

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

Implementación de los modelos de propagación de gran escala entre 0.5 GHz y 100 GHz de acuerdo a las especificaciones del 3GPP para aplicaciones móviles 5G

Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería de las Telecomunicaciones

Víctor Alonso Vilchez Díaz

Asesor:

Dr. Diógenes Manuel Marcano Aviles

LIMA

2018

## RESUMEN

La presente tesis tiene como finalidad implementar en una aplicación web, los modelos de pérdidas en el trayecto de propagación de gran escala, de acuerdo a las especificaciones del 3GPP TR 38.901, para frecuencias de redes 5G. Para ello fue necesario analizar el modelo presentado en el TR 38.901.

Se hace una explicación del modelo de canal y los modelos de canal más importantes para redes 5G. Se mencionan los escenarios que se consideran en los modelos, así como los parámetros necesarios.

Posteriormente se profundiza el análisis del modelo propuesto en el TR 38.901, específicamente en lo relacionado a la pérdida en el trayecto y la probabilidad de línea de vista para cada escenario planteado en el reporte.

Para el cálculo de las pérdidas en el trayecto, se diseña una aplicación web, para lo cual se elige las herramientas necesarias para programar la aplicación, así como para implementarla en un servidor y ponerla a disposición de los potenciales usuarios. Los parámetros necesarios para el cálculo, se especifican en el TR 38.901 según el escenario seleccionado.

La aplicación permite elegir entre los cuatro escenarios contemplados en el reporte, y solicita los parámetros correspondientes al escenario. Como resultado devuelve el valor de pérdidas en el trayecto, y a la vez una tabulación y una gráfica que explican el comportamiento del modelo de pérdidas para un rango especificado por el usuario.

Finalmente se hacen las pruebas a la aplicación, las validaciones y comparaciones con el modelo del TR 38.901 implementado en MATLAB, así como con el modelo del NYU y su simulador NYUSIM.

# ABSTRACT

The purpose of this thesis is to implement, the large-scale path loss models, into a web application, according to the 3GPP TR 38.901 specifications, for 5G network frequencies. To accomplish this it was necessary to analyze the model presented in the TR 38.901.

An explanation of the channel model is made, as well as the most important channel models for 5G networks. The scenarios considered in the models are mentioned, and so are the necessary parameters.

Subsequently, a further analysis of the model proposed in TR 38.901 is carried out, specifically in relation to the path loss and the line of sight probability for each scenario proposed in the report.

A web application is designed for the path loss calculation. The necessary tools are chosen to program this application, and to implement it in a server; so it be available to all potential users. The parameters necessary for the calculation are specified in the TR 38.901 according to the selected scenario.

The application allows choosing between the four scenarios contemplated in the report, and at the same time, it requests the parameters corresponding to the scenario. As a result, it returns the path loss value, a tabulation and a graph that explain the behavior of the path loss model for a range previously specified by the user.

Finally, the application tests, validations and comparisons are made and contrasted with the TR 38.901 model implemented in MATLAB, along with the NYU model and the NYUSIM simulator.

## **Dedicatoria**

A mi familia, quienes siempre me dan su amor y apoyo incondicional, y que son mi razón para seguir adelante.

A mis padres, por inculcarme valores y principios, y por haberme enseñado que la manera para alcanzar mis objetivos es con determinación, coraje y perseverancia.

A mi esposa, por su cariño y ternura, y permanecer a mi lado a cada paso.



## Agradecimientos

A mi asesor, el Dr. Diógenes Marcano, por su dirección y ayuda invaluable en la realización de esta tesis. Y en general, a todos mis profesores y maestros, quienes con sus enseñanzas me impulsaron a llegar hasta donde estoy.

*«Si he visto más lejos es porque estoy sentado sobre los hombros de gigantes.»* –  
Carta de Isaac Newton a Robert Hooke, 1676.



# Índice de Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problemática .....	2
1.2. Objetivos .....	3
1.2.1. Objetivo general .....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Metodología.....	3
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	4
2.1. Bandas de frecuencias para 5G .....	4
2.2. Modelamiento del canal de radio .....	6
2.2.1. Parámetros de gran escala.....	8
2.2.2. Parámetros de pequeña escala .....	8
2.3. Modelos de canal externos al 3GPP.....	8
2.3.1. Comparación entre los modelos existentes .....	10
2.4. Propagación .....	12
2.5. Modelos de propagación clásicos .....	12
2.6. Modelos de propagación para el 5G .....	13
2.6.1. Modelo close-in (CI) free space reference distance .....	13
2.6.2. Modelo CIF .....	14
2.6.3. Modelo Alfa, Beta, Gamma.....	14
2.7. Modelos de propagación para los modelos de canal de 5G.....	14
3. MODELAMIENTO DEL PATH LOSS SEGÚN EL 3GPP TR 38.901 .....	16
3.1. Introducción.....	16
3.2. Escenario Macrocela Rural (RMa) .....	16
3.2.1. Pérdida en el trayecto de propagación para RMa LoS .....	18
3.2.2. Pérdida en el trayecto de propagación para RMa NLoS.....	20
3.2.3. Probabilidad de LoS para el escenario RMa .....	21
3.3. Escenario Macrocela Urbana (UMa).....	22

3.3.1.	Pérdida en el trayecto de propagación para UMa LoS .....	23
3.3.2.	Pérdida en el trayecto de propagación para UMa NLoS.....	26
3.3.3.	Probabilidad de LoS para el escenario UMa .....	27
3.4.	Escenario Microcelda Urbana (UMi-street canyon).....	29
3.4.1.	Pérdida en el trayecto de propagación para UMi LoS .....	30
3.4.2.	Pérdida en el trayecto de propagación para UMi NLoS .....	31
3.4.3.	Probabilidad de LoS para el escenario UMi.....	32
3.5.	Escenario Indoor-office (InH).....	34
3.5.1.	Pérdida en el trayecto de propagación para InH LoS .....	36
3.5.2.	Pérdida en el trayecto de propagación para InH NLoS.....	37
3.5.3.	Probabilidad de LoS para el escenario InH – Mixed office.....	37
3.5.4.	Probabilidad de LoS para el escenario InH – Open office .....	38
4.	DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN .....	40
4.1.	Diseño de la interfaz web .....	40
4.1.1.	Selección de las herramientas de desarrollo .....	40
4.1.2.	Implementación de la interfaz web.....	42
4.2.	Cálculo de resultados .....	49
4.2.1.	Selección de las herramientas de desarrollo .....	49
4.2.2.	Implementación del cálculo de resultados .....	50
4.3.	Servidor web .....	53
4.3.1.	Selección de las herramientas de desarrollo .....	53
4.3.2.	Implementación del servidor web .....	53
4.4.	Pruebas .....	55
4.4.1.	Escenario RMa .....	55
4.4.2.	Escenario UMa .....	58
4.4.3.	Escenario UMi .....	60
4.4.4.	Escenario InH.....	62
4.5.	Validación y comparación de resultados.....	64
4.5.1.	Validación utilizando la herramienta MATLAB .....	65

4.5.2. Comparación con el NYU 5G Simulator.....	66
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	78
5.1. Conclusiones.....	78
5.2. Recomendaciones.....	79
Referencias .....	80





# Índice de Figuras

Figura 2.1: Tipos de canal en radiocomunicaciones. ....	7
Figura 2.2: a) Channel fading, b) small-scale fading, c) shadowing. ....	7
Figura 2.3: Comparación entre cuatro modelos diferentes de PL para el escenario UMi. ....	15
Figura 3.1: Escenario típico RMa. ....	17
Figura 3.2: Vista típica desde el transmisor en RMa. ....	17
Figura 3.3: Definición de $d_{2D}$ y $d_{3D}$ para terminales UT outdoor. ....	19
Figura 3.4: Definición de $d_{2D-out}$ , $d_{2D-in}$ y $d_{3D-out}$ , $d_{3D-in}$ para terminales UT indoor. ....	21
Figura 3.5: Probabilidad de LoS para RMa. ....	22
Figura 3.6: Macrocela y microcela desplegadas en un entorno urbano. ....	23
Figura 3.7: Propagación de dos rayos en un entorno urbano. ....	25
Figura 3.8: Probabilidad tipo 1 y tipo 2: a) escenario UMA; b) escenario UMi. ....	27
Figura 3.9: Principio de propagación de radio para entornos NLoS: a) escenario UMA; b) escenario UMi. ....	28
Figura 3.10: Probabilidad de LoS para UMA a diferentes alturas del UT. ....	29
Figura 3.11: Escenario street canyon en la ciudad de Lima. Google 2013. ....	30
Figura 3.12: Distancias para escenarios: outdoor (izquierda) y outdoor-indoor (derecha). ....	33
Figura 3.13: Probabilidad de LoS para UMi. ....	34
Figura 3.14: Disposición típica indoor oficina. ....	35
Figura 3.15: Centro comercial indoor Jockey Plaza, Lima. Codigo.pe 2015. ....	35
Figura 3.16: Distribución en escenarios indoor y oficina. ....	36
Figura 3.17: Despliegue Indoor hotspot: a) 6-site Case B; b) 12-site. ....	38
Figura 3.18: Probabilidad de LoS para InH. ....	39
Figura 4.1: Interfaz web para escenario RMa, sin estilos. ....	43
Figura 4.2: Interfaz web para escenario RMa, con estilos. ....	44
Figura 4.3: Diagrama de flujo del procedimiento de selección de rangos o valores para las variables $f_c$ y $d_{2D}$ . ....	45
Figura 4.4: Visualización de resultados. ....	46
Figura 4.5: Gráfico de resultados tabulados. ....	46
Figura 4.6: Ingreso de datos para a) RMa, b) UMA, c) UMi y d) InH. ....	47
Figura 4.7: Diagrama de flujo para la visualización de resultados. ....	48
Figura 4.8: Funcionamiento de Ajax. ....	49
Figura 4.9: Diagrama de flujo para el cálculo de resultados. ....	51

Figura 4.10: Diagrama de flujo de la función para generar números aleatorios con distribución normal.....	52
Figura 4.11: Parámetros de evaluación para escenario RMa.....	56
Figura 4.12: Resultados para escenario RMa LoS.....	57
Figura 4.13: Resultados gráficos para escenario RMa LoS. ....	57
Figura 4.14: Resultados para escenario RMa NLoS. ....	58
Figura 4.15: Resultados gráficos para escenario RMa NLoS.....	58
Figura 4.16: Resultados para escenario UMa LoS.....	59
Figura 4.17: Resultados gráficos para escenario UMa LoS. ....	59
Figura 4.18: Resultados para escenario UMa NLoS. ....	60
Figura 4.19: Resultados gráficos para escenario UMa NLoS.....	60
Figura 4.20: Resultados para escenario UMi LoS.....	61
Figura 4.21: Resultados gráficos para escenario UMi LoS.....	61
Figura 4.22: Resultados para escenario UMi NLoS. ....	62
Figura 4.23: Resultados gráficos para escenario UMi NLoS.....	62
Figura 4.24: Resultados para escenario InH LoS.....	63
Figura 4.25: Resultados gráficos para escenario InH LoS. ....	63
Figura 4.26: Resultados para escenario InH NLoS. ....	64
Figura 4.27: Resultados gráficos para escenario InH NLoS.....	64
Figura 4.28: Gráficas con MATLAB de los cuatro escenarios, para LoS y NLoS.....	66
Figura 4.29: Interfaz gráfica del simulador NYUSIM. ....	67
Figura 4.30: Parámetros ingresados en NYUSIM. ....	68
Figura 4.31: Resultados para escenario RMa con NYUSIM.....	69
Figura 4.32: Resultados para escenario UMa con NYUSIM.....	69
Figura 4.33: Resultados para escenario UMi con NYUSIM.....	69
Figura 4.34: Resultados de simulación Monte Carlo para escenario RMa. ....	70
Figura 4.35: Resultados de simulación Monte Carlo para escenario UMa. ....	70
Figura 4.36: Resultados de simulación Monte Carlo para escenario UMi. ....	71
Figura 4.37: Comparación entre los modelos 3GPP y NYU de PL para los cuatro escenarios en LoS.....	73
Figura 4.38: Comparación entre los modelos 3GPP y NYU de PL para los cuatro escenarios en NLoS. ....	74
Figura 4.39: Simulación para escenario RMa para variables aleatorias.....	75
Figura 4.40: Simulación para escenario UMa para variables aleatorias.....	76
Figura 4.41: Simulación para escenario UMi para variables aleatorias. ....	76

## Índice de Tablas

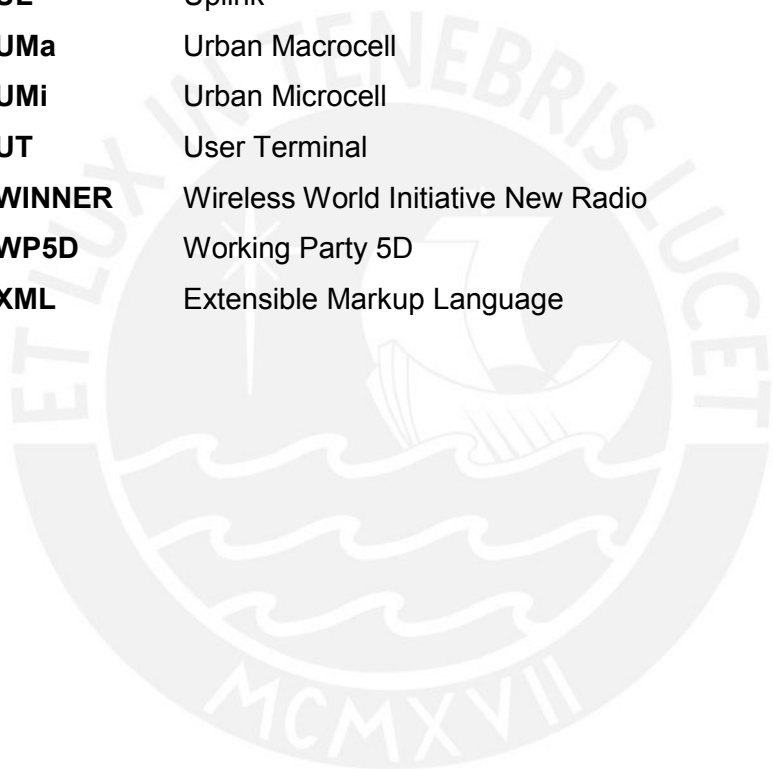
Tabla 2.1: Bandas de operación E-UTRA. ....	4
Tabla 2.2: Definición de frecuencias y rangos para NR.....	5
Tabla 2.3: Bandas de operación NR en FR1.....	6
Tabla 2.4: Bandas de operación NR en FR2.....	6
Tabla 2.5: Comparación de los modelos de canal para 5G.....	11
Tabla 3.1: Parámetros de evaluación para escenario RMa. ....	18
Tabla 3.2: Valores de parámetros predeterminados y rangos de aplicación para LoS y NLoS según el modelo de PL RMa del 3GPP TR 38.901.....	19
Tabla 3.3: Parámetros de evaluación para escenarios UMi-street canyon y UMa...23	
Tabla 3.4: Valores de parámetros predeterminados para LoS y NLoS según el modelo de PL UMa del 3GPP TR 38.901. ....	26
Tabla 3.5: Parámetros de evaluación para el escenario UMi-street canyon. ....	30
Tabla 3.6: Valores de parámetros predeterminados para LoS y NLoS según el modelo de PL UMi del 3GPP TR 38.901.....	32
Tabla 3.7: Parámetros de evaluación para escenarios indoor-office. ....	36
Tabla 3.8: Valores de parámetros predeterminados para LoS y NLoS según el modelo de PL InH del 3GPP TR 38.901. ....	37
Tabla 4.1: Parámetros de evaluación para los cuatro escenarios. ....	55
Tabla 4.2: Comparación de resultados tabulados para todos los escenarios.....	66
Tabla 4.3: Parámetros de evaluación para los escenarios de NYUSIM. ....	68
Tabla 4.4: Comparación de resultados entre la aplicación web y NYUSIM. ....	70
Tabla 4.5: Valores de $n$ y $\sigma_{SF}$ para los escenarios del NYUSIM. ....	72
Tabla 4.6: Parámetros de evaluación para comparación de escenarios de ambos modelos.....	72
Tabla 4.7: Rangos de aplicación para parámetros de evaluación. ....	75
Tabla 4.8: Comparación de simulaciones para parámetros aleatorios. ....	75

## Acrónimos

<b>2D</b>	Bidimensional
<b>3D</b>	Tridimensional
<b>3G</b>	Tercera Generación de tecnologías de telefonía móvil
<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project
<b>3GPP-HF</b>	Modelo para altas frecuencias del 3rd Generation Partnership Project
<b>4G</b>	Cuarta Generación de tecnologías de telefonía móvil
<b>5G</b>	Quinta Generación de tecnologías de telefonía móvil
<b>5GCM</b>	5G Channel Model
<b>ABG</b>	Alpha-beta-gamma model
<b>AJAX</b>	Asynchronous JavaScript And XML
<b>AOD</b>	Angle of Departure
<b>AP</b>	Access Point
<b>BS</b>	Base Station
<b>CentOS</b>	Community ENTerprise Operating System
<b>CI</b>	Close-In model
<b>CIF</b>	Close-In path loss model with a Frequency dependent exponent
<b>COST</b>	Coopération européenne dans le domaine de la recherche Scientifique et Technique
<b>CSS</b>	Cascading Style Sheets
<b>D2D</b>	Device-to-Device
<b>DPDP</b>	Directional Power Delay Profile with Strongest Power
<b>EHF</b>	Extremely High Frequency
<b>EWN</b>	Evolved WiFi Networks
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplex
<b>FEPL</b>	Flat Earth Path Loss
<b>FR</b>	Frequency Range
<b>GSCM</b>	Geometric-based Stochastic Channel Model
<b>HetNet</b>	Heterogeneous Networks
<b>HHI</b>	Heinrich-Hertz-Institut
<b>HTML</b>	HyperText Markup Language
<b>HTTP</b>	Hypertext Transfer Protocol
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IIS</b>	Internet Information Services

<b>IMT</b>	International Mobile Telecommunications
<b>InH</b>	Indoor Hotspot
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>ISD</b>	Inter-Site Distance
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>ITU-R</b>	ITU Radiocommunication Sector
<b>LoS</b>	Line-of-sight
<b>LSP</b>	Large Scale Parameters
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>LTE-A</b>	Long Term Evolution Advanced
<b>LTE-A Pro</b>	Long Term Evolution Advanced Pro
<b>METIS</b>	Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output
<b>MiWEBA</b>	Millimeter-Wave Evolution for Backhaul and Access
<b>mmMAGIC</b>	Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications
<b>MMSE</b>	Minimum Mean Square Error
<b>mm-waves</b>	Ondas milimétricas
<b>NIST</b>	National Institute of Standards and technology
<b>NLoS</b>	Non-line-of-sight
<b>NR</b>	New Radio
<b>NYU</b>	New York University
<b>NYUSIM</b>	New York University Simulator
<b>O2I</b>	Outdoor-to-Indoor
<b>PDP</b>	Power Delay Profile
<b>PHP</b>	Hypertext Preprocessor
<b>PL</b>	Path Loss
<b>PLE</b>	Path Loss Exponent
<b>QuaDRiGa</b>	QUAsi Deterministic Radlo channel GenerAtor
<b>RAN</b>	Radio Access Network
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RMa</b>	Rural Macrocell
<b>RT</b>	Ray Tracing
<b>SCM</b>	Stochastic Channel Model
<b>SF</b>	Shadow Fading
<b>SHF</b>	Super High Frequency

<b>SSP</b>	Small Scale Parameters
<b>SUL</b>	Supplement Uplink
<b>TDD</b>	Time Division Duplex
<b>TR</b>	Technical Report
<b>TRP</b>	Transmission/Reception points
<b>TS</b>	Technical Specification
<b>TSCL</b>	Time Cluster Spatial Lobes
<b>TSG</b>	Technical Specification Group
<b>UE</b>	User Equipment
<b>UHF</b>	Ultra High Frequency
<b>UL</b>	Uplink
<b>UMa</b>	Urban Macrocell
<b>UMi</b>	Urban Microcell
<b>UT</b>	User Terminal
<b>WINNER</b>	Wireless World Initiative New Radio
<b>WP5D</b>	Working Party 5D
<b>XML</b>	Extensible Markup Language



# 1. INTRODUCCIÓN

Las redes inalámbricas 5G están siendo objeto de investigación y desarrollo, y se espera que se desplieguen a partir del 2020 [1]. Los objetivos de los sistemas celulares 5G son variados. Con el incremento de datos inalámbricos y la Internet de las Cosas (IoT), se está en la búsqueda de sistemas inalámbricos 5G que soporten una mayor capacidad total de la red, que proporcionen conexiones para miles de millones de dispositivos, que ofrezcan altas velocidades de datos con latencias y tiempos de respuesta inferiores a 1 ms, y que proporcionen una alta confiabilidad. El acceso de radio 5G se construirá sobre las tecnologías inalámbricas existentes evolucionadas, en particular LTE, LTE-A, LTE-A Pro y Redes Wifi Evolucionadas (EWN), al mismo tiempo que se introducen nuevas bandas de frecuencia para el de acceso de radio, en particular las bandas correspondientes a ondas milimétricas.

Asimismo, la escasez de ancho de banda que enfrentan los operadores inalámbricos, ha motivado la exploración del espectro de frecuencias de ondas milimétricas (mm-waves), las cuales han sido poco utilizadas hasta ahora; para aplicaciones en las futuras redes celulares 5G. Sin embargo, es de manera reciente que se han iniciado los estudios de la propagación celular de ondas milimétricas en ambientes interiores y exteriores densamente poblados. La obtención de esta información es vital para el diseño y operación de futuras redes celulares de quinta generación que usan el espectro de mm-waves.

En este contexto, recurrir a modelos de propagación permite predecir las pérdidas en el trayecto de propagación (PL del inglés path loss) entre los puntos de transmisión y recepción. Es posible conocer el comportamiento de las ondas electromagnéticas en función a las características del enlace, como la estación base, la estación móvil, la topografía del terreno en donde se realizan las mediciones, los obstáculos, entre otros aspectos.

El presente trabajo está enfocado en interpretar el TR 38.901 del 3GPP [2], cuyo propósito es modelar y evaluar apropiadamente el desempeño de las técnicas de capa física usando los modelos de canal apropiados [2]. Específicamente el trabajo se centra en el modelamiento de las pérdidas en el trayecto (PL), probabilidad de línea de vista (LoS) y el modelo de penetración; así como de todas aquellas variables involucradas y el modelamiento e interpretación de éstas.

A continuación, se ejecutan simulaciones con los modelos estudiados para observar su comportamiento. Finalmente se implementan estos modelos usando un lenguaje de programación que nos permite alojarlos en un servidor web (HTTP) para que estén disponibles como herramientas de estimaciones de presupuestos de enlace, distancias máximas, potencias mínimas de transmisión, entre otros.

Todos los cálculos y parámetros seleccionados se harán de acuerdo a los estándares publicados por el 3GPP en los casos que aplique.

### **1.1. Problemática**

Las futuras redes móviles y los sistemas 5G, contarán con nuevos requerimientos y necesitarán soportar nuevos casos de uso, que demandarán más espectro en rangos de frecuencia cada vez más altos.

Los modelos de propagación para móviles, como el modelo COST 231 Hata, cubren sólo hasta la frecuencia 2.0 GHz [3], pero las redes celulares tienen algunas bandas que superan dicha frecuencia. Sin embargo, como hasta la fecha no se habían desarrollado modelos para frecuencias superiores, se seguían usando los modelos clásicos para frecuencias menores.

En el caso de 5G, se han propuesto utilizar frecuencias en las bandas milimétricas. Bandas previstas para comunicaciones de punto a punto de alta capacidad, que proporcionan velocidades de datos muy altas más allá de 10 Gbps [2], ahora se espera que sean utilizadas en las futuras redes. Es por ello que los modelos de propagación que se han venido usando ya no tienen validez. El 3GPP inició una serie de trabajos que culminó con la propuesta de un modelo de propagación que cubre desde 0.5 GHz hasta 100 GHz, de acuerdo con la TR 38.901.

El propósito de la presente Tesis es diseñar e implementar una aplicación, en un lenguaje de programación que nos permita alojarla en un servidor web, para calcular las pérdidas en el trayecto (PL), que ayude a estimar el presupuesto del enlace, la distancia máxima para asegurar la conexión o la potencia requerida en el



transmisor. Los usuarios podrán seleccionar entre las variables, configuraciones y combinaciones posibles permitidas por el TR 38.801 del 3GPP.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Diseñar e implementar una aplicación para calcular las pérdidas en el trayecto (PL), basada en los modelos del 3GPP TR 38.901, y alojarla en un servidor web para que esté a disposición del público en general.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Describir el estado del arte de los modelos de propagación a gran escala para redes 5G.
- Evaluar el desempeño de la aplicación implementada, y contrastar los resultados con los obtenidos en el simulador NYUSIM.

## **1.3. Metodología**

- Analizar los modelos de propagación presentes en el 3GPP TR 38.901, y otros modelos pertinentes.
- Desarrollar un algoritmo con las variables que participan en los cálculos, y los diagramas de flujo respectivos.
- Determinar el lenguaje de programación más adecuado para implementar los modelos.
- Programar las interfaces, los estilos, las funciones y demás código para el cálculo de los modelos.
- Preparar un servidor con las aplicaciones necesarias para que aloje la aplicación desarrollada.
- Ejecutar los modelos de propagación en varios escenarios y comparar los resultados.
- Validar los resultados y poner la aplicación a disposición de los usuarios.

## 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Bandas de frecuencias para 5G

Los sistemas de radio móvil terrestre celular comercial operan en frecuencias UHF e incluso en las bandas bajas de SHF, como en el caso de LTE [4] (ver Tabla 2.1). Para 5G se planea utilizar las demás bandas de SHF e inclusive las frecuencias EHF. A estas frecuencias, la longitud de onda portadora  $\lambda_c$ , está en el orden de los centímetros, o hasta milímetros, como en el caso de mm-waves, usando la relación  $c=f_c\lambda_c$ , donde  $f_c$  es la frecuencia portadora y  $c$  es la velocidad de la luz.

**Tabla 2.1: Bandas de operación E-UTRA [4].**

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit		Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive		Duplex Mode
	$F_{UL,low}$	$F_{UL,high}$	$F_{DL,low}$	$F_{DL,high}$	
1	1920 MHz	1980 MHz	2110 MHz	2170 MHz	FDD
2	1850 MHz	1910 MHz	1930 MHz	1990 MHz	FDD
3	1710 MHz	1785 MHz	1805 MHz	1880 MHz	FDD
4	1710 MHz	1755 MHz	2110 MHz	2155 MHz	FDD
5	824 MHz	849 MHz	869 MHz	894 MHz	FDD
6	830 MHz	840 MHz	875 MHz	885 MHz	FDD
7	2500 MHz	2570 MHz	2620 MHz	2690 MHz	FDD
8	880 MHz	915 MHz	925 MHz	960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz	1784.9 MHz	1844.9 MHz	1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz	1770 MHz	2110 MHz	2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	1447.9 MHz	1475.9 MHz	1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz	716 MHz	729 MHz	746 MHz	FDD
13	777 MHz	787 MHz	746 MHz	756 MHz	FDD
14	788 MHz	798 MHz	758 MHz	768 MHz	FDD
15	Reserved		Reserved		FDD
16	Reserved		Reserved		FDD
17	704 MHz	716 MHz	734 MHz	746 MHz	FDD
18	815 MHz	830 MHz	860 MHz	875 MHz	FDD
19	830 MHz	845 MHz	875 MHz	890 MHz	FDD
20	832 MHz	862 MHz	791 MHz	821 MHz	FDD
21	1447.9 MHz	1462.9 MHz	1495.9 MHz	1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz	3490 MHz	3510 MHz	3590 MHz	FDD
23	2000 MHz	2020 MHz	2180 MHz	2200 MHz	FDD

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive	Duplex Mode
24	1626.5 MHz – 1660.5 MHz	1525 MHz – 1559 MHz	FDD
25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 MHz	FDD
26	814 MHz – 849 MHz	859 MHz – 894 MHz	FDD
27	807 MHz – 824 MHz	852 MHz – 869 MHz	FDD
28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
29	N/A	717 MHz – 728 MHz	FDD
30	2305 MHz – 2315 MHz	2350 MHz – 2360 MHz	FDD
31	452.5 MHz – 457.5 MHz	462.5 MHz – 467.5 MHz	FDD
32	N/A	1452 MHz – 1496 MHz	FDD
33	1900 MHz – 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD
41	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
42	3400 MHz – 3600 MHz	3400 MHz – 3600 MHz	TDD
43	3600 MHz – 3800 MHz	3600 MHz – 3800 MHz	TDD
44	703 MHz – 803 MHz	703 MHz – 803 MHz	TDD
45	1447 MHz – 1467 MHz	1447 MHz – 1467 MHz	TDD
46	5150 MHz – 5925 MHz	5150 MHz – 5925 MHz	TDD
47	5855 MHz – 5925 MHz	5855 MHz – 5925 MHz	TDD
48	3550 MHz – 3700 MHz	3550 MHz – 3700 MHz	TDD
50	1432 MHz – 1517 MHz	1432 MHz – 1517 MHz	TDD
51	1427 MHz – 1432 MHz	1427 MHz – 1432 MHz	TDD
...			
64	Reserved		
65	1920 MHz – 2010 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	FDD
66	1710 MHz – 1780 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	FDD
67	N/A	738 MHz – 758 MHz	FDD
68	698 MHz – 728 MHz	753 MHz – 783 MHz	FDD
69	N/A	2570 MHz – 2620 MHz	FDD
70	1695 MHz – 1710 MHz	1995 MHz – 2020 MHz	FDD
71	663 MHz – 698 MHz	617 MHz – 652 MHz	FDD
72	451 MHz – 456 MHz	461 MHz – 466 MHz	FDD
74	1427 MHz – 1470 MHz	1475 MHz – 1518 MHz	FDD
75	N/A	1432 MHz – 1517 MHz	FDD
76	N/A	1427 MHz – 1432 MHz	FDD

En enero de 2018, el 3GPP publicó la especificación para 5G NR, el TS 38.104 [5], que en la sección 5.2 proporciona la lista de bandas en las cuales NR (New Radio) puede operar. Para la fecha de publicación, el uso de otras bandas continuaba en estudio. Según el Release 15 de la especificación técnica, estas bandas de frecuencia están diseñadas para diferentes rangos de frecuencia (FR) y los define como FR1 y FR2 (ver Tabla 2.2). La Tabla 2.3 y la Tabla 2.4 muestran los rangos de frecuencia correspondiente a cada FR.

**Tabla 2.2: Definición de frecuencias y rangos para NR [5].**

Frequency range designation	Corresponding frequency range
FR1	450 MHz – 6000 MHz
FR2	24250 MHz – 52600 MHz

**Tabla 2.3: Bandas de operación NR en FR1 [5].**

E-UTRA Operating Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit		Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive		Duplex Mode
	$F_{UL\_low}$	$F_{UL\_high}$	$F_{DL\_low}$	$F_{DL\_high}$	
n1	1920 MHz	1980 MHz	2110 MHz	2170 MHz	FDD
n2	1850 MHz	1910 MHz	1930 MHz	1990 MHz	FDD
n3	1710 MHz	1785 MHz	1805 MHz	1880 MHz	FDD
n5	824 MHz	849 MHz	869 MHz	894 MHz	FDD
n7	2500 MHz	2570 MHz	2620 MHz	2690 MHz	FDD
n8	880 MHz	915 MHz	925 MHz	960 MHz	FDD
n20	832 MHz	862 MHz	791 MHz	821 MHz	FDD
n28	703 MHz	748 MHz	758 MHz	803 MHz	FDD
n38	2570 MHz	2620 MHz	2570 MHz	2620 MHz	TDD
n41	2496 MHz	2690 MHz	2496 MHz	2690 MHz	TDD
n50	1432 MHz	1517 MHz	1432 MHz	1517 MHz	TDD
n51	1427 MHz	1432 MHz	1427 MHz	1432 MHz	TDD
n66	1710 MHz	1780 MHz	2110 MHz	2200 MHz	FDD
n70	1695 MHz	1710 MHz	1995 MHz	2020 MHz	FDD
n71	663 MHz	698 MHz	617 MHz	652 MHz	FDD
n74	1427 MHz	1470 MHz	1475 MHz	1518 MHz	FDD
n75		N/A	1432 MHz	1517 MHz	SDL
n76		N/A	1427 MHz	1432 MHz	SDL
n78	3300 MHz	3800 MHz	3300 MHz	3800 MHz	TDD
n77	3300 MHz	4200 MHz	3300 MHz	4200 MHz	TDD
n79	4400 MHz	5000 MHz	4400 MHz	5000 MHz	TDD
n80	1710 MHz	1785 MHz		N/A	SUL
n81	880 MHz	915 MHz		N/A	SUL
n82	832 MHz	862 MHz		N/A	SUL
n83	703 MHz	748 MHz		N/A	SUL
n84	1920 MHz	1980 MHz		N/A	SUL

**Tabla 2.4: Bandas de operación NR en FR2 [5].**

Band number	UL	DL	Duplex mode
n257	26.5 –29.5 GHz	26.5 –29.5 GHz	TDD
n258	24.25 – 27.5 GHz	24.25 – 27.5 GHz	TDD
n259	N/A	N/A	TDD
n260	37–40 GHz	37–40 GHz	TDD

Además de por rango de frecuencia (FR), las bandas NR se pueden clasificar en tres categorías:

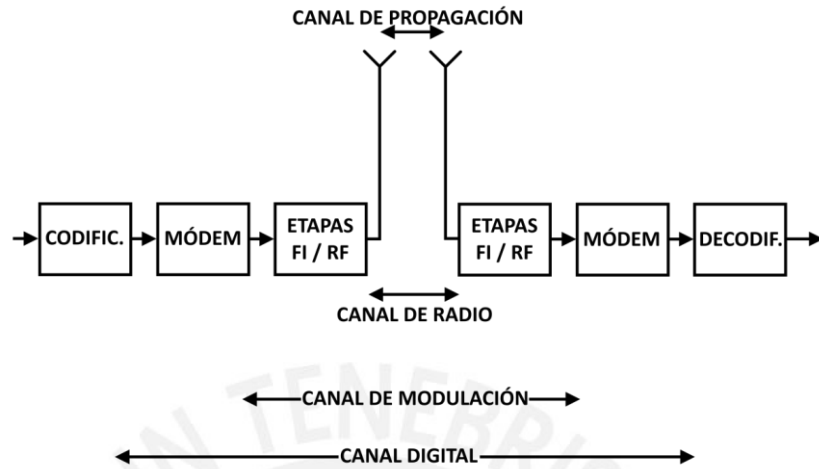
- Frequency Division Duplex Bands (FDD).
- Time Division Duplex Bands (TDD).
- Supplement Uplink Bands (SUL).

NR ha introducido una nueva notación para la banda, que comienza con "n", por ejemplo, la banda 20 se señala como n20, donde en LTE se denominó B20.

## 2.2. Modelamiento del canal de radio

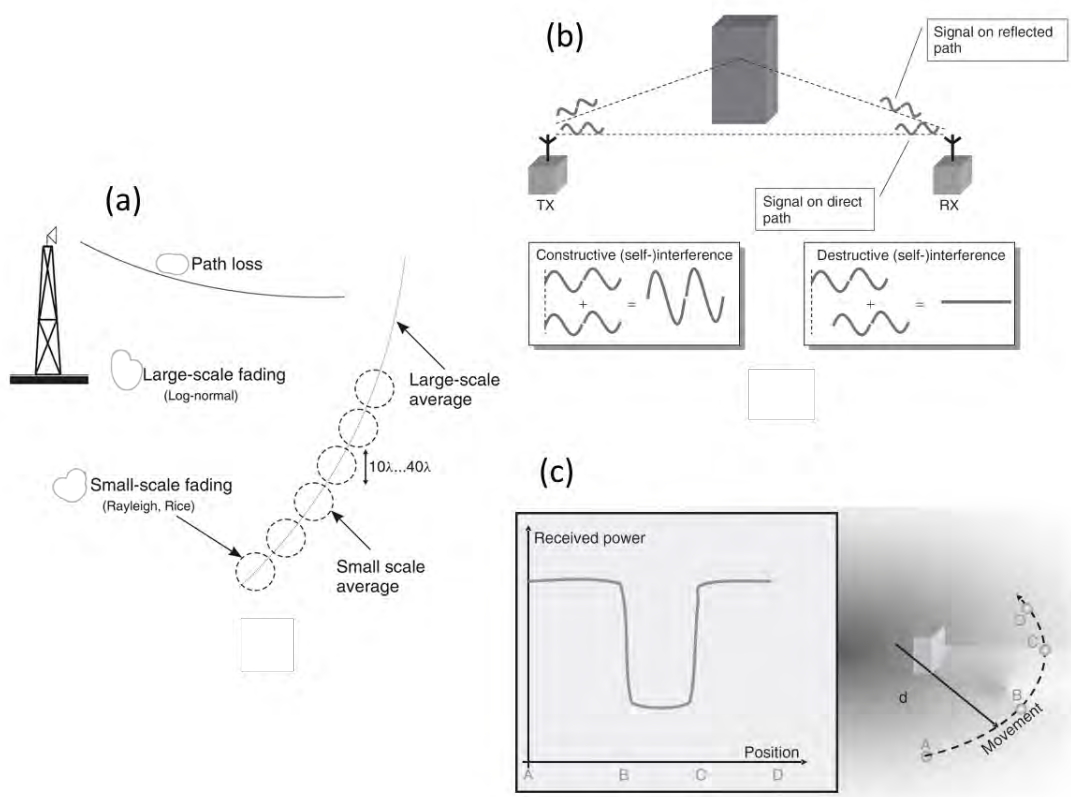
Se puede definir el canal como el enlace entre dos puntos de un trayecto de comunicaciones. El canal de radio, por lo general, es lineal y recíproco (permite

estudiar el canal en una sola dirección) [6]. Un radio enlace entre dos puntos requiere un trayecto o medio definido. Es posible definir tipos de canales en base a las etapas que comprenden, como se muestra en la figura la Figura 2.1.



**Figura 2.1: Tipos de canal en radiocomunicaciones [6].**

Los parámetros de canal generalmente se dividen en pérdidas en el trayecto (PL), parámetros a gran escala (LSP) y parámetros de pequeña escala (SSP).



**Figura 2.2: a) Channel fading, b) small-scale fading, c) shadowing [7].**

Los LSP como el shadowing, la propagación del retardo, la dispersión angular, entre otros; y los SSP como el retardo, los ángulos de llegada y salida, por nombrar algunos; reflejan conjuntamente las características de desvanecimiento del canal (channel fading). La Figura 2.2 explica gráficamente estos conceptos.

En las tecnologías 5G se vuelve evidente la gran importancia de establecer el modelo de canal, describiendo las características de éste de una manera numérica, con métodos de medición y prueba, y proporcionando una simulación del canal que sea objetiva, suficientemente real y reproducible.

### **2.2.1. Parámetros de gran escala**

El canal de radio es por lo general no estacionario. Aun así, es posible considerar que en periodos cortos de tiempo y espacio, los parámetros del canal experimentan pequeñas variaciones, y se puede asumir una estacionalidad de corto plazo como una buena aproximación [8]. Estos parámetros describen las propiedades promedio del canal en un área local, tales como dispersión de ángulo, shadow-fading y dispersión del retardo. La razón para llamarlos parámetros de gran escala es que cambian aproximadamente a la misma velocidad que el shadow-fading que a veces se denomina desvanecimiento de gran escala en contraste con el desvanecimiento de pequeña escala.

### **2.2.2. Parámetros de pequeña escala**

Los parámetros en pequeña escala describen las rápidas fluctuaciones en la potencia de la señal recibida sobre distancias de desplazamiento muy cortas (unas pocas longitudes de onda) o sobre periodos de tiempo muy cortos (en el orden de segundos), de modo que se pueden ignorar los efectos de pérdida en el trayecto a gran escala. El desvanecimiento (fading) es la principal característica de los modelos de pequeña escala, y es causado por la interferencia entre dos o más versiones de la señal transmitida que llegan al receptor en tiempos ligeramente diferentes. Estas ondas, llamadas ondas multitrayecto, se combinan en la antena receptora para dar una señal resultante que puede variar considerablemente en amplitud y fase, dependiendo de la distribución de la intensidad y el tiempo de propagación de las ondas y el ancho de banda de la señal transmitida.

## **2.3. Modelos de canal externos al 3GPP**

Existen grupos formados en todo el mundo para medir y modelar canales de 5G, con la intención de proponer un modelo de canal que sea aplicable a las

bandas de frecuencias altas. Entre aquellos que ya cuentan con un modelo establecido, tenemos:

- 3GPP (Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz) [2].
- METIS (Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society) [9].
- 5GCM (5G channel model for bands up to 100 GHz) [10]
- MiWEBA (Millimetre-Wave Evolution for Backhaul and Access) [11].
- ITU-R M.2135 [12].
- COST2100 [13] [14] [15].
- IEEE 802.11 [16] [17] [18] [19].
- NYU WIRELESS: interdisciplinary academic research center [20].
- Fraunhofer HHI desarrolló el modelo de canal QuaDRiGa [21].

Y entre aquellos que aún están desarrollando un modelo, están:

- 5G mmWave Channel Model Alliance: iniciado por el NIST, en Norte América [22].
- mmMAGIC (Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications): en Europa [23].
- IMT-2020 5G promotion association: en China [24].

El modelo de canal del 3GPP, propuesto en el TR 38.901 [2], es en el que se basa la presente tesis, y por lo tanto, se describirá con mayor profundidad en capítulos siguientes.

METIS2020, por ejemplo, se ha centrado en tecnologías 5G y ha contribuido con amplios estudios en términos de modelado de canales en una amplia gama de bandas de frecuencia (hasta 86 GHz), anchos de banda muy grandes (cientos de MHz) y modelos de polarización tridimensional, esféricos modelado de onda y alta resolución espacial. Los modelos de canales METIS consisten en un modelo basado en mapas, un modelo estocástico y un modelo híbrido que puede cumplir con los requisitos de flexibilidad y escalabilidad.

El modelo de canal COST2100 es un modelo de canal estocástico basado en geometría (GSCM) que puede reproducir las propiedades estocásticas de los canales de entrada múltiple / salida múltiple (MIMO) en el tiempo, la frecuencia y el espacio.

El modelo de canal IEEE 802.11ad está destinado a redes inalámbricas de área local (WLAN) de 60 GHz, donde se requieren velocidades de datos muy

elevadas [16]. El modelo se basa en clústeres y describe el canal proporcionando características de espacio-tiempo precisas, incluida la polarización, y admite características no estacionarias del canal.

El 5GCM es un grupo ad-hoc de 15 empresas y universidades que desarrollaron modelos basados en extensas campañas de medición y ayudaron al 3GPP en el desarrollo del TR 38.900 [25].

El mmMAGIC (Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society), es otro gran proyecto de investigación patrocinado por la Unión Europea.

Por otro lado, la alianza modelo NIST 5G mmWave Channel se estableció recientemente para proporcionar directrices para la calibración y metodología de medición, metodología de modelado, así como parametrización en diversos entornos y una base de datos para campañas de medición de canales.

NYU WIRELESS ha realizado y publicado extensas mediciones de propagación urbana a 28, 38, 60 y 73 GHz para canales exteriores e interiores, y ha creado modelos de canales a gran escala y de pequeña escala, incluidos los conceptos de lóbulos espaciales de clústeres de tiempo (TSCL) para modelar múltiples clústeres de múltiples trayectorias que llegan en direcciones particulares [26], [27], [28].

Si bien muchos de los participantes se superponen en estos cuerpos normativos, los modelos finales entre esos grupos son algo distintos. Es importante tener en cuenta que estudios recientes han encontrado discrepancias entre los modelos estandarizados y los resultados medidos [26], [29], [30].

### **2.3.1. Comparación entre los modelos existentes**

Con el avance en la investigación y el desarrollo de 5G, aparecen modelos de canales con los métodos que combinan el modelado determinista basado en RT y el modelado estocástico basado en la medición de canales. Los modelos de canal existentes todavía no pueden cumplir con los requisitos de las comunicaciones móviles 5G. La Tabla 2.5 hace una comparación y resume los modelos de canales inalámbricos existentes que cumplen los diversos requisitos de los futuros modelos de canal 5G [31].



Tabla 2.5: Comparación de los modelos de canal para 5G [31].

Características	Banda de frecuencia [GHz]	Ancho de banda [MHz]	Velocidad máxima [km/h]	3-D	D2D	Backhaul	Simulac. dinámica	Consistenc. espacial	Consistenc./dependenc. en frecuencia
3GPP SCM	1~3	5	-						
3GPP 3D	1~4	100	3	Sí					
3GPP D2D	1~4	100	60	Limitado				Limitado	
3GPP-HF	6~100	10% fc	500 (Aún no)	Sí	Sí	Aún no	Sí	Sí	Sí
WINNER II/+	0.45~6	100	350	Sí		Sí	Muy Limitado	Limitado	Sí
IMT-2020	0.5~100	100(<6 GHz) 10% fc	500 (Aún no)	Sí	Sí	Aún no	Sí	Sí	Aún no
QuaDRiGa/		100~2 GHz (Aún no)	350	Sí	Lado Rx		Sí	Aún no	
mimMagic									
IEEE 802.11n/ac	2.4/5	1.28 GHz	Muy baja	Sí					
IEEE 802.11ad/ay	57~68	2.16 GHz, 2.64 GHz (ay)	3~5	Sí	Sí	Sí	Limitado		
MiWEBA	57~66		Baja	Sí	Sí	Sí	Limitado	Sí	
COST	0.45~100	-	-	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
5GCM	0.5~100	100 (<6 GHz) ~2 GHz (>6 GHz)	350	Sí			Sí	Sí	Sí (un lado fijo)
METIS	0.45~6,61~65	100 (<6 GHz) 4 GHz (63 GHz)	200	Sí	Limitado	<6 GHz			
		10% fc	250	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
NYU Wireless	6~100	800	100~300	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

## **2.4. Propagación**

El modelo del canal de propagación es una descripción numérica determinística o estocástica de los entornos de propagación física basados en la medición de canales o análisis y simulación sobre la base de teorías de propagación. En general, las ondas electromagnéticas, se ven afectadas por fenómenos de reflexión, refracción, difracción, absorción, polarización y dispersión. En particular las ondas milimétricas presentan la particularidad de que su longitud de onda es del orden de milímetros lo que conlleva que la mayoría de objetos en el entorno produzcan obstrucción, difracción o multitrayecto, así como dispersión o reflexión. Además, se ven afectadas en mayor medida por fenómenos físicos medioambientales al aumentar la frecuencia. Por ello, mientras en bandas de frecuencias más bajas las señales son capaces de propagarse a mayores distancias y pueden penetrar fácilmente a través de los edificios, en bandas superiores únicamente pueden transmitirse unos cientos de metros, debido a las pérdidas adicionales relativas a la relevancia de un mayor número de fenómenos atenuantes, y tienen dificultades para penetrar materiales sólidos.

## **2.5. Modelos de propagación clásicos**

Existen diferentes modelos de propagación, que se han desarrollado utilizando diferentes técnicas y enfoques. Estos modelos se pueden agrupar en: deterministas, empíricos y semiempíricos. Entre los modelos más importantes que se vinieron aplicando para redes 4G y anteriores, podemos considerar los siguientes modelos:

El modelo de Okumura [32], que proporciona un método empírico para el cálculo de las pérdidas de propagación (PL) en entornos urbanos. Este modelo se usa para determinar las pérdidas en el rango de frecuencia de 150 MHz a 1920 MHz.

El modelo de propagación de Hata [33] es resultado del desarrollo de expresiones numéricas para las curvas de propagación normalizadas del modelo de Okumura, mediante un análisis de regresión múltiple. La frecuencia de portadora va desde 150 MHz a 1.8 GHz.

Modelo de Walfisch-Bertoni [34], propuesto por Joram Walfisch y Henri Bertoni, tiene en cuenta las pérdidas producidas por las difracciones que se producen en las azoteas de los edificios. La frecuencia puede ir de 800 MHz a 2000 MHz.

El Modelo COST 231 Hata [35], es un modelo de propagación de radio que amplía el modelo Hata urbano (que a su vez se basa en el modelo Okumura) para cubrir un rango más elaborado de frecuencias. Este rango va de 1500 MHz a 2 GHz.

El Modelo COST 231 Walfisch-Ikegami [35], propuesto en el proyecto europeo COST 231, es resultado de la integración de los modelos de Ikegami-Ioshida y de Walfisch-Bertoni. Este modelo aplica para frecuencia de 800 MHz a 2000 MHz.

## 2.6. Modelos de propagación para el 5G

Para evaluar adecuadamente el desempeño de los sistemas 5G, es necesario desarrollar modelos de pérdida en el trayecto (PL) de múltiples frecuencias, probabilidad de línea de vista (LoS) y modelos de bloqueo en un amplio rango de bandas de frecuencia y variados escenarios de aplicación. Tres modelos de PL se considerarán, el modelo close-in (CI) free space reference distance, el modelo close-in free space reference distance model with frequency-dependent path loss exponent (CIF), y el modelo Alpha-Beta-Gamma (ABG). Estos modelos se explicarán más adelante. Los modelos de pérdida en el trayecto utilizados en la actualidad en el modelo 3GPP 3D son de la forma del modelo ABG pero con dependencias adicionales de las alturas de la estación base o del terminal, y con un punto de ruptura (breakpoint) de LoS.

### 2.6.1. Modelo close-in (CI) free space reference distance

La ecuación de Friis nos da el modelo de propagación de señal en el espacio libre. Para los escenarios reales, se construye un modelo de PL más general al introducir un exponente  $n$  de pérdida que describe la atenuación de una señal mientras se propaga a través de un canal. Para la condición LoS, se puede presentar un modelo de pérdida del trayecto como [10]:

$$PL(dB) = 20 \log\left(\frac{4\pi f}{c}\right) + 10 n \log\left(\frac{d}{1 \text{ m}}\right) + X_{\sigma} \quad (2.1)$$

A la ecuación anterior se le conoce como modelo corto close-in (CI) free space reference distance [28], donde  $f$  es la frecuencia portadora (en Hz),  $c$  es la velocidad de la luz,  $d$  es la distancia entre el transmisor y el receptor (en metros), y  $n$  es el exponente de pérdidas en el trayecto de propagación (PLE) de mínimo error cuadrático medio (MMSE) que mejor se ajusta a todos los valores tomados de una campaña de medición en particular [28]. El primer elemento en el lado derecho de la ecuación es la PL en el espacio libre a 1 m

de distancia.  $X_\sigma$  es el shadow fading. Las relaciones entre PL y  $f$  son las mismas con la fórmula de Friis en el espacio libre.

### 2.6.2. Modelo CIF

El modelo CIF de PL es una extensión del modelo CI y utiliza un PLE, dependiente de la frecuencia [36]:

$$PL(dB) = 20 \log\left(\frac{4\pi}{c}\right) + 10 n \left(1 + b \left(\frac{f - f_0}{f_0}\right)\right) \log\left(\frac{d}{1 \text{ m}}\right) + X_\sigma \quad (2.2)$$

Donde  $n$  denota el PLE y  $b$  es un parámetro de optimización que representa la pendiente o la dependencia de frecuencia lineal del PLE que se equilibra en la frecuencia  $f_0$ . PL aumenta a medida que  $f$  aumenta, cuando  $b$  es positivo. Cuando  $b = 0$  o  $f_c = f_0$ , el modelo CIF se reduce al modelo CI. El término  $f_0$  es una frecuencia de referencia fija, el centro de todas las frecuencias representadas por el modelo de PL, que se encuentra como la suma ponderada de las mediciones de diferentes frecuencias:

$$f_0 = \frac{\sum_{k=1}^K f_k N_K}{\sum_{k=1}^K N_K} \quad (2.3)$$

Donde  $K$  es la cantidad de frecuencias a las que se hicieron las mediciones, y  $N_k$  es el número de mediciones o puntos de PL correspondientes a la  $k$ -ésima frecuencia  $f_k$ .

### 2.6.3. Modelo Alfa, Beta, Gamma

Cuando estamos en un caso de NLoS, generalmente se usa otro modelo. Este es el modelo ABG [10] (nombrado por tres factores Alfa, Beta y Gamma). Es la extensión del modelo FI (Floating Intercept) [28] para reflejar la relevancia de la frecuencia.

$$PL(dB) = 20 \alpha \log(d) + \beta + 10 \gamma \log(f) + X_\sigma \quad (2.4)$$

Donde  $\alpha$  describe cómo el PL se incrementa a medida que la distancia (en metros) entre transmisor y receptor se incrementa,  $\beta$  es un desplazamiento flotante (en dB),  $\gamma$  es la variación del PL a través de la frecuencia (en GHz) y  $X_\sigma$  es el término de shadow-fading (SF) (en dB).

## 2.7. Modelos de propagación para los modelos de canal de 5G

Del punto 2.3, sabemos que existen diferentes modelos de canal para 5G, incluido el que concierne a la presente tesis, el TR 38.901 del 3GPP [2]. Cada uno de estos modelos plantea o hace referencia a un modelo a gran escala para las

pérdidas en el trayecto. No es el propósito de esta tesis estudiar y comparar cada uno de los modelos, sin embargo, se deja como referencia las siguientes publicaciones [37], [38], [39], [40] y [41]; que presentan comparaciones entre los modelos de propagación más importantes. Por ejemplo, en la Figura 2.3 se puede observar la comparación entre los modelos de 5GCM [10], 3GPP [2], METIS [9]. y mmMAGIC [23]; para el escenario Microcelda Urbana (UMi).

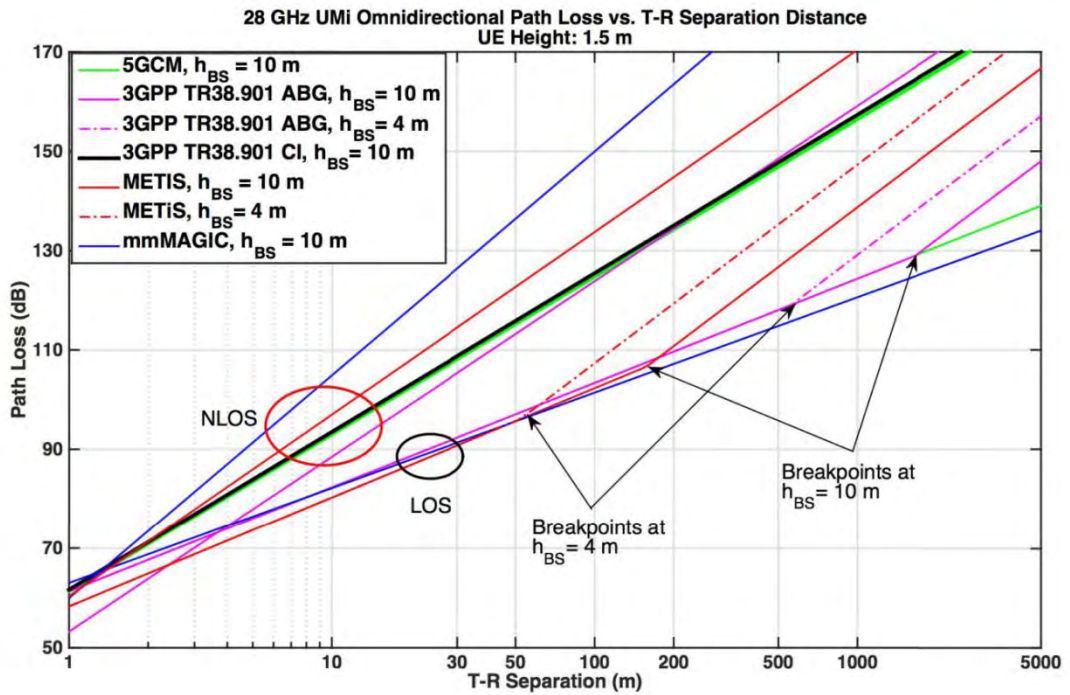


Figura 2.3: Comparación entre cuatro modelos diferentes de PL para el escenario UMi [37].

## **3. MODELAMIENTO DEL PATH LOSS SEGÚN EL 3GPP TR 38.901**

### **3.1. Introducción**

En noviembre de 2015, se aprueba el “Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz” [42], en el 3GPP TSG RAN #69 meeting [43]. Este estudio incluye información existente sobre altas frecuencias (por ejemplo, asignación de espectro, escenarios de interés, mediciones, etc.) y el modelo de canal para frecuencias hasta 100 GHz. Posteriormente el TR 38.901 [2], aprobado en marzo de 2017; documenta los modelos de canal. El nuevo modelo admite comparaciones entre bandas de frecuencia en el rango de 0.5 GHz a 100 GHz. Los modelos de canal definidos en el TR 38.901 son aplicables a todo el rango de 0.5 GHz a 100 GHz, salvo algunos métodos de modelado específicos, y sus parámetros o escenarios involucrados.

Cabe indicar que este nuevo modelo de canal se desarrolla partiendo de modelos de canales anteriores para frecuencias menores a 6 GHz, como el modelo 3D SCM (3GPP TR 36.873 [44]) o IMT-Advanced (ITU-R M.2135 [12]).

### **3.2. Escenario Macrocela Rural (RMa)**

Los modelos de PL macrocela rural (RMa) se refieren escenarios donde la altura del transmisor (BS) es elevada, igual a 35 m [2] o incluso superior; y son importantes para predecir el comportamiento estadístico de la intensidad de la señal recibida en áreas rurales. El PL a gran escala es independiente de la frecuencia en canales de macroceldas exteriores, excepto en el primer metro de PL que es una función del cuadrado de la frecuencia [45] [28]. Cabe señalar que los modelos de pérdida en el trayecto pueden desarrollarse utilizando señales de banda estrecha o de banda ancha, ya que el nivel de potencia media recibido en una ubicación de

área local (en tiempo o en espacio) es independiente del ancho de banda [45]. Un ejemplo de un escenario RMA se puede apreciar en la Figura 3.1.



**Figura 3.1: Escenario típico RMa [46].**

El escenario de implementación rural se enfoca en una cobertura amplia y continua. La característica clave de este escenario es su área extensa de cobertura libre de obstáculos, como puede observarse en la Figura 3.2; que puede admitir vehículos de alta velocidad. Este escenario tendrá limitaciones de ruido o interferencia, utilizando macro puntos de transmisión y recepción (TRP). Los detalles del escenario RMA se describen en la Tabla 3.1 [2].



**Figura 3.2: Vista típica desde el transmisor en RMa [38].**

**Tabla 3.1: Parámetros de evaluación para escenario RMa [2].**

Parámetros	RMa
Frecuencia portadora	Hasta 7 GHz
Altura de BS $h_{BS}$	35 m
Diseño	Grilla hexagonal, 19 Macro sitios, 3 sectores por sitio, ISD = 1732 m o 5000 m
Altura de UT $h_{UT}$	1.5 m
Distribución de UT	Uniforme
Indoor/Outdoor	50% indoor y 50% en automóvil
LoS/NLoS	LoS y NLoS
Distancia mínima BS - UT (2D)	35 m

### 3.2.1. Pérdida en el trayecto de propagación para RMa LoS

El modelo de pérdida en el trayecto 3GPP TR 38.901 para RMa LoS consta de dos secciones (ecuaciones (3.1) y (3.2)), separadas por una distancia de punto de corte ( $d_{BP}$ ) donde la atenuación de la pendiente aumenta más allá de la  $d_{BP}$ . El modelo de PL LoS se muestra en la ecuación (3.3).

Este modelo se utiliza para proporcionar un modelo estadístico de la pérdida en el trayecto de propagación para cuando haya una ruta clara y sin obstáculos (ver Figura 3.2) entre el transmisor (BS) y el receptor (UT).

$$\begin{aligned}
 PL_{RMa-LoS\ 1}(dB) &= 20 \log_{10} \left( 40\pi \cdot d_{3D} \cdot \frac{f_c}{3} \right) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \\
 &\quad \cdot \log_{10}(d_{3D}) - \min(0.044h^{1.72}, 14.77) \\
 &\quad + 0.002 \log_{10}(h) d_{3D}; \quad \sigma_{SF} = 4 \text{ dB}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$PL_{RMa-LoS\ 2}(dB) = PL_1(d_{BP}) + 40 \log_{10} \left( \frac{d_{3D}}{d_{BP}} \right); \quad \sigma_{SF} = 6 \text{ dB} \tag{3.2}$$

$$PL_{RMa-LoS}(dB) = \begin{cases} PL_{RMa-LoS\ 1}, & 10 \text{ m} \leq d_{2D} < d_{BP} \\ PL_{RMa-LoS\ 2}, & d_{BP} \leq d_{2D} \leq 10 \text{ km} \end{cases} \tag{3.3}$$

Donde:

$f_c$ : frecuencia central en GHz.

$d_{3D}$ : distancia de separación tridimensional entre BS y UT en metros (ver Figura 3.3).

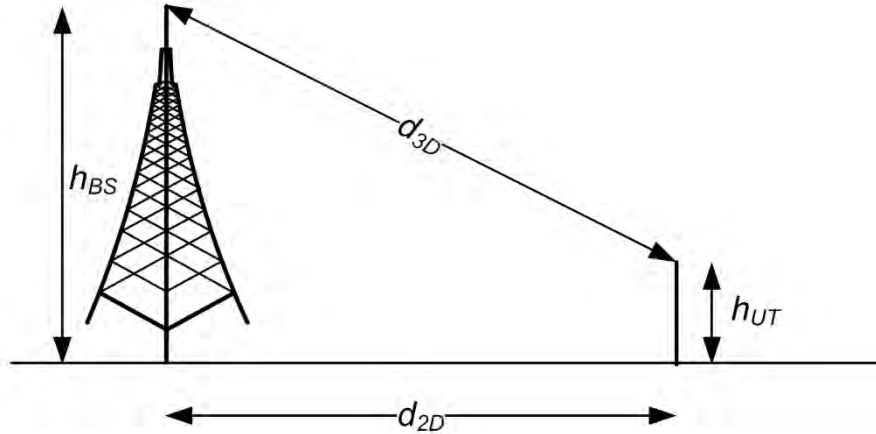
$h$ : altura promedio del edificio en metros.

$d_{BP}$ : distancia de punto de corte bidimensional (2D) a lo largo de la tierra plana en metros.

La distancia de punto de corte se define en la expresión (3.4) [47].



$$d_{BP} = 2\pi \cdot h_{BS} \cdot h_{UT} \cdot \frac{f_c}{c} \quad (3.4)$$



**Figura 3.3: Definición de  $d_{2D}$  y  $d_{3D}$  para terminales UT outdoor.**

La expresión  $PL_{RMa-LoS 1}$  en (3.1) es la pérdida en el trayecto en dB, antes de  $d_{BP}$  con una desviación estándar gaussiana de SF  $\sigma_{SF} = 4$  dB. La expresión  $PL_{RMa-LoS 2}$  en (3.2) es la pérdida en dB después de  $d_{BP}$ , con  $\sigma_{SF} = 6$  dB. La ecuación  $PL_{RMa-LoS 2}$  en (3.1) indica un exponente de pérdida en el trayecto (PLE) de 4 más allá de la distancia de punto de corte, como se deriva de Bullington para el modelo asintótico de reflexión en tierra de dos rayos [45], [48], [49].

La Tabla 3.2 proporciona los valores de parámetros predeterminados y los rangos de aplicabilidad para los modelos de pérdida en el trayecto para RMa del 3GPP [2].

**Tabla 3.2: Valores de parámetros predeterminados y rangos de aplicación para LoS y NLoS según el modelo de PL RMa del 3GPP TR 38.901 [50].**

Valores por defecto y rangos de aplicación para RMa con LoS
$10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d_{BP} (PL_1);$ $d_{BP} \leq d_{2D} \leq 10000 \text{ m} (PL_2);$ $h_{BS} = 35 \text{ m}; h_{UT} = 1.5 \text{ m}; W = 20 \text{ m}; h = 5 \text{ m}$ Rangos de aplicación: $5 \text{ m} \leq h \leq 50 \text{ m}; 5 \text{ m} \leq W \leq 50 \text{ m};$ $10 \text{ m} \leq h_{BS} \leq 150 \text{ m}; 1 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 10 \text{ m};$ $0.5 \text{ GHz} \leq f_c \leq f_H; f_H = 30 \text{ GHz}$
Valores por defecto y rangos de aplicación para RMa con NLoS
$10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq 5000 \text{ m};$ $h_{BS} = 35 \text{ m}; \leq h_{UT} = 1.5 \text{ m}; W = 20 \text{ m}; h = 5 \text{ m}$ Rangos de aplicación: $5 \text{ m} \leq h \leq 50 \text{ m}; 5 \text{ m} \leq W \leq 50 \text{ m};$ $10 \text{ m} \leq h_{BS} \leq 150 \text{ m}; 1 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 10 \text{ m};$ $0.5 \text{ GHz} \leq f_c \leq f_H; f_H = 30 \text{ GHz}$

La pérdida en el trayecto después de la distancia de punto de corte, dada por  $PL_{RMa-LoS 2}$  en (3.1), incluye la pérdida en el trayecto hasta la distancia del punto de corte ( $PL_{RMa-LoS 1}$ ) y una tasa de atenuación de 40 dB por década de distancia más allá de la distancia de punto de corte. La distancia de punto de corte ( $d_{BP}$ ) fue desarrollada inicialmente por Bullington para distancias de propagación alejadas, generalmente muchos kilómetros [38].

El ITU-R WP5D Contribution 88 [51] es la fuente del modelo de pérdidas en el trayecto ITU-R M.2135 RMa LoS adoptado por el 3GPP TR 38.901 (Versión 14) para frecuencias de 0.5 GHz a 30 GHz [38].

### 3.2.2. Pérdida en el trayecto de propagación para RMa NLoS

El modelo de PL del 3GPP TR 38.901 [2] RMa NLoS se muestra en la ecuación (3.5), que a su vez depende de la ecuación (3.6).

$$PL_{RMa-NLoS}(dB) = \max(PL_{RMa-LoS}, PL'_{RMa-NLoS}) \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} PL'_{RMa-NLoS} = & 161.04 - 7.1\log_{10}(W) + 7.5\log_{10}(h) \\ & - \left(24.37 - 3.7\left(\frac{h}{h_{BS}}\right)^2\right)\log_{10}(h_{BS}) \\ & + (43.42 - 3.1\log_{10}(h_{BS}))(\log_{10}(d_{3D}) - 3) \\ & + 20\log_{10}(f_c) \\ & - \left(3.2(\log_{10}(11.75h_{UT}))^2 - 4.97\right); \quad \sigma_{SF} = 8 \text{ dB} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Donde:

$W$ : ancho promedio de las calles en m.

La desviación estándar de SF tiene una distribución log-normal y se establece en  $\sigma_{SF} = 8$  dB. Los rangos de aplicabilidad para el modelo se proporcionan en la Tabla 3.2. La función *max* (máximo) en (3.5) es un ajuste matemático [50] y se usa para resolver un inconveniente en el modelo, que hace que éste dé como resultado una potencia mucho mayor en distancias cercanas (CI) para NLoS, que lo que resulta del modelo RMa LoS; garantizando así que el PL de NLoS sea siempre mayor o igual al PL de LoS equivalente a la misma distancia. Este problema se demostró que existe en muchos otros modelos similares de PL del 3GPP [52], por lo que se recurre a modelos opcionales de PL de CI [28]. Una nota al pie en el TR 38.901 [2] especifica el rango de frecuencia aplicable como  $0.5 \text{ GHz} < f_c < 30 \text{ GHz}$  en 3GPP, aunque otros estudios sugieren que no sería válido [50].

El modelo de pérdida en el trayecto RMa NLoS del 3GPP [2] se toma directamente del ITU-R M.2135 [12] y se origina del trabajo de Sakagami y Kuboi [53]. Este modelo empírico se desarrolló a partir de mediciones en el área metropolitana de Tokio en 1991 a 813 MHz y 1433 MHz. La combinación de expansiones y extensiones posteriores, en el modelo de Sakagami, es lo que aparece en el modelo final de PL RMa NLoS del 3GPP TR 38.901.

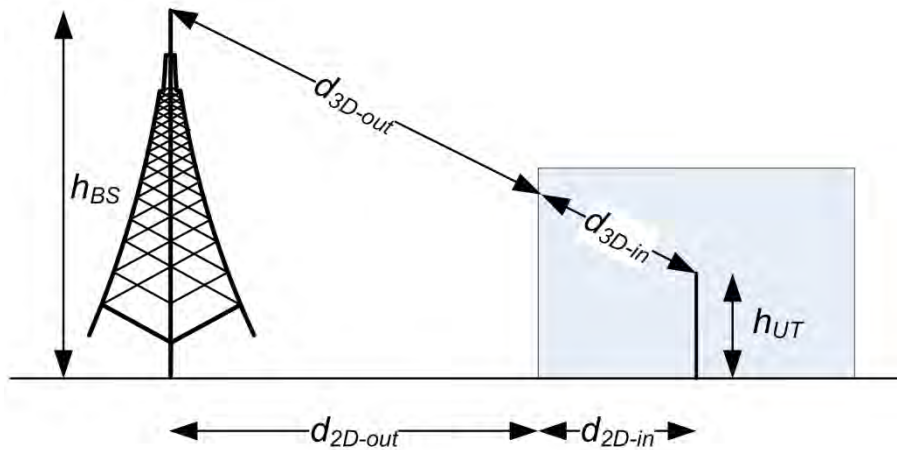
### 3.2.3. Probabilidad de LoS para el escenario RMa

La probabilidad de LoS para el escenario RMa del 3GPP TR 38.901 está expresada en la ecuación (3.7).

$$Pr_{LoS-RMa} = \begin{cases} 1, & d_{2D-out} \leq 10 \text{ m} \\ \exp\left(-\frac{d_{2D-out} - 10}{1000}\right), & 10 \text{ m} < d_{2D-out} \end{cases} \quad (3.7)$$

Donde:

$d_{2D-out}$ : distancia de separación 2D en metros entre un BS y UT específicos (ver Figura 3.4).

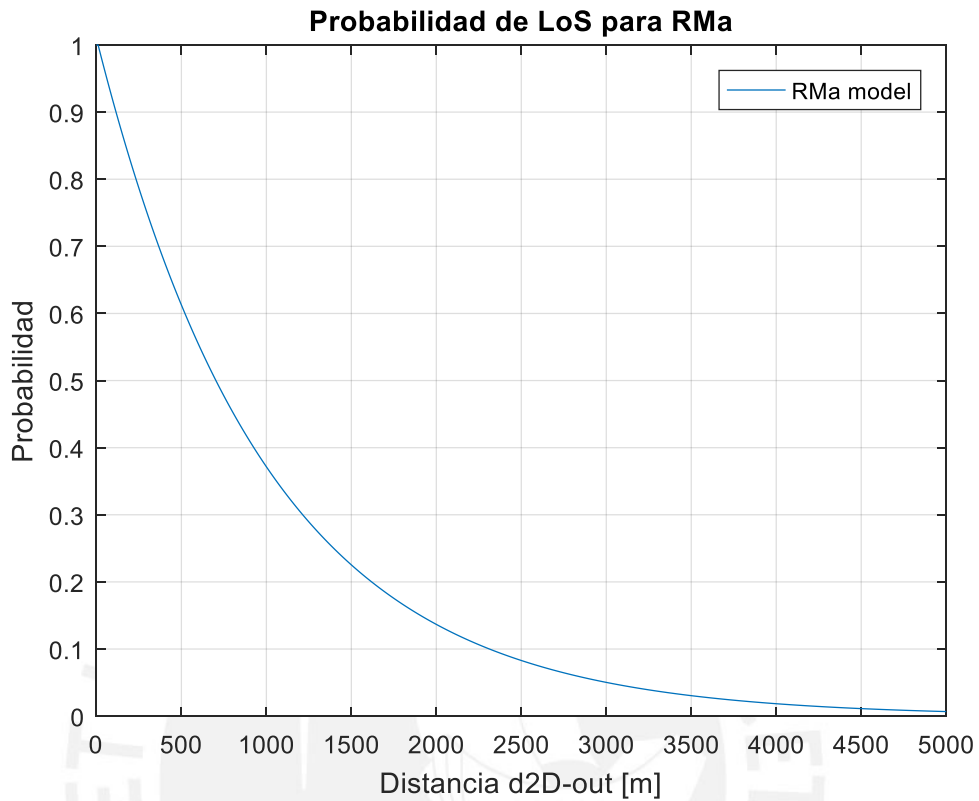


**Figura 3.4: Definición de  $d_{2D-out}$ ,  $d_{2D-in}$  y  $d_{3D-out}$ ,  $d_{3D-in}$  para terminales UT indoor.**

La razón para que la probabilidad de LoS para RMa, utilice  $d_{2D-out}$  en lugar de  $d_{2D}$ , es que la probabilidad de línea de vista no considera la penetración de exterior a interior (O2I). Las pérdidas por penetración O2I se determinan en otro capítulo del 3GPP TR 38.901, y no se mencionarán en la presente tesis.

Los escenarios de macroceldas rurales (RMa) suelen tener alturas de BS que oscilan entre 10 m y 150 m, con alturas de UT a nivel del suelo (por ejemplo, 1.5 m) y distancias entre sitios (ISD) hasta 5000 m [44], [12]. El modelo de probabilidad 3GPP RMa LoS no depende de la altura del UT. La Figura 3.5

describe el comportamiento del modelo de probabilidad de LoS, para el escenario RMa del 3GPP TR 38.901, tomando la expresión en (3.7).



**Figura 3.5: Probabilidad de LoS para RMa.**

El modelo de canal RMa LoS 3GPP TR 38.901 [2] es idéntico al modelo 3GPP TR 36.873 [44] RMa LoS, que fue adoptado del ITU-R M.2135 [12], que a su vez se derivó del modelo de probabilidad WINNER [54] RMa LoS; para escenarios urbanos a frecuencias por debajo de 6 GHz, como se muestra en [38], [55].

### 3.3. Escenario Macroelda Urbana (UMa)

Este escenario se refiere al entorno en el que la BS está situada sobre la azotea de un edificio y tiene una visibilidad dominante de los usuarios. Para el escenario de macroelda urbana, la mayor parte de la señal llega a los usuarios a través de la difracción y la ruta principal de propagación es sobre los edificios [10]. Este escenario de propagación es similar al escenario UMi y se aplican enfoques similares.

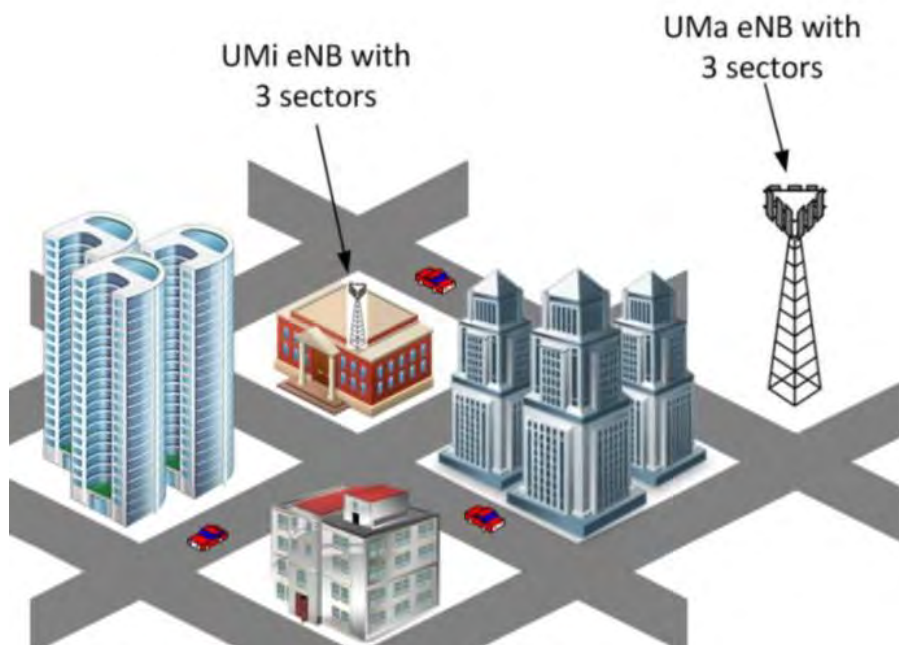
Para los escenarios urbanos, el 3GPP TR 38.901 toma las definiciones de distancia del modelo 3D [44], como se aprecia en la Figura 3.2 para escenarios outdoor y para escenarios outdoor-indoor.

Los detalles sobre el escenario UMA se listan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3: Parámetros de evaluación para escenarios UMi-street canyon y UMA [2].**

Parámetros		UMa
Diseño de celda		Grilla hexagonal, 19 micro sitios, 3 sectores por sitio (ISD = 500 m)
Altura de antena BS $h_{BS}$		25 m
Ubicación del UT	Outdoor/indoor	Outdoor e indoor
	LoS/NLoS	LoS y NLoS
	Altura $h_{UT}$	Igual que 3D-UMi según TR 36.873
Radio indoor UT		80%
Movilidad UT(sólo plano horizontal)		3 km/h
Distancia mínima BS - UT (2D)		35 m
Distribución de UT (horizontal)		Uniforme

Los escenarios urbanos de macrocelda y microcelda coexisten en una misma zona geográfica, como se muestra en la Figura 3.6. Es más, el concepto de redes heterogéneas (HetNet) se basa en mezclar diferentes tipos de tecnologías de radio y hacer uso de pequeñas celdas de baja potencia trabajando en conjunto con las macroceldas, con el objetivo de mejorar la cobertura y la capacidad de la red.



**Figura 3.6: Macrocelada y microcelda desplegadas en un entorno urbano [56].**

### 3.3.1. Pérdida en el trayecto de propagación para UMA LoS

De manera semejante al modelo de PL en RMa, el modelo UMA LoS, cuenta con dos secciones separadas por una distancia de punto de corte (en

este caso denotada  $d'_{BP}$ ), como se puede apreciar en (3.10), que es dependiente de las expresiones en (3.8) y (3.9).

$$PL_{UMa-LoS1}(dB) = 28.0 + 22\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) \quad (3.8)$$

$$PL_{UMa-LoS2}(dB) = 28.0 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) - 9\log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2) \quad (3.9)$$

$$PL_{UMa-LoS} = \begin{cases} PL_{UMa-LoS1}, & 10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d'_{BP}; \\ PL_{UMa-LoS2}, & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km}; \end{cases} \quad \sigma_{SF} = 4 \text{ dB} \quad (3.10)$$

La distancia de punto de corte  $d'_{BP}$ , es una función de la frecuencia central, la altura de la BS y la altura del UT [57], [2]; y viene dada por (3.11).

$$d'_{BP} = 4 \cdot h'_{BS} \cdot h'_{UT} \cdot \frac{f_c}{c} \quad (3.11)$$

Donde:

$f_c$ : frecuencia central en Hz.

Esta última expresión corresponde al último máximo local en el modelo de tierra plana (FEPL) [36], y se deriva de la teoría de la zona de Fresnel, donde  $d'_{BP}$  se define como la separación horizontal en la cual la primera zona de Fresnel toca el suelo [58]. Y, además:

$$h'_{BS} = h_{BS} - h_E \quad (3.12)$$

$$h'_{UT} = h_{UT} - h_E \quad (3.13)$$

Donde  $h_{BS}$  y  $h_{UT}$  son las alturas reales de la BS y el UT, y la altura efectiva del entorno  $h_E$  depende del enlace entre la BS y el UT. Para los enlaces LoS, se considera  $h_E = 1$  m con una probabilidad dada en (3.14).

$$Prob = (1 + C(d_{2D}, h_{UT})) \quad (3.14)$$

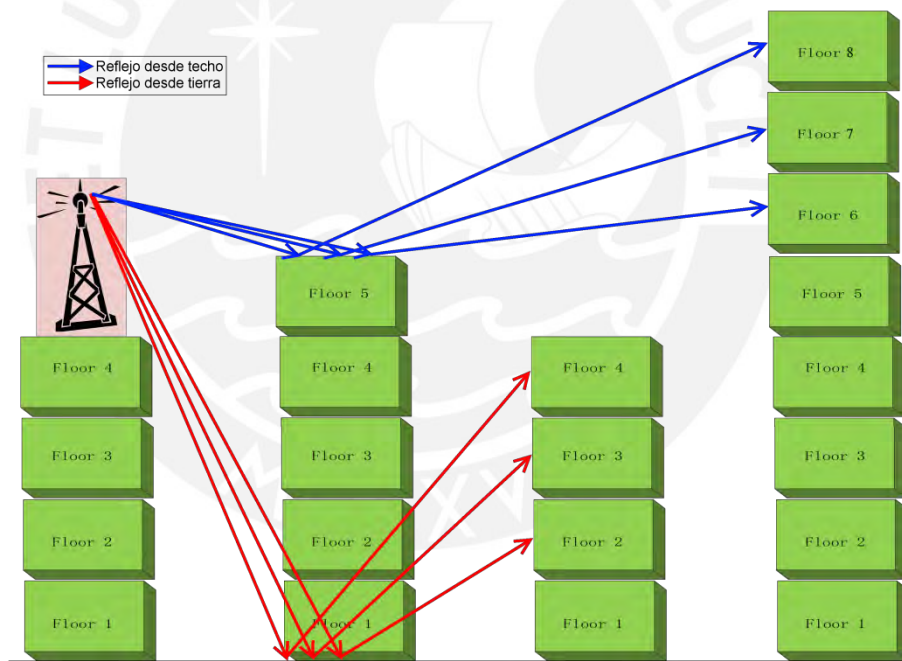
La función  $C(d_{2D}, h_{UT})$  se explicará más adelante, cuando se trate la probabilidad de LoS para el escenario UMa. Si se considera  $h_E$  diferente de 1 m,  $h_E$  se debe elegir de una distribución uniforme discreta en el conjunto  $\{12, 15, \dots, (h_{UT} - 1.5)\}$ , para  $1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$ . A continuación, la explicación.

En el escenario UMa, la altura efectiva del entorno debe extenderse para los UT ubicados en los pisos superiores (entiéndase por encima del piso 4). Como existen edificios con diferentes alturas, en el modelo de propagación de dos rayos el reflejo será desde otros edificios en lugar de desde tierra, para los

UT ubicados en pisos superiores. Por lo tanto, la altura efectiva del entorno está relacionada con la altura del UT.

Para los UT con alturas inferiores a 12 m, la ruta de propagación es tal que la reflexión es principalmente desde la tierra (Figura 3.11, rayos rojos); ya que para la instalación de la antena de la BS, se asume que la altura mínima de los edificios es de 12 m. En este caso, la altura efectiva del entorno se considera de 1 m. Para terminales ubicados por encima del piso 4, la reflexión será principalmente desde otros edificios (Figura 3.11, rayos azules). Como la altura del edificio se distribuye uniformemente entre el piso 4 y el piso 8, o entre 12 m y 24 m, y la altura efectiva del entorno debe ser menor que la altura del UT, entonces la altura efectiva del entorno se puede modelar a través de una distribución uniforme entre  $[12 - h_{UT}]$  [59].

$$h_E(h_{UT}) = \begin{cases} 1.0, & 0 \text{ m} < h_{UT} < 12 \text{ m} \\ \text{uniform}(12.0, h_{UT}), & h_{UT} \geq 12 \text{ m} \end{cases} \quad (3.15)$$



**Figura 3.7: Propagación de dos rayos en un entorno urbano [59].**

Un UT en indoor puede asociarse con una altura dada por  $h_{UT} = 3(n_{fl} - 1) + 1.5$ , donde  $n_{fl}$  es el número del piso distribuido uniformemente entre 1 y  $H_{fl}$ .  $H_{fl}$  denota la altura del edificio medida en pisos y se distribuye uniformemente entre 4 y 8 [60].

La Tabla 3.4 proporciona los valores de parámetros predeterminados para los modelos de pérdida en el trayecto 3GPP LoS y NLoS UMa como se indica en [2].

**Tabla 3.4: Valores de parámetros predeterminados para LoS y NLoS según el modelo de PL UMa del 3GPP TR 38.901.**

Valores por defecto y rangos de aplicación para UMa con LoS
$10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d'_{BP} (PL_1);$ $d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5000 \text{ m} (PL_2);$ $h_{BS} = 25 \text{ m}; 1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$
Valores por defecto y rangos de aplicación para UMa con NLoS
$10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq 5000 \text{ m};$ $h_{BS} = 25 \text{ m}; 1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$

El modelo 3GPP TR 38.901 [2] UMa LoS path loss se adoptó a partir de 3GPP TR 36.873 (por debajo de 6 GHz para LTE) [44] y TR 38.900 [25], [61].

### 3.3.2. Pérdida en el trayecto de propagación para UMa NLoS

El modelo de PL del 3GPP TR 38.901 [2] UMa NLoS se muestra en (3.16), y depende a la vez de (3.17).

$$PL_{UMa-NLoS} = \max(PL_{UMa-LoS}, PL'_{UMa-NLoS}); \quad \sigma_{SF} = 6 \text{ dB} \quad (3.16)$$

$$PL'_{UMa-NLoS} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6(h_{UT} - 1.5) \quad (3.17)$$

Al igual que en el escenario RMa NLoS, la función *max* en (3.16) garantiza que el PL de NLoS sea siempre mayor o igual al PL de LoS equivalente a la misma distancia.

Para el escenario UMa NLoS, el 3GPP TR 38.901 adopta el modelo del TR 36.873, basado en el modelo ABG. Además, se da un modelo opcional basado en el modelo de Close-In (CI), como se muestra en (3.18). Los valores de parámetros y rangos de aplicación se muestran en la Tabla 3.4.

$$PL_{UMa-NLoS} \text{ opcional} = 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) + 30 \log_{10}(d_{3D}); \quad \sigma_{SF} = 7.8 \text{ dB} \quad (3.18)$$

Si bien el modelo de PL para UMa LoS se comporta de manera similar al modelo PL de espacio libre, para el modelo de PL NLoS, las tendencias sobre la frecuencia no parecen concluyentes en un amplio rango de frecuencias [57], [62].



### 3.3.3. Probabilidad de LoS para el escenario UMa

La probabilidad de LoS para el escenario UMa del 3GPP TR 38.901 se presenta en la ecuación (3.19).

$$Pr_{LoS-UMa} = \left( \min\left(\frac{18}{d_{2D-out}}, 1\right) \left(1 - e^{-\frac{d_{2D-out}}{63}}\right) + e^{-\frac{d_{2D-out}}{63}} \right) \left(1 + C(d_{2D-out}, h_{UT})\right) \quad (3.19)$$

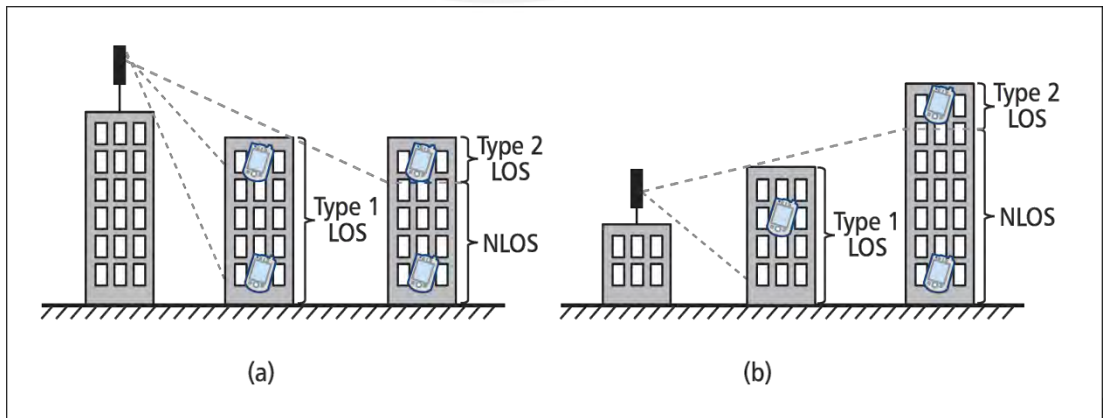
Donde  $d_{2D-out}$  se muestra en la Figura 3.4, y  $C(d_{2D-out}, h_{UT})$  se define en (3.20).

$$C(d_{2D-out}, h_{UT}) = \begin{cases} 0, & h_{UT} < 13 \text{ m} \\ \left(\frac{h_{UT} - 13}{10}\right)^{1.5} g(d_{2D-out}), & 13 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 23 \text{ m} \end{cases} \quad (3.20)$$

Y  $g(d_{2D-out})$  se define en (3.21).

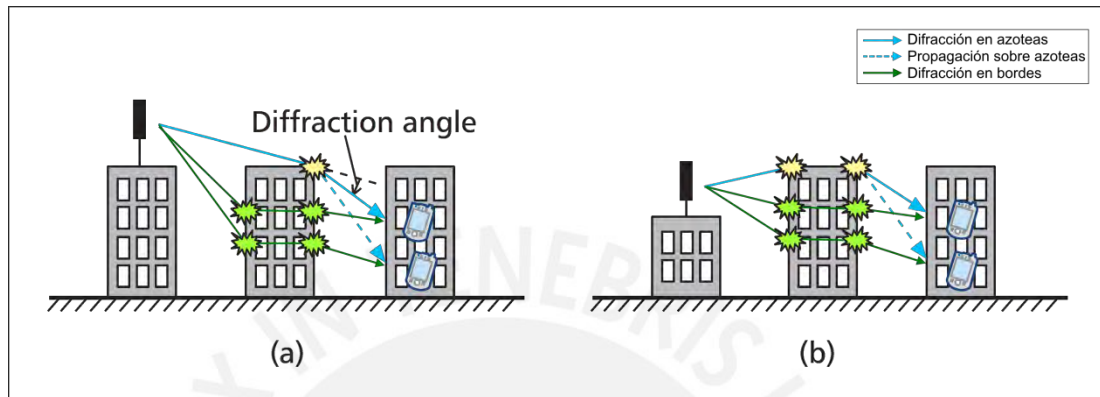
$$g(d_{2D-out}) = \begin{cases} (1.25 \times 10^{-6}) d^3 e^{-\frac{d_{2D-out}}{150}}, & d > 18 \text{ m} \\ 0, & \text{para otros valores} \end{cases} \quad (3.21)$$

La probabilidad LoS para el escenario UMa, se modela como una suma de dos probabilidades: probabilidades de tipo 1 y tipo 2 de LoS [63]. La descomposición de la probabilidad general de LoS en los componentes de tipo 1 y tipo 2 es para la simplificación de modelos. Como se muestra en la Figura 3.8 (a), se considera que un UT está en estado LoS de tipo 1 si otro UT en el primer piso del mismo edificio también está en un estado LoS (los UT en el primer piso sólo pueden ser del tipo 1). Por otro lado, se considera que un UT en uno de los pisos superiores de un edificio está en estado LoS de tipo 2 si otro UT en el primer piso del mismo edificio, nunca puede alcanzar un estado LoS.



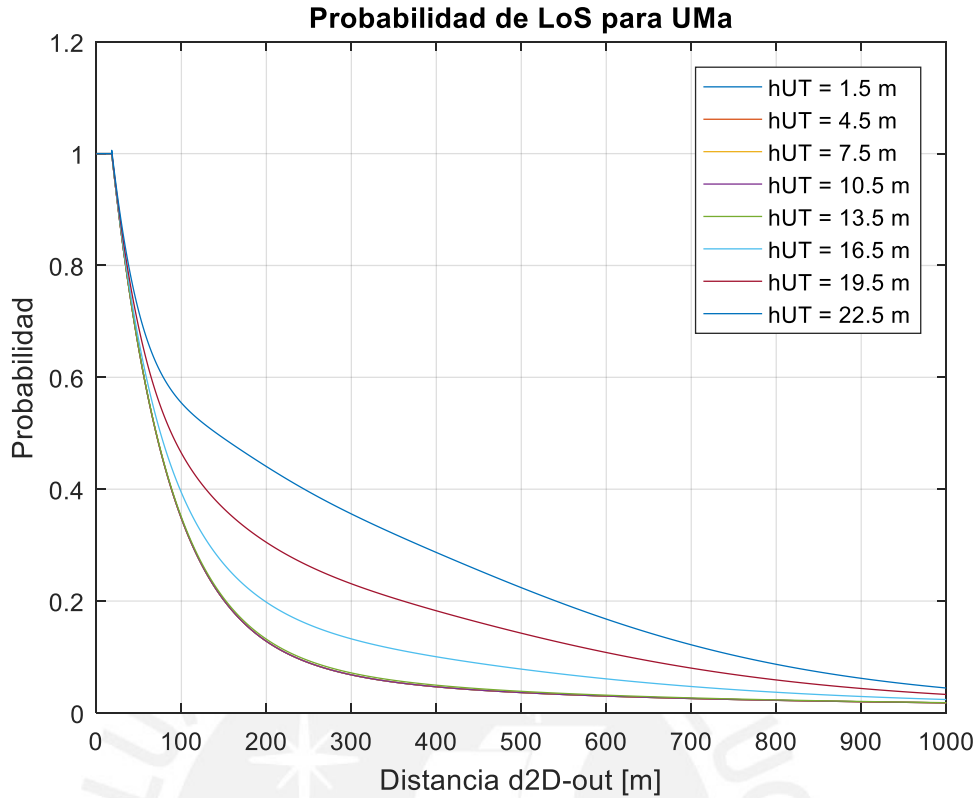
**Figura 3.8: Probabilidad tipo 1 y tipo 2: a) escenario UMa; b) escenario UMi [60].**

Para el modelado del PL NLoS, la Figura 3.9 (a) muestra el mecanismo primario de propagación de radio en un entorno UMa, donde las trayectorias de propagación dominantes viajan a través de difracciones múltiples sobre las azoteas, seguidas de difracción en el borde del edificio. La atenuación por PL aumenta con el ángulo de difracción a medida que una UE pasa de un piso alto a un piso bajo.



**Figura 3.9: Principio de propagación de radio para entornos NLoS: a) escenario UMa; b) escenario UMi [60].**

La Figura 3.10 nos muestra el comportamiento del modelo de probabilidad de LoS, para el escenario UMa del 3GPP TR 38.901, tomando la expresión en (3.19) a diferentes alturas del UT.



**Figura 3.10: Probabilidad de LoS para UMA a diferentes alturas del UT.**

#### **3.4. Escenario Microcelda Urbana (UMi-street canyon)**

El escenario UMi-street canyon (o cañón urbano), se desarrolla en un área donde la calle está flanqueada por edificios en ambos lados creando un entorno tipo cañón. Estos escenarios se dan cuando las calles separan cuadras o manzanas densas con edificaciones de gran altura, como rascacielos.

Los cañones urbanos afectan la recepción de las ondas de radio, incluidas las señales de navegación por satélite. La Figura 3.11 nos muestra un escenario street canyon típico.



**Figura 3.11: Escenario street canyon en la ciudad de Lima. Google 2013 [64].**

Los detalles sobre el escenario UMi-street canyon se detallan en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5: Parámetros de evaluación para el escenario UMi-street canyon [2].**

Parámetros		UMi - street canyon
Diseño de celda		Grilla hexagonal, 19 micro sitios, 3 sectores por sitio (ISD = 200 m)
Altura de antena BS $h_{BS}$		10 m
Ubicación del UT	Outdoor/indoor	Outdoor e indoor
	LoS/NLoS	LoS y NLoS
	Altura $h_{UT}$	Igual que 3D-UMi según TR 36.873
Radio indoor UT		80%
Movilidad UT(sólo plano horizontal)		3 km/h
Distancia mínima BS - UT (2D)		10 m
Distribución de UT (horizontal)		Uniforme

### 3.4.1. Pérdida en el trayecto de propagación para UMi LoS

El modelo de PL para UMi LoS del 3GPP TR 38.901, está expresado en la ecuación (3.24). El modelo de PL UMi para LoS es un modelo de punto de corte, por lo que consta de dos expresiones (3.22) y (3.23), dependiendo del rango en el que se encuentre la distancia  $d_{2D}$ .

$$PL_{UMi-LoS1}(dB) = 32.4 + 21\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) \quad (3.22)$$

$$PL_{UMi-LoS2}(dB) = 32.4 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) - 9.5\log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2) \quad (3.23)$$

$$PL_{UMi-LoS} = \begin{cases} PL_{UMi-LoS1}, & 10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d'_{BP}; \\ PL_{UMi-LoS2}, & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km}; \end{cases} \quad \sigma_{SF} = 4 \text{ dB} \quad (3.24)$$

El modelo es esencialmente un modelo de CI con el exponente de pérdidas en el trayecto de propagación (PLE)  $n = 2.1$  [37].

Las definición de la distancia de punto de corte  $d'_{BP}$  y de los otros parámetros son las mismas consideradas para(3.10). La distancia del punto de corte en un entorno urbano [48] es donde el PLE pasa del espacio libre ( $n = 2$ ) al modelo asintótico de reflexión en tierra de dos rayos  $n = 4$  [38], [37]. Los valores de los parámetros y rangos de aplicación se muestran en la Tabla 3.6.

Para frecuencias mm-wave, el uso de un punto de corte es discutido ya que no existen suficientes mediciones, pero algunas simulaciones de ray tracing [65] predicen que en efecto ocurre. Para frecuencias superiores a 28 GHz, dado que el radio de las celdas UMi es típicamente de alrededor de 500 m, el uso de un punto de corte y de los factores de altura en (3.11) no son realmente necesarios (la distancia de punto de corte es mayor a 500 m incluso con la menor distancia de corte posible cuando  $h_{BS} = 4$  m y  $h_{UT} = 1.5$ ). El modelo de CI proporciona una predicción similar de PL con una ecuación mucho más simple [37].

### 3.4.2. Pérdida en el trayecto de propagación para UMi NLoS

El modelo de PL para UMi NLoS, se presenta en la ecuación (3.25). Este modelo a su vez depende de la expresión (3.26).

$$PL_{UMi-NLoS} = \max(PL_{UMi-LoS}, PL'_{UMi-NLoS}); \quad \sigma_{SF} = 7.82 \text{ dB} \quad (3.25)$$

$$PL'_{UMi-NLoS} = 22.4 + 35.3\log_{10}(d_{3D}) + 21.3\log_{10}(f_c) - 0.3(h_{UT} - 1.5) \quad (3.26)$$

Se utiliza un ajuste matemático para corregir las deficiencias del modelo para establecer el modelo de LoS como límite inferior para el modelo NLoS. Los valores de los parámetros y rangos de aplicación también se muestran en la Tabla 3.6.

En el escenario NLoS, el modelo UMi del 3GPP utiliza el modelo ABG [33], con un término que depende de la frecuencia, que indica que el PL

aumenta con la frecuencia; y también tiene un término adicional de corrección de altura para el UT. El 3GPP TR 38.901, también proporciona un modelo opcional físico basado en CI para PL UMi NLoS, que se puede apreciar en (3.27).

$$PL_{UMi-NLoS} \text{ opcional} = 32.4 + 20\log_{10}(f_c) + 31.9\log_{10}(d_{3D}); \quad \sigma_{SF} = 8.2 \text{ dB} \quad (3.27)$$

**Tabla 3.6: Valores de parámetros predeterminados para LoS y NLoS según el modelo de PL UMi del 3GPP TR 38.901.**

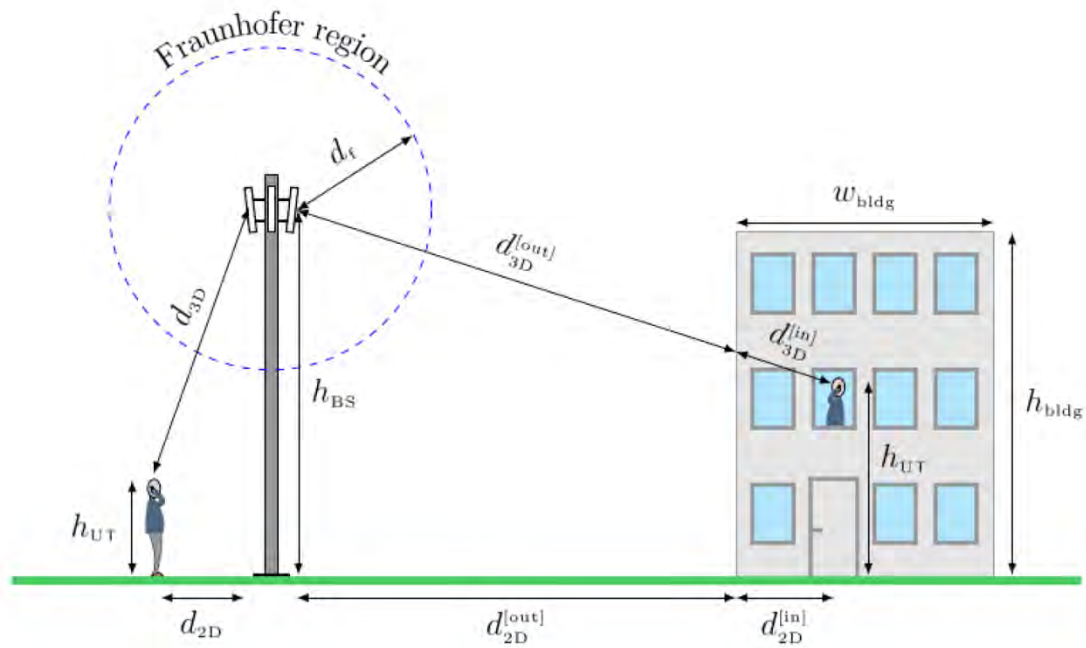
Valores por defecto y rangos de aplicación para UMi con LoS
$10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d'_{BP} (PL_1);$
$d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5000 \text{ m} (PL_2);$
$h_{BS} = 10 \text{ m}; 1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$
Valores por defecto y rangos de aplicación para UMi con NLoS
$10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq 5000 \text{ m};$
$h_{BS} = 10 \text{ m}; 1.5 \text{ m} \leq h_{UT} \leq 22.5 \text{ m}$

### 3.4.3. Probabilidad de LoS para el escenario UMi

En la ecuación (3.28) se presenta la probabilidad de LoS para el escenario UMi del 3GPP TR 38.901.

$$Pr_{LoS-UMi} = \begin{cases} 1, & d_{2D-out} \leq 18 \text{ m} \\ \frac{18}{d_{2D-out}} + \exp\left(-\frac{d_{2D-out}}{36}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D-out}}\right), & 18 \text{ m} < d_{2D-out} \end{cases} \quad (3.28)$$

La distancia  $d_{2D-out}$  se define en la Figura 3.12. Se observa en (3.28) que el modelo de probabilidad 3GPP UMi LoS no es una función de la altura del UT como en el modelo de probabilidad UMa LoS.



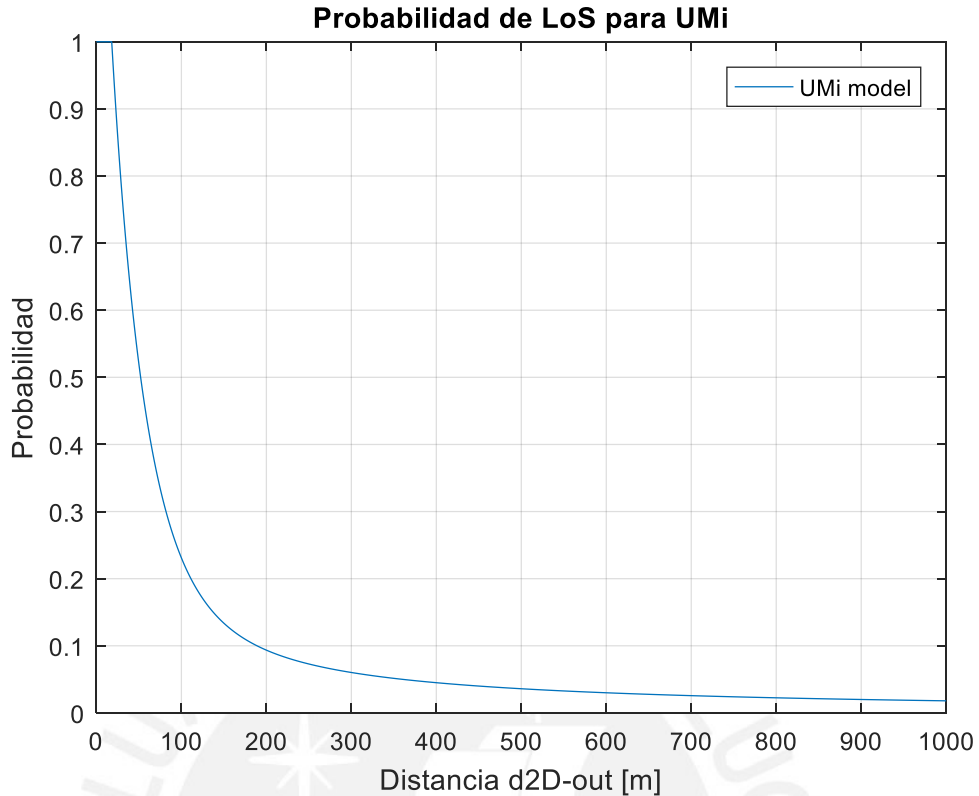
**Figura 3.12: Distancias para escenarios: outdoor (izquierda) y outdoor-indoor (derecha) [66].**

El modelo de probabilidad de LoS de ITU UMi [12] se reutiliza para el escenario UMi del 3GPP TR 38.901. En un escenario UMi, donde la altura de la antena de la BS es inferior a la altura de los edificios circundantes, los estados LoS de tipo 1 y tipo 2 se modelan de manera semejante a los del escenario UMa, como una suma de probabilidades de tipo 1 y tipo 2 de LoS [63] como se muestra en la Figura 3.8 (b). Sin embargo, mediante simulaciones de ray tracing [12], se encontró que la altura del UT probablemente no afecte la probabilidad de LoS en el escenario UMi ya que la condición de LoS de tipo 2 está limitada a situaciones donde la altura del UT es significativamente mayor que la de los edificios que obstaculizan la señal y por lo tanto, raramente puede ocurrir (principalmente debido a la baja altura de la BS) [60].

El principio de propagación de radio para NLoS en un entorno UMi dicta que las rutas de propagación dominantes viajan a través y alrededor de los edificios. El UT también puede recibir una pequeña energía por propagación por encima de las azoteas [60], como se muestra en la Figura 3.9 (b).

La Figura 3.13 describe el comportamiento del modelo de probabilidad de LoS, para el escenario UMi del 3GPP TR 38.901, tomando la expresión en (3.28).





**Figura 3.13: Probabilidad de LoS para UMi.**

### 3.5. Escenario Indoor-office (InH)

El escenario indoor incluye oficinas abiertas y cerradas, corredores dentro de oficinas, entre otros. El ambiente de oficina típico tiene áreas de cubículos abiertos, oficinas amuralladas, áreas abiertas, corredores, etc., donde las paredes divisorias están compuestas de una variedad de materiales como placas de yeso, hormigón vertido, vidrio, bloques de hormigón, etc. Para el entorno de oficina, los puntos de acceso se montan a una altura de 3 m en los techos o las paredes. Los centros comerciales generalmente tienen entre 2 y 5 pisos de altura y, a menudo, incluyen un área abierta (atrio). En el entorno del centro comercial, los AP se montan a una altura de 3 m en las paredes o techos de los corredores y tiendas. La densidad de los puntos de acceso puede variar de uno por piso a uno por habitación, dependiendo de la banda de frecuencia y la potencia de salida. La disposición típica en un escenario InH se muestra en la Figura 3.14, así también, un ejemplo del entorno en un centro comercial se muestra en la Figura 3.15 [10].



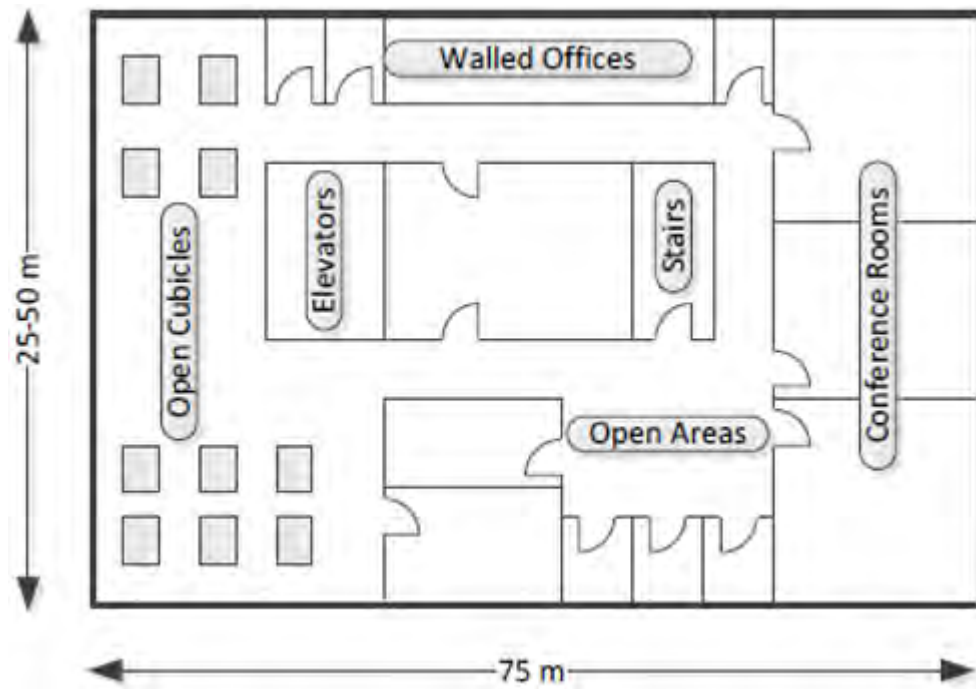


Figura 3.14: Disposición típica indoor oficina [10].



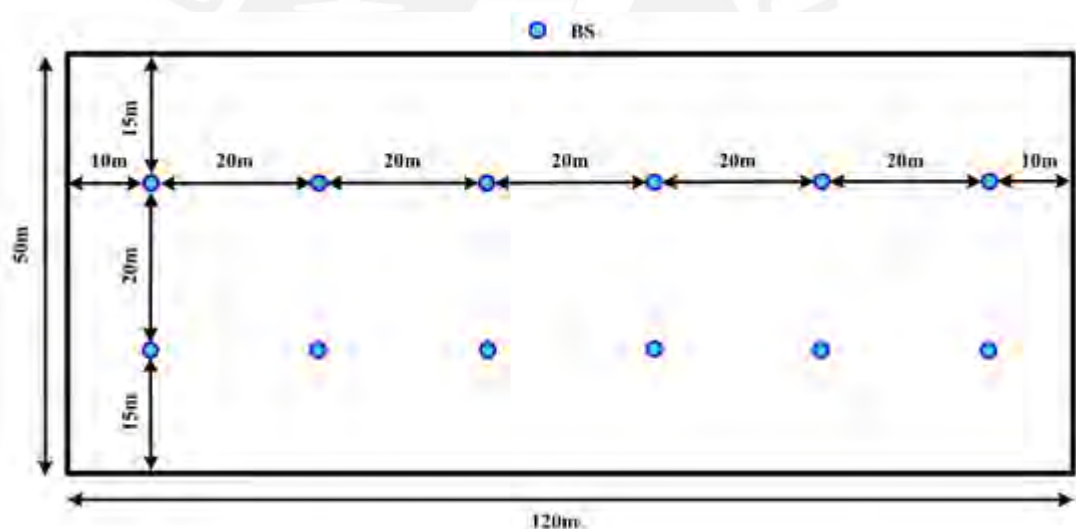
Figura 3.15: Centro comercial indoor Jockey Plaza, Lima. Codigo.pe 2015 [67].

Los detalles sobre los escenarios de indoor-office se listan en la Tabla 3.7, y en la Figura 3.16 se muestra un diseño simple de distribución de puntos de acceso.

**Tabla 3.7: Parámetros de evaluación para escenarios indoor-office [2].**

Parámetros		Indoor - office open office	Indoor - office mixed office
Diseño	Tamaño de habitación (W x L x H)	120 m x 50 m x 3 m	
	ISD	20 m	
Altura de antena de BS $h_{BS}$		3 m (en el techo)	
Ubicación del UT	LoS/NLoS	LoS y NLoS	
	Altura $h_{UT}$	1 m	
Movilidad del UT (sólo plano horizontal)		3 km/h	
Distancia mínima BS - UT (2D)		0	
Distribución UT (horizontal)		Uniforme	

En la Tabla 3.7 se observa que existen dos subescenarios para InH: oficina abierta (open office) y oficina mixta (mixed office). La única diferencia entre los modelos para estos subescenarios en el 3GPP TR 38.901, es la probabilidad de LoS. En la Figura 3.16 se muestra la distribución de puntos de acceso (BS) sugerida en el 3GPP TR 38.901, para un escenario InH.



**Figura 3.16: Distribución en escenarios indoor y oficina [2].**

### 3.5.1. Pérdida en el trayecto de propagación para InH LoS

El modelo de PL para el escenario de InH - Office LoS del 3GPP TR 38.901 [2] se expresa en (3.29).

$$PL_{InH-LoS} = 32.4 + 17.3 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c); \quad \sigma_{SF} = 3 \text{ dB} \quad (3.29)$$

Este modelo es válido hasta 100 m y es semejante al modelo de CI en el escenario UMi. Las diferencias con el modelo CI de UMi son que el PLE en InH - Office es ligeramente más bajo que en el UMi - Street Canyon, debido a que

existen más reflexiones y dispersión en el entorno indoor, debido a paredes y techos y efectos de guías de onda por los pasillos, que aumentan la potencia de señal recibida [68].

La Tabla 3.8 proporciona los valores de parámetros y rangos de aplicación para el modelo LoS.

### 3.5.2. Pérdida en el trayecto de propagación para InH NLoS

La expresión del modelo de PL NLoS del TR 38.901 InH – Office se presenta en (3.30). Esta expresión depende de (3.31).

$$PL_{InH-NLoS} = \max(PL_{InH-LoS}, PL'_{InH-NLoS}); \quad \sigma_{SF} = 8.03 \text{ dB} \quad (3.30)$$

$$PL'_{InH-NLoS} = 17.30 + 38.3 \log_{10}(d_{3D}) + 24.9 \log_{10}(f_c) \quad (3.31)$$

El modelo requiere un ajuste (función *max*) para asegurarse de tener como límite al modelo PL para LoS. Este modelo utiliza el modelo ABG UMi NLoS, excepto que no hay un término de corrección para la altura.

La Tabla 3.8 proporciona los valores de parámetros predeterminados para el modelo y NLoS InH.

**Tabla 3.8: Valores de parámetros predeterminados para LoS y NLoS según el modelo de PL InH del 3GPP TR 38.901.**

<b>Valores por defecto y rangos de aplicación para InH con LoS</b>
$1 \text{ m} \leq d_{3D} \leq 100 \text{ m};$ $h_{BS} = 3 \text{ m}; h_{UT} = 1 \text{ m}; ISD = 20 \text{ m}$
<b>Valores por defecto y rangos de aplicación para InH con NLoS</b>
$1 \text{ m} \leq d_{3D} \leq 86 \text{ m};$ $h_{BS} = 3 \text{ m}; h_{UT} = 1 \text{ m}; ISD = 20 \text{ m}$

### 3.5.3. Probabilidad de LoS para el escenario InH – Mixed office

En el TR 38.901, el entorno indoor office consta de dos tipos de casos: indoor hotspot (InH)-Mixed office e InH-Open office, donde la densidad de los obstáculos es mayor en Mixed office que en Open office, pero para ambos la altura de antena BS de 3 m.

En la ecuación (3.32) se presenta la probabilidad de LoS para el escenario InH – Mixed office del 3GPP TR 38.901.

$$Pr_{LoS-InH Mixed} = \begin{cases} 1, & d_{2D-in} \leq 1.2 \text{ m} \\ \exp\left(-\frac{d_{2D-in} - 1.2}{4.7}\right), & 1.2 \text{ m} < d_{2D-in} < 6.5 \text{ m} \\ \exp\left(-\frac{d_{2D-in} - 6.5}{32.6}\right) \cdot 0.32, & 6.5 \text{ m} \leq d_{2D-in} \end{cases} \quad (3.32)$$

El modelo InH – Mixed office del 3GPP es igual al modelo adoptado por el 5GCM [10], donde se investigaron diferentes tipos de entornos de oficinas interiores; que estuvieron basados en simulaciones de ray tracing [69]. Así también, el mmMAGIC adoptó el modelo de probabilidad 5GCM InH.

### 3.5.4. Probabilidad de LoS para el escenario InH – Open office

La probabilidad de LoS para el escenario InH – Open office del 3GPP TR 38.901, se expresa a continuación en la ecuación (3.33).

$$Pr_{LoS-InH Mixed} = \begin{cases} 1, & d_{2D-in} \leq 5 \text{ m} \\ \exp\left(-\frac{d_{2D-in} - 5}{70.8}\right), & 5 \text{ m} < d_{2D-in} \leq 49 \text{ m} \\ \exp\left(-\frac{d_{2D-in} - 49}{211.7}\right) \cdot 0.54, & 49 \text{ m} < d_{2D-in} \end{cases} \quad (3.33)$$

En este caso, el TR 38.901 retoma el modelo del TR 36.873 InH 6-site Case B y 12-site, para distancias ISD de 40 m en horizontal y 20 m en vertical [44]. La Figura 3.17 muestra el despliegue de estos dos escenarios.

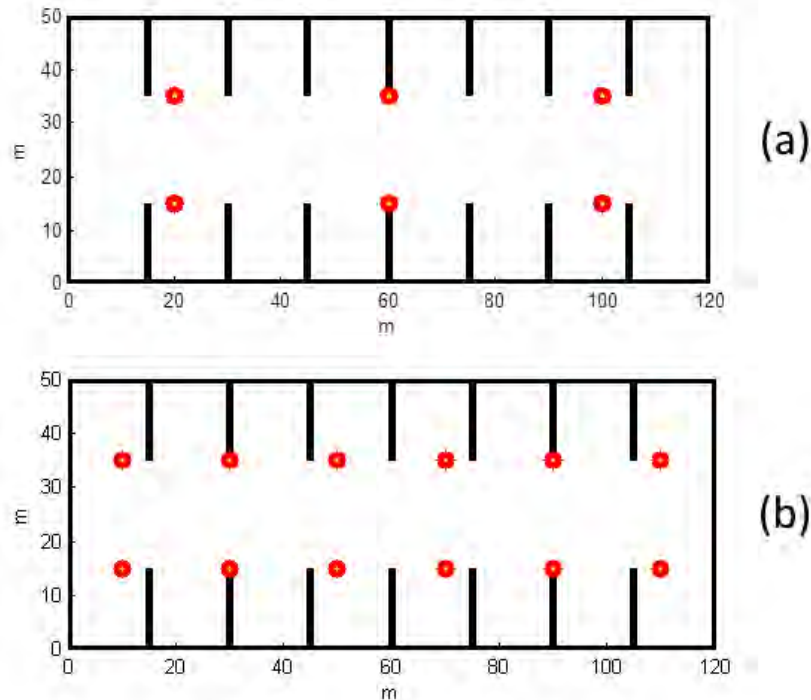
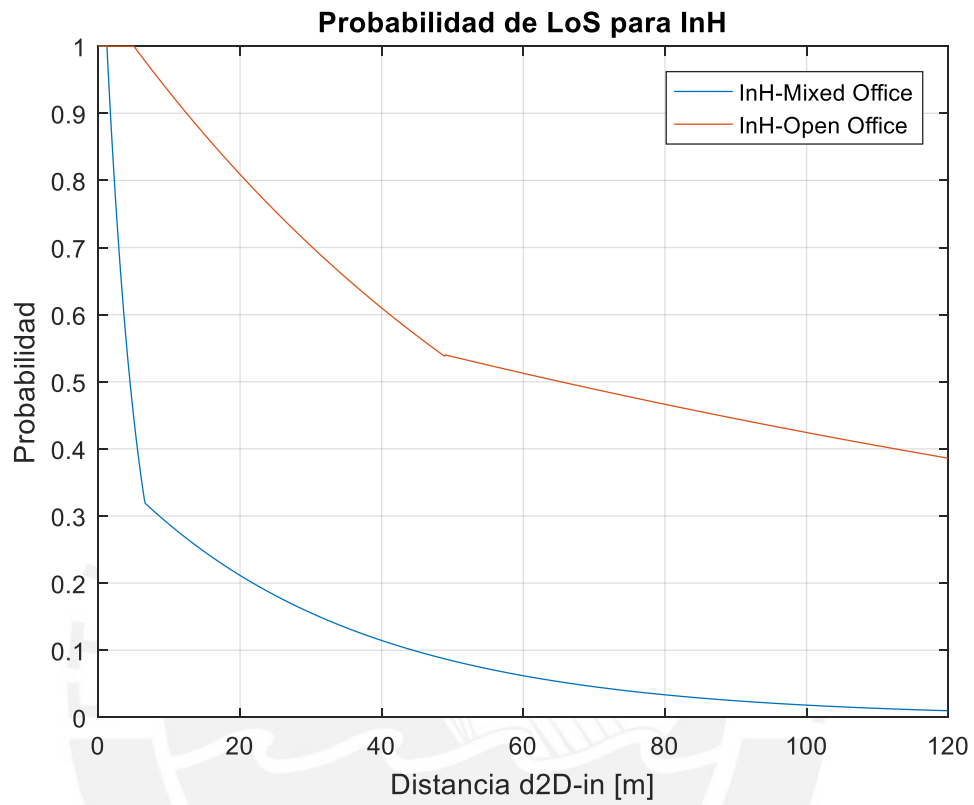


Figura 3.17: Despliegue Indoor hotspot: a) 6-site Case B; b) 12-site [44].

Como se puede apreciar en (3.33) y (3.32), ninguno de los modelos de probabilidad de LoS dependen de la altura del UT. La Figura 3.18 muestra el comportamiento del modelo de probabilidad de LoS, para el escenario InH del 3GPP TR 38.901, tomando las expresiones (3.32) y (3.33).



**Figura 3.18: Probabilidad de LoS para InH.**

## **4. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LA APLICACIÓN**

El presente capítulo comprende el desarrollo de la aplicación web para el cálculo de pérdidas en el trayecto de propagación, siguiendo los modelos y los 4 escenarios propuestos por el 3GPP en el TR 38.901 [2].

La aplicación contará con una interfaz web, mediante la cual se ingresarán los parámetros requeridos según el escenario, y donde se mostrará el resultado correspondiente al valor de PL. Este resultado podrá ser un único valor, o un rango de valores, en el caso de que los datos ingresados para frecuencia o distancia también sean un rango.

Para esto se deberán establecer los requerimientos del sistema, y posteriormente definir los lenguajes a utilizar, En el presente desarrollo se presentan las etapas de diseño de la interfaz web, cálculo de resultados, implementación del servidor web, pruebas, validación y comparación.

### **4.1. Diseño de la interfaz web**

#### **4.1.1. Selección de las herramientas de desarrollo**

La interfaz web es la responsable de la interacción entre un usuario y la aplicación y se visualizará a través de un navegador web, como lo son Internet Explorer, Firefox, Google Chrome, entre otros.

Para diseñar la interfaz, la primera herramienta que se va a utilizar es el Lenguaje HTML que nos permitirá estructurar el texto, imágenes y otros contenidos que se quieren mostrar al cliente o usuario. HTML es un lenguaje diseñado para estructurar documentos web, de manera que el navegador pueda mostrar el contenido apropiadamente; y no es el indicado para dar formatos y

estilos [70], si lo que se busca es hacer una aplicación dinámica y accesible para el usuario. Es por ello que además de HTML será necesario utilizar las Hojas de Estilo en Cascadas, o CSS por sus siglas en inglés. CSS es un lenguaje de estilos, que define la apariencia de los documentos HTML [70]. Por ejemplo, CSS abarca cuestiones relativas a fuentes, colores, márgenes, líneas, altura, anchura, imágenes de fondo, entre otros.

Adicional a estos dos lenguajes que dan estructura y estilos a los documentos HTML, existen los lenguajes de programación para agregar funcionalidad al documento. Existen diferentes lenguajes de programación que se pueden utilizar para programar aplicaciones web. Entre los más utilizados en la actualidad, se tiene:

- Java
- Python
- JavaScript
- C++
- C#
- Pearl
- PHP
- Otros

JavaScript fue la opción seleccionada, al ser un lenguaje interpretado y no requiere compilación. Es similar a Java, aunque no es un lenguaje orientado a objetos. JavaScript es compatible con todos los navegadores, se utiliza en más del 90 por ciento de todas las páginas web y es el idioma más popular en StackOverflow [71].

Entre las ventajas de utilizar JavaScript, se pueden nombrar:

- Es un lenguaje de scripting seguro y fiable.
- Los scripts tienen capacidades limitadas, por razones de seguridad.
- El código JavaScript se ejecuta en el cliente.

Entre las desventajas están:

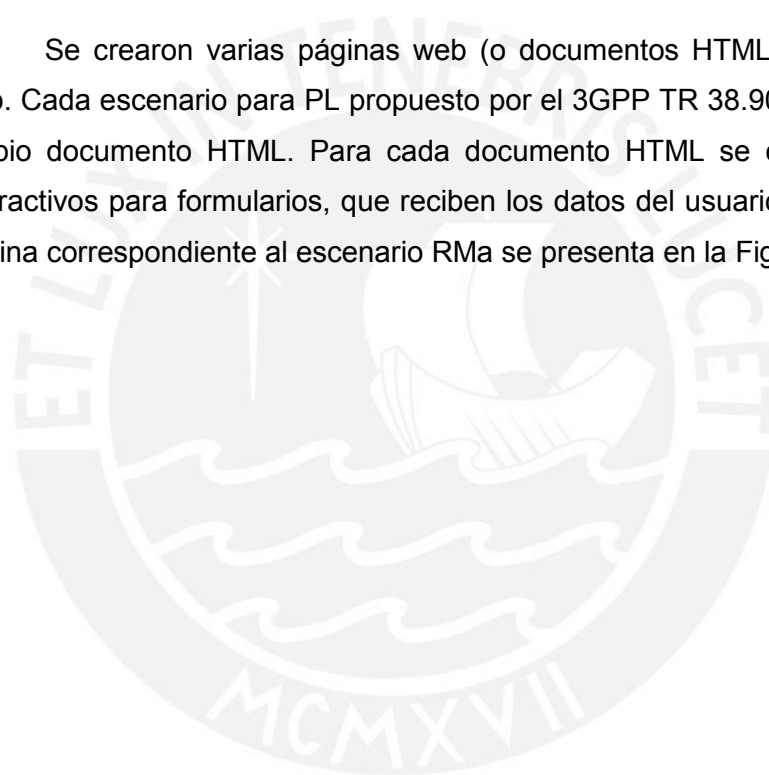
- El código es visible por cualquier usuario.
- El código debe descargarse completamente antes de poder ejecutarse.

En el presente desarrollo, y teniendo en cuenta los resultados que se querían obtener con la aplicación, las ventajas hicieron que JavaScript sea el más adecuado para hacer más interactiva la interfaz web. Debido a que sólo iba a utilizarse para agregar funciones a la interfaz, sus desventajas no presentaron mayor complicación.

#### **4.1.2. Implementación de la interfaz web**

El lenguaje HTML utiliza etiquetas para generar los diferentes elementos dentro de la página web. Se utilizan estas etiquetas para crear el contenido de la aplicación web, entre los que se tiene: título de la página, cabeceras, imágenes, cuadros para entrada de texto, entre otros.

Se crearon varias páginas web (o documentos HTML) para la interfaz web. Cada escenario para PL propuesto por el 3GPP TR 38.901, cuenta con su propio documento HTML. Para cada documento HTML se crearon controles interactivos para formularios, que reciben los datos del usuario. Por ejemplo, la página correspondiente al escenario RMa se presenta en la Figura 4.1.





RMa - Pérdidas en el trayecto ×

← → ↻ 🏠 🔍 Search or enter address

[Macrocela rural](#) [Macrocela urbana](#) [Microcela urbana](#) [InH/Oficina](#)

### Calculador de Atenuación

Tabulación

Frecuencia [ $0.5 \leq f_c \leq 30$ ]

GHz

Distancia 2D [ $10 \leq d_{2D} \leq 10000$ ]

m

Altura BS [ $10 \leq h_{BS} \leq 150$ ]

m

Altura UT [ $1 \leq h_{UT} \leq 10$ ]

m

Altura de edificios [ $5 \leq h \leq 50$ ]

m

Ancho de calles [ $5 \leq W \leq 50$ ]

m

Line of sight

**Figura 4.1: Interfaz web para escenario RMa, sin estilos.**

Los datos requeridos por el usuario para RMa, al igual que para los otros escenarios de PL, se detallan en el Capítulo 3. Como se puede observar en la Figura 4.1, se han creado los elementos básicos para la página web del escenario RMa; como lo son el título, los enlaces para los otros escenarios y el formulario para la entrada de datos. Este primer desarrollo carece de estilos, y si bien HTML nos permite agregar algunos estilos, se reservará HTML para la estructuración del contenido solamente. Usando CSS se modificó la presentación de los elementos dentro del documento HTML, lo que agrega estilos y detalles personalizados. La Figura 4.2 presenta el documento HTML con los estilos aplicados con CSS.

RMa - Pérdidas en el trayecto

← → ↻ 🏠 🔍 Search or enter address

## Pérdidas en el trayecto de propagación

[Macrocela rural](#)
[Macrocela urbana](#)
[Microcela urbana](#)
[InH/Oficina](#)

### Calculador de Atenuación

Tabulación

Frecuencia [ $0.5 \leq f_c \leq 30$ ]  GHz

Distancia 2D [ $10 \leq d_{2D} \leq 10000$ ]  m

Altura BS [ $10 \leq h_{BS} \leq 150$ ]  m

Altura UT [ $1 \leq h_{UT} \leq 10$ ]  m

Altura de edificios [ $5 \leq h \leq 50$ ]  m

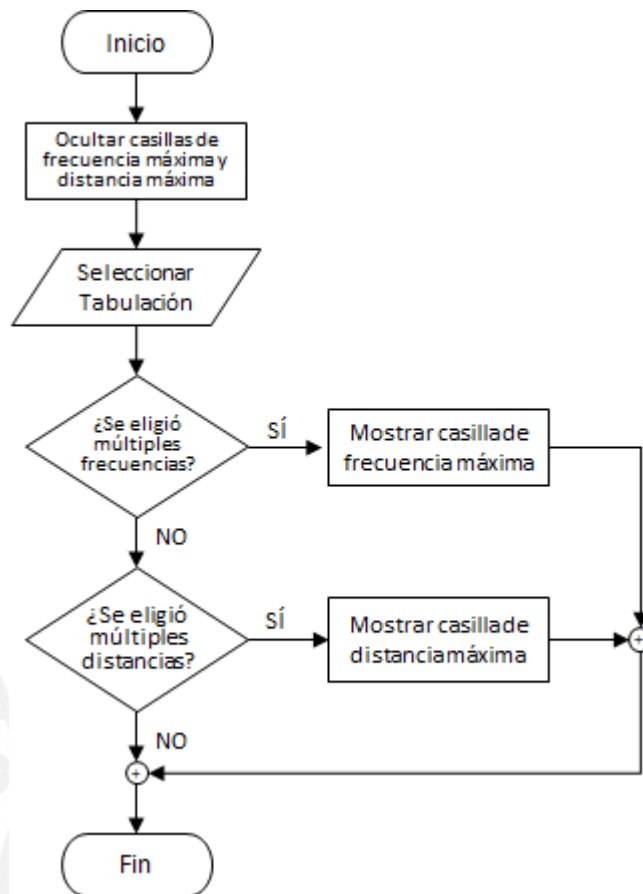
Ancho de calles [ $5 \leq W \leq 50$ ]  m

Line of sight

[» Pérdidas de trayecto](#)

**Figura 4.2: Interfaz web para escenario RMa, con estilos.**

Se ha implementado una casilla llamada Tabulación, para tener la opción de hacer los cálculos para un único valor de frecuencia  $f_c$  y distancia  $d_{2D}$ , o para un rango de frecuencias o un rango de distancias. Se puede apreciar en la Figura 4.3 cómo se implementó esta función. El usuario ingresa valores iniciales de  $f_c$  y  $d_{2D}$ , y adicionalmente puede ingresar valores  $f_c \text{ máx.}$  o  $d_{2D} \text{ máx.}$ , pero sólo uno de ellos a la vez. Posteriormente cuando se ejecute el procedimiento de envío de datos, recepción y visualización de resultados, se enviará la opción seleccionada: único valor o rango de valores; lo que le indicará a la etapa de cálculo de resultados el procedimiento correspondiente.



**Figura 4.3: Diagrama de flujo del procedimiento de selección de rangos o valores para las variables  $f_c$  y  $d_{2D}$ .**

El cálculo de PL se lleva a cabo en la etapa de cálculo de resultados. Sin embargo, el procedimiento para mostrar los resultados se hace en el diseño de la interfaz web, utilizando JavaScript. En la Figura 4.4 se pueden ver los resultados que se mostrarán una vez se procesen los datos ingresados. Se puede apreciar que, adicionalmente se muestra una tabla con los valores de frecuencia (o distancia) y PL, para cuando el cálculo sea para un rango de valores en frecuencia (o distancia), y no un único valor.

Pathloss (dB)

Shadow fading (dB)

Pathloss total (dB)

Valor	Frecuencia fc [MHz]	Pathloss [dB]
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

**Figura 4.4: Visualización de resultados.**

También se van a mostrar los valores tabulados, en una gráfica; para lo cual se está utilizando una biblioteca de JavaScript. La biblioteca utilizada es plotly.js [72].



**Figura 4.5: Gráfico de resultados tabulados.**

Para los otros escenarios: UMa, UMi e InH, el ingreso de datos es más simple, ya que se solicitan menos datos que los solicitados en RMa, como se aprecia en la Figura 4.6. Los rangos de aplicación también son los que se

determinaron en el Capítulo 3, de acuerdo al escenario. La visualización de los resultados es la misma sin importar el escenario.

The figure displays four screenshots of the 'Calculador de Atenuación' (Attenuation Calculator) interface, labeled (a) through (d), corresponding to different scenarios: (a) RMA, (b) UMa, (c) UMi, and (d) InH. Each screenshot shows a form with the following fields and values:

- Tabulación:** Un sólo valor (dropdown)
- Frecuencia:**  $[0.5 \leq f_c \leq 30]$  GHz (range: 0.5 to 30)
- Distancia 2D:**  $[10 \leq d_{2D} \leq 10000]$  m (range: 10 to 10000)
- Altura BS:**  $[10 \leq h_{BS} \leq 150]$  m (range: 10 to 150)
- Altura UT:**  $[1 \leq h_{UT} \leq 10]$  m (range: 1 to 10)
- Line of sight:** LoS (dropdown)

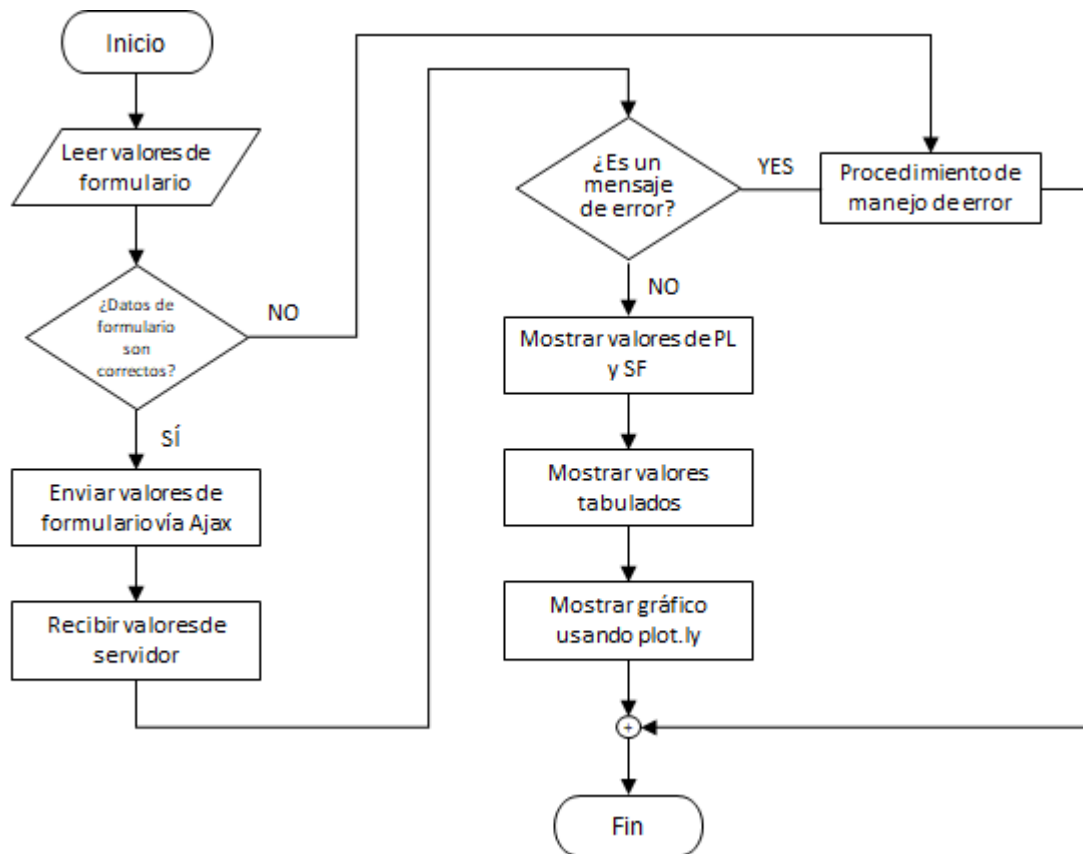
The specific values entered in each screenshot are:

- (a) RMA:** Frecuencia: [empty], Distancia 2D: [empty], Altura BS: [empty], Altura UT: [empty].
- (b) UMa:** Frecuencia: [empty], Distancia 2D: [empty], Altura BS: 25, Altura UT: [empty].
- (c) UMi:** Frecuencia:  $[0.5 \leq f_c \leq 100]$  GHz (range: 0.5 to 100), Distancia 2D:  $[10 \leq d_{2D} \leq 5000]$  m (range: 10 to 5000), Altura BS: 10, Altura UT: [empty].
- (d) InH:** Frecuencia:  $[0.5 \leq f_c \leq 100]$  GHz (range: 0.5 to 100), Distancia 2D:  $[1 \leq d_{2D} \leq 99.979]$  m (range: 1 to 99.979), Altura BS: 3, Altura UT: 1.

**Figura 4.6: Ingreso de datos para a) RMa, b) UMa, c) UMi y d) InH.**

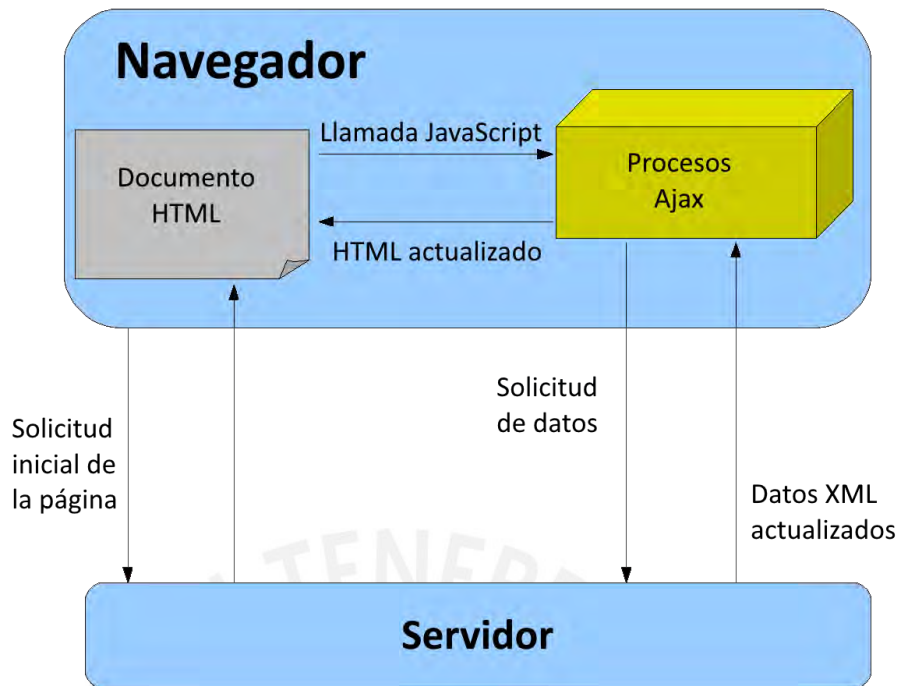
Se han agregado otros detalles a la interfaz, como títulos, logos e imágenes explicativas del TR 38.901 [2]; pero que no afectan el cálculo de resultados.

En la Figura 4.7 se puede observar el diagrama de flujo utilizado para la programación de los procedimientos de envío de datos, recepción y visualización de resultados. Como ya se mencionó, estos procedimientos se realizaron con lenguaje JavaScript. En primer lugar, se debe verificar que los valores ingresados por el usuario cumplan con el formato y sean exclusivamente números. También se verifican los valores máximos y mínimos que se pueden ingresar en las casillas, y para ello se han utilizado los rangos de aplicación correspondientes a cada variable y escenario, de acuerdo con el 3GPP TR 38.901 [2]. Utilizando Ajax, se enviarán los datos del formulario a la etapa de cálculo de resultados que se implementó en lenguaje PHP en el lado del servidor. Se reciben los resultados calculados por el procedimiento, y se verificará si hubo algún error y se muestra en pantalla cuál fue el error mediante el procedimiento de manejo de errores. Si no hubo errores, entonces se ejecutan los procedimientos de visualización de resultados, tablas y gráficos.



**Figura 4.7: Diagrama de flujo para la visualización de resultados.**

En la Figura 4.8, se muestra el funcionamiento de Ajax. En una primera instancia, el documento HTML hace una solicitud directamente al servidor; cuando el servidor responde, todo el documento se actualiza para mostrar la información solicitada. Sin embargo, posteriores solicitudes se hacen a través de los procesos de Ajax, lo que hace que sólo el elemento que se quiere actualizar, con la información del servidor, lo haga, sin necesidad de actualizar todo el documento HTML.



**Figura 4.8: Funcionamiento de Ajax.**

## 4.2. Cálculo de resultados

### 4.2.1. Selección de las herramientas de desarrollo

La etapa de cálculo recibe los datos ingresados por el usuario en la interfaz web para calcular el PL.

Para realizar las operaciones matemáticas necesarias, se seleccionó el lenguaje PHP (Hypertext Preprocessor), ya que gracias a Ajax (término que se explicará más adelante) la interacción entre ambos lenguajes es bastante sencilla de implementar.

PHP es utilizado en más del 80 por ciento de los sitios web de hoy [71] y necesita ser compilado para ejecutarse. Para su funcionamiento necesita tener instalado Apache o IIS con las librerías de PHP en el lado del servidor.

Las ventajas más importantes de PHP son:

- Fácil de aprender.
- Es un lenguaje muy rápido.
- Soporta en cierta medida la orientación a objeto. Clases y herencia.
- Es un lenguaje multiplataforma: Linux, Windows, entre otros.

- Tiene capacidad de conexión con la mayoría de los manejadores de base de datos: MySQL, PostgreSQL, Oracle, MS SQL Server, etc.
- Posee documentación en su página oficial la cual incluye descripción y ejemplos de cada una de sus funciones.
- Es libre, por lo que se presenta como una alternativa de fácil acceso para todos.
- Incluye gran cantidad de funciones.
- No requiere definición de tipos de variables ni manejo detallado del bajo nivel.

Sus desventajas, por otro lado, son:

- Se necesita instalar un servidor web.
- Todo el trabajo lo realiza el servidor y no delega al cliente. Por tanto, puede ser más ineficiente a medida que las solicitudes aumenten de número.
- La legibilidad del código puede verse afectada al mezclar sentencias HTML y PHP.

El término Ajax se acuñó por primera vez en 2005. Significa Asynchronous JavaScript and XML, que, en términos simples, significa utilizar un conjunto de métodos integrados en JavaScript para transferir datos entre el navegador y un servidor en segundo plano. Así, es posible que nuevas secciones de un documento HTML, se descarguen del servidor cuando sea necesario, sin necesidad de actualizar la página. [73].

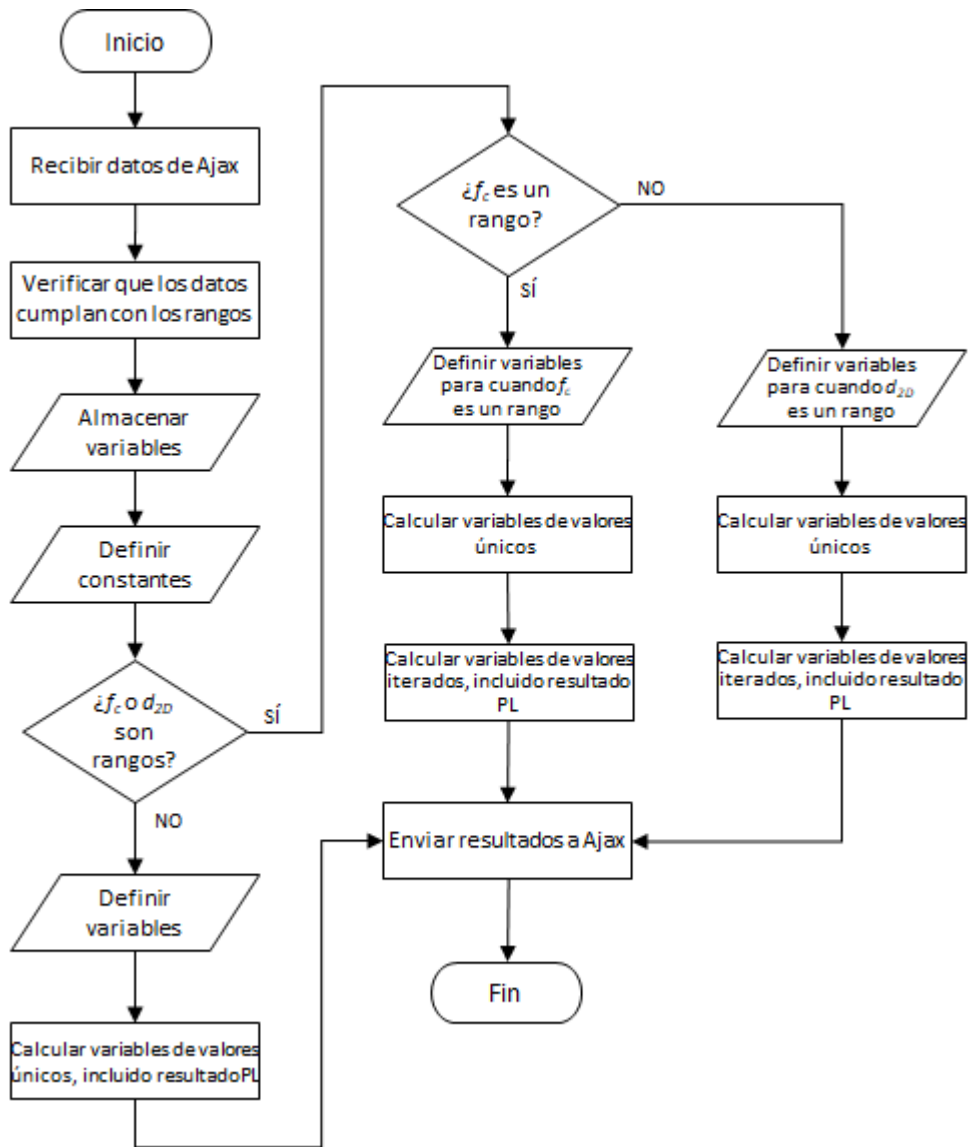
El uso de Ajax no solo reduce sustancialmente la cantidad de datos que se deben enviar de un lado a otro, sino que también hace que las páginas web sean perfectamente dinámicas, lo que les permite comportarse más como aplicaciones autónomas. Los resultados son una interfaz de usuario mucho mejor y una mejor capacidad de respuesta [73].

#### **4.2.2. Implementación del cálculo de resultados**

La información recibida a través de Ajax, correspondiente a cada escenario de PL (ver Figura 4.6), se procesa con las funciones creadas en el documento PHP, y así se puede devolver como resultado las pérdidas en el trayecto (PL) en dB, el shadow fading (SF) en dB, y el total de ambos. Así también se utiliza la iteración para calcular varios valores de PL dependiendo de



si las variables  $f_c$  o  $d_{2D}$  son rangos o valores únicos, pero sólo una de ellas puede ser un rango.

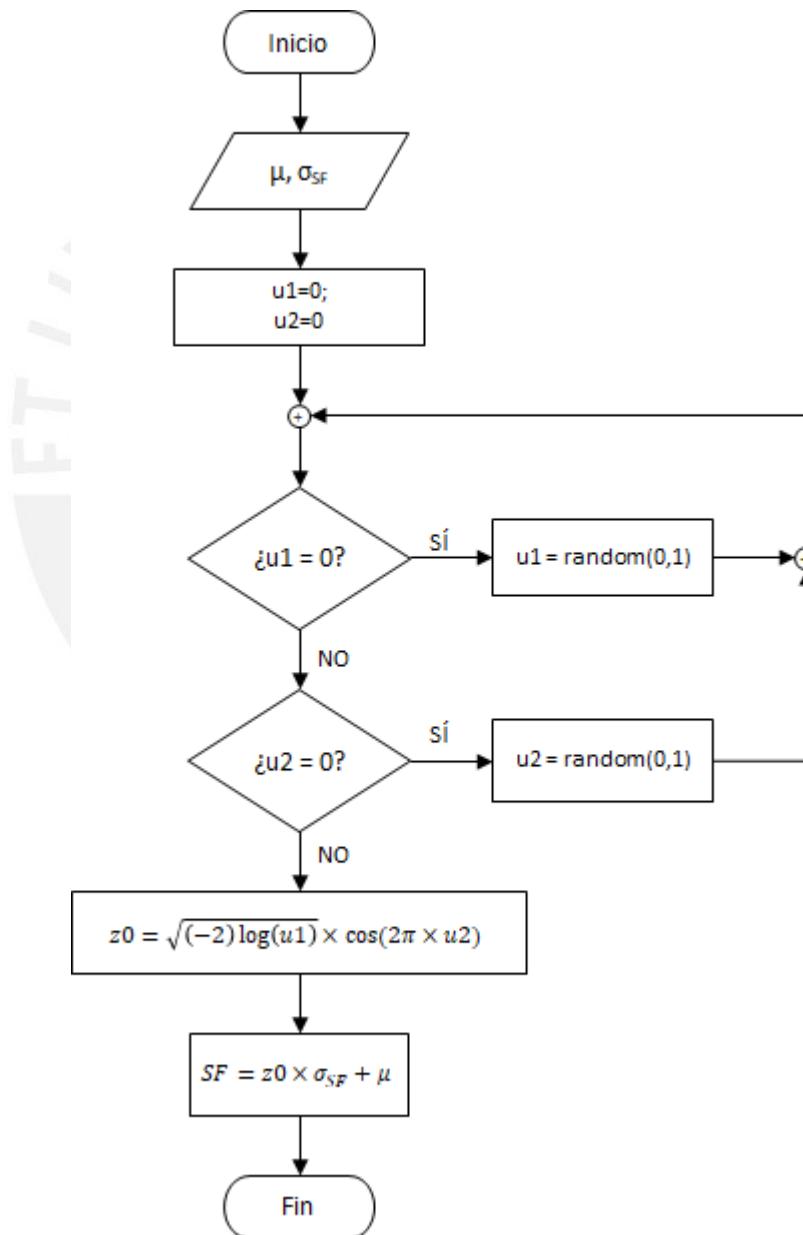


**Figura 4.9: Diagrama de flujo para el cálculo de resultados.**

En la Figura 4.9 se muestra el diagrama de flujo para el cálculo de resultados. Se consideran tres casos para el cálculo de los resultados, que se derivan de lo anteriormente explicado. El primer caso es cuando todas las variables tienen valores únicos, el segundo caso es cuando la variable  $f_c$  es un vector o rango de valores, y todas las demás sean valores únicos; y el tercer caso es cuando la variable  $d_{2D}$  es un vector, y todas las demás sean valores únicos. Dependiendo de esto último y con base en los modelos de PL de los escenarios explicados en el Capítulo 3, toda variable que dependa de un rango de frecuencia o distancia, será un rango, y se calculará de manera diferente a

las variables que dependen de valores únicos. Por eso en el diagrama de flujo se hace la diferenciación, calcular valores únicos y calcular valores iterados.

Si bien para el cálculo del PL y de todas las variables de las que depende, sólo basta aplicar las ecuaciones del modelo de PL, para el determinar el SF se tiene que implementar una función que nos permita generar números aleatorios con distribución gaussiana. Para ello nos vamos a valer de la transformada de Box-Muller [74] y de los valores de  $\sigma_{SF}$  de la Tabla 7.4.1-1 del 3GPP TR 38.901 [2], considerando al valor promedio  $\mu = 0$ . El diagrama de flujo de esta función se puede apreciar en la Figura 4.10.



**Figura 4.10: Diagrama de flujo de la función para generar números aleatorios con distribución normal.**

Finalmente, los resultados se envían vía Ajax, a la etapa de visualización; y específicamente, al procedimiento de recepción de datos.

### **4.3. Servidor web**

#### **4.3.1. Selección de las herramientas de desarrollo**

Este sistema o aplicación web será subido en un servidor web para que así pueda ser accesible a los usuarios. El servidor web se mantendrá a la espera de peticiones por parte de los clientes que, en este caso, será un navegador web que hará una llamada a la aplicación.

Habiendo seleccionado las herramientas para el desarrollo de las etapas anteriores, los requerimientos en el servidor web serán básicamente, tener Apache o IIS con las librerías de PHP. Debido a que Apache es más comúnmente utilizado en la mayoría de servidores web, se instalará junto con PHP en un servidor que, para la presente tesis, contará con una distribución Linux.

#### **4.3.2. Implementación del servidor web**

Para que la aplicación pueda subirse a un servidor, debemos instalar en el servidor Apache y PHP. El servidor estará implementado con una distribución Linux, específicamente CentOS 6.

Para instalar Apache Web Server se escribirá el siguiente comando en la interfaz del sistema operativo:

```
sudo yum -y install httpd
```

A continuación, se debe habilitar Apache como un servicio para que se inicie automáticamente al inicio:

```
sudo systemctl enable httpd.service
```

Para instalar PHP en su última versión se debe ejecutar lo siguiente:

```
sudo yum install php
```

Con la ejecución de estos tres comandos, ya se tiene instalado Apache Web Server, así como PHP. Es necesario configurar Apache para poder subir los documentos HTML que componen la aplicación. Las configuraciones necesarias son [75]:

- Crear la estructura del directorio
- Otorgar permisos

- Crear archivos de host virtuales
- Habilitar los archivos de host virtuales

Los archivos que se subirán al servidor son:

- descargas.php
- footer.php
- header.php
- index.php
- InH.php
- RMa.php
- UMa.php
- UMi.php

Estos archivos contienen las interfaces web para cada uno de los escenarios para PL, según el 3GPP TR 38.901. El archivo «index» es la página principal que se abre al insertar el URL de la página en el navegador. Los archivos «header.php» y «footer.php» contienen código para la cabecera y pie de página de los documentos HTML. Adicionalmente se han creado carpetas para organizar otros archivos que serán solicitados al ejecutarse los archivos anteriores.

- css
  - formas.css
- images
  - img\_741-1.png
  - img\_741-2.png
  - img\_InH.png
  - img\_path.png
  - img\_RMa.png
  - img\_UMa.png
  - img\_UMi.png
  - logo.png
  - posgrado.png
- js
  - results.js
- php

- calc\_InH.php
- calc\_RMa.php
- calc\_UMa.php
- calc\_UMi.php

La carpeta «css» contiene los archivos CSS que darán estilos a los documentos HTML. La carpeta «images» contiene las imágenes que se mostrarán en los documentos HTML. En la carpeta «js» se encuentra el archivo JavaScript que se encargará del envío de datos, recepción y visualización de resultados. Finalmente, en la carpeta «php» están los archivos que contienen el código encargado del cálculo de los resultados, para cada uno de los escenarios.

#### 4.4. Pruebas

En el presente apartado se mostrarán los resultados para cada uno de los escenarios de PL. Los datos que se ingresarán en la aplicación serán los parámetros de evaluación detallados en el punto 7.2 del 3GPP TR 38.901 [2]. Así también, se utilizarán los valores por defecto de la Tabla 7.4.1-1, del mismo documento.

Todas las frecuencias están en GHz y las distancias, alturas y anchos; están en metros. La aplicación está programada de manera que envíe un aviso si los datos ingresados están fuera de rango. Para utilizar la aplicación basta ingresar los valores en las casillas que corresponden y hacer clic en el botón «>>Pérdidas en el trayecto». Los resultados aparecen en la parte inferior de la página web y están en dB. La aplicación está disponible en <https://goo.gl/B4HDqu>.

##### 4.4.1. Escenario RMa

Los parámetros de evaluación para los cuatro escenarios se muestran en la Tabla 4.1. En la Figura 4.11 se muestran los valores ingresados en la interfaz web para el caso del escenario RMa.

**Tabla 4.1: Parámetros de evaluación para los cuatro escenarios [2].**

Parámetros	Escenario			
	RMa	UMa	UMi	InH
Frecuencia mínima [GHz]	0.5	2	2	2
Frecuencia máxima [GHz]	7	28	28	4
Distancia 2D [m]	35	35	10	10
Altura BS [m]	35	25	10	3
Altura UT [m]	1.5	1.5	1.5	1

Altura de los edificios [m]	5	No aplica	No aplica	No aplica
Ancho de las calles [m]	20	No aplica	No aplica	No aplica

Tabulación

Frecuencia [ $0.5 \leq f_c \leq 30$ ]  GHz

Frecuencia máxima ( $f_{c \text{ máx.}}$ )  GHz

Distancia 2D [ $10 \leq d_{2D} \leq 10000$ ]  m

Altura BS [ $10 \leq h_{BS} \leq 150$ ]  m

Altura UT [ $1 \leq h_{UT} \leq 10$ ]  m

Altura de edificios [ $5 \leq h \leq 50$ ]  m

Ancho de calles [ $5 \leq W \leq 50$ ]  m

Line of sight

**Figura 4.11: Parámetros de evaluación para escenario RMa.**

Después de presionar el botón para el cálculo de las pérdidas en el trayecto, se obtiene el resultado mostrado en la Figura 4.12 y Figura 4.13.

Pathloss (dB)

60.3

Shadow fading (dB)

-5.5

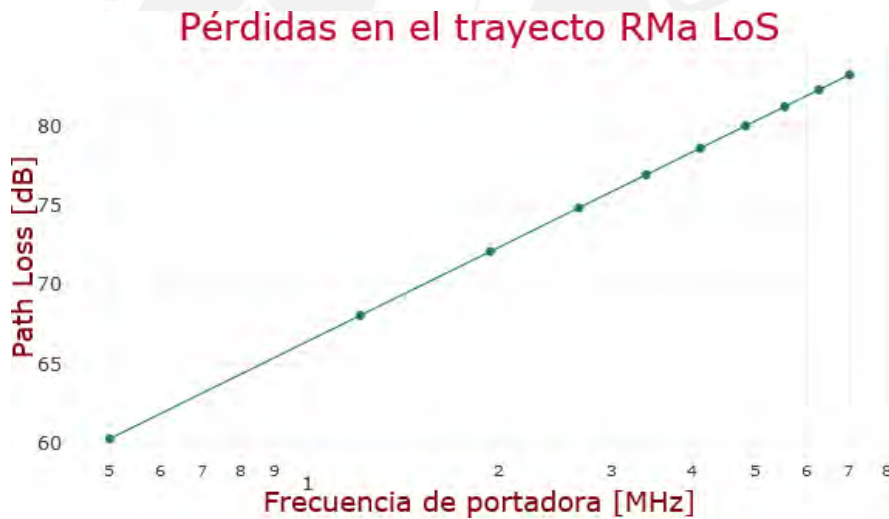
Pathloss total (dB)

54.8

Valor	Frecuencia fc [MHz]	Pathloss [dB]
1	0.50	60.30
2	1.22	68.06
3	1.94	72.10
4	2.67	74.84
5	3.39	76.92
6	4.11	78.60
7	4.83	80.00
8	5.56	81.21
9	6.28	82.28
10	7.00	83.22

Tabla de pérdidas en función de las frecuencias

**Figura 4.12: Resultados para escenario RMa LoS.**



**Figura 4.13: Resultados gráficos para escenario RMa LoS.**

Para el caso de NLoS, con todos los demás parámetros iguales, se obtiene el resultado de la Figura 4.14 y Figura 4.15.

Pathloss (dB)

62.7

Shadow fading (dB)

-14.5

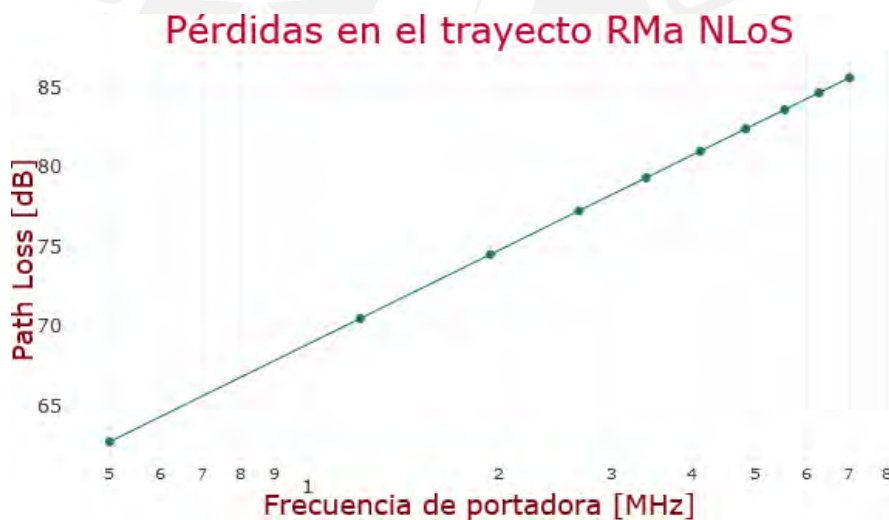
Pathloss total (dB)

48.2

Valor	Frecuencia fc [MHz]	Pathloss [dB]
1	0.50	62.72
2	1.22	70.48
3	1.94	74.52
4	2.67	77.26
5	3.39	79.34
6	4.11	81.02
7	4.83	82.43
8	5.56	83.64
9	6.28	84.70
10	7.00	85.64

Tabla de pérdidas en función de las frecuencias

**Figura 4.14: Resultados para escenario RMa NLoS.**



**Figura 4.15: Resultados gráficos para escenario RMa NLoS.**

#### 4.4.2. Escenario UMa

Los valores ingresados en la interfaz web para el caso del escenario UMa se tomaron de la Tabla 4.1. En este caso se tomarán, además, los valores de la Tabla 6-1 del 3GPP TR 36.873 [44], para la frecuencia central mínima y la altura del UT para cuando está en outdoor. La frecuencia máxima se determina arbitrariamente a 28 GHz, que pertenece a una banda de interés para el 5G. El resultado se muestra en la Figura 4.16 y Figura 4.17.



Pathloss (dB)

69.8

Shadow fading (dB)

-4.6

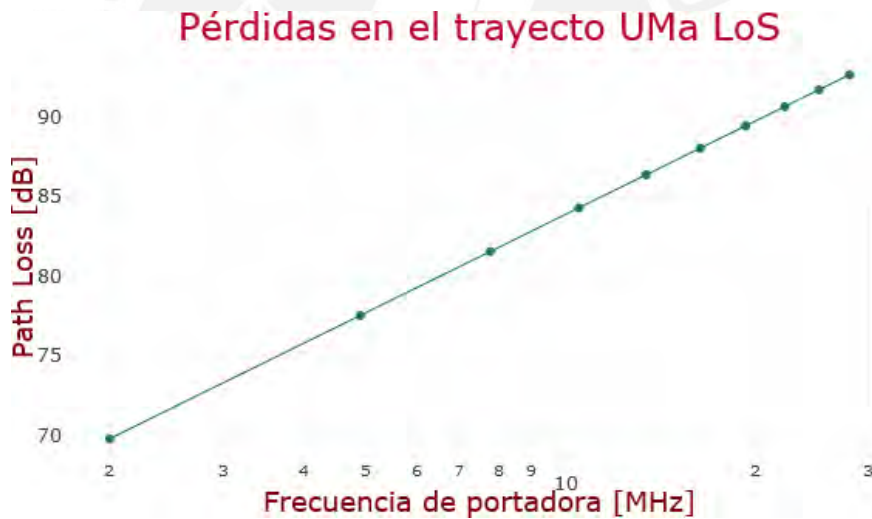
Pathloss total (dB)

65.1

Valor	Frecuencia fc [MHz]	Pathloss [dB]
1	2.00	69.77
2	4.89	77.53
3	7.78	81.56
4	10.67	84.31
5	13.56	86.39
6	16.44	88.07
7	19.33	89.47
8	22.22	90.68
9	25.11	91.74
10	28.00	92.69

Tabla de pérdidas en función de las frecuencias

**Figura 4.16: Resultados para escenario UMa LoS.**



**Figura 4.17: Resultados gráficos para escenario UMa LoS.**

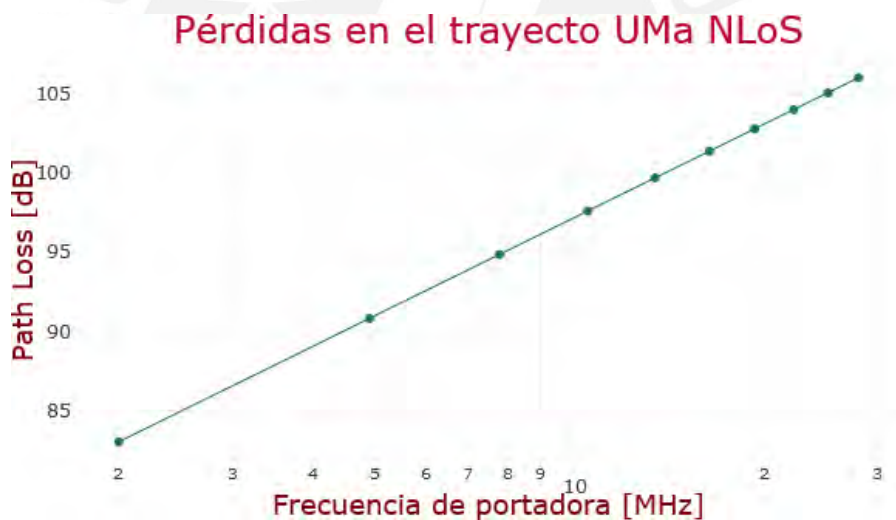
Para el caso de NLoS, manteniendo los demás parámetros iguales, se obtiene el resultado de la Figura 4.18 y Figura 4.19.

Pathloss (dB)	83.1
Shadow fading (dB)	-6.7
Pathloss total (dB)	76.4

Valor	Frecuencia fc [MHz]	Pathloss [dB]
1	2.00	83.06
2	4.89	90.82
3	7.78	94.86
4	10.67	97.60
5	13.56	99.68
6	16.44	101.36
7	19.33	102.77
8	22.22	103.98
9	25.11	105.04
10	28.00	105.98

Tabla de pérdidas en función de las frecuencias

**Figura 4.18: Resultados para escenario UMa NLoS.**



**Figura 4.19: Resultados gráficos para escenario UMa NLoS.**

#### 4.4.3. Escenario UMi

Los valores ingresados en la interfaz web para el escenario UMi también aparecen en la Tabla 4.1. En este caso se consideraran adicionalmente la Tabla 6-1 del 3GPP TR 36.873 [44], tal como se hizo en el escenario UMa. La frecuencia máxima se determina en 28 GHz. Se puede apreciar el resultado en la Figura 4.20 y Figura 4.21.

Pathloss (dB)

61.9

Shadow fading (dB)

4.3

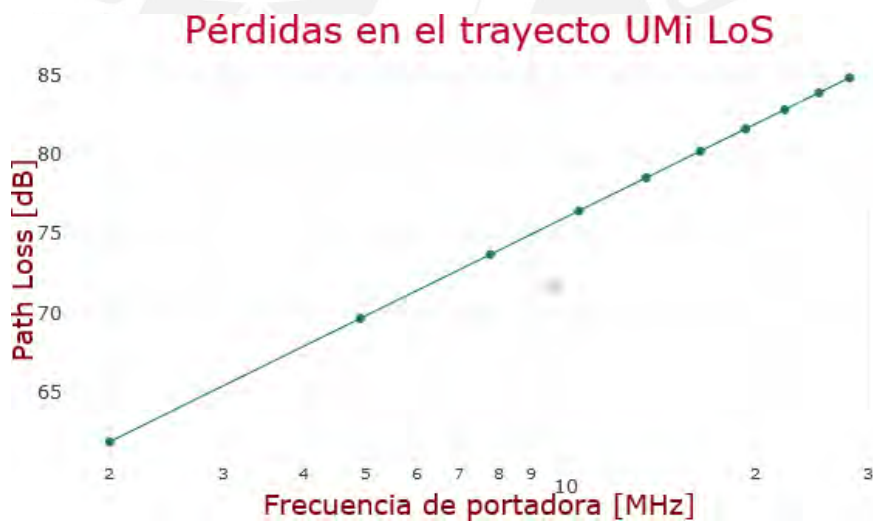
Pathloss total (dB)

66.2

Valor	Frecuencia fc [MHz]	Pathloss [dB]
1	2.00	61.90
2	4.89	69.66
3	7.78	73.70
4	10.67	76.44
5	13.56	78.52
6	16.44	80.20
7	19.33	81.61
8	22.22	82.82
9	25.11	83.88
10	28.00	84.82

Tabla de pérdidas en función de las frecuencias

**Figura 4.20: Resultados para escenario UMi LoS.**



**Figura 4.21: Resultados gráficos para escenario UMi LoS.**

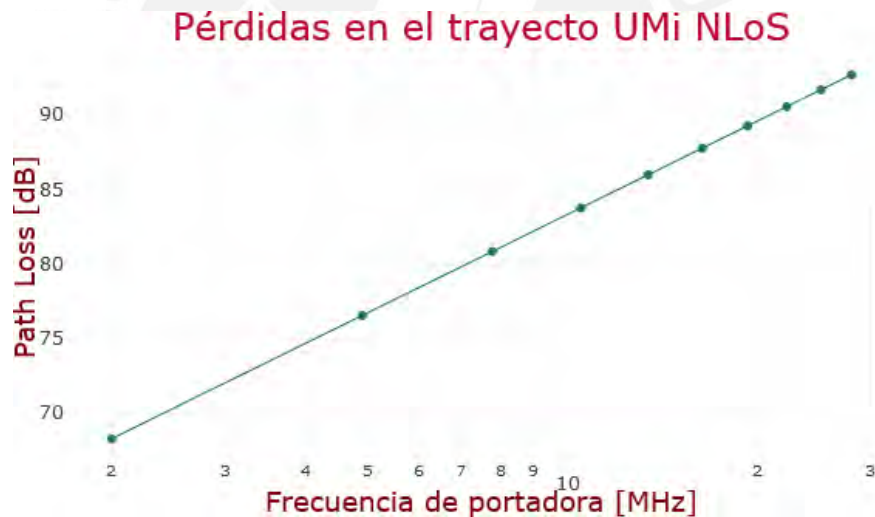
Para el caso de NLoS, con todos los demás parámetros iguales, se obtiene el resultado de la Figura 4.22 y Figura 4.23.

Pathloss (dB)	68.3
Shadow fading (dB)	10.4
Pathloss total (dB)	78.7

Valor	Frecuencia fc [MHz]	Pathloss [dB]
1	2.00	68.28
2	4.89	76.55
3	7.78	80.84
4	10.67	83.77
5	13.56	85.98
6	16.44	87.77
7	19.33	89.27
8	22.22	90.55
9	25.11	91.69
10	28.00	92.69

Tabla de pérdidas en función de las frecuencias

**Figura 4.22: Resultados para escenario UMi NLoS.**



**Figura 4.23: Resultados gráficos para escenario UMi NLoS.**

#### 4.4.4. Escenario InH

Los valores ingresados en la interfaz web para el caso del escenario InH se tomaron de la Tabla 4.1. Para las frecuencias máxima y mínima se utilizan los valores de la Tabla 6-2 del 3GPP TR 36.873 [44]. La distancia se considera como la mitad de la ISD, que aparece en la Tabla 7.2-2 del 3GPP TR 38.901 [2]. El resultado se muestra en la Figura 4.24 y Figura 4.25.

Pathloss (dB)

55.9

Shadow fading (dB)

2.1

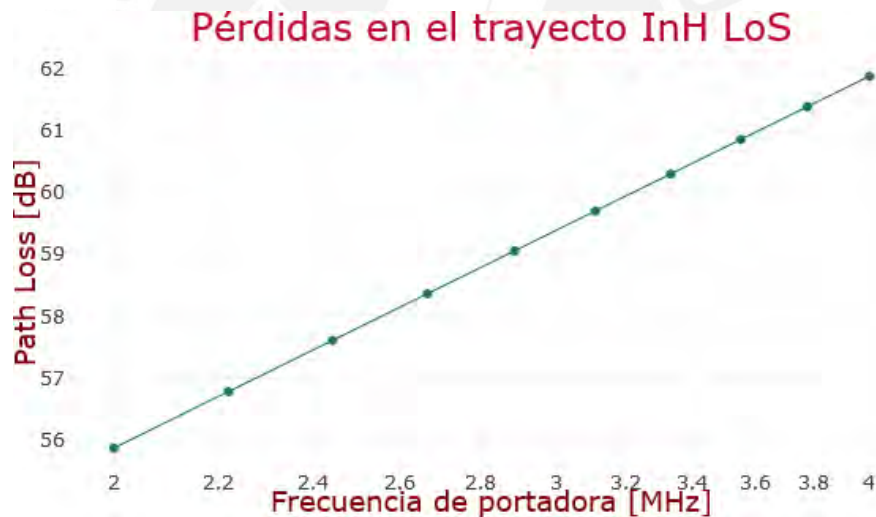
Pathloss total (dB)

58.0

Valor	Frecuencia fc [MHz]	Pathloss [dB]
1	2.00	55.87
2	2.22	56.78
3	2.44	57.61
4	2.67	58.37
5	2.89	59.06
6	3.11	59.71
7	3.33	60.30
8	3.56	60.87
9	3.78	61.39
10	4.00	61.89

Tabla de pérdidas en función de las frecuencias

**Figura 4.24: Resultados para escenario InH LoS.**



**Figura 4.25: Resultados gráficos para escenario InH LoS.**

Para el caso de NLoS se obtiene el resultado de la Figura 4.26 y Figura 4.27.

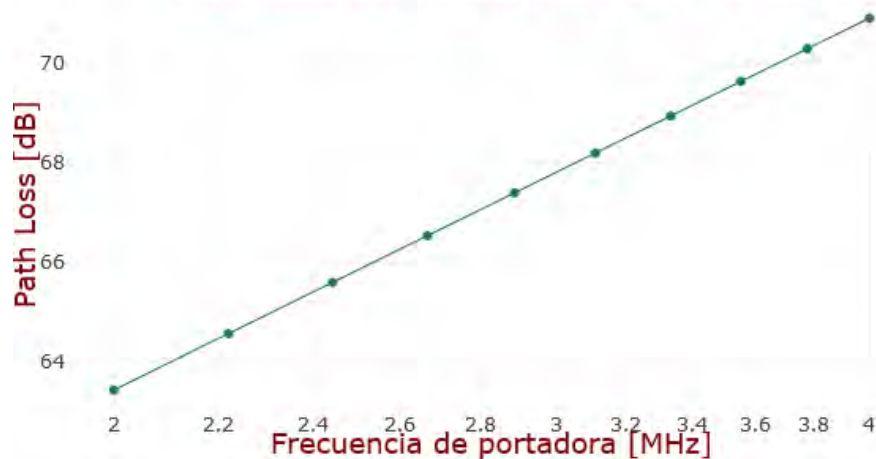
Pathloss (dB)	63.4
Shadow fading (dB)	-7.6
Pathloss total (dB)	55.8

Valor	Frecuencia fc [MHz]	Pathloss [dB]
1	2.00	63.42
2	2.22	64.56
3	2.44	65.59
4	2.67	66.53
5	2.89	67.40
6	3.11	68.20
7	3.33	68.95
8	3.56	69.64
9	3.78	70.30
10	4.00	70.92

Tabla de pérdidas en función de las frecuencias

**Figura 4.26: Resultados para escenario InH NLoS.**

### Pérdidas en el trayecto InH NLoS



**Figura 4.27: Resultados gráficos para escenario InH NLoS.**

#### 4.5. Validación y comparación de resultados

En este último apartado, haciendo uso de la herramienta MATLAB, se ingresarán los mismos modelos del 3GPP TR 38.901 [2], y se llevará a cabo la validación de los valores obtenidos con la aplicación web desarrollada, mediante comparación.

Asimismo, se compararán los resultados de la aplicación, y otra aplicación denominada NYU 5G Simulator, desarrollado por el centro de investigación académica NYU WIRELESS, cuyo modelo de canal se explicó en el Capítulo 2.

#### 4.5.1. Validación utilizando la herramienta MATLAB

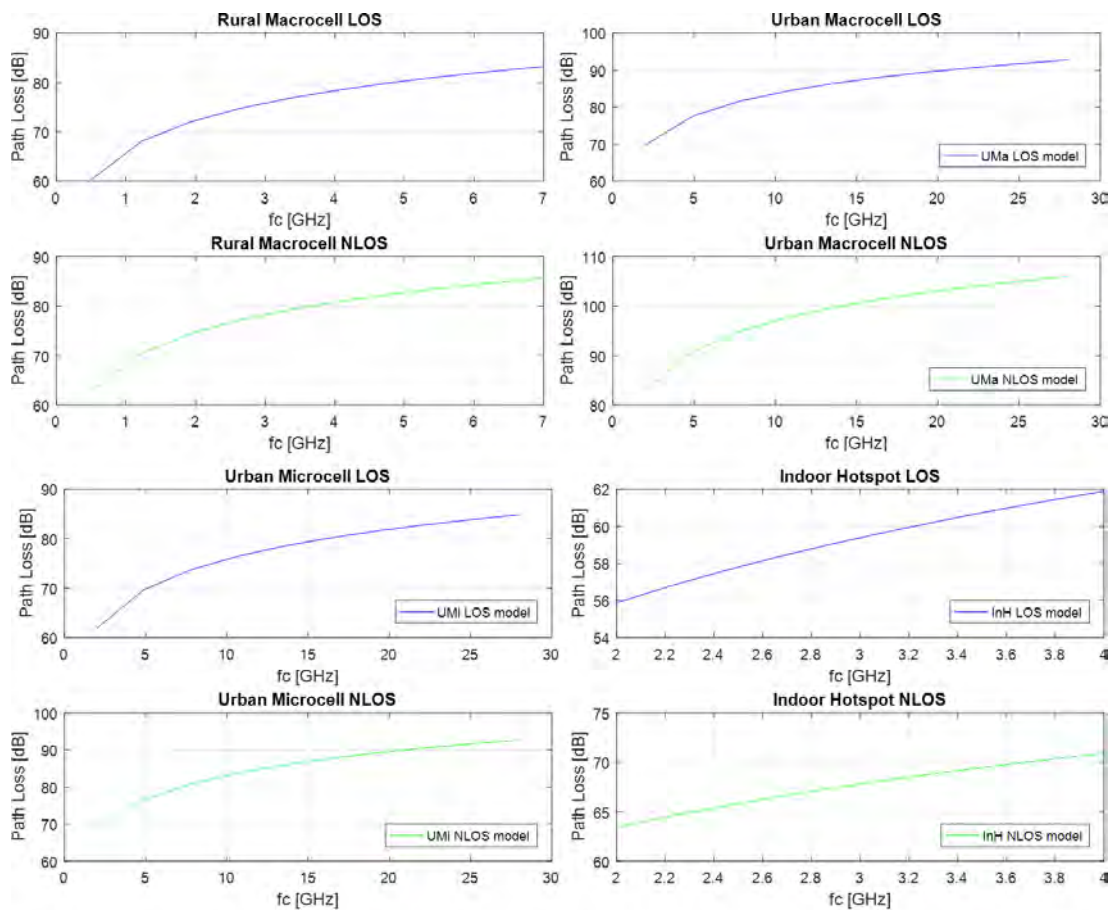
Mediante scripts en MATLAB, se han implementado los modelos de PL para los cuatro escenarios: RMa, UMa, UMi e InH, que devuelven dos vectores con los valores de PL en función de la frecuencia o distancia, para los casos de LoS, y NLoS.

En la Tabla 4.2 se muestra la comparación entre los resultados obtenidos con MATLAB y los resultados obtenidos con la aplicación web; para los cuatro escenarios, a las frecuencias máximas, y con los otros parámetros y valores de entrada que se utilizaron en el apartado anterior. En la Figura 4.28, se muestran los resultados graficados con MATLAB, para RMa, UMa, UMi e InH, respectivamente.



**Tabla 4.2: Comparación de resultados tabulados para todos los escenarios.**

Escenario	Frecuencia [MHz]	PL LoS MATLAB [dB]	PL LoS Web [dB]	PL NLoS MATLAB [dB]	PL NLoS Web [dB]
RMa	7.0000	83.2215	83.22	85.6434	85.64
UMa	28.0000	92.6904	92.69	105.9832	105.98
UMi	28.0000	84.8228	84.82	92.6927	92.69
InH	4.0000	61.8885	61.89	70.9175	70.92



**Figura 4.28: Gráficas con MATLAB de los cuatro escenarios, para LoS y NLoS.**

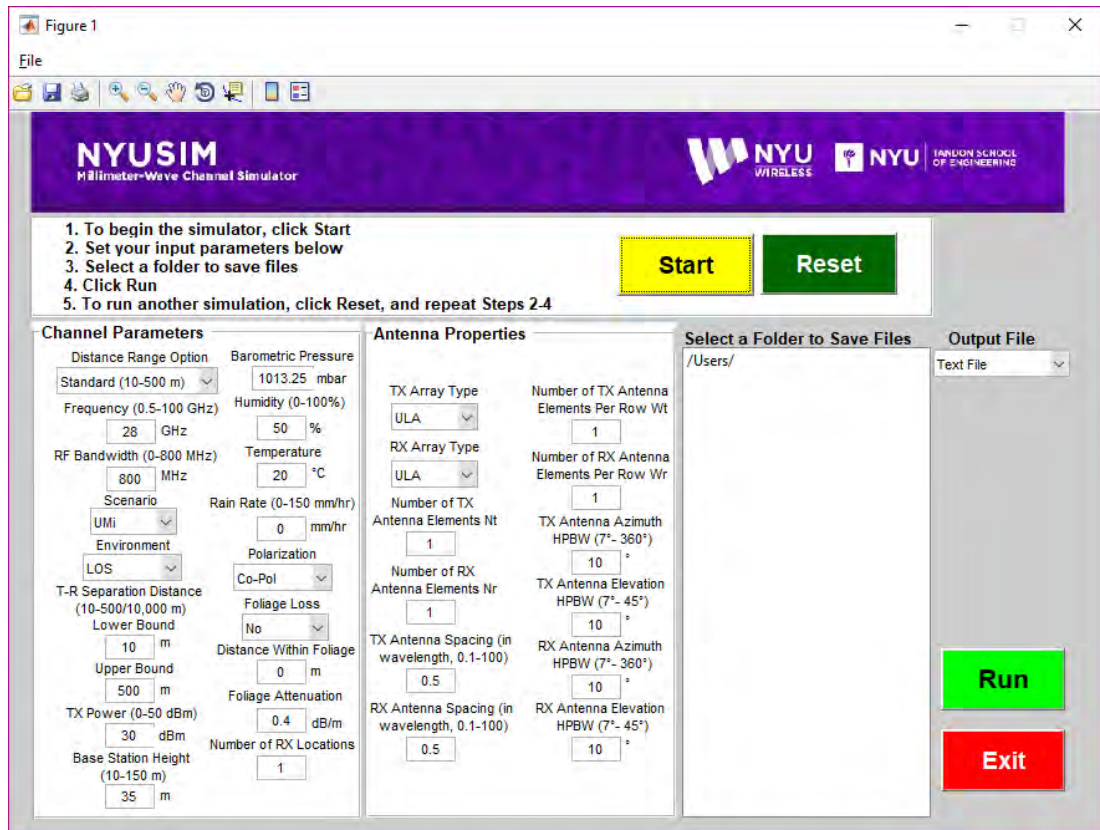
Con todo lo anterior, se puede confirmar que los resultados brindados por la aplicación web, se ajustan a los resultados que arrojan los scripts de MATLAB.

#### 4.5.2. Comparación con el NYU 5G Simulator

En el Capítulo 2 se presentó el modelo de canal NYU Wireless, propuesto por la Universidad NYU. Este modelo cuenta con el simulador NYUSIM, desarrollado por la misma universidad. Toda la información acerca del simulador, y el instalador se pueden encontrar en la página del proyecto NYU Wireless [76].



Al ejecutarse el programa aparece una interfaz gráfica, como se puede apreciar en la Figura 4.29.



**Figura 4.29: Interfaz gráfica del simulador NYUSIM.**

Esta herramienta permite introducir varios parámetros para diferentes resultados. Sin embargo, nos vamos a centrar sólo en los siguientes, dejando los demás invariables:

- Frequency
- Scenario
- Lower Bound
- UpperBound
- Base Station Height

De igual manera, el simulador devuelve varios resultados en la forma de gráficas. Estos resultados son:

- 3-D AOD Power Spectrum
- 3-D AOD Power Spectrum
- Omnidirectional Power Delay Profile (PDP)
- Directional PDP with Strongest Power

- Small Scale PDPs

Sólo se van a considerar los resultados mostrados en Omnidirectional Power Delay Profile (PDP); específicamente, los valores de PL.

Este simulador sólo tiene implementados tres escenarios: RMa, UMa y UMi, que utilizaremos para comparar con los resultados de la aplicación web. Para todos los escenarios, los valores o parámetros de evaluación se muestran en la Tabla 4.3 así como en la Figura 4.30.

**Tabla 4.3: Parámetros de evaluación para los escenarios de NYUSIM.**

Parámetros	Escenario NYUSIM		
	RMa	UMa	UMi
Frecuencia central [GHz]	7	28	28
Distancia T-R [m]	35	35	10
Altura BS [m]	35	25	10
Altura UT [m]	1.5	1.5	1.5
Potencia Tx [dBm]	30		
Presión barométrica [mbar]	1013.25		
Humedad [%]	50		
Temperatura [°C]	20		
Índice de precipitación [mm/hr]	0		
Atenuación por vegetación	No		

The figure shows three side-by-side screenshots of the NYUSIM Channel Parameters interface. Each interface has a red box around the 'Scenario' dropdown menu. The first interface is for the 'RMa' scenario, the second for 'UMa', and the third for 'UMi'. The parameters shown in each interface are: Distance Range Option (Standard (10-500 m)), Barometric Pressure (1013.25 mbar), Humidity (0-100%) (50%), Frequency (0.5-100 GHz) (7 GHz for RMa, 28 GHz for UMa and UMi), RF Bandwidth (0-800 MHz) (800 MHz), Temperature (20 °C), Rain Rate (0-150 mm/hr) (0 mm/hr), Environment (LOS), Polarization (Co-Pol), T-R Separation Distance (10-500/10,000 m) (35 m for RMa, 35 m for UMa, 10 m for UMi), Lower Bound (35 m for RMa and UMa, 10 m for UMi), Upper Bound (35 m for RMa and UMa, 10 m for UMi), TX Power (0-50 dBm) (30 dBm), Base Station Height (10-150 m) (35 m for RMa and UMa, 10 m for UMi), Foliage Loss (No), Distance Within Foliage (0 m), Foliage Attenuation (0.4 dB/m), and Number of RX Locations (1).

**Figura 4.30: Parámetros ingresados en NYUSIM.**

Y los resultados mostrados por el simulador, para el escenario RMa, por ejemplo, aparecen en la Figura 4.31 para LoS y NLoS. Para el escenario UMa, los resultados aparecen en la Figura 4.32; al igual que para el escenario UMi, los resultados se muestran Figura 4.33.

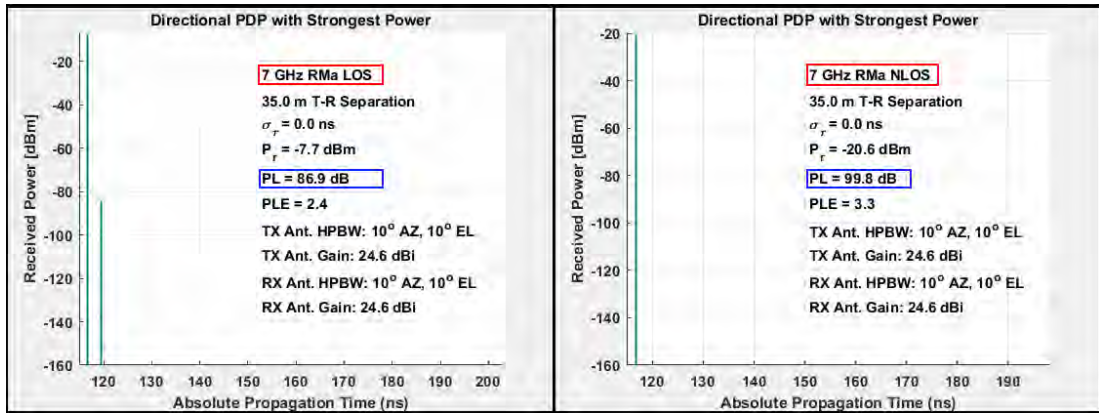


Figura 4.31: Resultados para escenario RMa con NYUSIM.

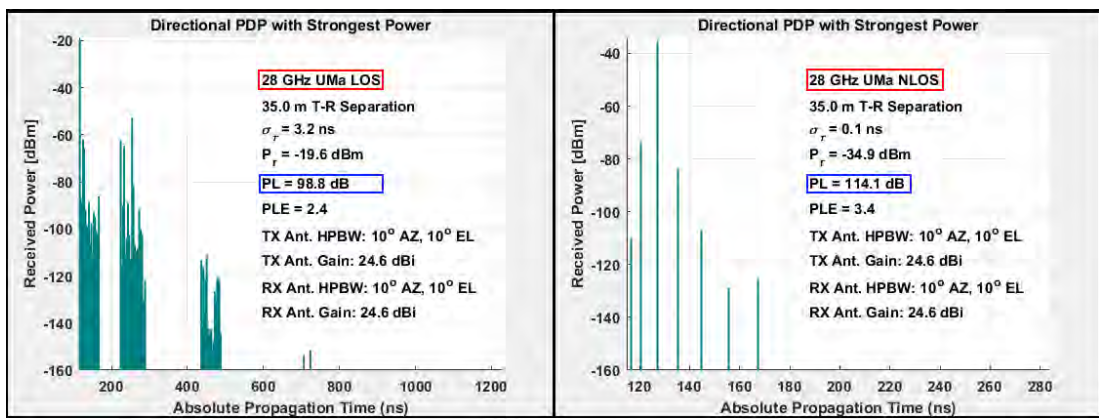


Figura 4.32: Resultados para escenario UMa con NYUSIM.

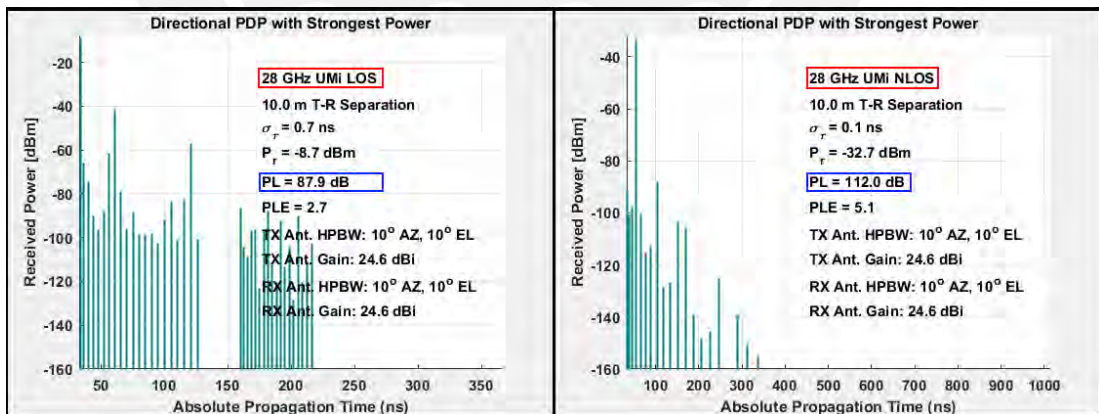


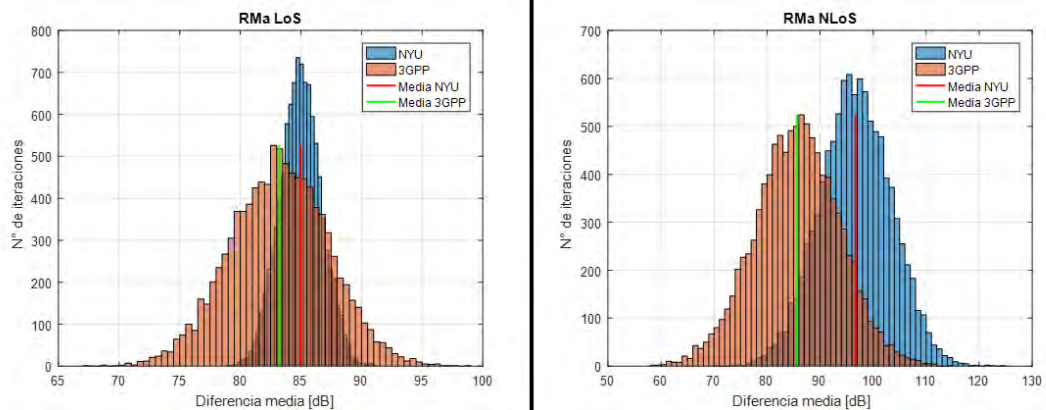
Figura 4.33: Resultados para escenario UMi con NYUSIM.

Como es posible apreciar, el simulador NYUSIM devuelve, además del valor de PL, otros valores no considerados para el alcance de esta tesis. Sólo se considerarán los valores de PL de los resultados para cada escenario. Después de varias simulaciones con NYUSIM, se observó que el resultado de PL variaba, aunque se mantuvieran los mismos parámetros ingresados, debido al SF, que es un término aleatorio con distribución gaussiana.

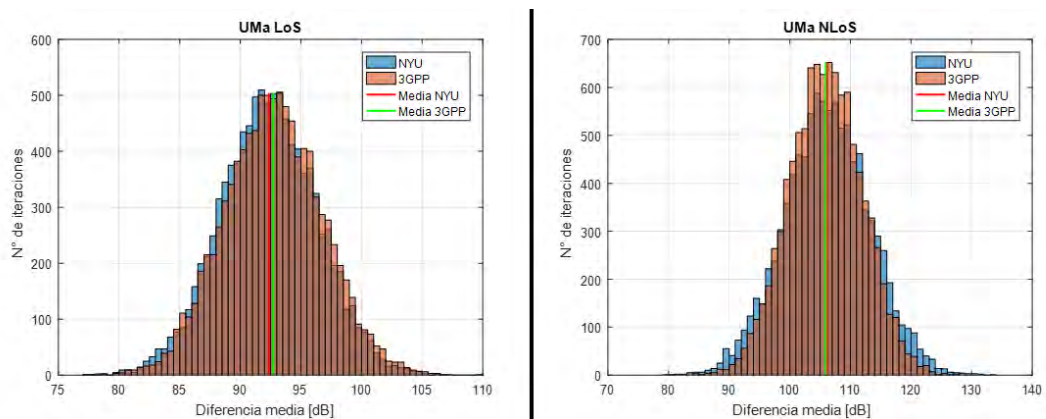
Dado lo anterior, se ejecutó una simulación con el método de Monte Carlo, para 10 000 iteraciones con los parámetros de la Tabla 4.3, con ambas aplicaciones (la aplicación web y NYUSIM), para cada escenario y para LoS y NLoS. Los resultados se muestran en la Tabla 4.4. Los histogramas de los resultados para los diferentes escenarios aparecen en la Figura 4.34, la Figura 4.35 y la Figura 4.36.

**Tabla 4.4: Comparación de resultados entre la aplicación web y NYUSIM.**

Escenario	Valores			
	Media NYU	Media 3GPP	Diferencia media	$\sigma$ de la diferencia
RMa LoS	85.0215	83.1919	1.8296	4.3614
RMa NLoS	96.8013	85.6130	11.1883	10.3489
UMa LoS	92.3529	92.7177	0.3648	5.6692
UMa NLoS	106.1537	105.9260	0.2277	9.2749
UMi LoS	81.3630	84.8595	3.4965	5.7047
UMi NLoS	93.3902	92.7355	0.6547	8.0224

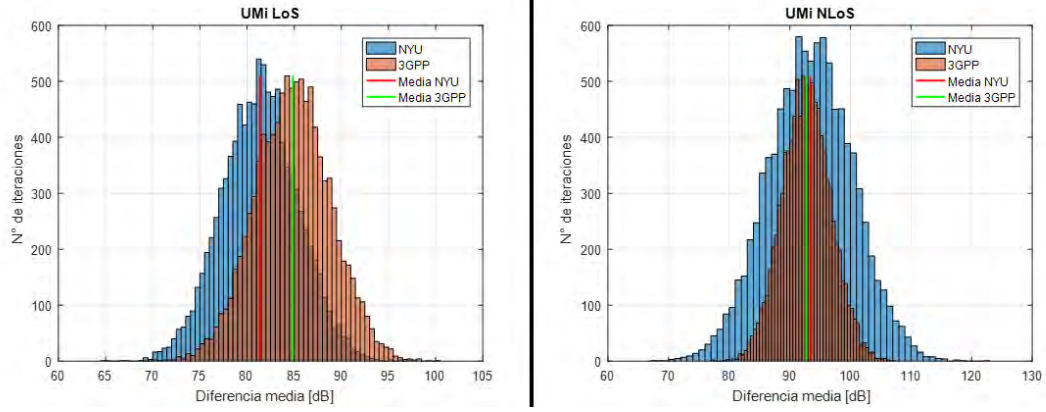


**Figura 4.34: Resultados de simulación Monte Carlo para escenario RMa.**



**Figura 4.35: Resultados de simulación Monte Carlo para escenario UMa.**





**Figura 4.36: Resultados de simulación Monte Carlo para escenario UMi.**

Las gráficas anteriores muestran la distribución de resultados posibles para todos los escenarios usando ambos simuladores. En azul se observa la distribución obtenida con el NYUSIM, y su valor medio se indica con una línea roja. En color naranja se observa la distribución obtenida con el simulador web, y la línea verde indica su valor medio o esperado.

Las variaciones en los valores de PL, causadas por el shadowing (SF) ocasionado por los obstáculos, muestran una distribución logarítmica normal, lo que significa que las mediciones siguen una distribución gaussiana. En consecuencia, los efectos del SF se incorporan en los modelos de pérdida en el trayecto mediante la adición de una variable aleatoria gaussiana con media cero, con desviación estándar  $\sigma_{SF}$ ; que es lo que finalmente se observa en la Figura 4.34, la Figura 4.35 y la Figura 4.36. Ambos modelos, el del 3GPP y el del NYU, siguen esta distribución. Las diferencias observadas se deben a que los modelos no son los mismos, ya que, por ejemplo, el NYUSIM utiliza un modelo de CI (4.1) para todos los escenarios, salvo para RMa (4.2) y (4.3), variando el PLE y el  $\sigma_{SF}$  para cada caso. Además el NYUSIM considera otros parámetros, como se observó en la Tabla 4.3, para incorporar atenuaciones producidas por factores atmosféricos, vegetación, etc.

$$PL_{CI} = 20 \log \left( \frac{4\pi d_0 f}{c} \right) + n \times 10 \times \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma_{SF}} \quad (4.1)$$

$$PL_{RMa LoS} = 20 \log \left( \frac{4\pi d_0 f}{c} \right) + n \times 10 \times (1 - 0.03) \times \left( \frac{h_{BS} - 35}{35} \right) \log(d) + X_{\sigma_{SF}} \quad (4.2)$$

$$PL_{RMa NLoS} = 20 \log \left( \frac{4\pi d_0 f}{c} \right) + n \times 10 \times (1 - 0.049) \times \left( \frac{h_{BS} - 35}{35} \right) \log(d) + X\sigma_{SF} \quad (4.3)$$

Donde:

- $f$ : frecuencia central en Hz.
- $d$ : distancia 2D entre la BS y el UT en m.
- $d_0$ : distancia de referencia del espacio libre, típicamente 1 m.
- $n$ : Exponente de path loss (PLE) dependiente de la frecuencia.
- $h_{BS}$ : altura de la estación base en m.
- $X$ : variable aleatoria con distribución normal (media = 0,  $\sigma = 1$ ).
- $\sigma_{SF}$ : desviación estándar del SF, en dB.

Además los valores de  $n$  y  $\sigma_{SF}$ , para cada escenario, se observan en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5: Valores de  $n$  y  $\sigma_{SF}$  para los escenarios del NYUSIM.**

Escenario	Condición	$n$	$\sigma_{SF}$ (dB)
RMa	LoS	2.31	1.7
	NLoS	3.07	6.7
UMa	LoS	2.0	4.0
	NLoS	2.9	7.0
UMi	LoS	2.0	4.0
	NLoS	3.2	7.0

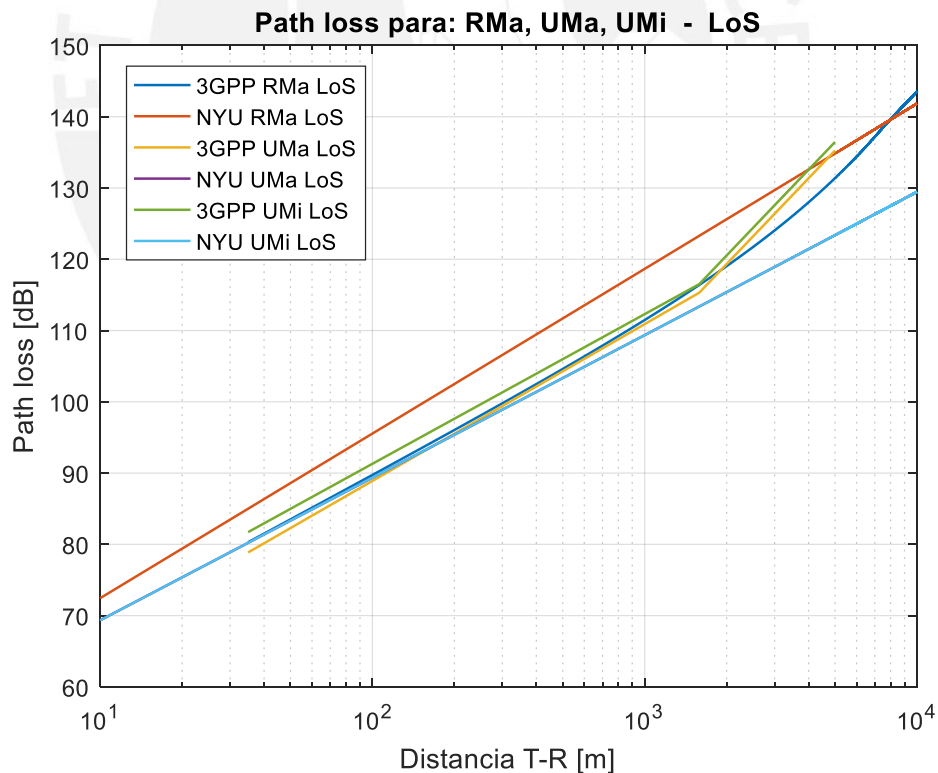
Si se hace variar sólo la distancia  $d_{2D}$  entre el rango de valores aplicables, manteniendo los demás parámetros constantes, se obtiene el comportamiento del PL para ambos simuladores, como se puede observar en la Figura 4.37 para LoS, y en la Figura 4.38 para NLoS. Los parámetros que se utilizaron se muestran en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6: Parámetros de evaluación para comparación de escenarios de ambos modelos.**

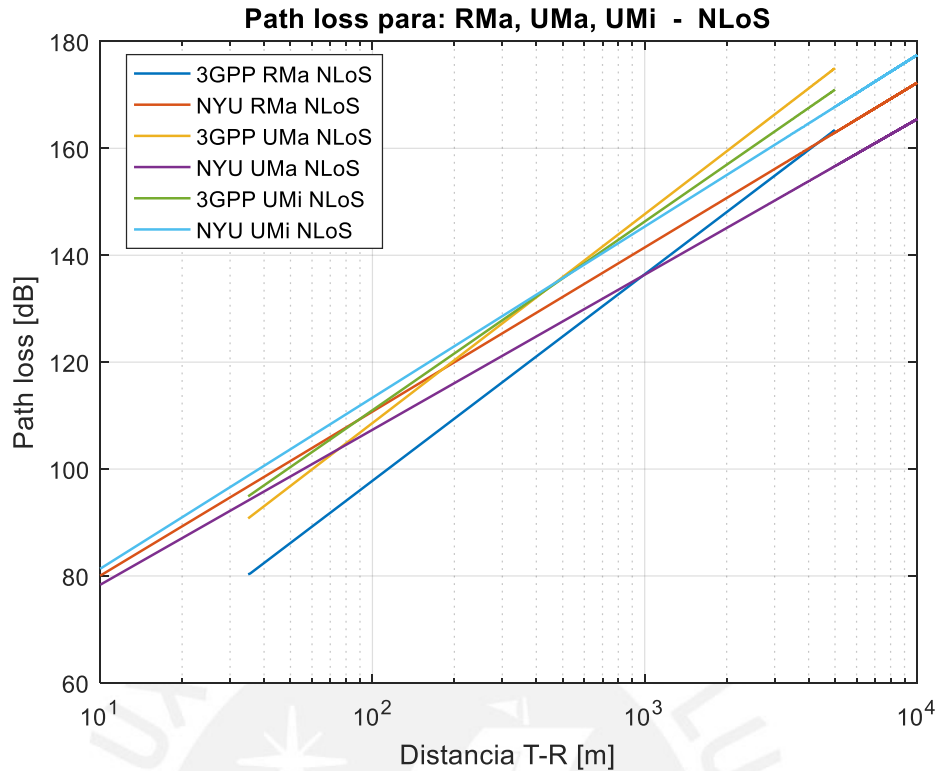
Parámetros	Valores
Frecuencia central [GHz]	7
Distancia T-R [m]	35
Altura BS [m]	35

Parámetros	Valores
Altura UT [m]	1.5
Potencia Tx [dBm]	30
Presión barométrica [mbar]	1013.25
Humedad [%]	50
Temperatura [°C]	20
Índice de precipitación [mm/hr]	0
Atenuación por vegetación	No

En la Figura 4.37, se puede observar el comportamiento cuadrático del escenario RMa LoS del modelo del 3GPP. Esto se debe a que el último término en la ecuación (3.1) depende de  $d_{3D}$  y no de su logaritmo. También se puede observar la doble pendiente para los escenarios UMa LoS y UMi LoS del modelo 3GPP. La distancia de punto de ruptura ( $d_{BP}$ ) es en este caso igual a 1586.7 metros. Las curvas para los escenarios UMa LoS y UMi LoS del modelo NYU se superponen, ya que ambos escenarios tienen el mismo modelo de pérdidas, con valores iguales de PLE y SF.



**Figura 4.37: Comparación entre los modelos 3GPP y NYU de PL para los cuatro escenarios en LoS.**



**Figura 4.38: Comparación entre los modelos 3GPP y NYU de PL para los cuatro escenarios en NLoS.**

Si nuevamente ejecutamos 10 000 iteraciones, pero esta vez variando todos los parámetros aleatoriamente (con distribución uniforme) dentro del rango de valores aplicables (ver Tabla 4.7), es posible comparar ambos simuladores para obtener una estadística al respecto. En cada iteración aplicamos los mismos valores para cada simulador, y restamos los valores de PL obtenidos en cada uno para esa iteración. Así se obtiene una matriz con las diferencias de cada iteración, a la que podemos hallarle la media y la desviación estándar. Los valores promedio y la desviación estándar se muestran en la Tabla 4.8. También se pueden observar los histogramas en la Figura 4.39, la Figura 4.40 y la Figura 4.41, para los escenarios RMa, UMa y UMi; respectivamente.

Al analizar los histogramas y la Tabla 4.8, se puede observar que la diferencia entre los modelos para todos los escenarios, excepto RMa LoS (Figura 4.39), está en el rango de  $[-4.36 - 1.31]$ . Para todos los casos, se restó del valor obtenido con el modelo NYU, el valor obtenido con el modelo 3GPP; es por ello que el signo negativo indica que en esos casos el valor del modelo 3GPP fue mayor. La desviación estándar de la diferencia para todos los escenarios oscila en el rango de  $[11.29 - 14.65]$ . Las diferencias de los



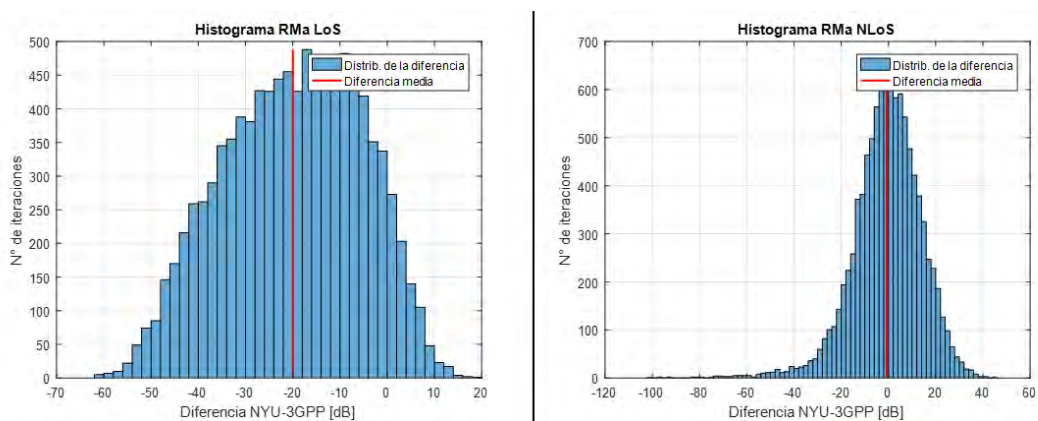
escenarios UMa y UMi, tienen distribuciones de asimetría positiva. En el caso de RMa LoS, la distribución es simétrica (normal), y para RMa NLoS la distribución es de asimetría negativa.

**Tabla 4.7: Rangos de aplicación para parámetros de evaluación.**

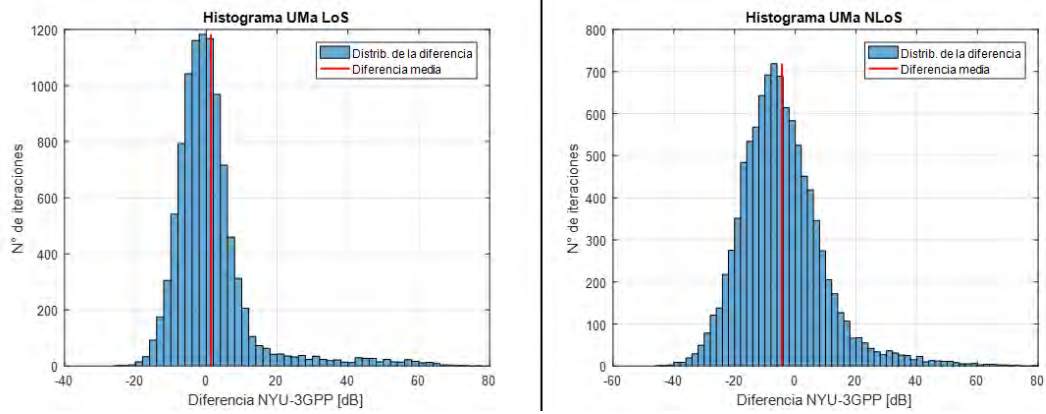
Parámetros	Escenario		
	RMa	UMa	UMi
Frecuencia central [GHz]	0.5 – 30	0.5 – 100	0.5 – 100
Distancia T-R [m]	10 – 10000	10 – 5000	10 – 5000
Altura BS [m]	10 – 150	25	10
Altura UT [m]	1 – 10	1.5 – 22.5	1.5 – 22.5
Altura de edificios [m]	5 – 50	No aplica	No aplica
Ancho de calles [m]	5 – 50	No aplica	No aplica
Potencia Tx [dBm]	30		
Presión barométrica [mbar]	1013.25		
Humedad [%]	50		
Temperatura [°C]	20		
Índice de precipitación [mm/hr]	0		
Atenuación por vegetación	No		

**Tabla 4.8: Comparación de simulaciones para parámetros aleatorios.**

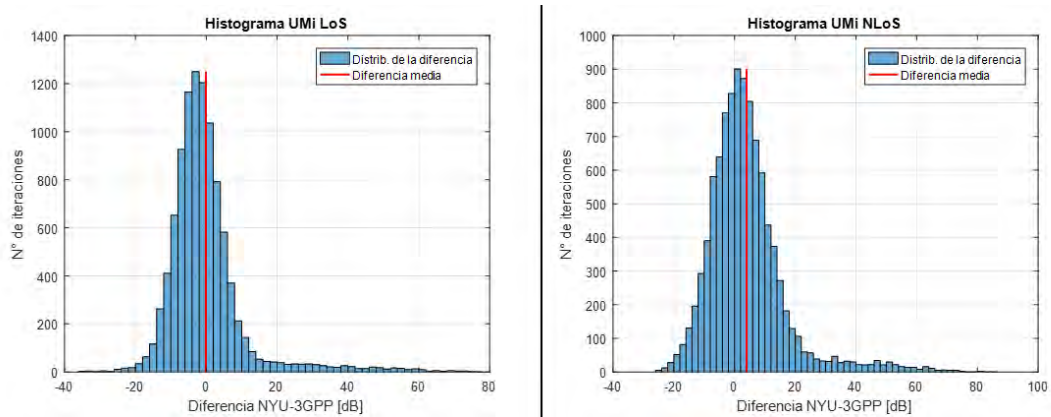
Escenarios	Diferencia media	Diferencia máxima	Diferencia mínima	$\sigma$ de la diferencia
<b>RMa LoS</b>	-19.9759	19.3047	-61.8420	14.6169
<b>RMa NLoS</b>	-0.7169	45.5334	-100.2285	14.6534
<b>UMa LoS</b>	1.3096	76.0979	-24.7146	11.4440
<b>UMa NLoS</b>	-4.3601	78.0402	-44.3770	13.7897
<b>UMi LoS</b>	-0.1308	77.4554	-35.9767	11.2956
<b>UMi NLoS</b>	3.9723	85.7558	-25.3505	12.9090



**Figura 4.39: Simulación para escenario RMa para variables aleatorias**



**Figura 4.40: Simulación para escenario UMA para variables aleatorias.**



**Figura 4.41: Simulación para escenario UMi para variables aleatorias.**

La forma particular de la distribución de la diferencia de los modelos en el escenario RMa LoS (Figura 4.39), el valor medio de las diferencias (líneas rojas) y el valor de la desviación estándar, se deben en parte a que ambos modelos, 3GPP y NYU, son más complejos en comparación al modelo CI; en especial el modelo RMa LoS del 3GPP. Existen publicaciones [37] que proponen un modelo más simple, del tipo CI o CIF, para el escenario RMa del 3GPP. Así también los rangos de aplicación en el escenario RMa son más amplios, por ejemplo,  $h_{BS}$  tiene un valor máximo de 150 m; en contraste, el escenario UMA tiene un  $h_{BS} = 25$  m. En el caso de RMa LoS, el valor máximo de  $d_{2D}$  es 10 000 m, mientras que en los demás casos es sólo de 5 000 m. Esto hace que la desviación estándar tome un valor más elevado en comparación con los otros escenarios.

La distribución de las diferencias y el valor medio de las diferencias, en los escenarios UMA y UMi, se deben a que cada modelo, 3GPP y NYU, toma diferentes valores de PLE y  $\sigma_{SF}$ . El hecho de que la diferencia de los valores medios en los resultados de ambos simuladores esté cercana a cero, se debe a

que ambos modelos, 3GPP Y NYU, son básicamente modelos CI. Como se mencionó en el párrafo anterior, el que las distribuciones tomen una forma más angosta, se debe a que, en estos escenarios, los rangos de aplicación de los parámetros son menores comparados con el escenario RMa.



## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- Se ha desarrollado e implementado una aplicación en un servidor web para los modelos de pérdidas en el trayecto de propagación de gran escala, propuestos por el 3GPP en el TR 38.901 para las redes 5G.
- Al comparar los resultados obtenidos con la aplicación y con el simulador NYUSIM, se pudo observar una correspondencia entre ellos, a pesar de que los modelos no son los mismos. La diferencia media entre el simulador web desarrollado, y el simulador NYUSIM, se halló en el rango de [-4.36 - 1.31] dB para los escenarios UMa y UMi en condiciones LoS y NLoS, y para el escenario RMA NLoS. También se observó que existe una diferencia de 19.98 dB para el escenario RMa LoS entre ambos simuladores. Esta diferencia se debe a la complejidad de los modelos para el escenario RMa, así como a los parámetros involucrados en el modelo, cuyos rangos de aplicación son más amplios, en contraste con los otros escenarios.
- La aplicación implementada puede ser utilizada como parte de la enseñanza para el desarrollo de las tecnologías para las redes 5G, ya que simplifica el uso y aplicación de los modelos de propagación del 3GPP, al realizar todos los cálculos.
- La aplicación es transversal a cualquier sistema operativo o navegador, ya que se basa en estándares y herramientas de amplia aplicación.
- El servidor configurado con Apache y PHP, y la aplicación programada con JavaScript, HTML y CSS, permiten alojar ejecutar apropiadamente la aplicación web.

## 5.2. Recomendaciones

- Se recomienda que la Pontificia Universidad Católica del Perú aloje esta aplicación en sus servidores de manera que esté disponible tanto dentro como fuera del campus, para beneficiar a la comunidad académica interesada en desarrollar estudios en redes 5G.
- Se recomienda ampliar el presente modelo para los parámetros de pequeña escala contemplados en el TR 38.901; ya que esta aplicación web, sólo contempla el cálculo de las pérdidas en el trayecto.
- Se puede optimizar este aplicativo para que se ajuste adecuadamente a pantallas más pequeñas como las de los equipos móviles, o crear una aplicación móvil para sistemas como Android o iOS, basada en este aplicativo.
- Se recomienda el desarrollo de herramientas similares para los otros modelos de canal disponibles para frecuencias de 0.5 GHz a 100 GHz, sobre todo para los mencionados en el TR 38.901.
- Es importante comparar a profundidad el modelo del TR 38.901 con los otros modelos de canal existentes.

## Referencias

- [1] Huawei, «5G: A Technology Vision,» Febrero 2014. [En línea]. Available: [http://www.huawei.com/ilink/en/download/HW\\_314849](http://www.huawei.com/ilink/en/download/HW_314849). [Último acceso: 19 09 2017].
- [2] 3rd Generation Partnership Project, «Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 14.3.0 Release 14),» Diciembre 2017. [En línea]. Available: [www.3gpp.org/DynaReport/38901.htm](http://www.3gpp.org/DynaReport/38901.htm). [Último acceso: 14 Febrero 2018].
- [3] J. M. Hernando Rábanos, Transmisión por radio, Madrid: Editorial Universitaria Ramón Areces, 2008.
- [4] 3rd Generation Partnership Project, «Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 15.0.0 Release 8),» 29 Septiembre 2017. [En línea]. Available: [www.3gpp.org/DynaReport/36101.htm](http://www.3gpp.org/DynaReport/36101.htm). [Último acceso: 25 Octubre 2017].
- [5] 3rd Generation Partnership Project, «NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TR 38.104 version 15.0.0 Release 15),» 09 01 2018. [En línea]. Available: [www.3gpp.org/DynaReport/38104.htm](http://www.3gpp.org/DynaReport/38104.htm). [Último acceso: 13 02 2018].
- [6] C. C. Cadenas, Radiocomunicación, Madrid: Pearson Educación S.A., 2008.
- [7] A. F. Molisch, Wireless Communications, California: Wiley-IEEE Press, 2011.
- [8] Wireless World Initiative New Radio+, «D5.4 - Final report on link level and system level channel models (IST-2003-507581 WINNER D5.4 v. 1.4),» 18 Noviembre 2005. [En línea]. Available: <http://projects.celtic-initiative.org/winner+/DeliverableDocuments/D5.4.pdf>. [Último acceso: 28 Octubre 2017].
- [9] METIS 2020, «D5.1 Intermediate description of the spectrum needs and usage principles,» 30 Agosto 2013. [En línea]. Available: <https://www.metis2020.com/>. [Último acceso: 20 Octubre 2017].

- [10] 5GCM White Paper, «5G Channel Model for bands up to 100 GHz (Version 2.3),» 21 Octubre 2016. [En línea]. Available: <http://www.5gworkshops.com/5gcm.html>. [Último acceso: 14 Febrero 2018].
- [11] MiWEBA, «Channel modeling and characterization (Tech. Rep. MiWEBA, Deliverable D5.1),» Junio 2014. [En línea]. Available: <http://www.miweba.eu/wp-content/uploads/2014/07/MiWEBA>. [Último acceso: 13 Febrero 2018].
- [12] International Telecommunication Union (ITU), «ITU-R M.2135-1 Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced,» Geneva, 2009.
- [13] COST2100, «COST Action 2100 - Pervasive Mobile & Ambient Wireless Communications,» 27 Enero 2016. [En línea]. Available: <http://www.cost2100.org/>. [Último acceso: 13 Febrero 2018].
- [14] L. Liu, C. Oestges, J. Poutanen, K. Haneda, P. Vainikainen, F. Quitin, F. Tufvesson y P. D. Doncker, «The COST 2100 MIMO channel model,» *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, nº 6, pp. 92 - 99, 2012.
- [15] R. Verdone y A. Zanella, *Pervasive Mobile and Ambient Wireless Communications COST Action 2100*, Springer, 2012.
- [16] M. Alexander y et al., «Channel Models for 60 GHz WLAN Systems (I. 802.11-09/0334r8),» *IEEE P802.11 Wireless LANs*, 2010.
- [17] Q. Greg Breit et al., «IEEE P802.11 Wireless LANs TGac Channel Model Addendum (IEEE 802.11-09/0308r3),» Mayo 2009. [En línea]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/09/11-09-0308-03-00ac-tgac-channel-model-addendum-document.doc>. [Último acceso: 2011 Noviembre 2017].
- [18] J. Luo, «Channel Sounding for 802.11ay (IEEE 802.11-15/0631r0),» 2015.
- [19] Z. W. Vinko Erceg y e. al., «IEEE P802.11 Wireless LANs TGn Channel Models (IEEE 802.11-03/940r4),» 10 Mayo 2004. [En línea]. Available: <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/03/11-03-0940-04-000n-tgn-channel-models.doc>. [Último acceso: 21 Noviembre 2017].
- [20] NYU WIRELESS, «NYU WIRELESS | 5G mmWave Research,» NYU Tandon School of Engineering, Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://wireless.engineering.nyu.edu/>. [Último acceso: 13 Febrero 2018].
- [21] QuaDRiGa, «QuaDRiGa,» Fraunhofer HHI t, Marzo 2015. [En línea]. Available:

<http://quadriga-channel-model.de/>. [Último acceso: 13 Febrero 2018].

- [22] NIST: National Institute of Standards and Technology, «5G mmWave Channel Model Alliance,» 25 Agosto 2016. [En línea]. Available: <https://www.nist.gov/ctl/5g-mmwave-channel-model-alliance>. [Último acceso: 13 Febrero 2018].
- [23] mmMAGIC, 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP), 12 Junio 2017. [En línea]. Available: <https://5g-mmmagic.eu/>. [Último acceso: 13 Febrero 2018].
- [24] ITU, «ITU towards “IMT for 2020 and beyond”,» 21 Abril 2013. [En línea]. Available: <http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx>. [Último acceso: 13 Febrero 2018].
- [25] 3rd Generation Partnership Project, «Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz (3GPP TR 38.900 version 14.3.1 Release 14),» 3 Julio 2017. [En línea]. Available: [www.3gpp.org/DynaReport/38900.htm](http://www.3gpp.org/DynaReport/38900.htm). [Último acceso: 20 Octubre 2017].
- [26] M. K. Samimi y T. S. Rappaport, «3-D Millimeter-Wave Statistical Channel Model for 5G Wireless System Design,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, n° 7, pp. 2207 - 2225, 2016.
- [27] M. K. Samimi y T. S. Rappaport, «Statistical Channel Model with Multi-Frequency and Arbitrary Antenna Beamwidth for Millimeter-Wave Outdoor Communications,» de *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2015 IEEE*, San Diego, CA, USA, 2015.
- [28] T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, M. K. Samimi y S. Sun, «Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design,» *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, n° 9, pp. 3029 - 3056, 2015.
- [29] T. S. Rappaport, S. Su y M. Shafi, «5G Channel Model with Improved Accuracy and Efficiency in mmWave Bands,» *IEEE 5G Tech Focus*, vol. 1, n° 1, 2017.
- [30] T. S. Rappaport, S. Sun y M. Shafi, «Investigation and Comparison of 3GPP and NYUSIM Channel Models for 5G Wireless Communications,» de *Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2017 IEEE 86th*, Toronto, ON, Canada, Canada , 2017.



- [31] Y. Yang, J. Xu, G. Shi y C.-X. Wang, *5G Wireless Systems Simulation and Evaluation Techniques*, Ontario: Springer, 2017.
- [32] Y. E. O. T. K. a. K. F. Okumura, «Field strength variability in VHF and UHF land mobile service,» *Rev. Elect. Comm. Lab.*, vol. 16, n° 9-10, pp. 825-873, 1968.
- [33] M. Hata, «Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 29, n° 3, pp. 317 - 325, 1980.
- [34] J. Walfisch y H. Bertoni, «A theoretical model of UHF propagation in urban environments,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, n° 12, pp. 1788 - 1796, 1988.
- [35] D. Cichon y T. Kurner., «Propagation prediction models. COST 231 Final Report,» European Commission, Directorate-General Telecommunications, Information Society, Information Market, and Exploitation of Research, 1999.
- [36] G. L. Stüber, *Principles of Mobile Communication*, Atlanta: Springer, 2017.
- [37] T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney y e. a. , «Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks—With a Focus on Propagation Models,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, n° 12, pp. 6213 - 6230, 2017.
- [38] G. R. MacCartney y T. S. Rappaport, «Rural Macrocell Path Loss Models for Millimeter Wave Wireless Communications,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, n° 7, pp. 1663 - 1677, 2017.
- [39] K. Haneda, J. Zhang, L. Tan y e. a. , «5G 3GPP-Like Channel Models for Outdoor Urban Microcellular and Macrocellular Environments,» de *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2016 IEEE 83rd*, Nanjing, China, 2016.
- [40] S. Sun, T. S. Rappaport, S. Rangan y e. a. , «Propagation Path Loss Models for 5G Urban Micro- and Macro-Cellular Scenarios,» de *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2016 IEEE 83rd*, Nanjing, China, 2016.
- [41] K. Haneda, L. Tian, H. Asplund y e. a. , «Indoor 5G 3GPP-like channel models for office and shopping mall environments,» de *Communications Workshops (ICC), 2016 IEEE International Conference on*, Kuala Lumpur, Malaysia , 2016.
- [42] 3rd Generation Partnership Project, «New SID Proposal: Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz (3GPP RP-151606 version 14.1.1

- Release 14),» 12 Noviembre 2015. [En línea]. Available: [http://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_ran/TSG\\_RAN/TSGR\\_69/Docs/RP-151606.zip](http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_69/Docs/RP-151606.zip). [Último acceso: 15 Noviembre 2017].
- [43] 3rd Generation Partnership Project, «New SID Proposal: Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz,» Meeting: RP-69 - 2015-09-14 to 2015-09-16, Phoenix, Septiembre 2015. [En línea]. Available: [www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--RP-69--31198.htm](http://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--RP-69--31198.htm). [Último acceso: 15 Noviembre 2017].
- [44] 3rd Generation Partnership Project, «Study on 3D channel model for LTE (3GPP TR 36.873 version 12.6.0 Release 12),» 26 Septiembre 2017. [En línea]. Available: [www.3gpp.org/DynaReport/36873.htm](http://www.3gpp.org/DynaReport/36873.htm). [Último acceso: 27 Octubre 2017].
- [45] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, New jersey: Prentice Hall , 2001.
- [46] E. Lum, «Analyst Angle: 2016 outlook for macrocell base station market murky,» ETL Wireless Research, 1 Junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.rcrwireless.com/20160601/analyst-angle/analyst-angle-2016-outlook-for-macrocell-base-station-market-murky-tag9>. [Último acceso: 11 Noviembre 2017].
- [47] K. Blackard, M. Feuerstein, T. Rappaport, S. Seidel y H. Xia, «Path loss and delay spread models as functions of antenna height for microcellular system design,» de *Vehicular Technology Conference, IEEE 42nd*, Denver, CO, USA, USA , 1992.
- [48] K. Bullington, «Radio Propagation at Frequencies above 30 Megacycles,» *Proceedings of the IRE*, vol. 35, nº 10, pp. 1122 - 1136, 1947.
- [49] M. Feuerstein, K. Blackard, T. Rappaport, S. Seidel y H. Xia, «Path loss, delay spread, and outage models as functions of antenna height for microcellular system design,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, nº 3, pp. 487 - 498, 1994.
- [50] G. R. MacCartney y T. S. Rappaport, «Study on 3GPP rural macrocell path loss models for millimeter wave wireless communications,» de *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France, 2017.

- [51] ITU-R WP5D Contribution 88, «Proposed propagation models for evaluation radio transmission technologies in IMT-Advanced,» 21 Enero 2008. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/md/R07-WP5D-C-0088/en>. [Último acceso: 11 Noviembre 2017].
- [52] S. Sun, T. S. Rappaport, T. A. Thomas, A. Ghosh, H. C. Nguyen, I. Z. Kovács, I. Rodriguez, O. Koymen y A. Partyka, «Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, nº 5, pp. 2843 - 2860, 2016.
- [53] S. Sakagami y K. Kuboi, «Mobile propagation loss prediction for arbitrary urban environments,» *Electronics and Communications in Japan, Part 1*, vol. 74, nº 10, pp. 17-25, 1991.
- [54] Wireless World Initiative New Radio – WINNER+, «D5.3: WINNER+ Final Channel Models,» CELTIC / CP5-026, 2010.
- [55] J. George R. MacCartney, S. Sun, T. S. Rappaport, Y. Xing, H. Yan, J. Koka, R. Wang y D. Yu, «Millimeter wave wireless communications: new results for rural connectivity,» *All Things Cellular'16 Proceedings of the 5th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications and Challenges*, p. 31–36, 2016.
- [56] J. Zhang, N. Sheng, F. Zhang, L. Tian, G. Liu, W. Dong, P. Zhang y C.-C. Chong, «Analysis and modeling of spatial characteristics in urban microscenario of heterogeneous network,» *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2011, nº 187, 2011.
- [57] K. Haneda, L. Tan, A. Ghosh, Y. Zheng y e. al., «5G 3GPP-Like Channel Models for Outdoor Urban Microcellular and Macrocellular Environments,» de *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2016 IEEE 83rd*, Nanjing, China, 2016.
- [58] 3rd Generation Partnership Project, «Remaining details of path loss modeling for elevation beamforming and FD-MIMO (3GPP R1-133594),» 23 Agosto 2013. [En línea]. Available: [http://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_ran/WG1\\_RL1/TSGR1\\_74/Docs/R1-133594.zip](http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_74/Docs/R1-133594.zip). [Último acceso: 04 Diciembre 2017].
- [59] 3rd Generation Partnership Project, «Discussion on remaining path loss and

- LOS probability issues (3GPP R1-132895),» 23 Agosto 2013. [En línea]. Available: [http://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_ran/WG1\\_RL1/TSGR1\\_74/Docs/R1-132895.zip](http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_74/Docs/R1-132895.zip). [Último acceso: 04 Diciembre 2017].
- [60] B. Mondal, T. A. Thomas, E. Visotsky, F. W. Vook, A. Ghosh, Y.-h. Nam, Y. Li, J. Zhang, M. Zhang, Q. Luo, Y. Kakishima y K. Kitao, «3D channel model in 3GPP,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, nº 3, pp. 16 - 23, 2015.
- [61] 3rd Generation Partnership Project, «Correction for low and high frequency model harmonization (3GPP R1-1701225),» 17 Enero 2017. [En línea]. Available: [http://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_ran/WG1\\_RL1/TSGR1\\_AH/NR\\_AH\\_1701/Docs/R1-1701225.zip](http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_AH/NR_AH_1701/Docs/R1-1701225.zip). [Último acceso: 29 Noviembre 2017].
- [62] T. S. Rappaport, . R. W. H. Jr., . R. C. Daniels y . J. N. Murdock, *Millimeter Wave Wireless Communications*, Massachusetts: Prentice Hall, 2015.
- [63] 3rd Generation Partnership Project, «Height Dependent LOS Probability for 3D-Channel Model (3GPP R1-133273),» Meeting: R1-74 - 2013-08-19 to 2013-08-23, Barcelona, Agosto 2013. [En línea]. Available: [http://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_ran/WG1\\_RL1/TSGR1\\_74/Docs/R1-133273.zip](http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_74/Docs/R1-133273.zip). [Último acceso: 17 Noviembre 2017].
- [64] Google Maps, «200 Jirón Sta. Rosa,» Febrero 2013. [En línea]. Available: <https://www.google.com.pe/maps/@-12.0487204,-77.0315755,3a,75y,116.54h,77.45t/data=!3m7!1e1!3m5!1shnmpuhLsWlm6UOGM-5gbCQ!2e0!5s20130201T000000!7i13312!8i6656>.
- [65] S. Hur, S. Baek, B. Kim, Y. Chang, A. F. Molisch, T. S. Rappaport, K. Haneda y J. Park, «Proposal on Millimeter-Wave Channel Modeling for 5G Cellular System,» *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, nº 3, pp. 454 - 469, 2016.
- [66] Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS), «METIS Channel Models (Deliverable D1.4),» 14 Julio 2015. [En línea]. Available: [https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/METIS\\_D1.4\\_v3.pdf](https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/METIS_D1.4_v3.pdf). [Último acceso: 13 Febrero 2018].
- [67] J. Takehara, «Jockey Plaza, con el ingreso de la marca H&M, espera facturar US\$88 millones por el Día de la Madre,» *Codigo.pe*, 28 Abril 2015. [En línea].

Available: <https://codigo.pe/marcas/jockey-plaza-con-el-ingreso-de-la-marca-hm-espera-facturar-us88-millones-por-el-dia-de-la-madre>. [Último acceso: 01 Abril 2018].

- [68] G. R. Maccartney, T. S. Rappaport, S. Sun y S. Deng, «Indoor Office Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models at 28 and 73 GHz for Ultra-Dense 5G Wireless Networks,» *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2388 - 2424, 2015.
- [69] J. Järveläinen, S. L. H. Nguyen, K. Haneda, R. Naderpour y U. T. Virk, «Evaluation of Millimeter-Wave Line-of-Sight Probability With Point Cloud Data,» *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 5, n° 3, pp. 228 - 231, 2016.
- [70] C. Musciano y B. Kennedy, *HTML & XHTML, The Definitive Guide*, California: O'Reilly Media, Inc., 2007.
- [71] J. Patel, «The 9 Most In-Demand Programming Languages of 2017,» Coding Dojo Blog, 02 Febrero 2017. [En línea]. Available: <http://www.codingdojo.com/blog/9-most-in-demand-programming-languages-of-2017/>. [Último acceso: 21 Diciembre 2017].
- [72] Plotly, «JavaScript Graphing Library,» Plotly, 2015. [En línea]. Available: <https://plot.ly/javascript/>. [Último acceso: 23 Diciembre 2017].
- [73] R. Nixon, *Learning PHP, MySQL & JavaScript with jQuery, CSS & HTML5*, 5th Edition, California: O'Reilly Media, Inc., 2015.
- [74] G. E. P. Box y M. E. Müller, «A Note on the Generation of Random Normal Deviates,» *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 29, n° 2, pp. 610-611, 1958.
- [75] J. Barnett, «How To Set Up Apache Virtual Hosts on CentOS 7,» DigitalOcean, 5 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/how-to-set-up-apache-virtual-hosts-on-centos-7>.
- [76] NYU Tandon School of Engineering, «NYU 5G Simulator | NYU WIRELESS,» NYU Wireless, 14 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <http://wireless.engineering.nyu.edu/nyusim/>. [Último acceso: 15 Febrero 2018].

