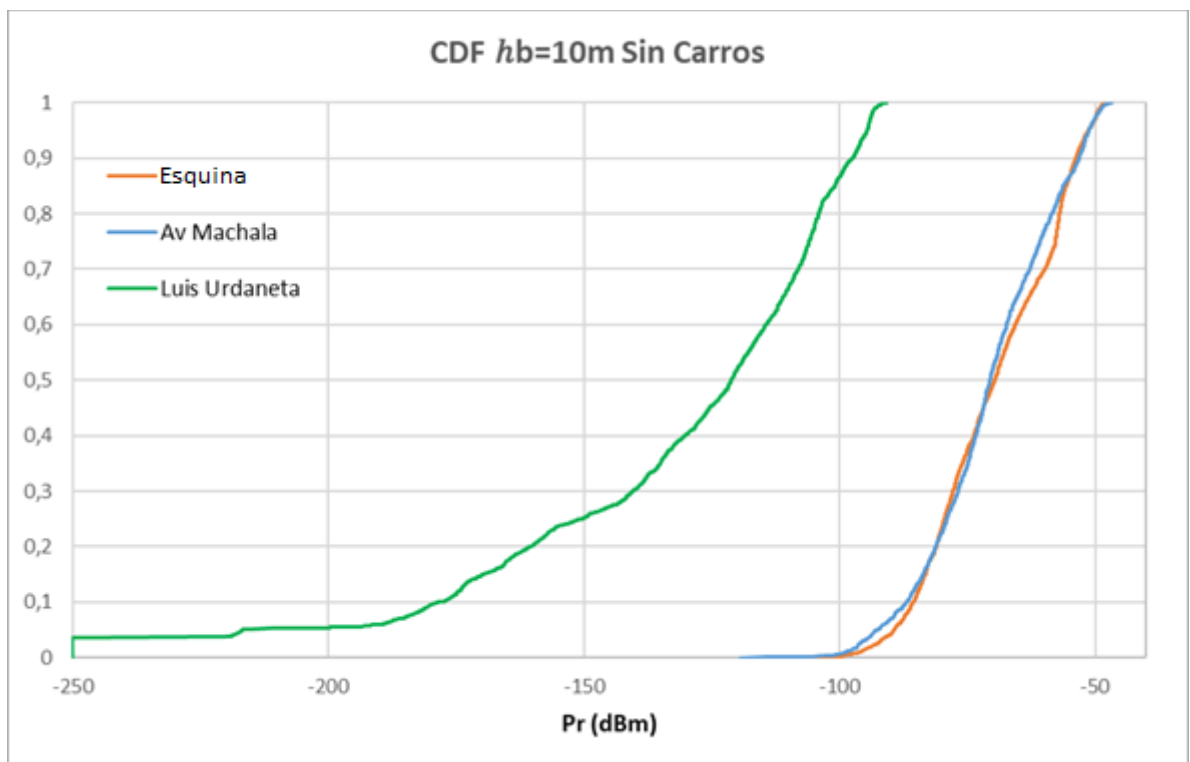


Figura 4.15 Comparación de ubicaciones de la Estación Base

En la *Figura 4.15* se aprecia claramente que ubicar la estación base desplazada hacia Luis Urdaneta es el peor escenario. Colocar la antena transmisora en la esquina del edificio sigue siendo la ubicación óptima para este escenario. Finalmente, en la *Figura 4.16* se muestra una comparación de función de densidad de probabilidad entre el escenario con presencia y en ausencia vehicular. Mediante esta gráfica se puede observar la ventaja que tiene el escenario con vehículos debido a que su curva se encuentra centrada hacia valores de potencia mayores que el escenario sin carros.

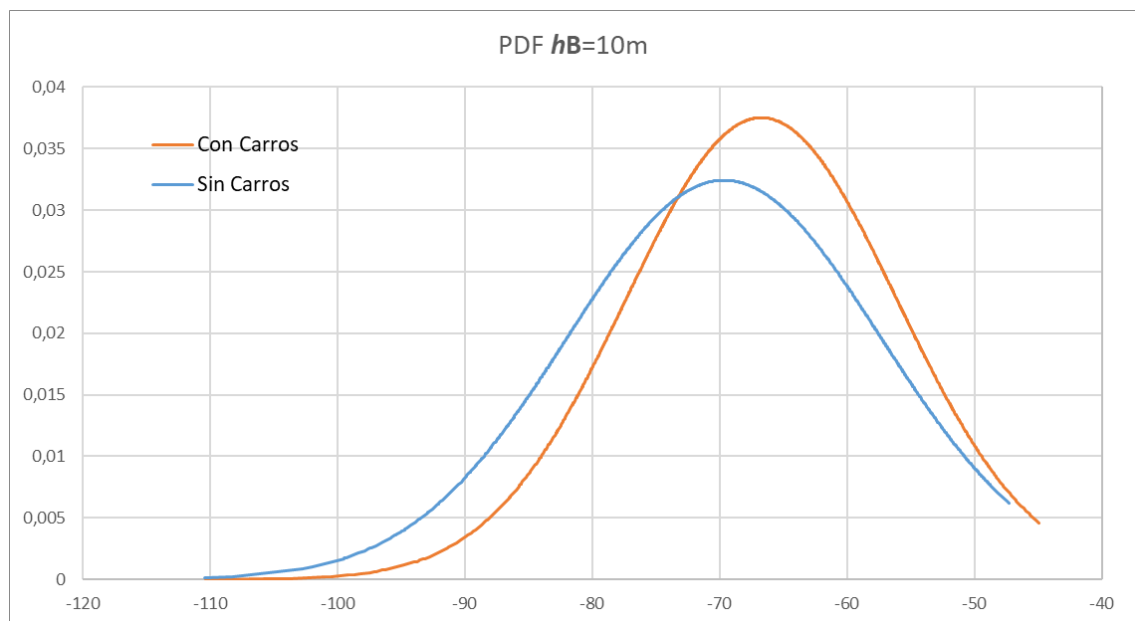


Figura 4.16 Comparación PDF para Altura Óptima

4.8 Conclusiones

Acorde a las gráficas presentadas anteriormente se puede concluir que a medida que se incremente la altura de la antena transmisora, la diferencia entre las potencias de recepción en presencia y ausencia vehicular disminuye. Además, la presencia de vehículos en la zona urbana de Av. Machala y Luis Urdaneta provoca el incremento de la potencia recibida en los grupos de receptores debido a la disminución de recorrido de los rayos y de la reducción de pérdida por reflexión en el metal del vehículo comparado al concreto de los edificios. Es decir, la presencia vehicular para el caso específico de este proyecto genera una mejora en las comunicaciones en la banda de 28 GHz debido a la ubicación alta de la antena transmisora.

El escenario óptimo en el que los grupos de receptores desplegados en las zonas peatonales establecerán una comunicación aceptable con la estación base ocurre con las condiciones en que la antena transmisora se encuentre a una altura de $h_B = 10\text{m}$ y ubicada en la esquina del edificio. En este caso, el 98.12% de los receptores totales obtendrán una potencia de recepción por encima de -90 dBm en presencia vehicular, mientras que en ausencia de vehículos será el 95.78%. Por lo cual, la empresa WitPro deberá instalar la estación base en la ubicación y altura mencionada para brindar el servicio de telefonía móvil 5G para un rendimiento óptimo de las comunicaciones en la zona urbana de Av. Machala y Luis Urdaneta.

Con la altura y ubicación óptima de la antena transmisora, el grupo de receptores # 3 recibe la mayor potencia debido a que la estación base está apuntada en su dirección.

Al elevar la antena transmisora $h_B = 10\text{m}$ y ubicarla en la esquina del edificio, se logró mediante simulación que la presencia vehicular beneficie en lugar de perjudicar la comunicación en la banda de 28 GHz para la zona urbana de Av. Machala y Luis Urdaneta.

4.9 Recomendaciones

Durante la ejecución de este proyecto se presentaron múltiples problemas en la importación del modelo vehicular 3D lo que retrasó la ejecución de las simulaciones. Además, debido a la gran cantidad de vehículos se colocó las simulaciones duraban aproximadamente 24 horas. Mediante preprocesamiento y reducción de la cantidad de vehículos se logró tiempos de simulación cercanos a las 12 horas cada escenario, razón por la cual se analizó alturas de la estación base para 3m, 4m, 6m, 8m y 10m, y también debido a esto solo se simuló una distribución de vehículos y el escenario de ausencia vehicular. Se recomienda realizar simulaciones con muchas distribuciones de carros diferentes para lograr promediar los resultados y plantear una altura óptima de estación base generalizada y de esta forma funcionar en distintas zonas urbanas y no solo en la seleccionada en este proyecto.

Para determinar la altura óptima exacta de la estación base se podría realizar más simulaciones variando la altura de 0.25m en cada corrida en lugar de 2m como se realizó en este proyecto. No obstante, esto requeriría un periodo más amplio de simulación. También se recomienda simular desplazando la antena transmisora hacia los lados de los edificios con espacios de 0.25m entre cada corrida, en este proyecto solo se simuló 5m hacia dos direcciones.

Se puede obtener resultados más precisos si se configura los parámetros constitutivos del cuerpo del vehículo a valores de conductividad y permitividad para metal en la frecuencia de 28 GHz. En este proyecto se asignó PEC al metal del carro para reducir los tiempos de simulación.

Se recomienda realizar un modelo más detallista del vehículo incluyendo varios componentes de distintos materiales para obtener resultados más cercanos a la realidad. En este caso, los tiempos de corrida podrían llegar a ser días de simulación por cada escenario.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] GSMA Intelligence, «La Economía Móvil en América Latina y el Caribe 2018,» GSM Association, Londres, 2018.
- [2] Nokia Bell Labs, «Coverage and Capacity Impact of Mobility and Human Body,» de *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, Singapore, 2017.
- [3] Electronics and Telecommunications Research Institute, «Millimeter Wave Vehicular Blockage Characteristics,» de *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Toronto, 2017.
- [4] Chethan Kumar Anjinappa y Ismail Guvenc, «Millimeter-Wave V2X Channels: Propagation Statistics, Beamforming, and Blockage,» de *VTC2018-Fall*, Chicago, 2018.
- [5] REMCOM, 2019. [En línea]. Available: <https://www.remcom.com/customers>.
- [6] R. G. Bayas Toro y V. M. Concha Quispilema, 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, Guayaquil: ESPOL, 2018.
- [7] A. Navarro Cadavid, D. Guevara Ibarra y J. Gómez Rojas, «Modelado de canal inalámbrico empleando técnicas de trazado de rayos: Una revisión sistemática,» *Revista S&T*, p. 15, 2014.
- [8] M. Jeison, "Modelo de Propagación Empírico para Predicción de Pérdidas de Potencia en Señales Inalámbricas bajo el estándar IEEE 802.11b/g", *Gerencia Tecnológica Informática*, no. 8202009, pp. 33-45, 2010.
- [9] J. Soriano Montero, "Modelo Experimental de Propagación de RF en Espacio Libre y Vegetación a 9.1Ghz", Licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones., Universidad de las Américas Puebla., 2006.

- [10] Khafaji, Saadane, Belkasmi y Abbadi, «Semantic Scholar,» 2008. [En línea]. Available:
<https://pdfs.semanticscholar.org/1059/377beafa54bc5fa5d17ab33bcd68085c8029.pdf>.
- [11] B. Fontal, *El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones*, 1st ed. Venezuela: Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química, 2005, pp. 119-120.
- [12] 5G Americas, "Recomendaciones sobre el espectro para la 5G", 4g Americas, 2015.
- [13] J. Murillo Fuentes, *Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación*, 2nd ed. España: Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla, 2019, pp. 31-32.
- [14] W. Stutzman and G. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed. United States of America: Kindle, 2012, pp. 36-53.
- [15] A. Nordrum and K. Clark, "Everything You Need to Know About 5G", *IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News*, 2017. [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/everything-you-need-to-know-about-5g>. [Accessed: 21- Aug- 2019].
- [16] REMCOM, Wireless Insite Reference Manual, 2013.
- [17] A. Plazola Cisneros, A. Plazola Anguiano and G. Plazola Anguiano, *Arquitectura Habitacional Plazola*, 5th ed. México: Plazola Editores, p. 406.
- [18] AutoCAD 2019. (2019). Autodesk.
- [19] Google Maps. (2019). Google LLC.
- [20] Q. Liao, "Ray-tracing based analysis of channel characteristics and capacity improvement capabilities of spatial multiplexing and beamforming at 15 and 28 GHz", Master's Thesis, Lund University, 2016.

- [21] Radiowaves, «HGSN28V1790 90 Degree, 17 dBi Sector Antenna, Vertical-Polarized, 27.3-29.5Ghz» Infinite Electronics International, North Andover.
- [22] BBC News, "Los países de América Latina cuyos habitantes han aumentado más y menos su estatura en el último siglo", 2016.
- [23] J. Arora, *Introduction to Optimum Design*, 3rd ed. Iowa City: Academic Press, 2011, p. 770.
- [24] G. Pedersen, "Mobile Phone Antenna Performance 2018", Aalborg, 2018.
- [25] La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT, "RECOMENDACIÓN UIT-R P.525-2", Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1994.
- [26] G. Fowles, *Introduction to Modern Optics*, 2nd ed. New York: Holt, Rinehart & Winston of Canada, 2019, pp. 38-45.