



MAPAS DE CAPACIDAD DE CANAL PARA SISTEMAS MÓVILES DE QUINTA GENERACIÓN

JORGE GÓMEZ ROJAS

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN
DOCTORADO EN INGENIERÍA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES
DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES**

MEDELLÍN, 2018



MAPAS DE CAPACIDAD DE CANAL PARA SISTEMAS MÓVILES DE QUINTA GENERACIÓN

JORGE GÓMEZ ROJAS

Tesis bajo el convenio de cotutela acordado entre la Universidad Politécnica de Cartagena (España) y la Universidad Pontificia Bolivariana (Colombia)

Dirigido por

ANDRES NAVARRO CADAVID

JUAN PASCUAL GARCÍA

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN
DOCTORADO EN INGENIERÍA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES
DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES**

MEDELLÍN, 2018

Nota de aceptación

Comité Doctoral

Comité Doctoral

Comité Doctoral

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

“Declaro que esta tesis no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad”. Art. 82 Régimen Discente de Formación Avanzada, Universidad Pontificia Bolivariana.

FIRMA AUTOR (ES) _____

Resumen

La movilidad trae consigo la demanda de servicios que, a su vez, intentan proveer de mayores capacidades a los usuarios. Con el pasar del tiempo, la tendencia en servicios móviles ha ido migrando a la multimedia, ocasionando mayores exigencias de capacidad a los proveedores de servicios. Esta tesis estimó la capacidad de canal MIMO para un entorno móvil de quinta generación (5G), empleando para ello, la simulación de canal inalámbrico bajo un entorno bien definido, tanto de interior como de exterior siendo ambos complejos. Se trabajó sobre la banda de frecuencias sub 6 GHz y de ondas milimétricas alrededor de 60 GHz usando la técnica óptica del lanzamiento de rayos en conjunto con motores de juego y aceleración por hardware.

Queda establecido que utilizando una representación del escenario que contenga la suficiente información geoespacial y los parámetros constitutivos de los dispersores adecuados, mejora su precisión, permite la planificación y optimización de sistemas móviles 5G, siendo una alternativa a las costosas campañas de mediciones. Adicionalmente, son evaluadas las contribuciones de la reflexión difusa en ondas milimétricas, evidenciando que sus aportes mejoran la predicción en entornos complejos. Se demuestra que el uso de la técnica óptica del lanzamiento de rayos es rentable para un número considerable de puntos candidatos a evaluar en referencia a otras herramientas computacionales experimentales.

Abstract

Mobility has been increased causing services multimedia demand and requiring increasing the capacities offered to the user. In this thesis, we estimated the MIMO channel capacity for a fifth-generation mobile systems environment (5G), using for this purpose the simulation of wireless channel under a defined complex scenario, both indoor and outdoor. We worked on the sub 6 GHz frequency band and millimeter frequency band around 60 GHz using the optical technique of ray launching in conjunction with game engines and hardware acceleration.

We demonstrate that a scenario representation that contains sufficient geospatial information and the properties of each material improves accuracy, allows planning and optimization of 5G mobile systems being an alternative to costly campaigns of measures. In Addition, diffuse reflection contributions in millimeter waves are evaluated, evidencing that its contributions improve the prediction in complex environments. We demonstrated that the use of optical ray throwing technique is profitable for a considerable number of candidate sites in reference to other experimental computational tools.

| | |
|--|-------------|
| Resumen..... | ix |
| Abstract | x |
| Índice..... | xi |
| Lista de figuras..... | xiii |
| Lista de tablas | xv |
| 1. Generalidades..... | 1 |
| 1.1. <i>Introducción</i> | 1 |
| 1.2. <i>Motivación</i> | 1 |
| 1.3. <i>Relevancia</i> | 2 |
| 1.4. <i>Contribuciones</i> | 3 |
| 1.5. <i>Preguntas de Investigación</i> | 3 |
| 1.6. <i>Hipótesis</i> | 4 |
| 1.7. <i>Objetivos</i> | 4 |
| 1.7.1. <i>Objetivo General</i> | 4 |
| 1.7.2. <i>Objetivos específicos</i> | 4 |
| 1.8. <i>Organización de la tesis</i> | 5 |
| 1.9. <i>Apoyos a la investigación</i> | 5 |
| 1.10. <i>Publicaciones</i> | 5 |
| 2. Bases Teóricas | 7 |
| 2.1. <i>Ondas milimétricas</i> | 7 |
| 2.2. <i>Trazado de rayos óptico</i> | 7 |
| 2.3. <i>Método de imágenes</i> | 8 |
| 2.4. <i>Método de fuerza bruta</i> | 9 |
| 2.5. <i>Campo eléctrico en un punto</i> | 10 |
| 2.6. <i>Pérdidas básicas de propagación</i> | 10 |
| 2.7. <i>Reflexión de especular</i> | 10 |
| 2.8. <i>Difracción uniforme</i> | 12 |
| 2.8.1. <i>Polarización debida a la difracción</i> | 15 |
| 2.9. <i>Parámetros del canal multicamino</i> | 16 |
| 2.10. <i>Sistemas MIMO</i> | 19 |
| 2.10.1. <i>Capacidad de canal en sistemas MIMO</i> | 19 |
| 2.11. <i>Dispersión Difusa</i> | 20 |
| 2.11.1. <i>Modelo Lambertiano</i> | 21 |
| 2.11.2. <i>Modelo directivo</i> | 22 |
| 2.2. <i>Antecedentes</i> | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 3. Modelado | 28 |
| 3.1. <i>Elección de las plataformas</i> | 28 |
| 3.1.1. Software | 28 |
| 3.1.2. Hardware..... | 30 |
| 3.2. <i>Modelo del escenario</i> | 30 |
| 3.3. <i>Modelo de canal</i> | 31 |
| 3.3.1. Propagación de los rayos | 33 |
| 3.3.2. Aceleración por hardware..... | 36 |
| 4. Resultados | 38 |
| 4.1. <i>Canal MIMO en exterior ondas sub 6 GHz. Caso de estudio: Ilmenau</i> | 38 |
| 4.1.1. Descripción del escenario | 38 |
| 4.1.2. Campaña de medidas..... | 39 |
| 4.1.3. Comparación de la simulación con campañas de medida | 40 |
| 4.2. <i>Canal MIMO en ondas milimétricas. Caso de estudio: Cartagena</i> | 42 |
| 4.2.1. Modelo del escenario..... | 42 |
| 4.2.2. Campañas de medida..... | 45 |
| 4.2.3. Comparación del lanzador de rayos con campaña de medida | 48 |
| 4.2.4. Comparación del lanzador y el trazador de rayos | 54 |
| 4.2.5. Aportes de la difusión | 58 |
| 4.3. <i>Mapas de capacidad de canal MIMO en ondas milimétricas</i> | 60 |
| 5. Conclusiones | 62 |
| 6. Trabajos futuros | 64 |
| Referencias | 65 |
| Anexos | 72 |
| A.1. <i>Gráficas y estadísticas de error para todas las ubicaciones.</i> | 72 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.1. SEGUNDO ORDEN DE REFLEXIÓN PARA LA FUENTE S Y EL RECEPTOR R. | 9 |
| FIGURA 2.2. GEOMETRÍA Y VARIABLES PARA LA DIFRACCIÓN EN BORDES [43]. | 13 |
| FIGURA 2.3. EFECTO DE LA DIFRACCIÓN SOBRE LA INTERFAZ. | 15 |
| FIGURA 2.4. PERFIL DE RETARDO DE POTENCIA PARA UN CANAL [48]. | 17 |
| FIGURA 2.5. ELEMENTO DE SUPERFICIE UBICADO A UNA DISTANCIA DEL TRANSMISOR [63]. | 22 |
| FIGURA 2.6. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR TRAYECTORIA. RESULTADOS TOMADOS DE [72]. | 24 |
| FIGURA 3.1. REPRESENTACIÓN DE UN ESCENARIO CON VOLÚMENES LIMITADORES IMPLEMENTADO EN AMBIENTE EXTERIOR (DERECHA) Y EN AMBIENTE INTERIOR (IZQUIERDA). | 32 |
| FIGURA 3.2. REPRESENTACIÓN DEL LANZAMIENTO DE RAYOS USANDO LA TÉCNICA DE RAYO TUBO E ICOSAEDRO (IZQUIERDA) Y LA TÉCNICA DE RAYO CONO. | 34 |
| FIGURA 4.1. PARTE DEL CENTRO DE ILMENAU (ALEMANIA) CON LA RUTA DE LA CAMPAÑA DE MEDIDAS EN COLOR AMARILLO Y LA UBICACIÓN DEL TRANSMISOR EN COLOR VERDE. CIUDAD REAL TOMADA DESDE GOOGLE MAPS (IZQUIERDA) Y LA SIMULACIÓN 3D (DERECHA). | 39 |
| FIGURA 4.2. ANTENA TRANSMISORA (IZQUIERDA) Y ANTENA RECEPTORA (DERECHA). | 40 |
| FIGURA 4.3. SIMULACIÓN DEL ESCENARIO CON LOS RAYOS OCASIONADOS POR REFLEXIONES Y DIFRACCIONES DE DIFERENTES ÓRDENES PARA UN SOLO PUNTO DE RECEPCIÓN ESPECÍFICO. ESFERAS RECEPTORAS (AMARILLAS), EL TRANSMISOR (VERDE) Y LOS RAYOS QUE IMPACTAN AL RECEPTOR (FUCSIA). | 41 |
| FIGURA 4.4. COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON ALTA RESOLUCIÓN (AZUL), BAJA RESOLUCIÓN (VERDE) Y LAS MEDICIONES (ROJO). | 41 |
| FIGURA 4.5. MODELO EN 3D DEL LABORATORIO. | 43 |
| FIGURA 4.6. VISTA SUPERIOR DEL LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN ELECTROMAGNÉTICA, UPCT, ESPAÑA. DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDIDA. | 44 |
| FIGURA 4.7. SISTEMA DE MEDIDAS PARA LA CAMPAÑA DE MEDIDAS ENTRE 57 Y 66 GHz. | 45 |
| FIGURA 4.8. CONFORMACIÓN DE LOS ARREGLOS VIRTUALES (SUPERIOR). | 46 |
| FIGURA 4.9. ANTENA OMNIDIRECCIONAL QOM55-65 VRA, BASE DE LOS ARREGLOS VIRTUALES. | 46 |
| FIGURA 4.10. PATRONES DE RADIACIÓN PARA LA ANTENA OMNIDIRECCIONAL QOM55-65 VRA A 55GHz (SUPERIOR), 60GHz (CENTRO) Y 65 GHz (INFERIOR). | 47 |
| FIGURA 4.11. PDP PARA LA UBICACIÓN 3 CON 3,4,7 Y 10 EVENTOS. | 49 |
| FIGURA 4.12. VALORES DE MEDICIONES Y SIMULACIONES PARA 4 Y 10 EVENTOS EN LA UBICACIÓN 4 CON SUS RESPECTIVOS CÁLCULOS ESTADÍSTICOS. | 50 |
| FIGURA 4.13. VALORES DE MEDICIONES Y SIMULACIONES PARA 4 Y 10 EVENTOS EN LA UBICACIÓN 5 CON SUS RESPECTIVOS CÁLCULOS ESTADÍSTICOS. | 51 |
| FIGURA 4.14. VALORES DE MEDICIONES Y SIMULACIONES PARA 4 Y 10 EVENTOS EN LA UBICACIÓN 10 CON SUS RESPECTIVOS CÁLCULOS ESTADÍSTICOS. | 52 |
| FIGURA 4.15. VALORES DE MEDICIONES Y SIMULACIONES PARA 4 Y 10 EVENTOS EN LA UBICACIÓN 16 CON SUS RESPECTIVOS CÁLCULOS ESTADÍSTICOS. | 53 |
| FIGURA 4.16. VALORES DE MEDICIONES Y SIMULACIONES PARA 3, 4, 7 Y 10 EVENTOS EN LA UBICACIÓN 17 CON SUS RESPECTIVOS CÁLCULOS ESTADÍSTICOS. | 54 |
| FIGURA 4.17. PDP PARA LA UBICACIÓN 3 COMPARANDO LOS RESULTADOS DEL LANZADOR Y TRAZADOR DE RAYOS CON RESPECTO DE LAS MEDIDAS. | 55 |
| FIGURA 4.18. PDP PARA LA UBICACIÓN 7 COMPARANDO LOS RESULTADOS DEL LANZADOR Y TRAZADOR DE RAYOS CON RESPECTO DE LAS MEDIDAS. | 56 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 4.19. PDP PARA LA UBICACIÓN 11 COMPARANDO LOS RESULTADOS DEL LANZADOR Y TRAZADOR DE RAYOS CON RESPECTO DE LAS MEDIDAS. | 57 |
| FIGURA 4.20. PDP PARA LA UBICACIÓN 18 COMPARANDO LOS RESULTADOS DEL LANZADOR Y TRAZADOR DE RAYOS CON RESPECTO DE LAS MEDIDAS. | 58 |
| FIGURA 4.21. COMPARATIVA DEL LOS PDP PARA LAS MEDIDAS, SIMULACIONES CON EL TRAZADOR (RT) Y EL LANZADOR (RL) CON DIFUSIÓN. | 59 |
| FIGURA 4.22. MAPA DE CAPACIDAD DE CANAL NORMALIZADO PARA EL ESCENARIO DE PRUEBAS DE LA UPCT. | 61 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| TABLA 2.1. SISNTESIS DE LOS APORTES DE LA TESIS VS LOS ANTECEDENTES REVISADOS..... | 27 |
| TABLA 3.1. ANÁLISIS DE LAS COMPATIBILIDADES EN CREACIÓN DE ESCENARIOS..... | 30 |
| TABLA 4.1. RESUMEN DE LOS VOLÚMENES LIMITADORES EMPLEADOS PARA REPRESENTAR EL MODELO GEOMÉTRICO DEL ESCENARIO 3D..... | 39 |
| TABLA 4.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ANTENAS EMPLEADAS. | 40 |
| TABLA 4.3. ESTADÍSTICA DE ERROR ENTRE LA SIMULACIÓN DE ALTA Y BAJA RESOLUCIÓN VERSUS LAS MEDIDAS. | 41 |
| TABLA 4.4. ESTADÍSTICA DE ERROR ENTRE LA SIMULACIÓN DE ALTA Y BAJA RESOLUCIÓN VERSUS LAS MEDIDAS. | 42 |
| TABLA 4.5. VALORES DE PERMITIVIDAD RELATIVA Y CONDUCTIVIDAD..... | 44 |
| TABLA 4.6. ESTADÍSTICAS DE ERROR PARA TODAS LAS UBICACIONES DEL ESCENARIO DE PRUEBA. | 48 |
| TABLA 4.7. TIEMPO DE EJECUCIÓN PARA LA SIMULACIÓN DE TODAS LAS UBICACIONES SEGÚN EL NÚMERO DE EVENTOS PROGRAMADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CANAL. | 48 |
| TABLA 4.8. VALORES DE MEDICIONES Y SIMULACIONES PARA 3, 4, 7 Y 10 EVENTOS EN LA UBICACIÓN 4 CON SUS RESPECTIVOS CÁLCULOS ESTADÍSTICOS. | 50 |
| TABLA 4.9. VALORES DE MEDICIONES Y SIMULACIONES PARA 3, 4, 7 Y 10 EVENTOS EN LA UBICACIÓN 5 CON SUS RESPECTIVOS CÁLCULOS ESTADÍSTICOS. | 51 |
| TABLA 4.10. VALORES DE MEDICIONES Y SIMULACIONES PARA 3, 4, 7 Y 10 EVENTOS EN LA UBICACIÓN 10 CON SUS RESPECTIVOS CÁLCULOS ESTADÍSTICOS. | 52 |
| TABLA 4.11. VALORES DE MEDICIONES Y SIMULACIONES PARA 3, 4, 7 Y 10 EVENTOS EN LA UBICACIÓN 16 CON SUS RESPECTIVOS CÁLCULOS ESTADÍSTICOS. | 53 |
| TABLA 4.12. VALORES DE MEDICIONES Y SIMULACIONES PARA 3, 4, 7 Y 10 EVENTOS EN LA UBICACIÓN 17 CON SUS RESPECTIVOS CÁLCULOS ESTADÍSTICOS. | 53 |
| TABLA 4.13. PDP PARA LA UBICACIÓN 3 COMPARANDO LOS RESULTADOS DEL LANZADOR Y TRAZADOR DE RAYOS CON RESPECTO DE LAS MEDIDAS. | 55 |
| TABLA 4.14. PDP PARA LA UBICACIÓN 7 COMPARANDO LOS RESULTADOS DEL LANZADOR Y TRAZADOR DE RAYOS CON RESPECTO DE LAS MEDIDAS. | 56 |
| TABLA 4.15. PDP PARA LA UBICACIÓN 11 COMPARANDO LOS RESULTADOS DEL LANZADOR Y TRAZADOR DE RAYOS CON RESPECTO DE LAS MEDIDAS. | 57 |
| TABLA 4.16. PDP PARA LA UBICACIÓN 18 COMPARANDO LOS RESULTADOS DEL LANZADOR Y TRAZADOR DE RAYOS CON RESPECTO DE LAS MEDIDAS. | 58 |
| TABLA 4.17. VALORES DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN (S) Y DEL FACTOR DE ANCHO DE LÓBULO DE DIFUSIÓN α_R PARA CADA MATERIAL..... | 59 |
| TABLA 4.18. COMPARATIVA DE LAS ESTADÍSTICAS ENTRE LAS SIMULACIONES POR TRAZADO DE RAYOS (RT) , LANZAMIENTO DE RAYOS (RL) Y LOS APORTES DE LA DIFUSIÓN. | 60 |

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

En esta tesis se presenta una nueva forma de estimar los sistemas MIMO tanto en ambientes de exterior como de interior. Se utiliza la técnica de rayos óptica del lanzamiento de rayos bajo el método de fuerza bruta. Esta técnica no ha sido ampliamente empleada debido a los grandes consumos computacionales, sin embargo, para resolver este problema se recurre a los motores de juego y la aceleración por hardware mediante tarjetas gráficas. Adicionalmente, se realiza la verificación de la precisión de la solución presentada evaluándole en frecuencias a ser empleadas para el 5G móvil.

1.2. Motivación

La masificación en el acceso a la información multimedia a través de aplicaciones y servicios obliga a la siguiente generación de comunicaciones móviles a presentar avances tecnológicos con rapidez [1], [2]. Esto es, aumentar la eficiencia del canal inalámbrico mediante la transmisión en el menor tiempo y con una calidad aceptable al mayor número de usuarios posibles. Bajo el supuesto de ambientes con alta dispersión (*Rich Scattering*), un sistema de banda estrecha de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) puede aumentar significativamente la capacidad del canal resultante sobre el sistema de antena simple tradicional [3]. Para los sistemas de 5G móviles se propone MIMO masivo como tecnología para mejorar la eficiencia espectral [4]. El rango de frecuencias sugerido por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) donde se implementará el 5G móvil contempla un amplio set de rangos de frecuencias entre 24 GHz y 86 GHz [5].

Para evaluar la eficiencia de implementaciones tecnológicas es necesario estimar el comportamiento del canal de radio a través de modelos determinísticos o estocásticos [6]. Los modelos estocásticos usan una función de distribución probabilística y descuida algunos efectos del canal debido a las antenas o al tipo y número de dispersores en el escenario a evaluar. Los modelos deterministas son adecuados en los diferentes ambientes con dispersores de tamaño considerable, dada sus predicciones exactas y verificables [7]. Los métodos computacionales han presentado gran influencia en la predicción de parámetros de canal inalámbrico, siendo la técnica de rayos ópticos la de mayor precisión [8]. Hasta ahora,

se han implementado con mayor eficiencia y precisión, la técnica del trazado de rayos (RT, *Ray Tracing*) basado en el método de imágenes [9]–[11] y la técnica de lanzamiento de rayos (RL, *Ray Launching*) que emplea el algoritmo de fuerza bruta [12]–[14].

Sin embargo, computacionalmente, la primera técnica está limitada a un escenario simplificado debido al número de fuentes secundarias que se producen por los fenómenos de reflexión múltiple y difracción. En cuanto a la segunda técnica, su precisión está en función del ángulo de resolución de disparo. Los rayos producidos inicialmente y los generados como una fuente secundaria producto del principio de Huygens – Fresnel, aumenta exponencialmente el número de caminos a analizar. Para que el lanzamiento de rayos sea una estrategia práctica, precisa y eficiente computacionalmente, es necesario recurrir al uso de motores de juego y aceleración por hardware [15],[16] pero su estudio se ha limitado a la estimación de canales inalámbricos de un transmisor y un receptor (SISO, *Single input single output*) en ondas decimétricas.

Actualmente, las limitaciones computacionales de las técnicas de rayos ópticos imposibilitan su utilización en herramientas de planificación y optimización de los futuros sistemas MIMO masivo y ondas milimétricas. Este hecho provoca que instrumentos útiles como los mapas de canal no hayan sido empleados hasta el momento en la planificación de los mencionados sistemas. Los mapas de canal son presentaciones en códigos de colores que muestran las características de un canal dentro de un mapa geográfico [17] y son ampliamente usados como una aplicación computacional de planificación y optimización [18], [19]. A pesar de los usos y aplicaciones, publicaciones recientes por Weng et al en [19], [20], Suzuki [18] y Zhu et al en [21] muestran que los mapas de canal aún no son usados en el tratamiento de sistemas MIMO masivo y ondas milimétricas debido al alto consumo de recurso computacional.

1.3. Relevancia

El rango de frecuencias de las ondas milimétricas es estudiado como alternativa para la implementación de la comunicación móvil de 5G. Especialmente el rango de 57 a 66 GHz es un espectro libre de licenciamiento y con gran tasa de velocidad (algunos Gigabits por segundo), haciendo la banda propuesta por el ITU como la mejor opción para pequeñas áreas de cobertura.

En esta tesis se presenta una nueva forma de estimación paramétrica para canales inalámbricos en sistemas MIMO que operan en ondas milimétricas, que combina el software de motores de juego con la aceleración por hardware y métodos heurísticos obteniendo rangos de precisión importantes.

La estimación paramétrica se emplea para obtener un mapa de capacidad de canal. Su función principal es permitir la planificación y la optimización de redes inalámbricas en un escenario bien definido, en este caso, para aplicaciones de 5G móvil. Al obtener la respuesta en frecuencia para un conjunto de transmisores y receptores dados, es posible predecir la capacidad de canal para posiciones específicas y así, elegir la mejor opción para el escenario bajo estudio. El efecto sobre la precisión a causa de los parámetros constitutivos de los materiales, el número de antenas en transmisor y receptor, el número de eventos de reflexión, difracción y reflexión difusa, así como sus combinaciones, también fueron materia de estudio.

1.4. Contribuciones

Las contribuciones que esta tesis doctoral le entrega al estado actual en la estimación de canal inalámbrico son las siguientes:

1. Se desarrolló una herramienta computacional que permita estimar los parámetros de canal inalámbrico en un amplio espectro que incluye las ondas milimétricas, aplicable a tecnologías actuales (MIMO), preciso y confiable.
2. Se empleó en conjunto la aceleración de hardware, el software libre de motor de juegos implementando el lanzamiento de rayos y algoritmos heurísticos para obtener un mapa de canal para 5G de comunicaciones móviles dentro de un escenario bien definido.
3. Se obtiene una estimación paramétrica que atiende el principio de reciprocidad.
4. Se aportan simulaciones de gran precisión para modelar canales en 5G que fueron comparadas con campañas de mediciones y con otra estrategia de rayos ópticos, obteniendo mejoras considerables en tiempo computacional, precisión y nivel de detalle del escenario.
5. Permitted el estudio de las contribuciones de la reflexión difusa en las ondas milimétricas.

1.5. Preguntas de Investigación

¿En qué medida las herramientas de lanzamiento de rayos en 3D pueden modelar, de forma confiable, el canal radio y reducir la dependencia de medidas en la planificación de los futuros sistemas 5G?

¿En qué situaciones es más rentable el lanzador de rayos que otras estrategias de rayos ópticos?

¿Es posible extender las técnicas de modelado de canal basadas en la teoría uniforme de la difracción (UTD, *Uniform Theory of Diffraction*) y lanzado de rayos, de sistemas SISO a sistemas MIMO y MIMO masivo?

¿Se pueden usar herramientas de trazado de rayos para optimizar el canal y la capacidad de un sistema 5G desde su planificación?

1.6. Hipótesis

“Una simulación de mapa de capacidad de canal que utilice una representación que contenga la suficiente información geoespacial y los parámetros constitutivos de los dispersores mejorará su precisión, permitirá la planificación y optimización de sistemas móviles 5G”

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Estimar la capacidad de sistemas MIMO en ondas milimétricas, empleando el concepto de mapa de canal, software libre de motores de juego, aceleración por hardware y técnicas de lanzado de rayos.

1.7.2. Objetivos específicos

- Obtener modelos geoespaciales de un escenario de prueba en tres dimensiones a través de herramientas gráficas que permitan la inclusión de parámetros físicos de los materiales que caracterizan los dispersores.
- Modelar el comportamiento en tres dimensiones de las ondas electromagnéticas para sistemas MIMO y MIMO masivo en ondas milimétricas mediante la implementación de la UTD, técnicas de lanzado de rayos, motores de juego y aceleración por hardware.

- Proponer un mapa de capacidad de canal a partir de los resultados de la simulación.
- Verificar la precisión de los resultados obtenidos mediante la comparación con la técnica de trazado de rayos y campañas de medición.

1.8. Organización de la tesis

En esta sección se presenta el cómo está estructurada el contenido de este documento. En el capítulo 1 son descritas las generalidades, en el capítulo 2 se describen las bases teóricas compuestas por las definiciones fundamentales y el marco de antecedentes en donde se realiza la revisión al estado actual de la temática. En el capítulo 3 se describe el modelado del escenario y del canal, así como el método para elegir las plataformas de hardware y software. En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos desde la simulación con el motor de juegos para los casos de la banda sub 6 GHz y ondas milimétricas (alrededor de 60 GHz). Estos resultados son comparados con campañas de mediciones y en el caso de las ondas milimétricas también se comparan con otra herramienta computacional desarrollada por la UPCT. Finalmente, son mostradas las conclusiones de este trabajo en el capítulo 5 y los trabajos futuros en la sección 6.

1.9. Apoyos a la investigación

Esta tesis se realizó bajo cotutoría del Dr. Juan Pascual-García, profesor adscrito al departamento de Tecnologías de Información y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cartagena (España), en el marco del convenio firmado con la Universidad Pontificia Bolivariana.

Este proyecto se llevó a cabo mediante la subvención del Gobierno Colombiano a través de la convocatoria 528 de 2012 del departamento de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS).

1.10. Publicaciones

[1] A. Navarro, D. Guevara, and J. Gomez, “Modelado de canal inalámbrico empleando técnicas de trazado de rayos: Una revisión sistemática,” **Sistemas & Telemática**, vol. 12, no. 30, pp. 87–101, 2014.

-
- [2] A. Navarro, D. Guevara, and J. Gomez, “*Prediction of delay spread using ray tracing and game engine based on measurement,*” in **81th IEEE Vehicular Technology Conference**, 2015, vol. 2015.
- [3] A. Navarro, D. Guevara, and J. Gomez, “*Comparison of uniform theory of diffraction coefficients for delay spread and angle spread estimation using game engines in MIMO,*” **2015 IEEE 82nd Veh. Technol. Conf. VTC Fall 2015** - Proc., no. 1, 2015.
- [4] D. Escalante et al., “*Indoor Propagation Using a Game Engine Ray Based Model in Indoor Scenario At 5,4GHz,*” in **2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference**, 2016, vol. 11, no. 5, pp. 1–5.
- [5] A. Navarro et al., “*Delay spread in mmwave bands for indoor using Game Engines 3D Ray based Tools,*” in **2016 10th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2016**, 2016, pp. 1–5.
- [6] A. Navarro et al., “*Delay spread estimation using a Game Engine Ray based model in indoor scenario at 5 GHz,*” **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences**, vol. 11, no. 5, pp. 3380–3384, 2016.
- [7] A. Navarro, D. Guevara, N. Cardona, J. Gomez, “*Heuristic UTD Coefficients for Delay Spread Prediction in an Indoor Scenario,*” in **2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)**, 2017, vol. 4, no. 0, pp. 3163–3167.
- [8] J. Gómez Rojas, D. Guevara Ibarra, A. Navarro Cadavid, J. Pascual García, and J. M. Molina García Pardo, “*Aceleración del lanzamiento de rayos mediante algoritmos de paralelización en GPU,*” in **XXXII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI.**, 2017.

2. BASES TEÓRICAS

Se revisan los elementos conceptuales que permiten abordar la temática presentada. A continuación, se presentan los aspectos relacionados con la técnica para modelado de canal y los parámetros de canal multicamino.

2.1. Ondas milimétricas

Las ondas en alta frecuencia están dadas como la solución para la siguiente generación de comunicaciones inalámbricas de corto alcance y muy altas velocidades [22]. La banda de frecuencias con mayor opción es la de ondas milimétricas que se encuentra libre de licenciamiento (ISM, *Industrial, Scientific and Medical Band*), alrededor de 60 GHz. Existen rangos definidos con aplicaciones estandarizadas como lo son IEEE-802.15.3 c [23] y IEEE-802.11ad [24].

El 14 de julio, la FCC anunció la atribución de las bandas de 28GHz, 37GHz, 39GHz y 64-71GHz, en el plan de nominado *Spectrum Frontiers*, con el ánimo de ser pionero en 5G. Las reglas publicadas, crean un nuevo servicio denominado *Upper Microwave Flexible Use* en las bandas licenciadas 28 GHz (27.5-28.35 GHz), 37 GHz (37-38.6 GHz), y 39 GHz (38.6-40 GHz), y en la banda no licenciada de 64-71 GHz.

A esta frecuencia la atenuación por pérdidas de propagación en el espacio libre es muy alta [25]. Esto es posible compensarlo con antenas de alta directividad y haciendo que el aporte principal de energía en el receptor sea por la componente de línea de vista. Sin embargo, las contribuciones debidas a la reflexión, difracción y difusión se deben tener en cuenta [26]. Debido a estas consideraciones, las técnicas de modelado de canal basada en rayos ópticos son apropiadas para tratar estas frecuencias. Las características dieléctricas de los materiales que conforman el espacio de propagación aportaran mayor precisión en el modelo [27].

2.2. Trazado de rayos óptico

Es una técnica determinista utilizada para caracterizar canales de radiocomunicaciones

basada en la Teoría de la Óptica Geométrica (GO, *Geometrical optics*) y la UTD [28], [29]. El trazado de rayos considera fenómenos de reflexión que soluciona la GO y difracción tratados por la UTD, en superficies planas. Esta técnica es válida en escenarios urbanos de propagación y permite expresar el campo de ondas con un conjunto de rayos, cada uno correspondiendo a la conectividad lineal de dos terminales. La técnica de rayos ópticos posee principalmente, dos métodos, llamados el método de trazado de rayos (RT, *ray tracing*) y el método de lanzamiento de rayos (RL, *ray launching*) [30]. El primero se utiliza generalmente en escenarios interiores con geometrías de baja complejidad y número pequeño de reflexiones. El lanzamiento de rayos es empleado en entornos con geometrías complejas y pueden considerarse múltiples reflexiones y difracciones o combinaciones de ellas. La ventaja de utilizar un trazado de rayos es su característica de distinguir entre diferentes caminos de propagación, lo que permite estimar los parámetros de canal, ya sea para banda angosta o banda ancha, como también la caracterización espacial y temporal.

2.3. Método de imágenes

La estrategia de trazado de rayos es basada en la teoría de imágenes, se utiliza generalmente en escenarios interiores con geometrías de baja complejidad y número pequeño de reflexiones [31], [32]. Consiste en conseguir todas las imágenes del receptor sobre todas las superficies de los dispersores con el fin de obtener las reflexiones y difracciones simples, múltiples y las combinaciones entre ellas. Luego, cada una de esas imágenes constituyen una fuente secundaria de radiación para repetir el proceso el análisis de reflexión y difracción con las nuevas imágenes. Si se asume N superficies o caras reflectoras, existirán igual número de imágenes del transmisor. Para las reflexiones de segundo orden se tendrán un número igual a $N(N-1)$, para el tercer orden será $N(N-1)(N-1)$ y así, sucesivamente [33].

Un método propuesto para obtener las reflexiones es definir el orden, luego graficar las fuentes virtuales o imágenes y obtener las trazas descartando aquellas que no pertenezcan al dominio de la reflexión [34]. A modo de ejemplo, en la Figura 2.1 se ilustra las componentes de segundo orden.

En primera instancia se obtiene el orden, el cual sería para este ejemplo $N = 2$ y así existirán $N(N-1) = 4$ imágenes. Luego se realiza un proceso de recorrido inverso desde la fuente con mayor cantidad de subíndices hasta llegar a la fuente.

Para ubicar los subíndices se inicia por el número de interfaz con la cual se refleja y se va incrementando de acuerdo al orden. La fuente S_{12} se genera como resultado de la imagen de S en la interfaz 1 dando lugar a la fuente S_1 y posteriormente ésta se refleja sobre la

interfaz 2. Para ilustrar el proceso de corrido inverso, se parte del receptor y se une con una línea a S_{12} . Como la línea pasa por la interfaz, la reflexión tendrá lugar. Ahora, el punto de intersección x es el nuevo receptor. Se une el nuevo receptor x con la fuente siguiente en corrido inverso, es decir S_1 . De igual forma la reflexión existe ya que se intersecta en un punto de la interfaz 1. Ahora el nuevo receptor es el punto y . Se traza una línea desde y en corrida inversa a la siguiente fuente que es S . Se finaliza el proceso al llegar a la fuente real. De la gráfica es posible revisar que la fuente S_{21} no es una fuente válida. El orden de trazado de rayos afecta fuertemente el proceso computacional haciéndolo tender a incalculable. La transmisión del rayo a través de una cara es posible si las características del material permiten que llegue con la suficiente potencia para ser considerado.

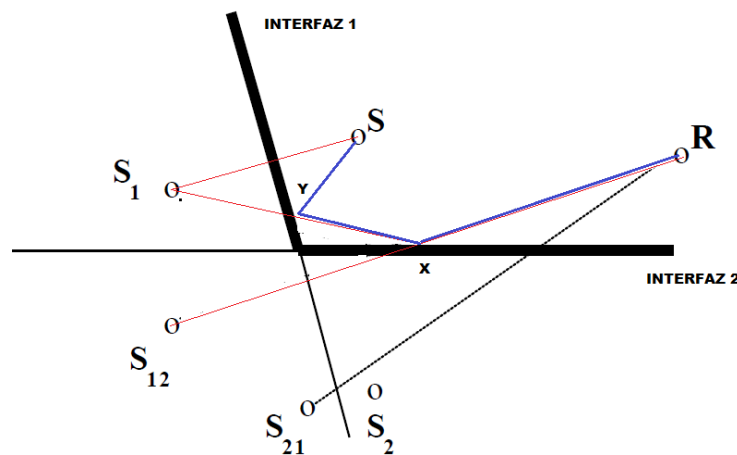


Figura 2.1. Segundo orden de reflexión para la fuente S y el receptor R.

2.4. Método de fuerza bruta

La técnica de disparo y rebote de rayos (SBR, *Shooting and Bouncing rays*)[35] parte del lanzamiento de miles de rayos desde la antena transmisora, separados por una resolución angular sólida, trazando las trayectorias de los mismos, permitiendo observar si golpean con algún objeto del entorno o si llegan a la antena receptora. Cuando el rayo golpea con algún obstáculo ocurre reflexión, refracción o desvanecimiento, difracción o dispersión dependiendo de la geometría y las propiedades eléctricas de los objetos. Debido a la cantidad de rayos generados, es un método más preciso que el método de imágenes ya que permite la investigación de la influencia de todos los dispersores involucrados en el escenario a costa del incremento de recurso computacional.

2.5. Campo eléctrico en un punto

Al emplear la técnica de rayos ópticos es necesario estimar el campo eléctrico en un lugar geométrico específico. Al aproximar la antena a una fuente puntual, el campo eléctrico se puede predecir según[36]:

$$E(\theta, \phi) = \left(\frac{e^{-jkR}}{R} \right) \sqrt{\frac{P_0 G_{tx}(\theta, \phi) G_{rx}(\theta, \phi) \eta}{4\pi}} \quad (1)$$

donde e^{-jkR} es la ecuación de onda plana, k es el número de onda, que a su vez está determinado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

y λ es la longitud de onda de la frecuencia bajo estudio. El valor P_0 hace referencia a la potencia del transmisor y $G(\theta, \phi)$ es la ganancia en la dirección de las coordenadas esféricas. Adicionalmente, η es el valor de la impedancia intrínseca del medio de propagación, que usualmente se considera el espacio libre.

2.6. Pérdidas básicas de propagación

Cuando los rayos recorren un camino, se asume que está viajando por el espacio libre. Ahí, para calcular el debilitamiento que sufre la señal por cruzar dicho medio, se calcula por la relación de Friis [37], dada por:

$$\frac{P_{rx}}{P_{tx}} = G_{tx} G_{rx} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (3)$$

Donde P expresa la potencia en el transmisor o en el receptor según sus subíndices al igual que G expresa la ganancia de las antenas y R la distancia de separación entre el transmisor y el receptor. Las unidades a emplear deben ser homogéneas.

2.7. Reflexión de especular

Cuando un rayo impacta sobre una superficie cuya rugosidad es mejor que su longitud de

onda, se puede tratar con el principio de reflexión de Fresnel [38]. El campo eléctrico sobre la interfaz que separa los medios $\vec{E}_r(\rho)$ se puede hallar mediante:

$$\begin{bmatrix} E_r^\perp \\ E_r^\parallel \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s^\perp & 0 \\ 0 & R_s^\parallel \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i^\perp \\ E_i^\parallel \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde R_s es el coeficiente de Fresnel para la reflexión de una onda plana en superficie lisa que toma en cuenta las polarizaciones con incidencias perpendiculares y paralelas, y se puede obtener a través de:

$$R_s = \frac{\sin(\varphi) - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(\varphi)}}{\sin(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2(\varphi)}} \quad (5)$$

siendo φ el ángulo de incidencia respecto de la normal de la interfaz y ε_r la permitividad compleja.

El campo eléctrico es perpendicular a la dirección del rayo y puede desglosarse en dos dimensiones o componentes, una perpendicular y otra paralela [39]. En esta tesis se emplea un sistema de coordenadas de rayo fijo el cual cambia de dirección después de la reflexión, dando lugar a la despolarización:

$$\vec{E}_i = \vec{a}^\parallel E_i^\parallel + \vec{a}^\perp E_i^\perp \quad (6)$$

donde \vec{a}^\parallel es un vector unitario en el plano de incidencia y \vec{a}^\perp es perpendicular al plano de incidencia. Este vector se calculó desde la normal al plano \vec{n} en el punto de reflexión y el vector unitario \vec{S} del rayo incidente, según:

$$\vec{a}^\perp = \frac{\vec{S} \times \vec{n}}{|\vec{S} \times \vec{n}|} \quad (7)$$

y

$$\vec{a}^\parallel = \vec{a}^\perp \times \vec{S} \quad (8)$$

Después de la reflexión se calculó la salida del vector de polarización del rayo-fijo mediante la salida del vector unitario del rayo incidente.

2.8. Difracción uniforme

La teoría general de la difracción permite calcular el campo eléctrico en un punto dado, siguiendo la teoría de la difracción uniforme [40], se aplica al rayo que impacta un borde y se calcula como:

$$E_{UTD} = E_0 \frac{e^{-jks'}}{s'} D \sqrt{\frac{s'}{s(s'+s)}} e^{-jks} \quad (9)$$

donde E_0 es el campo debido a la fuente de amplitud relativa, D es el coeficiente de difracción que depende de la polarización del campo incidente en el borde respecto de la interfaz, s representa la distancia del borde al punto de campo y s' es la distancia entre la fuente y el borde.

El fenómeno de difracción empleado en esta tesis está basado en la ecuación (9) y los algoritmos heurísticos para la difracción en bordes conceptuados en [41]. Sin embargo, esta teoría asume que los materiales de los planos que conforman el borde son iguales, evento que en la realidad no sucede y afecta los resultados en forma notable como fue demostrado en [42]. De otra parte, no permite reciprocidad, es decir, los algoritmos heurísticos de Luebbers, dando tratamiento puramente óptico, no contemplan el intercambio entre la fuente y el destino como sucede en el principio aplicado a la teoría de antenas.

Tomando a (9) y modificando su presentación según las variables presentadas en la Figura 2.2:

$$E_d(O) = E_i(W) \cdot D \cdot A(s_d) \cdot e^{-jks_d} \quad (10)$$

donde $E_i(W)$ representa el campo eléctrico incidente en el borde, $A(s_d)$ es la amplitud, s_d es la distancia a la arista desde la fuente u observador y \bar{D} es el coeficiente diádico de difracción. Los coeficientes heurísticos para la difracción *hard* y *soft* están dados por:

$$D^{(s,h)} = G_0^{(s,h)} [D_2 + R_0^{(s,h)} (\alpha_0) D_4] + G_n^{(s,h)} [D_1 + R_n^{(s,h)} (\alpha_n) D_3] \quad (11)$$

siendo D los coeficientes heurísticos, G_0 y G_n son los factores de incidencia, R_0 y R_n los coeficientes de reflexión de Fresnel para las 0 y n caras respectivamente.

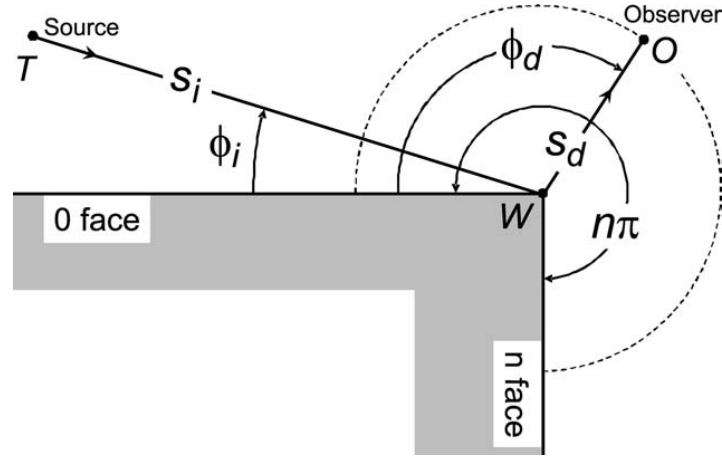


Figura 2.2. Geometría y variables para la difracción en bordes [43].

La resolución angular está dada por:

$$\alpha_0 = \min[\phi_i, n\pi - \phi_i] \quad (12)$$

y

$$\alpha_n = \min[\phi_d, n\pi - \phi_d] \quad (13)$$

donde α_0 es el ángulo de incidencia y α_n el ángulo del rayo difractado, ambos con respecto de la cara o y siendo $n\pi$ el ángulo exterior al borde. Como se puede apreciar, en el modelo propuesto por Luebbers asume zonas de sombra dadas por la condición angular:

$$\phi_i < \phi_d \quad (14)$$

Para mejorar la precisión en múltiples difracciones, sin descuidar las simples, se incorpora a los algoritmos la UTD modificada para inclinaciones dada en [44], definida según:

$$D = \left[-\frac{e^{-j\frac{\pi}{4}}}{2n\sqrt{2\pi k}} \right] \times \left\{ \begin{array}{l} G_0 \left[\begin{array}{l} \text{Cot}\left(\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n}\right) \cdot F\left(\left(\frac{ss'}{s'+s'}\right)ka^-(\phi - \phi')\right) + \\ R_g^0 \text{Cot}\left(\frac{\pi - (\phi + \phi')}{2n}\right) \cdot F\left(\left(\frac{ss'}{s'+s'}\right)ka^-(\phi + \phi')\right) \end{array} \right] + \dots \\ \dots + G_n \left[\begin{array}{l} \text{Cot}\left(\frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n}\right) \cdot F\left(\left(\frac{ss'}{s'+s'}\right)ka^+(\phi - \phi')\right) + \\ R_g^n \text{Cot}\left(\frac{\pi + (\phi + \phi')}{2n}\right) \cdot F\left(\left(\frac{ss'}{s'+s'}\right)ka^+(\phi + \phi')\right) \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (15)$$

donde R_g^0 y R_g^n son los coeficientes de reflexión especular de la onda plana para polarizaciones perpendiculares o paralelas desde una superficie rugosa según la cara del superíndice, siendo el ángulo de incidencia ϕ' para la cara 0 y ángulo de reflexión $n\pi - \phi'$ para la cara n . De otra parte, se tiene que

$$\alpha^\pm(\beta) = 2 \cos^2 \left(\frac{2n\pi N - \beta}{2} \right), \beta = \phi \pm \phi' \quad (16)$$

siendo N los enteros más próximos que satisfagan a

$$\begin{aligned} 2\pi n N^+ - \beta &= \pi \\ 2\pi n N^- - \beta &= -\pi \end{aligned} \quad (17)$$

Adicionalmente, en (15) $F()$ es la función de transición de Fresnel y está definida por:

$$F(x) = 2j\sqrt{x}e^{jx} \int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-j\tau^2} d\tau \quad (18)$$

Para implementar en los algoritmos esta función, se implementó la expresión asintótica:

$$F(x) \approx \begin{cases} e^{j\left(x + \frac{\pi}{4}\right)} \left(\sqrt{\pi x} - 2xe^{j\frac{\pi}{4}} - \frac{2}{3}x^2e^{-j\frac{\pi}{4}} \right); x < 0.3 \\ 1 + \frac{1}{2x} - \frac{3}{(2x)^2} - j\frac{15}{(2x)^3} - \frac{75}{(2x)^4}; x > 5.5 \end{cases} \quad (19)$$

y mediante interpolación, fue posible obtener los valores intermedios. EL parámetro G permite considerar múltiples difracciones e inclinaciones, estando definidos por:

$$G_0 = \begin{cases} \frac{1}{1 + R_g^0}, \phi' = 0 \text{ y } |1 + R_g^0| > 0 \\ \frac{1}{2}, \phi' = n\pi \\ 1, \text{ otros casos} \end{cases} \quad (20)$$

y

$$G_n = \begin{cases} \frac{1}{1+R_g^n}, \phi' = n\pi \text{ y } |1+R_g^n| > 0 \\ \frac{1}{2}, \phi' = 0 \\ 1, \text{ otros casos} \end{cases} \quad (21)$$

2.8.1. Polarización debida a la difracción

El principio de Fermat aplicado a la hipótesis de Keller [45] generalizó la reflexión ocurrida en bordes (difracción), como lo muestra la Figura 2.3. En esta gráfica se aprecian las direcciones debidas a la polarización y la forma como se obtiene el plano de salida del rayo difractado en el punto de difracción. El ángulo de difracción de incidencia se mide en el plano entre el rayo incidente y la normal al borde. En este mismo ángulo, se da la salida de los rayos difractados, similar a los rayos reflejados. Los rayos difractados pertenecen al dominio de un cono con el vector de borde como su eje. Los rayos difractados difunden la potencia incidente en el cono. Se define la polarización del rayo difractado en función de los planos incidente y refractado. Los vectores son paralelos y perpendiculares a los dos planos. Dado el vector unitario del borde \hat{e} , se calcula el vector incidente con polarización perpendicular mediante:

$$\vec{E}_{\phi'}^i = \frac{\hat{e} \times \hat{S}'}{\sin \beta_0} \quad (22)$$

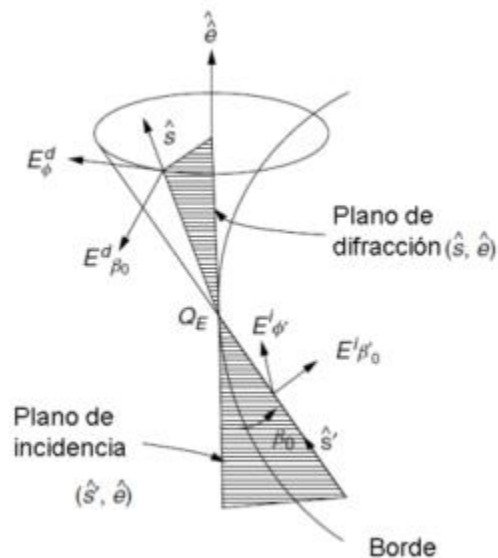


Figura 2.3. Efecto de la difracción sobre la interfaz.

siendo \hat{S}' el rayo incidente y β_0 el ángulo que existe entre la tangente del borde y el rayo incidente. El rayo difractado con polarización perpendicular es

$$\overrightarrow{E}_\phi^d = \frac{\hat{e} \times \hat{S}}{\sin \beta_0} \quad (23)$$

definiendo a \hat{S} como el rayo difractado unitario. Es de notar que para las difracciones se cumple que:

$$\begin{aligned} |\hat{e} \times \hat{S}| &= |\hat{e} \times \hat{S}'| \\ y \\ \hat{e} \cdot \hat{S} &= \hat{e} \cdot \hat{S}' \end{aligned} \quad (24)$$

Por lo tanto, el vector de polarización paralelo se obtiene mediante el producto cruz a lo largo de las coordenadas del rayo-fijo:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{E}_\phi^i \times \overrightarrow{E}_{\beta_0}^i &= \hat{S}' \\ y \\ \overrightarrow{E}_\phi^d \times \overrightarrow{E}_{\beta_0}^d &= \hat{S} \end{aligned} \quad (25)$$

2.9. Parámetros del canal multicamino

Los parámetros del canal multicamino se derivan principalmente del Perfil de Retardo de Potencia (PDP, *Power Delay Profile*), que se expresa como la potencia relativa de las componentes multicamino que arriban al receptor en función de un tiempo de retardo fijo de referencia. Matemáticamente el PDP se define como la variación de la potencia media del canal con retardo [46]–[48]. Asumiendo una respuesta al impulso invariable en el tiempo se puede describir el PDP mediante:

$$P(\tau) = \frac{\sum_{n=1}^N |h(\tau)|^2}{N} \quad (26)$$

donde N es el número de respuestas al impulso recogidas para evaluar el PDP y $h(\tau)$ es la respuesta al impulso del canal, descrito por:

$$h(\tau) = A_n \delta(t - \tau_n) e^{-j\varphi_n} \quad (27)$$

siendo

N los pulsos que arriban

A_n Amplitud de los pulsos

φ_n Fase

τ_n El tiempo de retardo de arribo

Normalmente el PDP es discreto en el tiempo, representando varios pulsos individuales con potencias definidas (P_1, \dots, P_n) los cuales pueden tener distribuciones de probabilidad independientes. Los principales parámetros del tiempo de dispersión en los canales multitrayectoria son el retardo excedente, el retardo excedente total, el retardo medio, la dispersión de retardo RMS y el retardo excedente máximo [46]. Estos son descritos en la Figura 2.4.

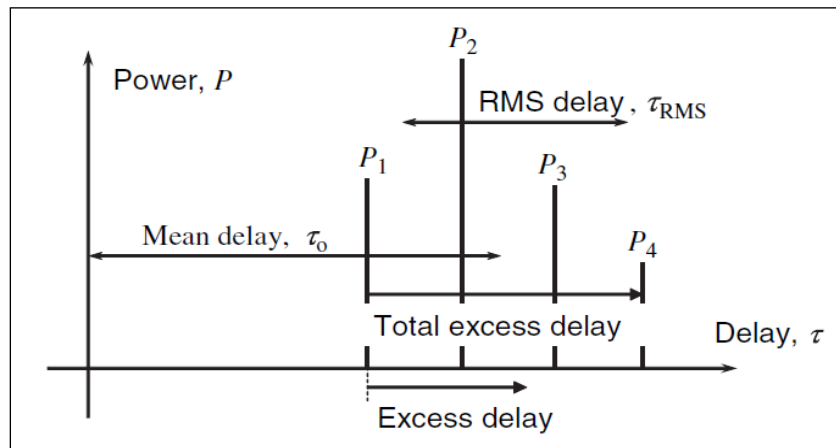


Figura 2.4. Perfil de retardo de potencia para un canal [48].

El retardo excedente (*excess delay*), es el primer momento del PDP con respecto del primer retardo [49], [50] y se obtiene mediante:

$$\tau_e = \int (\tau - \tau_1) P(\tau) dt \quad (28)$$

Donde τ es el tiempo que tarda la primera señal transmitida en llegar al receptor. Todos los parámetros de retardo están referidos a él. El retardo excedente total (*total excess delay*), es la diferencia entre el primer y generalmente, el último pulso que está por encima de un determinado nivel de potencia. Es la cantidad en la cual la duración del símbolo es extendida por el canal.

El valor cuadrático medio de la dispersión temporal o dispersión de retardo RMS (*Root Mean Square Delay Spread*), es el segundo momento central o dispersión de los pulsos [49]. Este parámetro tiene en cuenta la potencia relativa de los pulsos como también sus retardos, haciéndolo un buen indicador de interferencia intersimbólica y se define por:

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\int (\tau - \tau_e - \tau_1)^2 P(\tau) d\tau} \quad (29)$$

Valores típicos de la dispersión temporal RMS están por el orden de los microsegundos en canales de radio exteriores y por el orden de los nanosegundos en canales de radio interiores.

La dispersión angular (*AS, Angle Spread*) en un indicador del cómo las componentes multicamino llegan o salen con respecto del ángulo medio de llegada o salida, respectivamente [51]. Esta dispersión es dada en grados y describe la anchura del sector de donde provienen las señales cuya potencia conforman la señal recibida. Si N representa el número de caminos o trayectorias desde el transmisor al receptor, entonces AS es posible definirla según [52]:

$$AS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N P_A(\theta_i) (\theta_i - \bar{\theta})^2}{\sum_{i=1}^N P_A(\theta_i)}} \quad (30)$$

Donde θ_i es el i -ésimo ángulo de arribo o de partida (según convenga) de los componentes multicamino, $P_A(\theta_i)$ es su potencia y $\bar{\theta}$ es la media de los ángulos de partida o arribo, calculada a través de:

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^N P_A(\theta_i) \theta_i}{\sum_{i=1}^N P_A(\theta_i)} \quad (31)$$

2.10. Sistemas MIMO

Los sistemas MIMO presentan técnicas de procesamiento de un grupo de señales que han sido desarrolladas para mejorar el rendimiento en los sistemas de comunicaciones inalámbricas usando más de una antena en transmisión y más de una antena en recepción [53]. MIMO considera los efectos de los dispersores localizados entre el transmisor y el receptor creando bien sea diversidad espacial o multiplexación espacial.

Por definición, un sistema MIMO puede caracterizarse por la función de transferencia del canal en el dominio del tiempo (o la respuesta al impulso en el dominio del tiempo) que existe entre la antena i -ésima del transmisor y la antena j -ésima del receptor, calculadas con la integral de convolución [53]:

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} x_i(\tau) h_{j,i}(t, \tau) d\tau; \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (32)$$

donde N es el número de antenas transmisoras y M el número de antenas receptoras.

Este sistema puede tomar una forma matricial partiendo de la solución de ecuaciones en diferencia de (32) representada por la matriz de transmisión \mathbf{H} , que relaciona la función de transferencia de la respuesta impulso a cada canal formado por las de N entradas y M salidas. En forma general, se tiene que la señal recibida en el receptor es:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (33)$$

siendo \mathbf{n} el ruido en el canal.

2.10.1. Capacidad de canal en sistemas MIMO

El canal se caracteriza por un matriz en función del tiempo y retardo $\mathbf{H}(t, \tau)$ que contiene la respuesta al impulso desde cada transmisor y para cada receptor en ambas polarizaciones [54]. Convenientemente, es posible emplear una matriz de función de transferencia en el dominio de la frecuencia. Es una situación de banda angosta, es posible emplear la representación compleja banda base $h_{i,j}$ que caracteriza la respuesta al impulso entre la antena i -ésima del transmisor y la antena j -ésima del receptor. En estos términos, para calcular en sistemas MIMO la máxima transferencia de datos, denominada capacidad de canal basada en el teorema de Shannon - Hartley, se emplea la siguiente ecuación:

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_n + \frac{SNR}{m} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right) \quad (34)$$

donde \mathbf{I}_n representa la matriz identidad de $n \times n$ elementos, SNR la relación señal a ruido y la $(\bullet)^H$ representa la función transpuesta Hermitiana.

Esta situación es empleada cuando el transmisor no conoce el canal, donde se asume que la potencia transmitida es distribuida equitativamente para todas antenas. Para la situación de canales selectivos en frecuencia [55], se evalúa en todo el rango de frecuencias considerando la capacidad de canal por unidad de frecuencia ($b/s/Hz$) según:

$$C = \frac{1}{B} \int_B \log_2 \det \left(\mathbf{I}_n + \frac{SNR}{m} \mathbf{H}^H(f) \mathbf{H}(f) \right) \quad (35)$$

siendo $\mathbf{H}(f)$ la matriz de transferencia en frecuencia y B el ancho de banda ocupado por las frecuencias de interés.

Hasta ahora se han implementado sistemas MIMO de unos cuantos transmisores y receptores [56]. Para los sistemas de comunicaciones de quinta generación móvil se plantea la posibilidad de aumentar la capacidad del canal incrementando el número de antenas en transmisor y en receptor en un orden de decenas a cientos [57], conociéndose como MIMO masivo, una tecnología MIMO multiusuario.

2.11. Dispersión Difusa

Para los sistemas de comunicaciones 5G se plantea el uso de las ondas milimétricas como medio para solucionar la necesidad de mayor velocidad de datos [22]. Cuando una onda se propaga en un medio o un material e incide sobre otro material con propiedades dieléctricas diferentes experimenta cambios. Uno de esos cambios es la reflexión que sigue el principio de Snell. Si la superficie es completamente lisa habrá lugar a una reflexión especular. En una situación que se aproxima más al mundo real, cuando la interfaz entre los materiales presenta irregularidades comparables a la onda, es decir que la longitud de la onda es menor que las arrugas en el material, se da lugar a un fenómeno descrito como dispersión difusa. Se ha demostrado que al agregar un modelo de difusión aumenta la precisión en técnicas determinísticas como el modelo de rayos óptico [58].

En presencia de rugosidad las aproximaciones ópticas empleadas por las técnicas de rayos pierden precisión y se requiere agregar estrategias para estimar los campos debidos a la dispersión difusa. Cuando hay lugar a este tipo de tipo de dispersión existirán componentes

multicamino difusas (DMC, *Dense or Diffuse MultiPath Component*) que afectará la caracterización del canal en cuanto a dispersión temporal y angular del canal [12]. Trabajos recientes han empleado [59]–[62], comparado [26], [63], [64] y combinado [14] modelos para estimar los efectos de la dispersión difusa.

El modelo más empleado y que mejor se adapta a las técnicas de rayo óptico es el propuesto en [65]. Este modelo asume que la superficie del material rugoso es subdividida en pequeñas unidades llamadas elementos de superficie que cumplen con la condición de campo lejano de Fraunhofer. Propone que en el centro del elemento de superficie surgen infinitos rayos que contienen una fracción de la energía total debida a la dispersión. Existe un coeficiente de dispersión S , que indica la cantidad de energía que se difunde a expensas de la energía reflejada especularmente, y un modelo de patrón de radiación de difusión para cada elemento de superficie en concordancia con las características de rugosidad. El factor de disminución en reflexión R establece la cantidad de energía restada por la difusión a la reflexión especular, se relaciona con el coeficiente de difusión así [64]:

$$R \cong \sqrt{1 - S^2} \quad (36)$$

Para establecer el patrón de radiación dispersivo se han presentado dos modelos, descritos a continuación.

2.11.1. Modelo Lambertiano

En este modelo la dirección del lóbulo principal apunta en la dirección perpendicular a la superficie y la amplitud del campo disperso está dado por [64], [66]:

$$dE^2 = K_o^2 S^2 \frac{dS \cos \theta_i \cos \theta_s}{\pi} \frac{1}{r_i^2 r_s^2} \quad (37)$$

Donde $K_o = \sqrt{60 G_t P_t}$, siendo G_t la ganancia de la antena transmisora y P_t la potencia del transmisor. En la Figura 2.5 se aprecian las componentes para un elemento de superficie dS ubicado a una distancia x del transmisor [66].

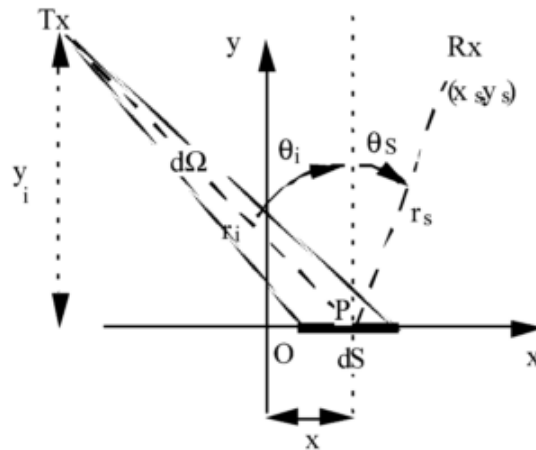


Figura 2.5. Elemento de superficie ubicado a una distancia del transmisor [63].

2.11.2. Modelo directivo

En este modelo el lóbulo principal apunta en la dirección de la reflexión especular [64]. La ecuación que describe el campo disperso es:

$$|E_S|^2 = E_{S0}^2 \left(\frac{1 + \cos \Psi_R}{2} \right)^{\alpha_R}, \alpha_R = 1, \dots, N \quad (38)$$

Siendo Ψ_R el ángulo que existe entre la dirección de la reflexión especular y la dirección de la difusión. α_R Es un factor que determina el ancho del lóbulo de difusión.

2.2 Antecedentes

Es presentada una revisión de trabajos relacionados, a partir de los cuales es posible establecer el contexto en el cual se realizó el aporte de este trabajo. El marco de antecedentes está orientado a predicciones basadas en el uso de herramientas computacionales que mejoran cada vez los tiempos de respuesta con precisiones aceptables y sus resultados fueron comparados con datos obtenidos a través de campañas de medición.

En las aplicaciones de comunicaciones móviles es utilizado el modelo de Trazado de Rayos Espectral (SRT, *Spectral Ray Tracing*) [67]. Técnicas desarrolladas para aplicar este método datan de 1962 con los trabajos de Murty y aportes de Chen et al [68]. Este modelo se basa en la descomposición del campo eléctrico en el plano de la fuente de onda plana espectral (PWS, *Plane Wave Spectral*) [69], satisfaciendo la ecuación de onda y así, validando su aproximación. El trazado de rayos mejora la precisión de los modelos empíricos tradicionales, permitiendo estimar por completo en espacio y tiempo la respuesta a un impulso en un punto receptor específico.

Las herramientas de software que utilizan estas técnicas pueden tomar un tiempo de cálculo considerablemente alto en el análisis de las condiciones de propagación en un entorno determinado [70]. Con el fin de reducirle, las técnicas de trazado de rayos se deben aplicar sólo a aquellas áreas en las que puedan existir rayos. Un algoritmo importante es desarrollado en [71], en el cual se varía el tamaño de la esfera de impacto de los posibles rayos permitiendo que sean pre-procesados los rayos exitosos, así aumenta la eficiencia computacional. La técnica del Trazado de rayos está proyectada por los expertos como una estrategia muy prometedora aplicable a la evaluación teórica de los nuevas tecnologías de comunicaciones inalámbricas [8], [16].

En [72] se empleó el Software Wireless System Engineering, (WiSE), desarrollado por los autores con el apoyo de *AT&T Bell Laboratories*. Los tipos bajo estudio fueron las ciudades de Manhattan y Boston en las frecuencias de 900 MHz y 2 GHz. Los parámetros de permitividad y permeabilidad empleados fueron 15 y 0.005, respectivamente. Se emplearon mapas en dos dimensiones tomando en cuenta la onda incidente, las reflexiones hasta un número de veinte y las difracciones por bordes de edificaciones en cuatro. El ángulo de separación inicial de los rayos fue de 2° . Las difracciones por techos no fueron trabajadas, obteniendo un error medio entre 5.3 dB y una desviación estándar que oscila entre 3.4 y 5.7 dB. El software propietario empleado permite definir el número máximo de reflexiones y difracciones a considerar. Los resultados de este trabajo exponen la integración de herramientas computacionales con métodos determinísticos en la caracterización de canal con un nivel de precisión aceptable.

Un trabajo contemporáneo es descrito en [73]. Las características destacadas son la generación de un árbol de difracciones en pre-procesado y el procesamiento en paralelo para aumentar la eficiencia. Adicionalmente se presentan técnicas para implementar el trazado de rayos en sistemas de antenas de múltiples entradas – múltiples salidas (MIMO, *Multiple-Input Multiple-Output*). Se trabajó en frecuencias de 1.97 GHz obteniendo una diferencia entre los valores medidos y los calculados que varían entre 1 y 4 dB. Es destacado el aporte realizado al dividir tareas independientes del algoritmo de fuerza bruta eficientemente en nodos de una malla computacional en sistema operativo GNU/Linux.

La evaluación realizada en [74] a una frecuencia de 1.8 GHz demuestra la importancia de la UTD en la situación de transmisores de poca altura con respecto a la altura de las

edificaciones. Para este caso de estudio se infiere que la difracción simple es dominante. Las mediciones fueron realizadas en el centro de la ciudad de Atenas (Grecia) en un entorno de 440 metros por 440 metros. La configuración del sitio bajo prueba es representada por geometrías regulares en dos planos perfectamente alineados, con permitividad de quince y conductividad de siete para el plano tierra. Por otra parte, la permitividad de las paredes es de tres y la conductividad de 0.005. Los resultados evidencian una desviación media de 6 dB. Los resultados muestran que los cambios en cuanto a los parámetros de permitividad y conductividad aportan cambios significativos.

En [75] es desarrollado un caso de estudio en la ciudad de Ottawa (Canadá) bajo un área de 1000 metros por 600 metros, usando un modelo bidimensional, el algoritmo de fuerza bruta y la UTD. Han sido considerados hasta la cuarta reflexión y dos difracciones evitando en esta última situación los cálculos por difracción en techos de edificaciones. Se asume que los pisos son completamente planos, es decir no hay curvas de nivel en los terrenos. Los parámetros pertinentes a permitividad en paredes es de seis y la conductividad de 0.5 S/m. Para el plano tierra los parámetros fueron de quince para la permitividad y una conductividad de 0.005 S/m.

El software para el desarrollo fue implementado en programación orientada a objetos C++ y se empleó una estrategia de grilla computacional paralela de cuatro nodos. Se usaron 655362 rayos con una separación inicial de 0.27° aproximadamente, usando un modelo tridimensional. La evaluación se realizó midiendo el tiempo de procesamiento por clústeres y la eficiencia demostrando que es posible incrementar el número de elementos en el mapa obteniendo un rendimiento computacional esperado. También es presentada Figura 2.6, la cual evidencia una aproximación significativa en las pérdidas de trayectoria, sin embargo, no es estimado el error ni la desviación estándar.

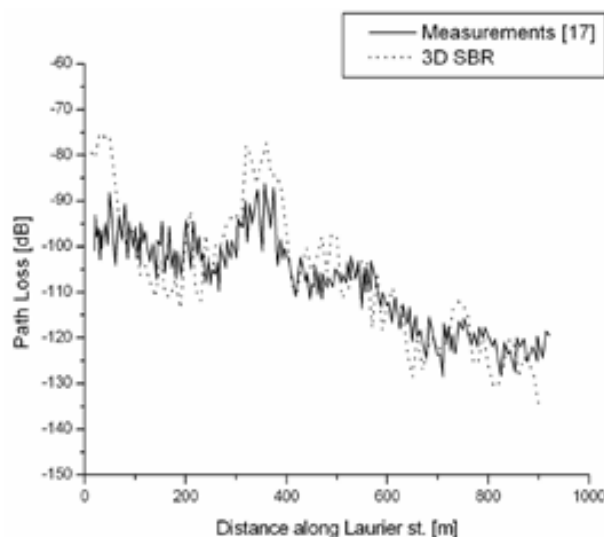


Figura 2.6. Cálculo de las pérdidas por trayectoria. Resultados Tomados de [72].

En la ciudad de Karlsruhe (Alemania) se validó un modelo de trazado de rayos tanto con medidas como con el algoritmo RiMAX aplicado a las mismas [76]. Este trabajo emplea la técnica del trazado de rayos en 3D para predecir el comportamiento en macrocelda de señales en 5.2 GHz verificando con mediciones los parámetros de máxima verosimilitud. Los resultados muestran una elevada correlación, el desempeño alto puede ser en la tarea de estimación, en la obtención de los resultados, en los niveles de retardo de propagación y azimut.

En [77] es usada la banda de frecuencias del estándar 802.11 y simulado en *Network Simulation 2* (NS-2). El entorno de comprobación es el campus de la Universidad de Nebraska-Lincoln (Omaha). Adicional a la técnica de trazado de rayo, son empleados módulos de propagación de pequeña escala y log-normal provistos por el simulador y ajustados. Además, un módulo de desvanecimiento Rice se utiliza para la pequeña escala mientras que el modelo de espacio libre se usa en el desvanecimiento de gran escala. Los efectos de los dispersores reales como la permitividad y conductividad no son tomados en cuenta. Para suplirlos, son incluidos algunos factores de corrección basados en mediciones. La evaluación emplea el cálculo del factor K y la atenuación para cuatro sectores del campus con características de entorno diferentes. Los resultados de este trabajo muestran un pre-procesamiento en la información, así como factores de corrección basados en medida y agregados al NS-2. Sin embargo, no son calculadas medidas estadísticas de error.

El algoritmo de lanzamiento inteligente de rayos (*IRLA, Intelligent Ray Launching Algorithm*) es propuesto en [78]. Este algoritmo es basado en la elaboración de cubos discretos que interpretan las edificaciones en forma Booleana. El algoritmo puede agrupar cubos con línea de vista, con difracción o con refracción y considerando todas las edificaciones en concreto. Emplea el modelo de pérdidas por propagación en el espacio libre y usa calibración basada en medida. La medida de precisión es obtenida a través del error medio cuadrado. Dentro de sus resultados se presenta la rapidez computacional aplicando la técnica de *multithreading*. En ésta un único conjunto de instrucciones (código) es usado por varios procesadores en diferentes etapas de ejecución. El escenario de comparación es COST-Munich y obtiene un error medio entre 0.001 y 0.006.

El uso de motores de juego para desarrollar técnicas de trazado de rayos aplicada a entornos bien definidos en tres dimensiones es presentada en [79]. Usando el motor de juegos JMonkey versión 2.0 y la técnica de fuera bruta se obtiene una alta precisión y rapidez computacional. El trabajo implementa digitalmente la ciudad de Cali (Colombia), usa la frecuencia de 900 MHz con lanzamiento de 393593 rayos con separación de 0.27° . Realiza una técnica de pre-procesamiento de rayos que reduce substancialmente el tiempo de cómputo al calcular solo los rayos que impactan al receptor tomando en cuenta la sensibilidad del mismo. Es destacada la caracterización de la permitividad como un valor complejo. Se obtuvo un error medio de 5.49 dB y desviación estándar de 4.21 con respecto de las mediciones. Los aportes de este trabajo están en la reducción del tiempo computacional al utilizar avances en las tarjetas gráficas, software libre y alta precisión. Adicionalmente, las características del entorno evaluado fueron tomadas con herramientas

de información geográfica lo cual asegura la simulación real del escenario.

En [80] son mostrados los resultados obtenidos al implementar un sistema MIMO en la ciudad de Ilmenau (Alemania). Se empleó una frecuencia de 2.53 GHz en un área cuadrada de mil metros y contrastada con los resultados del documento IST-4-027756 WINNER II empleando RIMAX. El trabajo muestra una alta correlación para el análisis a gran escala, especialmente aplicable a LTE y LTE-A.

Para la situación donde las edificaciones del sitio a evaluar poseen una altura mayor que la altura en la que se encuentra el conjunto transmisor-receptor, es válido aproximar a dos dimensiones el análisis del trazado de rayos. En [7] es presentado un modelo eficiente para microceldas que asume la situación mencionada. Está basado en el algoritmo de fuerza bruta y en una estrategia de árbol de reflexiones/difracciones para estimar los rayos de interés. Esta aplicación se evaluó sobre la ciudad de Ottawa (Canadá), en la frecuencia de 910 MHz y publicadas en [81]. Se empleó una permitividad de siete y una conductividad de 0.001.

Otros escenarios validados fueron la ciudad de Bern (Suiza) a una frecuencia de 1.89 GHz con una permitividad de cinco y una conductividad de 0.001; mientras Fribourg (Francia), usando una frecuencia de 1.8 GHz con la misma permitividad y conductividad de 0.0001 S/m. Este trabajo aporta un algoritmo eficiente para aproximar a dos dimensiones la técnica del trazado de rayo, calculando las pérdidas por propagación del espacio libre y el retardo de propagación. El tiempo computacional es mejorado con respecto a los propuestos en una aplicación convencional no mencionada. Es comprobado el incremento del recurso de cómputo al incrementar el número de dispersores.

En [82] es propuesto un nuevo método para el tratamiento del terreno. Es usado para la evaluación el software licenciado Wireless InSite. La estrategia propone y evalúa solo mediante simulación que el terreno puede descomponerse en una malla de triángulos de tamaño variable. El algoritmo busca inicialmente una sección rectangular que contenga el conjunto transmisor-receptor y a este segmento del terreno lo divide en triángulos que, expansivamente aumenta el tamaño de los triángulos que conforman la grilla. Son tratados tres dimensiones del mismo terreno con variación del tamaño de superficie. Los resultados muestran la eficiencia computacional para las situaciones de dimensiones en las que el área del triángulo del conjunto transmisor-receptor es pequeña con respecto de todo el terreno. Para la situación opuesta, los tiempos obtenidos no ofrecen mejora.

Nuevas estrategias son requeridas para la siguiente generación de comunicaciones inalámbricas. El 5G propone desarrollar tecnologías que permitan aumentar la eficiencia espectral [83], como MIMO masivo y Antenas inteligentes ajustables. En [56] son aplicadas ondas milimétricas en un entorno urbano, donde el receptor, retroalimentando información del canal es posible ajustar el haz de transmisión haciéndolo más directivo y así, resultando en una menor dispersión, permitiendo mejorar la tasa de transmisión. El estudio se realizó

en la ciudad de Nueva York, USA a una frecuencia de 38 GHz.

En [84] se realiza un extenso análisis LOS en ondas milimétricas (57 a 66 GHz), mostrando un desarrollo en MATLAB. Sus resultados muestran una herramienta computacional muy veloz y precisa empleando el trazado de rayos con el método de imágenes. Su limitación radica en el número de eventos que puede procesar.

Al trabajo anterior, se le adiciona las componentes difusas [26]. Son caracterizados los parámetros difusos para los tres principales materiales en la constitución del escenario de pruebas (madera, yeso y sintético) y contrastar su efecto sobre la precisión obtenida en el análisis LOS para el cual se consideró todos los materiales iguales. Se tiene como limitante en el modelo, un solo evento en reflexión difusa.

Una vez recopilada la evolución con relación al método de rayos ópticos según los principales trabajos publicados, es posible sintetizar los aportes y contrastar los desarrollos con las propuestas de esta tesis mediante el siguiente cuadro comparativo.

| Trabajos | Aportes relevantes | Aportes con esta tesis |
|------------|---|---|
| [71], [85] | Trabaja en ondas decimétricas con sistemas SISO con gran precisión y rapidez. Emplea Software libre. | Abarcará sistemas MIMO, en frecuencias centimétricas y milimétricas. |
| [19], [20] | Trabaja en amplios rangos de frecuencia con sistemas MIMO 2x2. Determina Path Loss en un único punto con un único transmisor en ambientes interiores. Emplea software propietario | Trabaja con sistemas MIMO de decenas de receptores o transmisores. Obtiene la respuesta al impulso para el canal MIMO. |
| [26][9] | Trabaja con método de imágenes en software licenciado (MATLAB) en ondas milimétricas con sistemas de decenas de receptores o transmisores. Obtiene la respuesta al impulso para el canal MIMO. Incluye la dispersión difusa. Limitado a dos eventos de reflexión especular, difracción y uno de difusión. | Describirá dispersores comparables a la longitud de onda. Aumentará la precisión mediante el incremento de, hasta diez eventos de reflexión y difracción manteniendo el mismo tiempo de procesado. Mejorará el estudio de los efectos en dispersión difusa. |

Tabla 2.1. Síntesis de los aportes de la tesis vs los antecedentes revisados.

3. MODELADO

A continuación, se describe tanto el modelo geométrico del escenario como el modelo físico de la propagación de la onda usando los motores de juego y la aceleración por hardware. La estimación de los parámetros de canal depende en gran medida de estas representaciones.

3.1. Elección de las plataformas

La elección de software se basó en las premisas de que debe ser una plataforma libre, de fácil integración con el lenguaje de programación Java debido a su universalidad y fácil implementación. Adicionalmente, debe poseer capacidades embebidas para interpretar, procesar y entregar información relativa a fenómenos físicos. Por esta razón se emplea un motor de juegos.

En el lanzamiento de rayos es necesario desarrollar técnicas de aceleración eficientes y prácticas que permitan la reducción temporal de la respuesta manteniendo la precisión. Cada rayo lanzado o trazado es independiente del resto de rayos, por lo tanto, es posible que un procesador o unidad procesadora calcule la trayectoria y las interacciones de un rayo al mismo tiempo que otro procesador hace lo mismo con otro rayo. De este modo, si se disponen de varios procesadores, la tarea de lanzamiento o trazado de rayos se puede paralelizar alcanzando una elevada eficiencia sin perder precisión. Por tanto, se planteó el uso de aceleración por hardware usando la unidad de procesamiento gráfico (GPU, *Graphics Processor Unit*) para optimizar los sistemas de lanzamiento de rayos y su uso en la estimación de parámetros.

3.1.1. Software

Con base en los antecedentes y en el desarrollo de la tesis, se pudo apreciar que definir el escenario en donde se realiza la estimación de canal es bastante complejo. De ahí surge la necesidad de realizar el modelo geométrico en un software especializado e importar su resultado al motor de juegos, que es donde se realiza la estimación de canal.

3.1.1.1. Software para elaborar el modelo geométrico

El formato es un aspecto relevante en la definición de la información a procesar. Existen

distintas aproximaciones para codificar las características de un escenario o un ambiente específico. En [86] se implementó la importación de archivos en formato raster y shape. Sin embargo, cuando estos archivos no existen y se desea la construcción del escenario desde cero estos archivos no son prácticos. Se necesario adoptar una estrategia para la implementación de nuevos escenarios que permita manipular los objetos con versatilidad y con rapidez.

Uno de los esquemas más utilizados es el uso del metalenguaje de marcas extensible (XML, *eXtensible Markup Language*), siendo muy conocido debido a las siguientes ventajas:

- Es extensible: después de su diseño y funcionamiento, es posible extender XML para agregar nuevas etiquetas y funcionalidades.
- Es fácil de entender y procesar, mejorando la compatibilidad e interoperabilidad entre diferentes aplicaciones. Es posible conectar las aplicaciones de diferentes plataformas independientemente de los datos.
- XML mantiene un alto nivel semántico, está bien soportado y estandarizado y permite asociar estructuras de árbol bien definidas para encapsular la información relevante. Además, posibilita que el contenido a importar sea legible por los propios programadores.

A pesar de las anteriores características, los motores de juegos comerciales no son compatibles con XML. Sin embargo, los motores de código abierto (*Open Source*) soportan XML y todos los motores soportan archivos de imagen 3D tipo OBJ (*Wavefront 3D Object File*). Es posible convertir de XML a OBJ utilizando un software de diseño 3D como Blender, 3DS Max o Maya. Se realiza una revisión de las compatibilidades de los formatos para el tratamiento de imágenes y su integración con motores de juegos, cuyos resultados son mostrados en la Tabla 3.1. Análisis de las compatibilidades en creación de escenarios.

Todos los motores de juegos soportan el formato OBJ, es un formato de datos simple que representa solamente la geometría 3D e incluye solo la posición de cada vértice, por lo que es el formato común en el mundo de los videojuegos que soportan objetos de mallas, así como las superficies y volúmenes delimitadores para motores de físicas. Por las consideraciones anteriores, es elegido como plataforma de implementación del escenario.

3.1.1.2. Software para estimación de canal

Existe un gran desarrollo a nivel de los motores de juego de fuente abierta para la producción de aplicaciones, por sus características de gran flexibilidad, modularidad y reuso. Estos motores de código abierto permiten utilizar eficientemente las potencialidades y recursos de las tarjetas gráficas, disminuyen los tiempos computacionales utilizando técnicas de renderizado, algoritmos de procesamiento gráfico y de procesamiento de fenómenos físicos.

| Motor de juegos | Unity | CryEngine | Unreal | Jmonkey | Ogre3D |
|--|----------------|-----------|-----------|----------------|----------------|
| Versión | Código abierto | Comercial | Comercial | Código abierto | Código abierto |
| Soporte XML native | N | N | N | S | S |
| Soporte OBJ | S | S | S | S | S |
| Requiere software adicional para convertir a XML (Maya, 3DS Max, Softimage, Blender) | S | S | N | N | N |

Tabla 3.1. Análisis de las compatibilidades en creación de escenarios

La estrategia del uso de motores de juego está en que los cálculos de propagación y comportamiento de los rayos sea procesada en la GPU y no sea graficada en el monitor. En la versión más actual del software JMonkey (3.0), los desarrolladores de las funcionalidades físicas las simplificaron para mejorar las velocidades del juego e impiden que se pueda acceder a estas implementaciones. Dada esta limitación y los antecedentes de esta tesis [86], se elige el motor de juegos JMonkey versión 2.0.

3.1.2. Hardware

Para la implementación del software se eligió un hardware con las mínimas prestaciones de 16 GB en memoria de acceso aleatorio (RAM), procesador de múltiples núcleos que permita el procesamiento paralelo y tarjeta graficadora con gran cantidad de núcleos y RAM propia. La WorkStation HP Z840 cumplió con las necesidades. Cuenta con un procesador Xeón® de Intel® que permite hasta 44 procesos simultáneos, tarjeta gráfica NVIDIA® NVS™ 510 con 2GB de RAM y 192 núcleos de cálculo paralelo CUDA.

3.2. Modelo del escenario

Aplicado a los motores de juegos, un volumen limitador es un volumen invisible, matemáticamente simple; puede ser una caja, una esfera o un cilindro [87]. Una técnica apropiada es envolver un volumen, que puede ser irregular dentro de uno o varios modelos geométricos. Esta estrategia permite contener, y así, definir todas las geometrías de un entorno o escenario complejo.

Es posible colocar un limitador de volumen para la geometría que se utiliza en la detección

de colisiones de un rayo. Los limitadores permiten realizar rápidamente pruebas de intersección o colisión. Dentro de estas pruebas se incluyen las de intersección con un rayo. En los videos juegos un rayo es una geometría diferente a todas las demás geometrías ya que no representa un objeto solido [87].

El rayo es una línea infinitamente delgada que inicia desde la posición de una geometría y se extiende en la dirección del eje local definido por el usuario. Las mallas obtenidas son de objetos planos por lo tanto no encierran o limitan un espacio. Entonces, para poder aplicar la física del rayo de la interfaz JMonkey Phisycs, se adecuaron las clases que permiten obtener los volúmenes limitadores de los techos de los edificios, paredes, calles y en general de cualquier objeto, ya que los rayos implementados detectan las colisiones de los rayos solo con objetos limitadores de volumen.

Se adecuaron dos clases específicas para los volúmenes limitadores a partir de los limitadores existentes en JMonkey; un limitador de tipo caja para los planos rectangulares, como es el caso de las paredes de los edificios, y otra para los triángulos que conforman los polígonos irregulares de los techos y calles. Estas cajas limitadoras por defecto se implementaron con una profundidad de una micra de metro para lograr un volumen lo suficientemente pequeño que permita envolver los planos o triángulos con gran precisión, y a la vez permita detectar una intersección con un rayo. La Figura 3.1. representación de un escenario con volúmenes limitadores implementado en ambiente exterior (derecha) y en ambiente interior (izquierda). muestra la representación de un escenario con volúmenes limitadores implementado en ambiente exterior (derecha) y en ambiente interior (izquierda). Se aprecian los volúmenes limitadores sobre cada componente. En el modelo de físicas se le incorporan sus propiedades electromagnéticas de permitividad compleja y rugosidad a cada caja limitadora que envuelve una pared, techo, calle o elemento que define el escenario.

3.3. Modelo de canal

Como se describió anteriormente, la respuesta del canal es una función de la frecuencia. En esta sección se describe la implementación del lanzamiento de rayos, la técnica empleada para identificar las trayectorias que alcanzan al receptor en línea directa, reflexión especular, reflexión difusa y difracción.

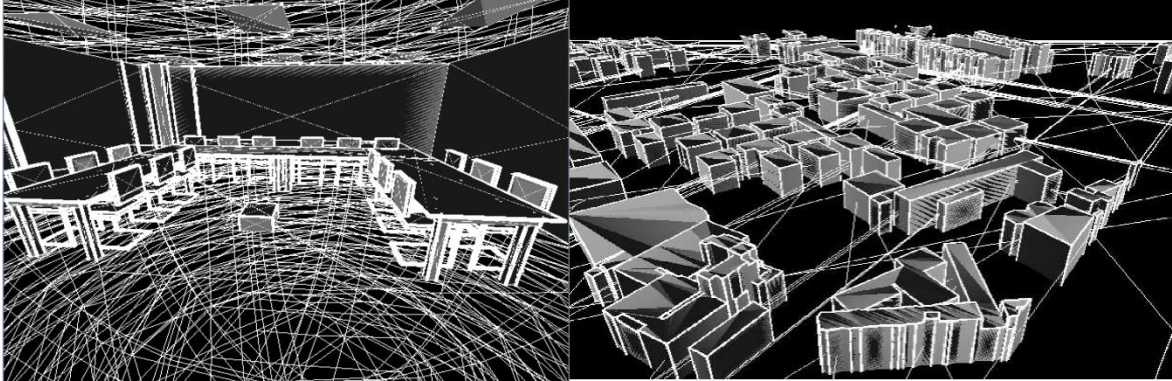


Figura 3.1. representación de un escenario con volúmenes limitadores implementado en ambiente exterior (derecha) y en ambiente interior (izquierda).

El método de fuerza bruta empleado en esta tesis utiliza la teoría del rayo óptico que permite separar cada mecanismo de propagación (reflexión, difracción y dispersión) con la ventaja de aplicar la geometría óptica. se basa en el algoritmo de disparo y rebote de rayos (SBR, *Shooting and Bouncing Ray*). Primero se lanzan rayos desde la antena transmisora, luego se trazan las trayectorias de rayos permitiendo ver si este impacta con algún objeto del entorno o si llega a la antena receptora. Cuando el rayo impacta con una superficie plana, se genera un rayo reflejado y otro transmitido por la interfaz, pero si el rayo impacta en un borde, se generan una gran cantidad de rayos difractados y cada uno de estos es trazado hasta impactar con otro objeto y así sucesivamente hasta que se descarte por tener una potencia menor que la sensibilidad del receptor, o impacte exitosamente al receptor. Finalmente se calculan las características del rayo asociadas a la propagación.

El método del lanzamiento de rayos aplica el principio de Fermat y el principio de campo local para modelar rayos. El principio de Fermat establece que un rayo sigue el camino más corto desde la fuente hasta el punto campo, mientras que el principio del campo local establece que cuando los rayos impactan una superficie experimentan reflexión, refracción y difracción, y a grandes frecuencias, solo depende de las propiedades eléctricas y geométricas de los dispersores.

A cada rayo se le asocia un campo eléctrico complejo y vectorial de amplitud, el cual se computa teniendo en cuenta el campo emitido en el transmisor, las pérdidas en el espacio libre, las reflexiones, las difracciones y difusiones experimentadas por el rayo en las que se emplean los modelos adecuados. Las pérdidas en el espacio libre se representan con la ecuación de Friss, las reflexiones se representan aplicando los coeficientes de reflexión de Fresnel, mientras que para difracciones el vector campo es multiplicado por los coeficientes de difracción pertinentes y obtenidos de la teoría de la UTD.

3.3.1. Propagación de los rayos

El transmisor se modela como un punto fuente en el escenario. Para determinar todos los posibles rayos que se pueden lanzar desde el transmisor y lleguen al receptor es necesario considerar todos los ángulos posibles de salida del transmisor y llegada al receptor. Los rayos se deben lanzar desde el transmisor en un ángulo de elevación θ y un ángulo en azimut φ relativo al sistema de coordenadas fijo y siguiendo un método de lanzamiento.

El trazador de rayos calcula tanto en la dimensión temporal como en la frecuencia. Para efectos de las comparativas con el trazador de rayos de la UPCT se emplea su funcionamiento en el dominio de la frecuencia. Así, el lanzador calcula la ganancia en transmisión directa del campo eléctrico (parámetro S_{21}) bajo la siguiente ecuación:

$$E_{rx} = S_{21} E_{tx} \quad (39)$$

siendo E_{rx} el campo eléctrico en el punto de recepción y E_{tx} el campo eléctrico en el punto de transmisión. Para esta última situación se asume el campo eléctrico como un fasor con fase cero, de referencia. La potencia en el receptor se calcula mediante [88]:

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} G_{tx}}{4\pi d^2} = \frac{|E_{rx}|^2}{120\pi} \text{ w/m}^2 \quad (40)$$

pero

$$|E_{rx}| = \frac{\sqrt{30P_{tx} G_{tx}}}{d} \quad (41)$$

para todas las trayectorias sin línea de vista (NLoS, *Non Line of Sight*) se puede escribir de (40) y (41):

$$|E_{rx}| = S_{21} |E_{tx}| \quad (42)$$

si se considera la potencia recibida a una distancia específica

$$P_{rx} = |E_{rx}|^2 \left(\frac{\lambda^2}{480\pi^2} \right) G_{rx} \quad (43)$$

En términos del parámetro S_{21} es posible reescribir la potencia en recepción como

$$P_{rx} = |S_{21}|^2 |E_{tx}|^2 \left(\frac{\lambda^2}{480\pi^2} \right) G_{rx} \quad (44)$$

En concordancia con la ecuación (44) se halla el parámetro mediante simulación. Para la fase y en la situación de dispersión, se emplea lo descrito en el aparte de fase aleatoria de los resultados.

3.3.1.1. Algoritmo de lanzamiento

Para el lanzamiento de los rayos se implementó el método del icosaedro regular [89], en donde se inscribe en una esfera unitaria. Este solido platónico al contener 20 caras poligonales y 12 vértices permite a los rayos ser lanzados en ángulos que pasan a través de los vértices interiores y de las aristas. La principal ventaja de esta técnica es que, usando el rayo tubo, no genera solapamiento entre los frentes de onda como se aprecia en la Figura 3.2.

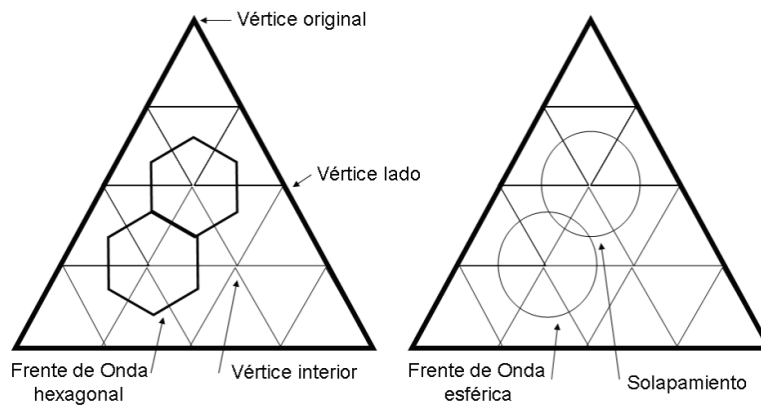


Figura 3.2. Representación del lanzamiento de rayos usando la técnica de rayo tubo e icosaedro (izquierda) y la técnica de rayo cono.

La dirección de propagación no necesariamente es la normal a la cara del icosaedro que tiene el rayo tubo. Para determinar la dirección de propagación se emplea la estrategia de teselación [90]. Esta es dividir al icosaedro en un mosaico con la finalidad de determinar la dirección del rayo tubo. Al realizar esta división los frentes de onda modifican su tamaño, pero la relación en forma y distancia en la vecindad de frentes de onda se mantiene. El número de rayos lanzados por la fuente transmisora está dado por [91]:

$$RL = 10N^2 + 2 \quad (45)$$

donde N es la frecuencia de la división. La separación radial (α) es una medida de la resolución angular de la dispersión de los rayos para un lanzamiento de rayos [92] y se

empleó para calcular la resolución angular de separación entre la vecindad de frentes de onda:

$$\alpha = \frac{69^\circ}{N} \quad (46)$$

3.3.1.2. Algoritmo de recepción

Un método con gran eficiencia para determinar la recepción es mediante esferas variables [93]. Este método consiste en examinar si un rayo lanzado alcanza a una esfera ubicada en el receptor y centrada en un punto con radio de:

$$r = \frac{\alpha d}{\sqrt{3}} \quad (47)$$

donde d es la longitud del rayo. Si el rayo lanzado tiene contacto con la esfera, puede ser recibido. En este método, se verifica cada rayo con la generación de una esfera, lo que hace ineficiente su implementación computacional tratándose de miles de rayos lanzados. Por tanto, se modifica la técnica de esferas variables a una esfera constante. La esfera ahora tiene un radio definido por (47) calculando la distancia del rayo de la longitud máxima esperada según la propagación en el espacio libre esa distancia. Una vez calculada las pérdidas por la trayectoria del rayo, la sensibilidad del receptor se compara para descartar el rayo. Si la potencia del rayo está por debajo de la sensibilidad del receptor el rayo no se toma en cuenta. Esta esfera de recepción contiene todas las esferas de recepción variable para los posibles rayos esperados.

3.3.1.3. Algoritmo para identificar impacto en bordes

Para definir las geometrías en los motores de juego se emplearon volúmenes limitadores. Los bordes son fronteras, líneas infinitesimales entre dos volúmenes delimitadores que definen la unión de una geometría. Para determinar si un rayo impacta sobre un borde se aplica la técnica descrita de la esfera de recepción constante pero aplicada a un volumen diferente, a un cilindro. El cilindro se coloca longitudinalmente en la unión de dos planos. Así, se determina si el rayo impactado posee difracción.

Siguiendo el principio de Huygens-Fresnel, todos los rayos que impacten el cilindro receptor se convierten en una fuente puntual generadora de nuevos rayos. Para examinar la segunda difracción se estiman los rayos candidatos. Esta vez, desde el receptor, se lanzan rayos

hacia los bordes. Sí hay impacto en el borde, se marca el rayo como candidato a segunda reflexión. Solo estos rayos son examinados en la estimación de canal. En la figura 3.3 se muestran los algoritmos planteados en esta sección.

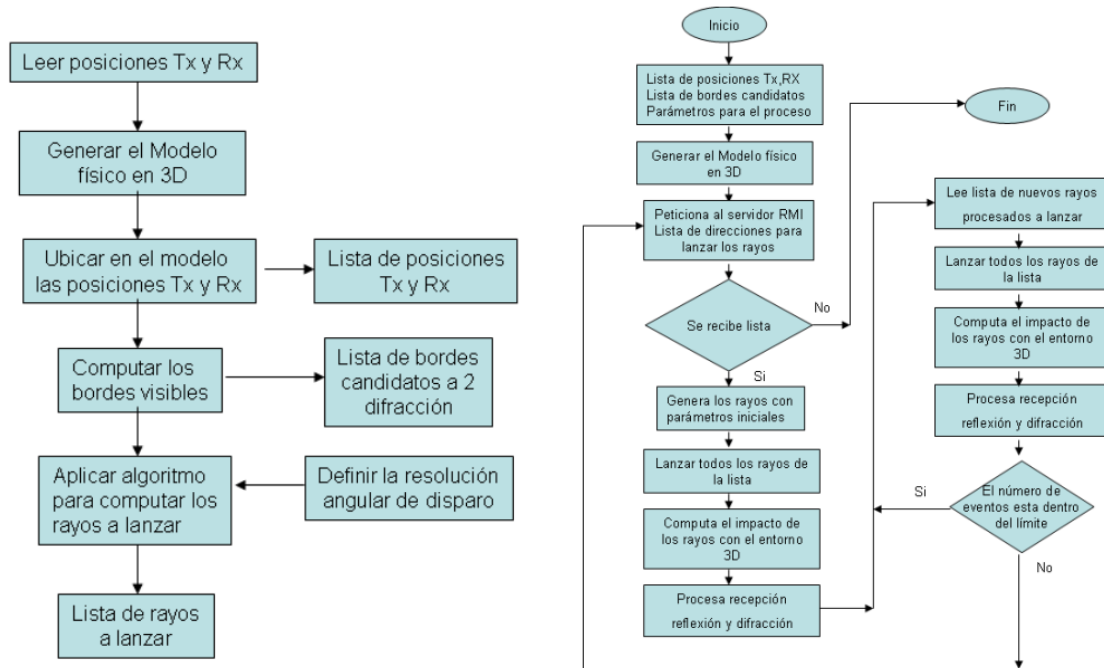


Figura 3.3. Algoritmos usados para la estimación del canal. Pre-procesamiento de rayos a lanzar (izquierda) y estimación de las componentes debidas a reflexión y difracción.

3.3.2. Aceleración por hardware

En la programación en motores de juego, sí la arquitectura del computador ofrece múltiples procesadores puede permitirle al programador paralelizar el juego para que pueda utilizar todos los recursos y tener mejoras en el desempeño. En Java, existe una invocación remota de métodos (RMI, *Java Remote Method Invocation*) para extraer al máximo la eficiencia de los equipos con procesadores de múltiples núcleos. RMI permite al programador distribuir los procesos en el que se invocan los objetos remotos.

Se utilizó múltiples máquinas virtuales de Java (JVM, *Java Virtual Machine*) sobre un mismo computador para paralelizar las tareas y así poder usar el procesador de múltiples núcleos como un sistema de procesos distribuidos.

Resultado del pre-procesamiento de rayos, se toman la lista de rayos candidatos almacenados y son procesados por el servidor RMI, ejecutando un motor de juegos por cada núcleo y entregando un lote de rayos candidatos desde la lista. El servidor RMI almacena en memoria la lista de las direcciones iniciales de los rayos a lanzar desde el transmisor, para

luego enviarlas secuencialmente y en orden.

El motor de juegos al recibir la lista de direcciones de los rayos a lanzar desde el transmisor, genera los rayos con sus parámetros iniciales para ser lanzados. Después lanza los rayos generados hacia el entorno y se procesan en la GPU. En esta etapa se utiliza eficientemente la GPU al procesar gran cantidad de rayos en paralelo y sin desplegarlos en un monitor o pantalla. En el siguiente ciclo de renderizado, la GPU retorna a la CPU la lista de rayos procesados para que el motor de juegos procese la recepción, reflexión y difracción, y se genere la nueva lista de rayos a lanzar en el siguiente ciclo. Este proceso se repite iterativamente mientras el número de eventos este dentro de los parámetros iniciales.

El motor de juegos recibe de la tarjeta gráfica una lista de los rayos que fueron procesados por la GPU. El algoritmo lee secuencialmente desde la lista de candidatos uno a uno los rayos e identifica para cada rayo si impacto con un objeto y determina el objeto con el que impacto (esfera, cilindro o plano). Dependiendo del objeto de impacto valida el impacto y calcula sus parámetros multicamino y verifica que el nivel de potencia este por encima del umbral para continuar o descartar el rayo.

En caso de reflexión o difracción genera los nuevos rayos con sus parámetros para guardarlos en una nueva lista de rayos a lanzar desde la posición de impacto. Después verifica si hay más rayos a procesar, en caso afirmativo, lee el siguiente rayo en la lista y lo procesa, en el caso contrario, termina el ciclo para los rayos enviados por la GPU.

4. RESULTADOS

En este capítulo son descritos los resultados obtenidos al aplicar las estimaciones de canal en dos situaciones diferentes, pero ambas descritas para el 5G móvil. Las dos situaciones emplean sistemas MIMO. En la primera, la propagación se realiza en ambientes exteriores a una frecuencia dentro del rango sub 6 GHz. La segunda situación se desarrolla con la propagación en un ambiente de interior en la franja de ondas milimétricas alrededor de 60 GHz (Banda E). En este aparte, mediante la simulación y sus comparaciones en diferentes entornos, se verifican los resultados del modelo obtenidos comparándoles con las campañas de mediciones. Finalmente, a partir de los resultados de las simulaciones se generan los mapas de capacidad de canal como una aplicación a la estimación de canal y como opción para planificar y optimizar una red bajo un escenario bien definido.

4.1. Canal MIMO en exterior ondas sub 6 GHz. Caso de estudio: Ilmenau

A continuación, se describe el escenario donde se realizaron las mediciones, la descripción del cómo se obtuvo su equivalente en el motor de juegos, se describe la campaña de mediciones y finalmente, la evaluación de los resultados obtenidos.

4.1.1. Descripción del escenario

Para este escenario en exteriores se tomó una porción del centro de la ciudad de Ilmenau (Alemania) con una extensión de 1000 m x 800 m. Los datos fueron suministrados por La universidad de esta ciudad a quienes agradecemos su apoyo para la verificación de este modelo [94]. El ambiente es de tipo urbano con edificaciones de bajas alturas cuyos techos son inclinados y sus calles con inclinaciones. Para efectos de la simulación se asumen techos planos. La Figura 4.1 muestra el segmento de la ciudad a tratar (izquierda) con la ruta de la campaña de medidas en color amarillo. Se presenta la vista superior de la simulación 3D (derecha) donde el transmisor se encuentra en color verde.

Para el modelo geométrico usado en la simulación 3D se asume que las paredes de los edificios están construidas del mismo material, para lo que se implementó la permitividad y permeabilidad del ladrillo ($\epsilon_r=7.9-j0.65$, $\mu_r=1$), mientras que para las calles y techos concreto ($\epsilon_r=5.2-j0.21$, $\mu_r=1$). Se empleó una rugosidad de ($\sigma_r=1$ mm) para todos los materiales del escenario [95]. Las cantidades de volúmenes limitadores se resumen en la Tabla 4.1.

| Polígonos limitadores | Escenario | |
|-------------------------------|-------------------|------------|
| | Unidades | Cantidades |
| Paredes | [m ²] | 800000 |
| Techos | [Un] | 13508 |
| Calles | [Un] | 1989 |
| Cilindros bordes horizontales | [Un] | 1727 |
| Cilindros bordes verticales | [Un] | 12147 |
| Esferas de recepción | [Un] | 13396 |

Tabla 4.1. Resumen de los volúmenes limitadores empleados para representar el modelo geométrico del escenario 3D.

4.1.2. Campaña de medidas

La campaña de medición se realizó en múltiples rutas, de las cuales se analizó, para este trabajo, solo la ruta 9a – 10b. La frecuencia que se empleó es la de 2.53 GHz en un sistema 2 x 40 MHz. Para el transmisor se usó un arreglo lineal uniforme de 8 elementos con polaridad dual (H/V). Para el receptor se empleó un arreglo circular de dos anillos con 12 antenas tipo parche con polarización horizontal/vertical. Las antenas son mostradas en la Figura 4.2 y sus principales características están resumidas en la Tabla 4.2.

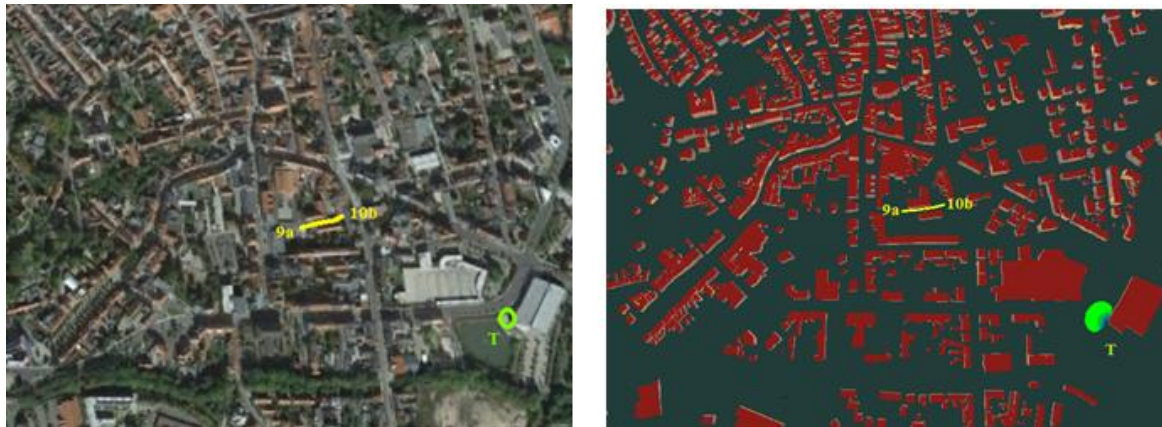


Figura 4.1. Parte del centro de Ilmenau (Alemania) con la ruta de la campaña de medidas en color amarillo y la ubicación del transmisor en color verde. Ciudad real tomada desde Google Maps (izquierda) y la simulación 3D (derecha).

La ruta de medidas está conformada por 3325 puntos receptores a lo largo del segmento 9a – 10b, que posee una longitud aproximada de 64 m. Se transmite con una potencia de 46 dBm a 26.5 m sobre el nivel del piso con una inclinación de 5° y la altura en el receptor es de 1.9 m. El ancho de banda a media potencia para el transmisor es de 100° mientras que en el arreglo de la recepción es omnidireccional.

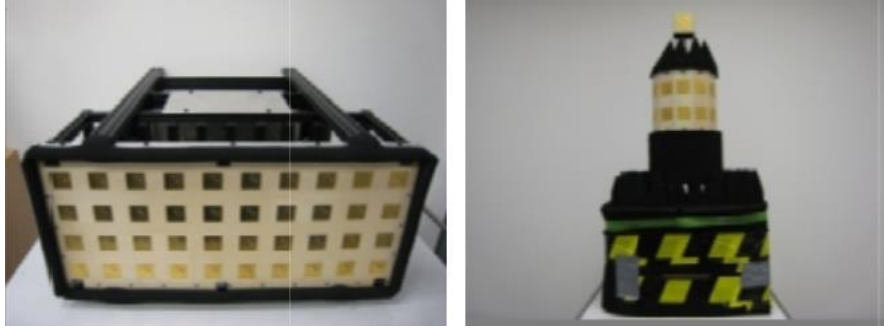


Figura 4.2. Antena transmisora (izquierda) y antena receptora (derecha).

| Parámetros | Antenas | | |
|----------------------------|----------|------------|----------------------|
| | Unidades | Transmisor | Receptor |
| Alturas | [m] | 26.5 | 1.9 |
| Ancho del haz: azimut | [°] | 100 | Omni- direccional |
| elevación | [°] | 24 | 80 |
| Inclinación (pendiente) | [deg.] | 5 | 0 |

Tabla 4.2. Características de las antenas empleadas.

4.1.3. Comparación de la simulación con campañas de medida

En este trabajo se empleó la función de distribución acumulativa para verificar la precisión del modelo [94], [96], [97]. Los resultados de la campaña de medición se compararon con dos simulaciones. Una simulación fue realizada con baja resolución, es decir, la separación media angular en la vecindad de rayos lanzados desde el transmisor por el simulador fue de $2\alpha_R$, asimismo para la primera difracción mientras que, en la segunda, fue de alta resolución α_R , donde $\alpha_R = 0.27^\circ$. Esta presunción no afectó significativamente los tiempos computacionales y permite verificar el cómo la precisión se afecta por una mayor resolución en el lanzamiento de los rayos. En la Figura 4.3, a modo de ilustración, se muestra la simulación del motor de juegos en el escenario de prueba, donde se aprecian los rayos reflejados y difractados hasta cinco eventos para una esfera de recepción específica. La transmisión y sus efectos posteriores, no se consideran. Se define un evento como la combinación secuencial entre rayos reflejados que producen reflexión o difracción. En amarillo se representan las esferas receptoras, en verde el transmisor y los rayos que impactan al receptor se representan en fucsia. Los resultados finales del Delay Spread obtenidos mediante la simulación en alta y baja resolución y su comparativa con las mediciones son mostrados en la Figura 4.4.

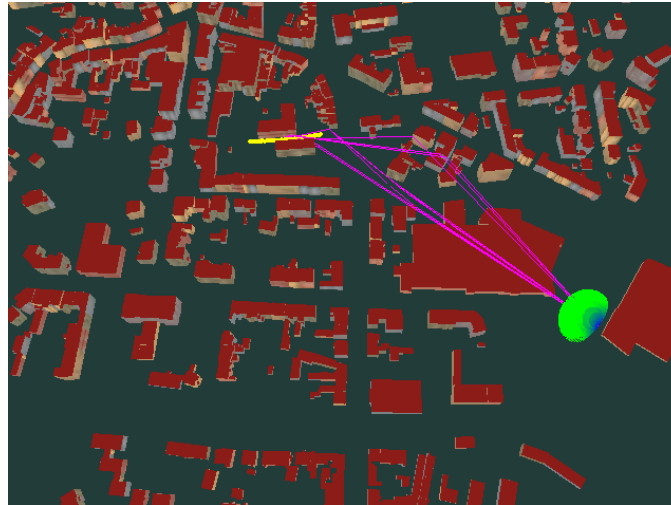


Figura 4.3. Simulación del escenario con los rayos ocasionados por reflexiones y difracciones de diferentes órdenes para un solo punto de recepción específico. Esferas receptoras (amarillas), el transmisor (verde) y los rayos que impactan al receptor (fucsia).

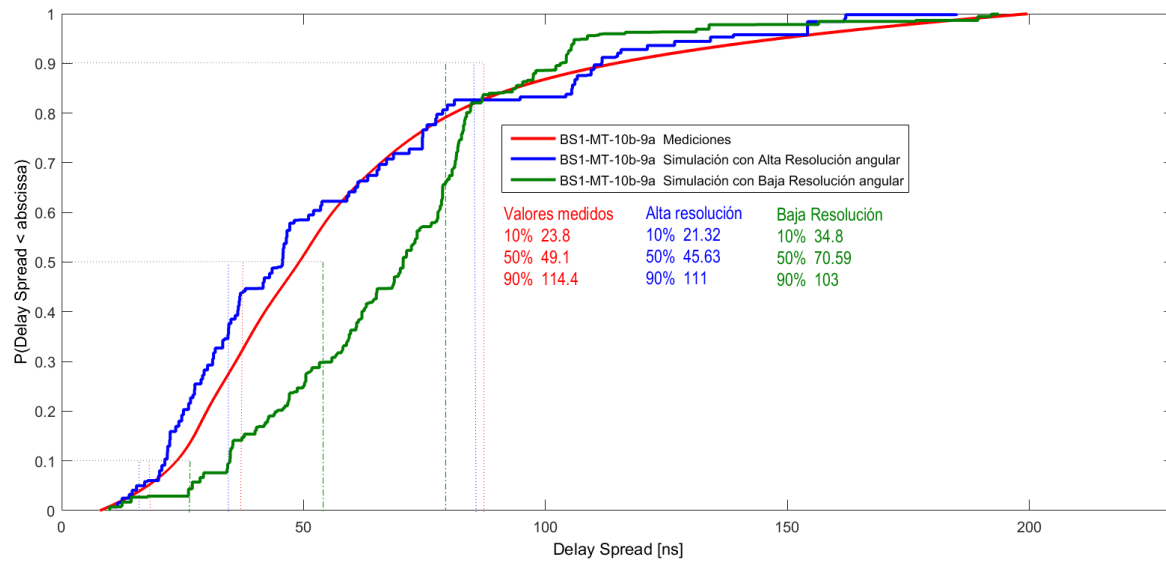


Figura 4.4. Comparativa de los resultados de la simulación con alta resolución (azul), baja resolución (verde) y las mediciones (rojo).

En la Tabla 4.3 se muestran los valores obtenidos para el promedio de Delay Spread tomando en cuenta la resolución en difracción.

| Ruta | | σ_t (ns) | σ_t 10% (ns) | σ_t 50% (ns) | σ_t 90% (ns) |
|--------|----------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 10b-9a | Mediciones | 59.37 | 23.80 | 49.10 | 114.40 |
| | Simulación alta resolución | 55.93 | 21.32 | 45.63 | 111.00 |
| | Simulación baja resolución | 69.31 | 34.80 | 70.59 | 103.00 |

Tabla 4.3. Estadística de error entre la simulación de alta y baja resolución versus las medidas.

En la Tabla 4.4 se muestra los datos para el análisis de precisión mediante la estadística de

error, empleando para ello, el error medio y la desviación estándar del Delay Spread entre los valores obtenidos en las simulaciones de baja y alta resolución versus las medidas.

| Ruta | Simulación | Error medio (ns) | Desviación Std.(ns) |
|--------|-----------------|------------------|---------------------|
| 10b-9a | Baja resolución | 16.42 | 7.60 |
| | Alta resolución | 4.98 | 4.55 |

Tabla 4.4. Estadística de error entre la simulación de alta y baja resolución versus las medidas.

En esta sección se ha podido verificar el cómo afecta en la simulación la resolución angular. En un escenario en el cual el fenómeno físico de la difracción tiene alta presencia, el algoritmo heurístico de difracción mejorado implementado sobre el motor de juegos incrementa la precisión.

4.2. Canal MIMO en ondas milimétricas. Caso de estudio: Cartagena

Este aparte se realizó la comparación de los resultados obtenidos de la simulación con una campaña de medidas realizada en la banda de 57 a 66 GHz con 180 canales al interior de un laboratorio que posee mobiliario propio de las instalaciones y que, por sus dimensiones comparadas con la longitud de onda, se considera un escenario complejo.

4.2.1. Modelo del escenario

La precisión de los resultados del lanzador de rayos está íntimamente ligada con la descripción del entorno o escenario 3D para la situación de ambientes interiores. La representación de los dispersores al igual que sus parámetros constitutivos deben incluir una alta resolución tanto geométrica como físicamente y sus valores deben ser ajustados a la realidad.

La Figura 4.5 muestra una fotografía (derecha) del laboratorio de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), en España utilizado para las mediciones y su modelo en 3D (izquierda). El escenario está localizado en la tercera planta del edificio de Laboratorios de Desarrollo e Investigación (ELDI), con dimensiones de 6.40 m x 4.44m x 2.60 m. Se identificaron cinco clases de materiales presentes en el escenario de análisis. El piso y las columnas están constituidos por concreto, las ventanas en vidrio, el mobiliario de madera con armazón metálico y el cielo raso en yeso. La esfera roja representa los puntos de medida (arreglo de 36 antenas receptoras) y la esfera azul la posición del transmisor (arreglo de 5 antenas transmisoras).

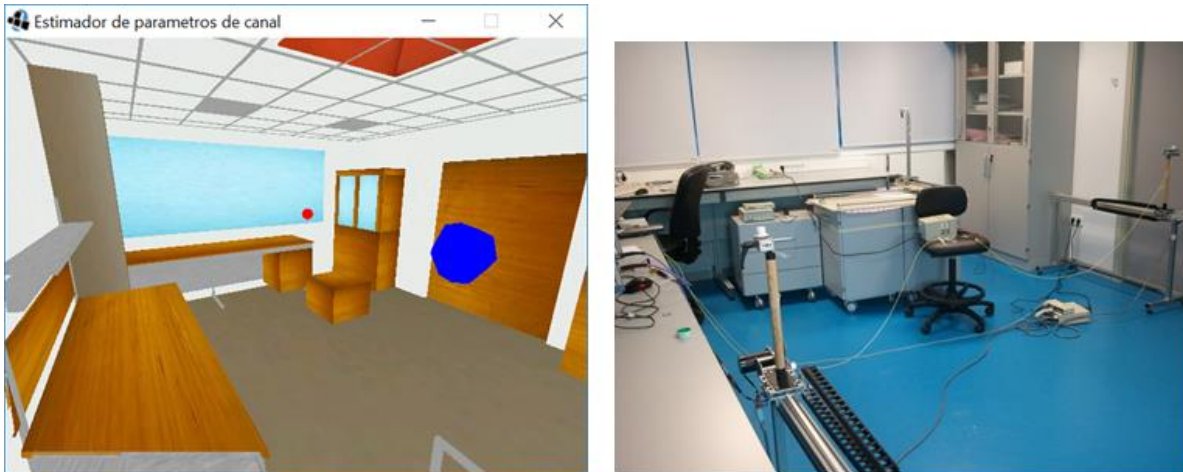


Figura 4.5. Modelo en 3D del laboratorio.

Las mediciones se realizaron en diferentes puntos al interior del laboratorio, como lo muestra la Figura 4.6. La distancia de separación entre cada ubicación es de 1 metro a lo largo y de medio metro en anchura referida al laboratorio. En ese orden de ideas, por ejemplo, el punto número 3 (receptores) está ubicado a 2.8 metros en línea directa los transmisores.

El modelo 3D del escenario se logró utilizando geometrías planas para representar todos los objetos presentes. Cada una de las geometrías físicas de los objetos presentes en un laboratorio se puede modelar combinando algunas geometrías primitivas básicas, que en conjunto logran gran resolución geométrica. Sin embargo, en el escenario seleccionado, el entorno y los objetos presentes no tienen gran complejidad geométrica y están compuestos por superficies planas con sus respectivas propiedades de dimensión, grosor, permitividad y conductividad. Así mismo, para identificar el impacto de la onda de propagación en los bordes se utilizó la geometría del cilindro. Además, para representar los puntos de medida e identificar los rayos que impactan en estos, se utilizó la geometría de la esfera de recepción.

Los valores iniciales utilizados para la permitividad relativa y la conductividad de los materiales del escenario fueron suministrados por los asesores de la UPCT (mencionados en los agradecimientos) y se muestran en la Tabla 4.5.

En la literatura los valores nominales de permitividad relativa y conductividad para la madera, el concreto y el vidrio, pueden encontrarse para materiales específicos y a frecuencias cercanas de la medida.

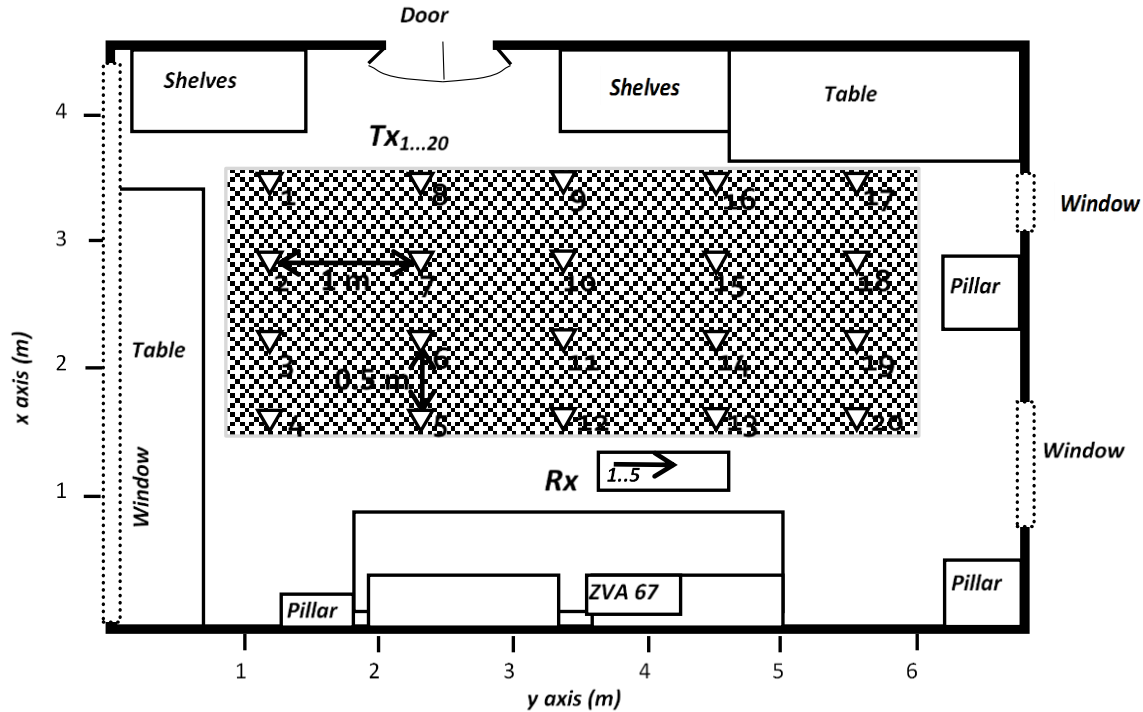


Figura 4.6. Vista superior del Laboratorio de caracterización electromagnética, UPCT, España. Distribución de los puntos de medida.

| Elemento | Permitividad relativa | Conductividad (S/m) |
|----------------------|-----------------------|---------------------|
| Piso y columnas | 6.5-0.43i | 1.43 |
| Paredes y Cielo raso | 2.81-0.046i | 0.15 |
| Mobiliario | 1.54-0.095i | 0.32 |
| metal | 1 | 1.000 |
| Vidrio | 6.94-0.176i | 0.59 |

Tabla 4.5. Valores de permitividad relativa y conductividad.

La herramienta multiplataforma de código abierto *Blender 2.74* es utilizada para desarrollar el modelado 3D del entorno interior, ésta usa *Python* como lenguaje de programación interno. En una primera fase, se seleccionan los datos para crear el ambiente de acuerdo a las medidas del escenario realístico de la UPCT, obteniendo los puntos de las coordenadas XY con su altura respectiva para cada elemento que se incluye en el entorno de estudio.

En *Blender* se incluye cada objeto adicionando una malla tipo cubo en la escena para las paredes, piso, techo, ventanas y demás elementos del entorno, adicionalmente cada material se representa como texturas que se incorporan en el modelo, mediante la técnica de texturizado mapeado en coordenadas 2D (UV), la cual permite establecer una correspondencia entre los vértices de un objeto y las coordenadas de una textura. Asignando una imagen a cada polígono de acuerdo al material en el modelo del entorno, para mejorar

el renderizado, se obtiene gran resolución 3D y da realismo al escenario. Por último, se deben tener en cuenta las transformaciones de escala, unidades, rotación y localización de la escena aplicadas en el entorno 3D de *Blender* antes de exportar los archivos, para aplicar los cambios de la escena con las características del modelo como material, mallas y texturas asociadas, para posteriormente importar el modelo en el motor de juegos JME (*Java Monkey Engine*). Posteriormente, el escenario 3D en formato *Blender* es exportado a un formato compatible con los motores de juegos.

4.2.2. Campañas de medida

La Figura 4.7 muestra un esquema del sistema empleado para las medidas. El rango de mediciones fue entre 57 GHz y 66 GHz con 4096 puntos de frecuencia. El sistema de medida utilizado se compone de dos grupos de antenas idénticas en arreglos virtuales (Q-par QOM55–65 VRA) con polarización vertical y ganancia que va desde 4 a 5.1 dBi a lo largo del ancho de banda. La Figura 4.8 la configuración virtual realizada mientras que la Figura 4.9 muestra la antena físicamente. En cada arreglo, los elementos de antena, tanto en recepción como en transmisión están separados en forma equidistante a 2 mm, lo que en términos de longitudes de onda da una relación de $\lambda/2$, como se aprecia en la figura 4.8. Existe un arreglo de 6 x 6 para recepción y un arreglo de 1 x 5 para trasmisión, conformando así un sistema con 180 canales.



Figura 4.7. Sistema de medidas para la campaña de medidas entre 57 y 66 GHz.

Además, posee un patrón de radiación omnidireccional en el plano H y un haz de media potencia centrado en 40° , 28° y 21° para las frecuencias de 55GHz, 60GHz y 65GHz respectivamente, como se muestran en la Figura 4.10. Las antenas se encuentran soportadas en estructuras metálicas a 1.44 m de altura para el transmisor y de 1.54 m para el receptor. Están conectadas con cable coaxial al analizador de redes vectorial Rohde & Schwartz ZVA67 cuya potencia de transmisión fue de -10 dBm. Para compensar los efectos de atenuación de los coaxiales se emplearon amplificadores (HXI HLNA-465) con ganancias de máximas de 25 dB, cuyos efectos fueron medidos y ajustados. Con fin de obtener precisión se generó un software para el posicionamiento con servomotores y se operó desde

el exterior del escenario para mantener el canal estacionario. Con una frecuencia intermedia de 10 Hz se obtuvo un rango dinámico de más de 100 dB.

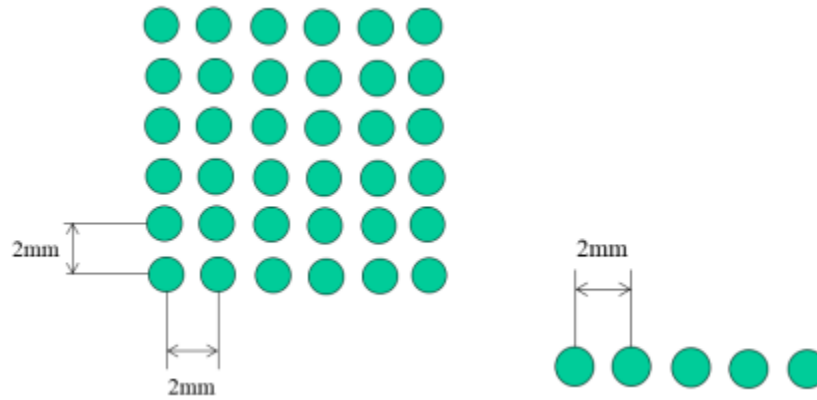


Figura 4.8. Conformación de los arreglos virtuales (superior).



Figura 4.9. Antena omnidireccional QoM55-65 VRA, base de los arreglos virtuales.

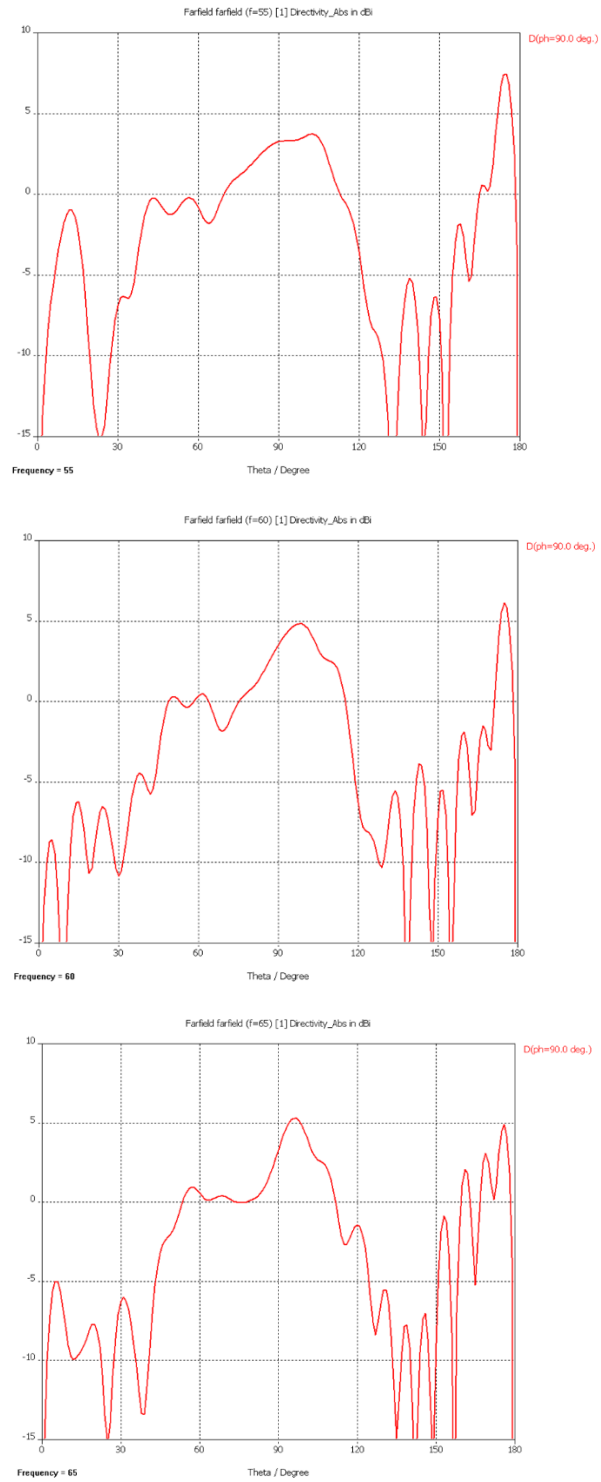


Figura 4.10. Patrones de radiación para la antena omnidireccional QoM55-65 VRA a 55GHz (superior), 60GHz (centro) y 65 GHz (inferior).

4.2.3. Comparación del lanzador de rayos con campaña de medida

Para la estimación de canal, es posible establecer el número de eventos que se tomará en cuenta en el pre-procesamiento para cada simulación con fin de determinar los rayos que llegan a la esfera receptora. Al emplear aceleración por hardware, los números de eventos no tienen un alto impacto en el tiempo de procesamiento, sin embargo, con fines de mejorar la respuesta se busca el equilibrio entre número de eventos y precisión. Se simuló el Perfil de Retardo Potencia (PDP), analizando los parámetros de retardo mediante su valor cuadrático medio (RMS, *Root Mean Square*), retardo medio (MD, *Medium Delay*) y pérdidas básicas de propagación (PL, *Path Loss*) en todas las posiciones del escenario de la Figura 4.6. Para la evaluación del lanzador se analizó el error cuadrático medio (ECM) y la desviación estándar (σ) entre las estimaciones y las medidas por eventos, resumida en la Tabla 4.6.

| Simulación | desviación estándar (σ) | | |
|------------|----------------------------------|--------|--------|
| | RMS DS (ns) | MD(ns) | PL(dB) |
| 3 eventos | 0.7779 | 2.8619 | 2.9363 |
| 4 eventos | 0.8532 | 2.9261 | 3.0411 |
| 7 eventos | 1.1724 | 3.0406 | 2.8941 |
| 10 eventos | 1.1478 | 2.9902 | 2.9742 |
| Simulación | ECM | | |
| | RMS DS (ns) | MD(ns) | PL(dB) |
| 3 eventos | 0.9664 | 0.7891 | 2.6631 |
| 4 eventos | 1.0417 | 0.6531 | 2.9142 |
| 7 eventos | 2.2915 | 1.2277 | 2.8469 |
| 10 eventos | 2.0561 | 1.0770 | 2.8249 |

Tabla 4.6. Estadísticas de error para todas las ubicaciones del escenario de prueba.

En el mismo orden de ideas, se presenta en la Tabla 4.7 el tiempo de ejecución tomado por cada simulación según el número de eventos para todas las ubicaciones.

| Simulación | Tiempo en ejecución (min) |
|------------|---------------------------|
| 3 eventos | 2165.3333 |
| 4 eventos | 2172.6333 |
| 7 eventos | 2176.9333 |
| 10 eventos | 2182.2000 |

Tabla 4.7. Tiempo de ejecución para la simulación de todas las ubicaciones según el número de eventos programados para la estimación de canal.

En anexo A.1 se presentan las estadísticas de error para todas las posiciones evaluadas con 3, 4, 7 y 10 comparadas con las mediciones realizadas por el grupo de investigación en Sistemas de Comunicaciones Móviles (SiCoMo) de la UPCT.

Para este aparte, se presenta la evaluación de resultados en las posiciones 4, 5, 10, 16 y 17 para simulaciones con 4 y 10 eventos, siendo estos los más representativos según el análisis de las estadísticas de error y los tiempos de computo. Lo anterior se realiza con la finalidad de analizar ubicaciones geoespacialmente cercanas (4 y 5), media (10) y extremas (16 y 17) con referencia al transmisor. Otra razón para esto es reducir la gráfica con poco número de eventos (4) y con el mayor número de eventos (10) simulados para su mejor apreciación visual. En la Figura 4.11 se muestran los resultados de la ubicación 3 con fines de ilustrar los resultados obtenidos para todas las simulaciones, lo que resulta difícil de diferenciar.

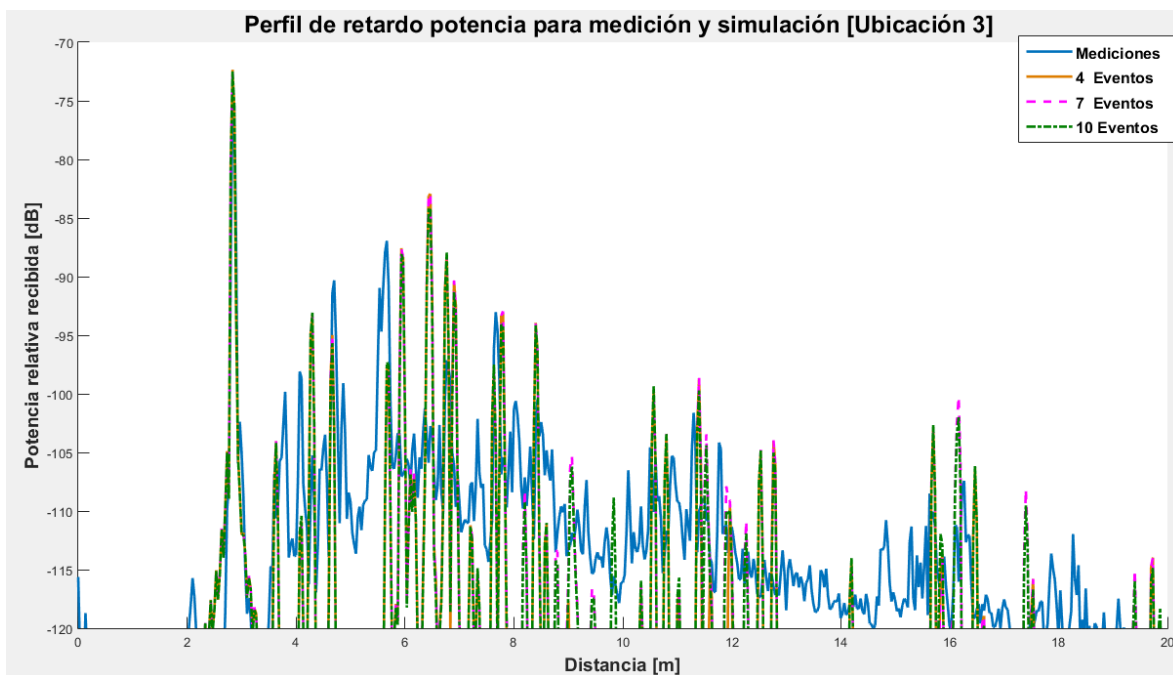


Figura 4.11. PDP para la ubicación 3 con 3,4,7 y 10 eventos.

Para la ubicación 4, se obtuvieron los resultados de la Tabla 4.8. En términos generales los resultados son bastante precisos y muy próximos considerando el número de eventos estudiados. En la Figura 4.12 es posible evidenciar que hay una diferencia muy pequeña en el tap principal medido y los simulados, que corresponden a 0.022 ns.

La fuente del error puede deberse a la precisión en el posicionamiento de los puntos del receptor y del transmisor, que corresponden a una distancia de 6,6 mm aproximadamente. También se puede notar las contribuciones que aportan la simulación con 10 eventos debidas a las réplicas en la franja entre 12 y 18 metros.

| Posición | RMS (ns) | | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | |
|----------|------------|--------|----------|------|---------|----------|------|----------------|----------|------------|
| | Medido | | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 4 | 3 eventos | 4,1856 | 4,3906 | 95,1 | 10,27 | 10,189 | 99,2 | 71,1341 | 70,7816 | 0,35 |
| | 4 eventos | | 4,3907 | 95,1 | | 10,189 | 99,2 | | 70,7777 | 0,36 |
| | 7 eventos | | 4,5143 | 92,1 | | 10,248 | 99,8 | | 70,7561 | 0,38 |
| | 10 eventos | | 4,4474 | 93,7 | | 10,184 | 99,2 | | 70,7429 | 0,39 |

Tabla 4.8. Valores de mediciones y simulaciones para 3, 4, 7 y 10 eventos en la ubicación 4 con sus respectivos cálculos estadísticos.

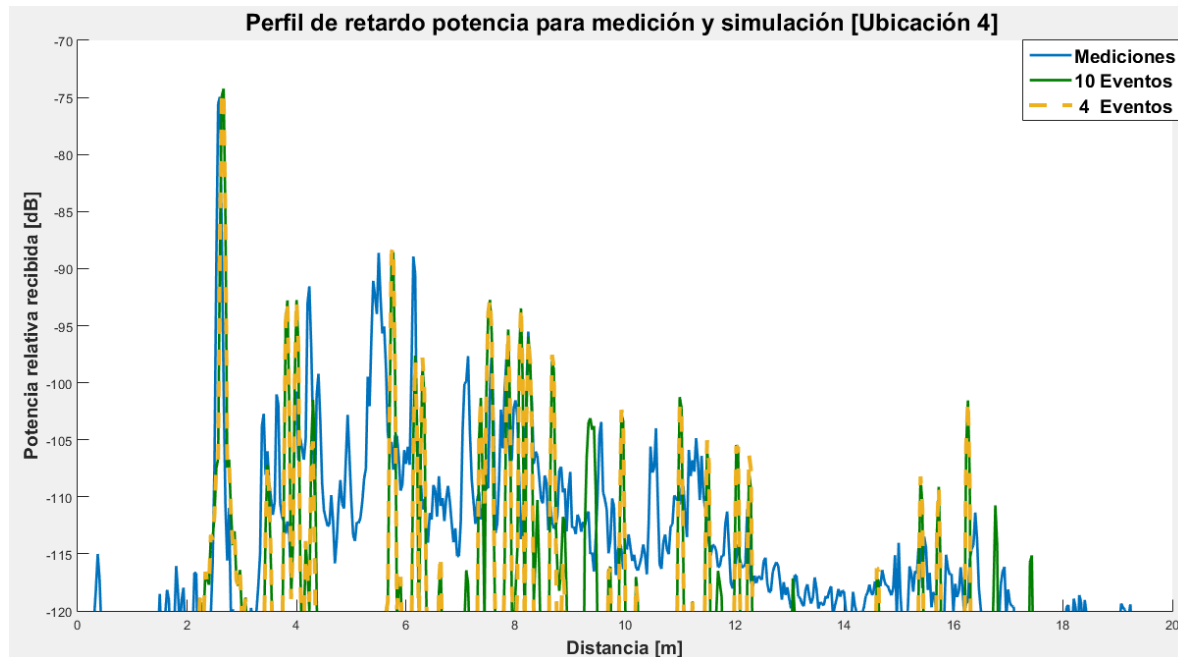


Figura 4.12. Valores de mediciones y simulaciones para 4 y 10 eventos en la ubicación 4 con sus respectivos cálculos estadísticos.

En la Tabla 4.9 se muestran los resultados para la posición 5 del escenario. Nuevamente se aprecia en la figura Figura 4.13 una pequeña diferencia entre el tap principal de las mediciones y las simulaciones. La diferencia es la misma de la situación anterior (ubicación 4) lo que corrobora la fuente de error. Los resultados en general son precisos considerando que a 10 eventos el RMS presenta un valor más amplio que las mediciones sugiriendo la influencia de algunas replicas, notorias en la cercanía de 10 m, 12 m y 17 m, que no están presentes en las otras simulaciones con menos eventos. La influencia del corte de 30 dB permite que a 10 eventos existan replicas que afectan al RMS mientras que la situación de las mediciones no. Esta es la razón por la que el RMS empeora con el aumento del número de eventos. El PL se mantiene por debajo de 1 dB indicando que, las pérdidas calculadas en promedio, son muy cercanas a las mediciones.

| Posición | RMS (ns) | | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | |
|----------|----------|------------|----------|------|---------|----------|------|----------------|----------|------------|
| | Medido | | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 5 | 4,08 | 3 eventos | 4,2376 | 96,1 | 9,451 | 9,612 | 98,3 | 68,5624 | 69,2860 | 0,72 |
| | | 4 eventos | 4,5587 | 88,3 | | 9,7337 | 97,0 | | 69,2586 | 0,70 |
| | | 7 eventos | 4,9443 | 78,8 | | 9,9796 | 94,4 | | 69,1759 | 0,61 |
| | | 10 eventos | 4,907 | 79,7 | | 9,9747 | 94,5 | | 69,2475 | 0,69 |

Tabla 4.9. Valores de mediciones y simulaciones para 3, 4, 7 y 10 eventos en la ubicación 5 con sus respectivos cálculos estadísticos.

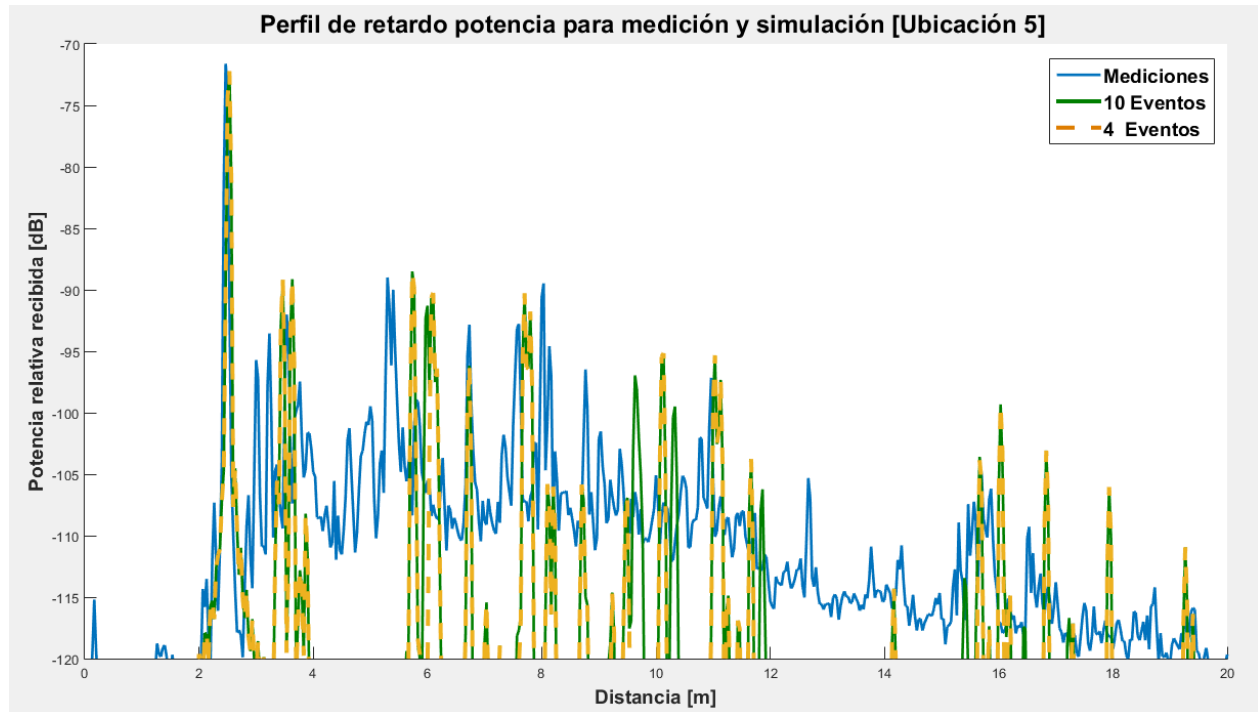


Figura 4.13. Valores de mediciones y simulaciones para 4 y 10 eventos en la ubicación 5 con sus respectivos cálculos estadísticos.

Para la ubicación 10 se presentan la síntesis de resultados en la Tabla 4.10 y la gráfica de las mediciones y simulaciones con 10 y 4 eventos en la Figura 4.14. Para esta situación la diferencia entre los taps principales de las mediciones y las simulaciones corresponde a 3 mm aproximadamente. En las simulaciones se aprecian réplicas que permiten que el RMS sea mayor que las medidas y esto afecte la estadística de error, especialmente las contribuciones alrededor de 11m y 15 m para la situación de 10 eventos. En cuanto a los otros indicadores como MD y PL la variabilidad entre los resultados con 3,4, 7 y 10 eventos son poco significativos. Para este punto, el PL está alrededor de 1.5 dB de diferencia con las mediciones, siendo una buena precisión.

| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|----------|------------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | Medido | | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 10 | 3,671 | 3 eventos | 4,5043 | 77,3 | 7,67 | 9,473 | 76,5 | 70,3607 | 68,8058 | 1,55 |
| | | 4 eventos | 4,5662 | 75,6 | | 9,5348 | 75,7 | | 68,7767 | 1,58 |
| | | 7 eventos | 4,8473 | 68,0 | | 9,6059 | 74,8 | | 68,7603 | 1,60 |
| | | 10 eventos | 4,9003 | 66,5 | | 9,5439 | 75,6 | | 68,7944 | 1,57 |

Tabla 4.10. Valores de mediciones y simulaciones para 3, 4, 7 y 10 eventos en la ubicación 10 con sus respectivos cálculos estadísticos.

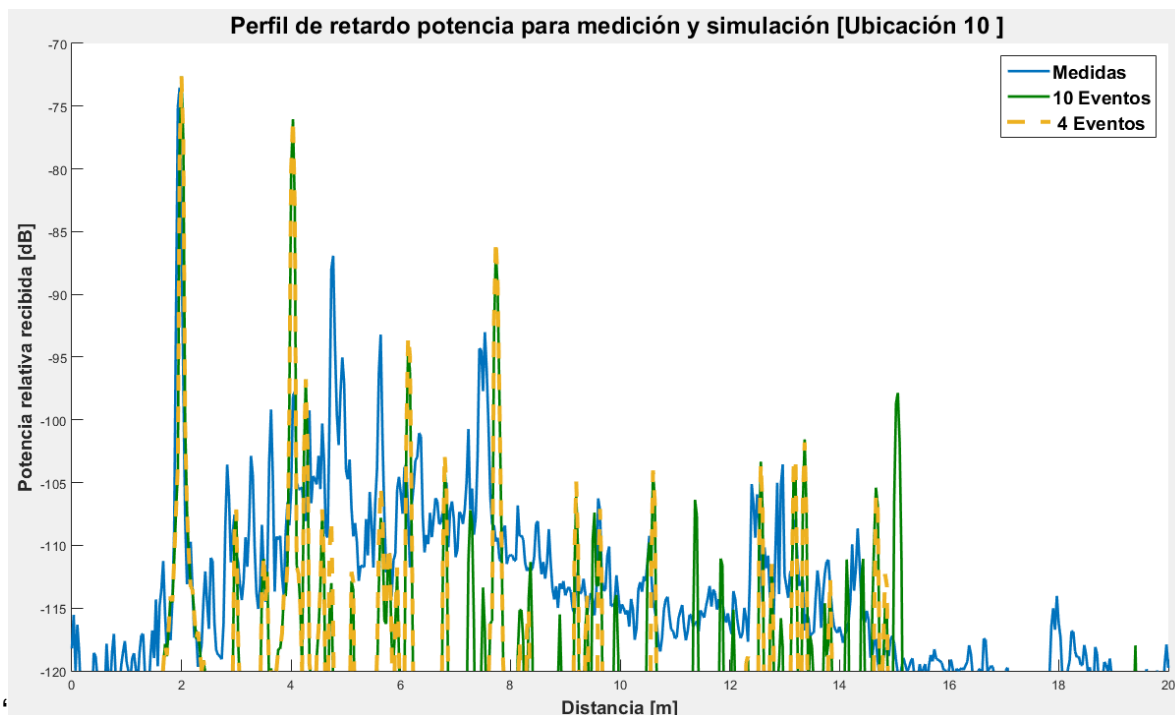


Figura 4.14. Valores de mediciones y simulaciones para 4 y 10 eventos en la ubicación 10 con sus respectivos cálculos estadísticos

Los resultados de las medidas y las simulaciones para la ubicación 16 se muestran en la Tabla 4.11 y en la Figura 4.15. Los aportes debidos a las réplicas de las simulaciones provocan que existan diferencias en el RMS al comparar con las mediciones, resultando un factor notorio en las estadísticas de error. Sin embargo, para el caso del PL se tienen valores promedio por debajo de medio dB indicando una buena aproximación de las simulaciones.

Las diferencias entre los distintos parámetros de evaluación (RMS, MD y PL) no presentan una diferencia significativa entre sus resultados para las simulaciones de 3, 4, 7 y 10 eventos. En cuanto al tap principal coinciden entre mediciones y simulaciones en el mismo tiempo por tanto a la misma distancia.

| Posición | RMS (ns) | | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | |
|----------|----------|------------|----------|------|---------|----------|------|----------------|----------|------------|
| | Medido | | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 16 | 2,673 | 3 eventos | 3,7894 | 58,2 | 4,959 | 5,8319 | 82,4 | 65,7165 | 65,2641 | 0,45 |
| | | 4 eventos | 3,7895 | 58,2 | | 5,832 | 82,4 | | 65,2639 | 0,45 |
| | | 7 eventos | 3,7895 | 58,2 | | 5,832 | 82,4 | | 65,2613 | 0,46 |
| | | 10 eventos | 3,7737 | 58,8 | | 5,8201 | 82,6 | | 65,2229 | 0,49 |

Tabla 4.11. Valores de mediciones y simulaciones para 3, 4, 7 y 10 eventos en la ubicación 16 con sus respectivos cálculos estadísticos.

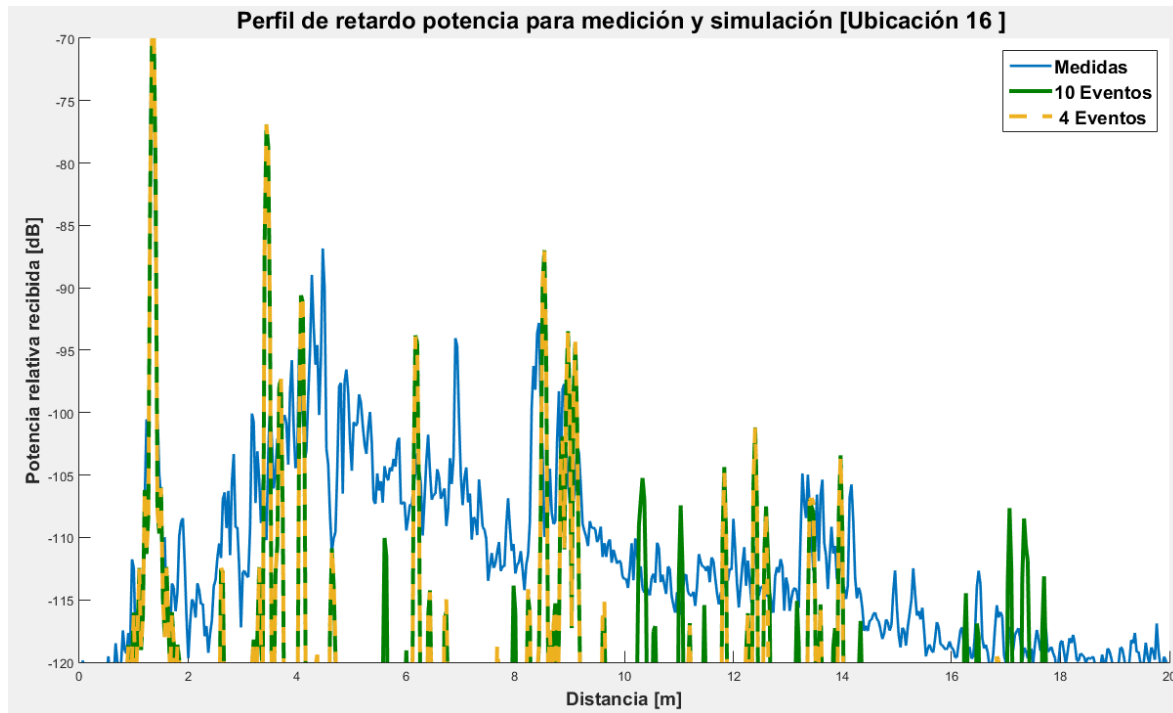


Figura 4.15. Valores de mediciones y simulaciones para 4 y 10 eventos en la ubicación 16 con sus respectivos cálculos estadísticos.

Para la ubicación 17 se tiene los resultados resumidos en la Tabla 4.12. De forma similar al punto 16, existen réplicas cuyas contribuciones afectan la estadística de error, especialmente en el RMS. La simulación con 10 eventos presenta 3 réplicas alrededor de los 16 m y una menos significativas cerca a los 14 m y a los 17.5 m que no están presentes en la simulación con 4 eventos, visibles en la Figura 4.16. En cuanto al PL se mantiene cerca de 1 dB lo que mantiene una buena precisión.

| Posición | RMS (ns) | | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | |
|----------|----------|------------|----------|------|---------|----------|------|----------------|----------|------------|
| | Medido | | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 17 | 2,651 | 3 eventos | 3,9877 | 49,5 | 6,493 | 7,5806 | 83,3 | 67,7367 | 66,8583 | 0,88 |
| | | 4 eventos | 3,9868 | 49,6 | | 7,5801 | 83,3 | | 66,8560 | 0,88 |
| | | 7 eventos | 4,3407 | 36,2 | | 7,6703 | 81,9 | | 66,8388 | 0,90 |
| | | 10 eventos | 4,1845 | 42,1 | | 7,5894 | 83,1 | | 66,7242 | 1,01 |

Tabla 4.12. Valores de mediciones y simulaciones para 3, 4, 7 y 10 eventos en la ubicación 17 con sus respectivos cálculos estadísticos.

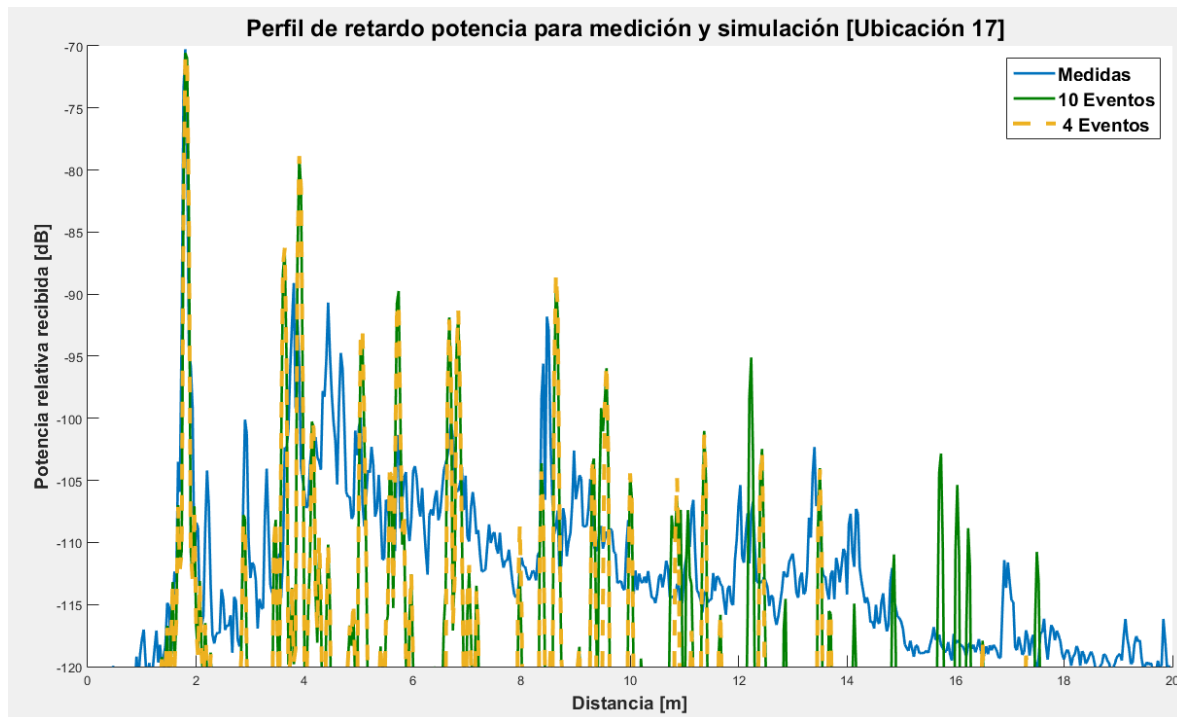


Figura 4.16. Valores de mediciones y simulaciones para 3, 4, 7 y 10 eventos en la ubicación 17 con sus respectivos cálculos estadísticos.

4.2.4. Comparación del lanzador y el trazador de rayos

En la Universidad Politécnica de Cartagena se ha desarrollado un software en Matlab[®] usando la técnica de trazado de rayos [84]. Como se mencionó anteriormente, esta técnica utiliza la teoría de imágenes a partir de las imágenes simples y de orden superior y no emplea la aceleración por hardware. El trazador de rayos emplea en promedio 13 horas para obtener la respuesta del sistema en una ubicación con un máximo de 3 eventos.

Para comparar las simulaciones y la medición se emplearon las ubicaciones en las posiciones 3, 7, 11 y 18. La simulación con el lanzador de rayos se ajustó a 3 eventos para que, en ambas técnicas, lanzamiento de rayos y trazado de rayos sea con iguales condiciones. Sin embargo, se presenta el detalle de las simulaciones con mayores cantidades de eventos a modo de comparativa. Para este análisis, el trazador de rayos es capaz de incluir rayos que sufren hasta tres reflexiones, difracciones simples, hasta dos reflexiones tras una difracción y dos reflexiones con una difracción posterior. Los resultados para las posiciones 3, 7, 11 y 18 se encuentran en las figuras 15, 16, 17 y 18 respectivamente.

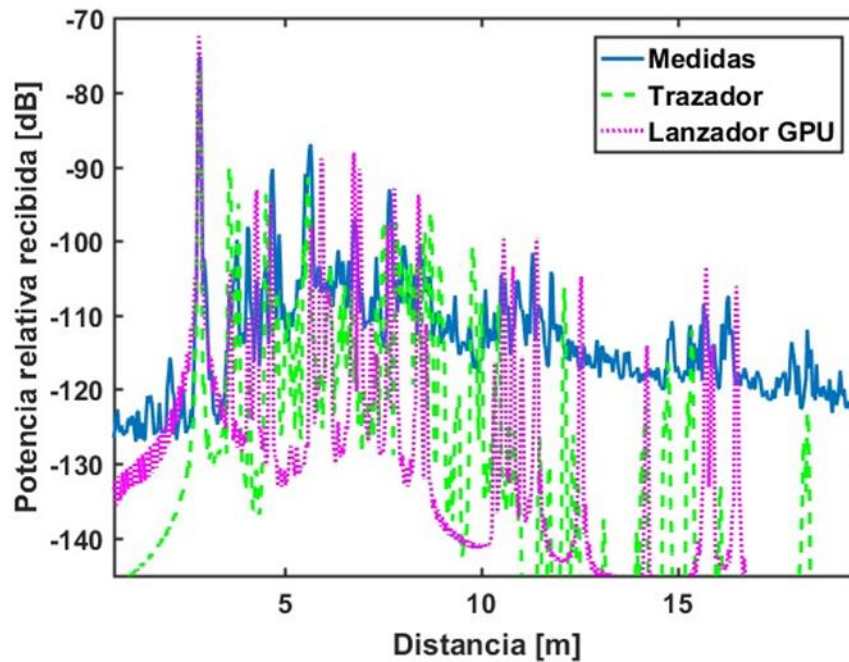


Figura 4.17. PDP para la ubicación 3 comparando los resultados del lanzador y trazador de rayos con respecto de las medidas.

En la Figura 4.17 se han mostrado los resultados para el punto 3, donde se verifica las similitudes. Las comparativas cuantitativas se sintetizan en la Tabla 4.13.

| Posición | RMS [ns] | | | MD [ns] | | | Path Loss [dB] | | | |
|----------|------------|----------|--------|---------|----------|---------|----------------|----------|------------|------|
| | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia | |
| 3 | Trazador | 4.2527 | 4.4100 | 96.30 | 11.249 | 11.0100 | 97.9 | 70.7453 | 74.0000 | 3.25 |
| | 3 eventos | | 3.9966 | 93.98 | | 10.7594 | 95.6 | | 69.6471 | 1.10 |
| | 4 eventos | | 4.9550 | 83.49 | | 11.8045 | 95.1 | | 69.2116 | 1.53 |
| | 7 eventos | | 5.0921 | 80.26 | | 11.8377 | 94.8 | | 69.1951 | 1.55 |
| | 10 eventos | | 4.8356 | 86.29 | | 11.5676 | 97.2 | | 69.4018 | 1.34 |

Tabla 4.13. PDP para la ubicación 3 comparando los resultados del lanzador y trazador de rayos con respecto de las medidas.

Para la ubicación 3, se puede verificar que, para 3 eventos, el trazador posee mayor número de réplicas que el lanzador, haciendo mejor aproximación dado su ponderación de potencia. Los resultados son muy similares, sin embargo, el lanzador ofrece mejores resultados en las pérdidas básicas de propagación.

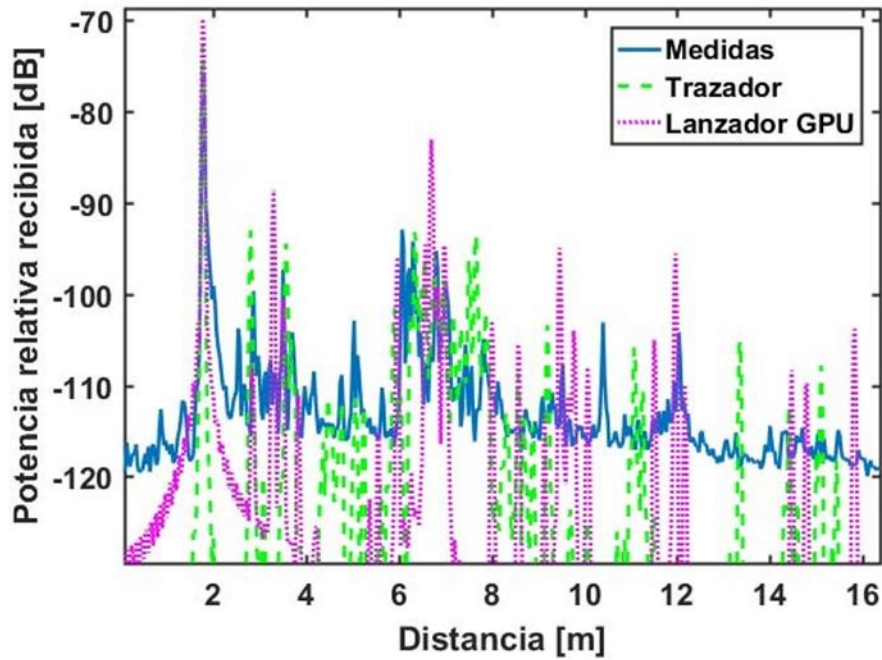


Figura 4.18. PDP para la ubicación 7 comparando los resultados del lanzador y trazador de rayos con respecto de las medidas.

En las En la Figura 4.18 se han mostrado los resultados para el punto 7 y los resultados cuantitativos en la Tabla 4.14.

| Posición | RMS [ns] | | | MD [ns] | | | Path Loss [dB] | | | |
|----------|------------|----------|--------|---------|----------|--------|----------------|----------|------------|------|
| | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia | |
| 7 | Trazador | 3.7708 | 4.4100 | 83.05 | 6.906 | 6.7000 | 97.0 | 72.0829 | 74.0000 | 1.92 |
| | 3 eventos | | 4.1649 | 89.55 | | 6.973 | 99.0 | | 67.1486 | 4.93 |
| | 4 eventos | | 4.2181 | 88.14 | | 6.9929 | 98.7 | | 67.1372 | 4.95 |
| | 7 eventos | | 4.7776 | 73.30 | | 7.1438 | 96.6 | | 67.1015 | 4.98 |
| | 10 eventos | | 4.8689 | 70.88 | | 7.1654 | 96.2 | | 67.2502 | 4.83 |

Tabla 4.14. PDP para la ubicación 7 comparando los resultados del lanzador y trazador de rayos con respecto de las medidas.

Para la ubicación 7, mejora el trazador en RMS y el MD con respecto del trazador. Siendo resultados similares, el lanzador no es preciso en las pérdidas de propagación. Resultados en contraste al punto 3. La razón es el significativo grupo de réplicas que se presentan en el trazador y que en el lanzador aparecen de forma parcial en el intervalo entre los 4 y 8 metros.

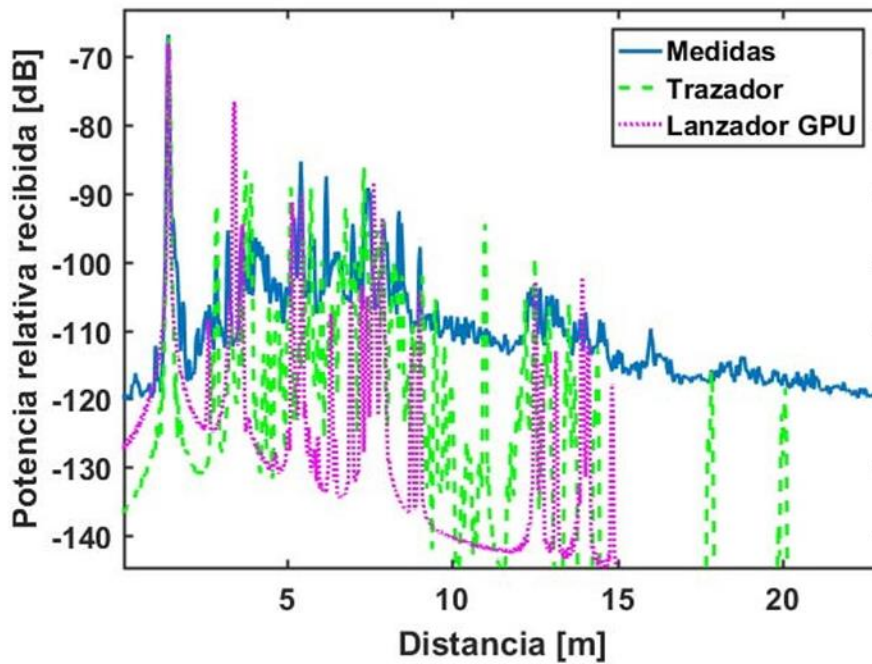


Figura 4.19. PDP para la ubicación 11 comparando los resultados del lanzador y trazador de rayos con respecto de las medidas.

En las En la Figura 4.19 se han mostrado los resultados para el punto 11 y los resultados cuantitativos en la Tabla 4.15.

| Posición | RMS [ns] | | | MD [ns] | | | Path Loss [dB] | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 11 | Trazador | 4.2527 | 3.0900 | 72.66 | 5.5278 | 5.4400 | 98.4 | 63.7790 | 64.0000 | 0.22 |
| | 3 eventos | | 3.4068 | 80.11 | | 6.1663 | 88.4 | | 65.3086 | 1.53 |
| | 4 eventos | | 3.4416 | 80.93 | | 6.1808 | 88.2 | | 65.2974 | 1.52 |
| | 7 eventos | | 3.5054 | 82.43 | | 6.2124 | 87.6 | | 65.2800 | 1.50 |
| | 10 eventos | | 3.4328 | 80.72 | | 6.1888 | 88.0 | | 65.3173 | 1.54 |

Tabla 4.15. PDP para la ubicación 11 comparando los resultados del lanzador y trazador de rayos con respecto de las medidas.

Finalmente se muestran los resultados para la ubicación 18. En la Figura 4.20 se han mostrado los resultados para el punto 18 y los resultados cuantitativos en la Tabla 4.16.

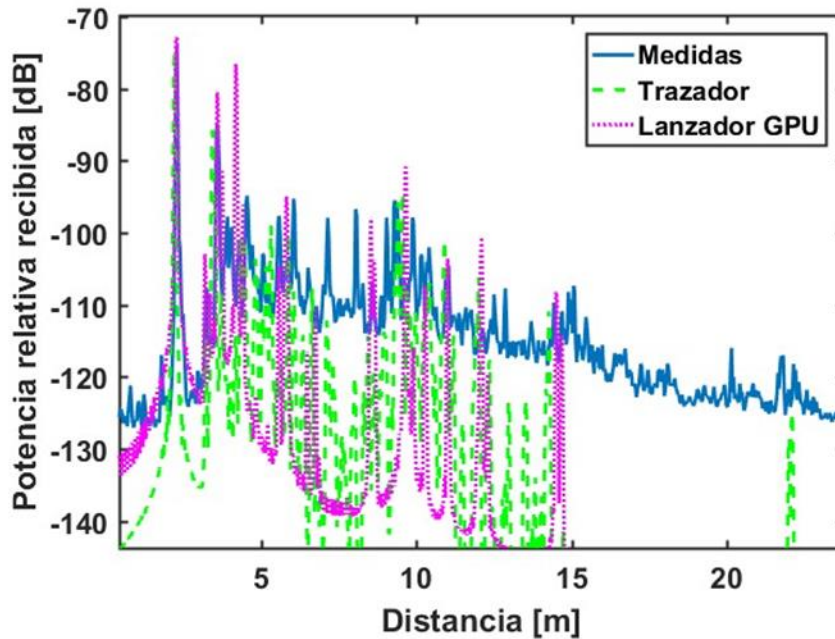


Figura 4.20. PDP para la ubicación 18 comparando los resultados del lanzador y trazador de rayos con respecto de las medidas.

| Posición | RMS [ns] | | | MD [ns] | | | Path Loss [dB] | | | |
|----------|------------|----------|--------|---------|----------|---------|----------------|----------|------------|------|
| | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia | |
| 18 | Trazador | 4.2527 | 3.7000 | 87.00 | 8.9852 | 8.2600 | 91.9 | 70.6972 | 72.0000 | 1.30 |
| | 3 eventos | | 3.6512 | 85.86 | | 9.5466 | 93.8 | | 67.8272 | 2.87 |
| | 4 eventos | | 3.6595 | 86.05 | | 9.5494 | 93.7 | | 67.8236 | 2.87 |
| | 7 eventos | | 6.7279 | 41.80 | | 11.2932 | 74.3 | | 67.4362 | 3.26 |
| | 10 eventos | | 6.2543 | 52.93 | | 11.037 | 77.2 | | 67.3745 | 3.32 |

Tabla 4.16. PDP para la ubicación 18 comparando los resultados del lanzador y trazador de rayos con respecto de las medidas.

4.2.5. Aportes de la difusión

Para analizar la contribución de la difusión se implementó el modelo directivo presentado en la sección 2.11.2. Los parámetros empleados en los materiales que componen el escenario de prueba para la simulación fueron los reportados en la Tabla 4.17.

La Figura 4.21 muestra el PDP para cada situación: medidas, simulación con el trazador de rayo y simulación con el lanzador de rayos. Para los cálculos de estimación de error se emplea un corte a 30 dB.

| Elemento | S | α_R |
|----------------------|-----|------------|
| Piso y columnas | 0.2 | 5 |
| Paredes y Cielo raso | 0.4 | 5 |
| Mobiliario | 0.2 | 3 |
| metal | 0.3 | 2 |
| Vidrio | 0.2 | 2 |

Tabla 4.17. Valores del coeficiente de difusión (S) y del factor de ancho de lóbulo de difusión α_R para cada material.

Al emplear el modelo directivo en la simulación del lanzador de rayos, se realiza una estimación de las contribuciones de los rayos difundidos por la rugosidad de los materiales. El valor de la conductividad de la Tabla 4.5 es útil en el cálculo de la parte imaginaria de la permitividad relativa compleja, a ser utilizada. Sin embargo, se emplea la conductividad para calcular el valor imaginario en cada frecuencia deseada. En cuanto a la fase, es de notar que cada punto fuente en la difusión posee su fase aleatoria y esta fase aleatoria va a ser constante para todas las frecuencias del ancho de banda. Posteriormente, son sumados la fase aleatoria a la fase debida la distancia recorrida y así, obtener el campo total complejo debido al escáter difuso para cada componente.

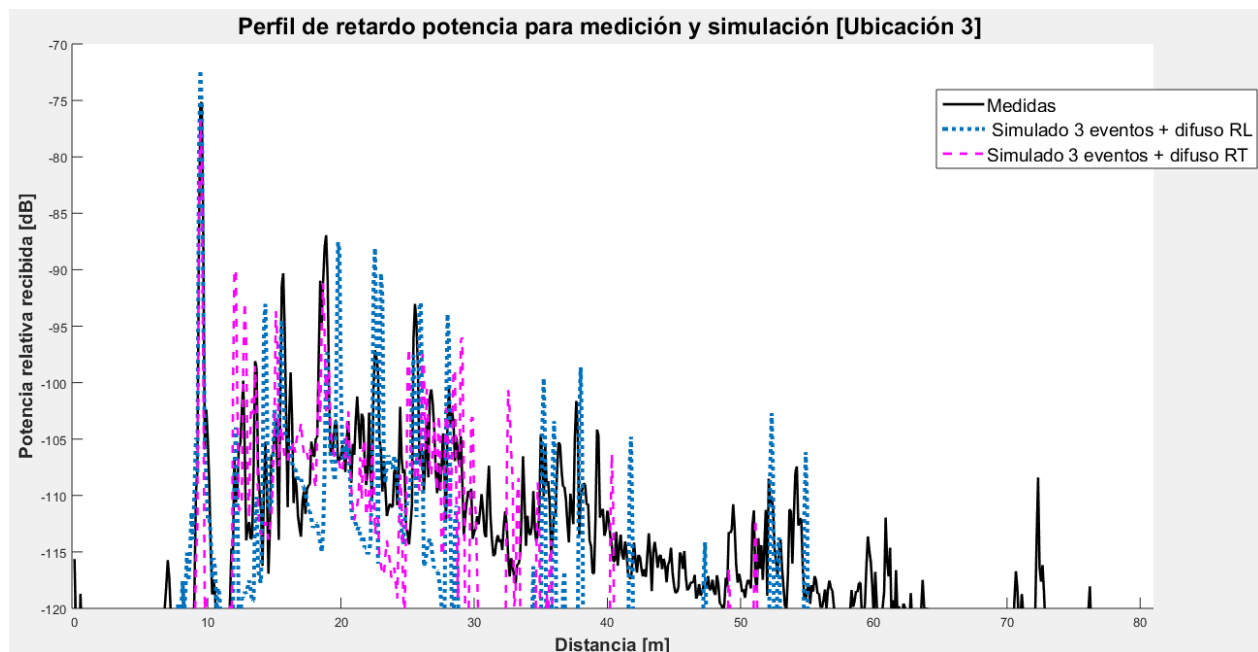


Figura 4.21. Comparativa del los PDP para las medidas, simulaciones con el trazador (RT) y el lanzador (RL) con difusión.

En la figura anterior se evidencian las contribuciones de la difusión. En los dos casos, trazador y lanzador se obtiene un ajuste a las medidas que mejora la estimación. Esto se aprecia en la Tabla 4.18. En el RMS el trazador presenta mayor precisión, sin embargo, es de notar que las réplicas consideradas en el rango de 30 dB permiten que la simulación esté por encima del valor medido. Por otra parte, el lanzador ajusta los resultados en comparación con la Tabla 4.13, en donde no están presentes las contribuciones de la difusión, mostrando una tendencia hacia el valor de las mediciones y por debajo de éstas. Esto evidencia el efecto

de mejora que provoca la difusión con el modelo directivo en la simulación del lanzador la aceleración por hardware.

| Posición | RMS [ns] | | | MD [ns] | | | Path Loss [dB] | | | |
|----------|---------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 3 | RT | 4.227 | 4.39 | 96.14 | 11.227 | 11.07 | 98.60 | 70.7453 | 73.74 | 2.99 |
| | RT + Difusión | | 4.45 | 94.72 | | 10.72 | 95.48 | | 73.8 | 3.05 |
| | RL | | 3.9966 | 94.55 | | 10.7594 | 95.84 | | 69.6471 | 1.10 |
| | RL +Difusión | | 4.0144 | 94.97 | | 10.7847 | 96.06 | | 69.6 | 1.15 |

Tabla 4.18. Comparativa de las estadísticas entre las simulaciones por trazado de rayos (RT) , lanzamiento de rayos (RL) y los aportes de la difusión.

En cuanto al tiempo de las simulaciones, el trazador mantiene alrededor de 12 horas de duración en cada ubicación mientras el lanzador se le adicionan 4 horas a las 36, lo que confirma que el lanzador es rentable a partir del análisis de más de 3 ubicaciones candidatas.

4.3. Mapas de capacidad de canal MIMO en ondas milimétricas

Los mapas de capacidad que se obtienen se presentan como una aplicación de los parámetros de canal obtenidos a través de la simulación. Mediante ellos, es posible determinar la mejor ubicación de uno o varios receptores al interior de un escenario complejo con respecto de la ubicación de un transmisor, aclarando que este sistema de comunicaciones puede ser MIMO.

Los mapas de capacidad permiten realizar planificación, es decir, elegir el lugar donde pueden ubicarse los dispositivos a instalarse en un recinto conociendo, de antemano a su implementación, su rendimiento en cuanto a transmisión de información se refiere.

Para implementar el mapa de capacidad de canal se tomó como escenario de prueba el laboratorio de la Universidad Politécnica de Cartagena, mismo recinto que se analizó en el inciso anterior para obtener sus parámetros de canal y compararle con mediciones. En esta aplicación se realizó el cálculo de la capacidad de canal de cada una de las frecuencias y luego se promedió. En cuanto a la Relación Señal a Ruido (SNR; *Signal to Noise Ratios*) se consideró igual para todos los puntos de frecuencia (4096), con lo cual el valor de capacidad entrega un valor donde sólo tiene en cuenta la riqueza dispersiva del entorno.

En la Figura 4.22 se muestra el mapa de capacidad de canal normalizado obtenido con los parámetros de canal del inciso anterior. Los puntos fucsias representan la ubicación de los puntos de medida, tal como se hace referencia en la Figura 4.6.

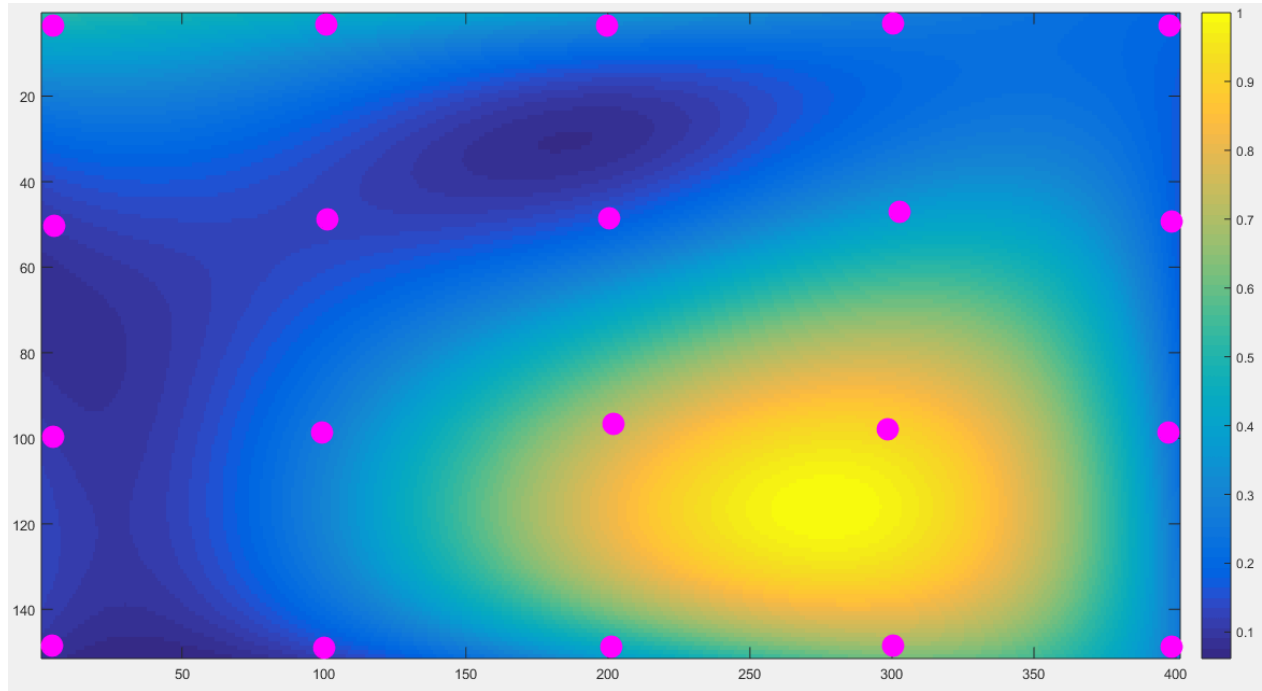


Figura 4.22. Mapa de capacidad de canal normalizado para el escenario de pruebas de la UPCT.

La mejor capacidad de canal se reporta en la vecindad de la ubicación 14. Es de notar que es alrededor de estos puntos en donde las contribuciones debidas a los eventos de reflexión, difracción y sus combinaciones aportan taps significativos.

5. CONCLUSIONES

Se obtuvo, con el uso de software libre, un modelo geoespacial en tres dimensiones que contiene las características físicas de los materiales que componen los escenarios trabajados. Con los resultados obtenidos se ha demostrado que la precisión obtenida en las simulaciones mejora con la clasificación de los materiales que conforman los dispersores. La caracterización de los materiales a diferentes frecuencias se convierte en un área de investigación necesaria con el fin de conocer sus propiedades físicas, las cuales determinan mayor aproximación a la realidad y con ello, sustituir las costosas campañas de medida.

Se ha determinado que las herramientas de simulación están tendiendo a las estimaciones basadas en técnicas deterministas. Es muy común conseguir aproximaciones de escenarios a dos dimensiones para atender los requerimientos de recursos computacionales demandados. Las técnicas de rayos ópticos ofrecen una precisión que mejora con el nivel de detalle del escenario de prueba y la caracterización de los materiales. Se ha hecho necesario equilibrar el tiempo computacional demandado por estos softwares con disminución del detalle de escenario. Sin embargo, se ha demostrado que con el uso de aceleración por hardware y motores de juego es posible conseguir una representación del escenario en 3D con el suficiente nivel de detalle que permita estudiar multiplicidad de puntos candidatos que, en otras herramientas se hacen para uno o unas pocas ubicaciones. La ejecución de un software con tareas distribuidas ha generado un aporte significativo, permitiendo la estimación de canal hasta con diez eventos físicos, siendo estos eventos tales como reflexión especular, difracción, la combinación de ellos en niveles de orden superior y reflexión difusa con el mismo tiempo computacional que al investigar un solo punto candidato.

En etapas en que la UIT está definiendo las bandas de frecuencia a ser estandarizadas para la explotación de servicios móviles de 5G, se han estudiado dos alternativas: la banda sub 6 GHz y las ondas milimétricas. Para la primera situación, se tiene 52 canales MIMO operando a 2.53 GHz con 3325 puntos de recepción. Se ha demostrado que el lanzador de rayos implementado en un motor de juegos y acelerado por hardware permite el análisis de canales MIMO en ambientes exteriores con gran precisión. Al revisar el impacto de la resolución angular, se aprecia el efecto ocasionado sobre la precisión. Entonces, aplicando algoritmos heurísticos que permiten la reciprocidad en difracción y mejorando la resolución angular los efectos sobre la precisión en error medio y en desviación estándar, conservando en términos prácticos el mismo tiempo computacional, afectado en el orden de minutos.

Para la situación de las ondas milimétricas, los resultados fueron comparados con campaña de medición y con un software trazador de rayos desarrollado en Matlab, ambas contribuciones de la UPCT. La campaña de medidas estuvo se realizó en 20 ubicaciones para un sistema MIMO basado en arreglos virtuales de 180 canales en un ancho de banda de 9 GHz que inicia en 57 GHz. Los resultados han mostrado que tanto el lanzador como el trazador presentan resultados bastante ajustados con respecto de las medidas. Sin embargo, el lanzador de rayos presenta rentabilidad a partir de la investigación de 3 o más ubicaciones o puntos candidatos debido a su procesamiento distribuido. Esta característica hace muy viable al lanzador de rayos implementado en motores de juego con aceleración por hardware como una herramienta computacional para evaluar diferentes puntos candidatos en un escenario específico, lo que le convierte en una opción para determinar capacidades de canal y así, optimizar la ubicación de equipos y determinar necesidades de implementar redes híbridas. La contribución de la dispersión difusa fue analizada para la situación de ondas milimétricas y comparada con el trazador de rayos implementado en Matlab. El aporte en la resultante mejora la precisión de la estimación de canal en un factor notorio debido a mejor definición de los taps que se encuentra en el umbral de 30 dB considerado, repercutiendo en el acercamiento en los parámetros de RMS Delay Spread, MD y Path Loss. Las comparativas confirman que el lanzador de rayos es rentable a partir de la investigación de 3 o más puntos candidatos al incluir la difusión.

Con este trabajo se ha demostrado que las técnicas de rayos ópticos son la herramienta computacional para obtener de forma precisa una estimación de canal MIMO en un amplio rango de frecuencias que, aunque los canales investigados no se consideren MIMO masivo, son una cantidad significativa para mostrar que computacionalmente el lanzador de rayos implementado en motores de juego y acelerado por hardware es viable como software para simular, analizar y optimizar sistemas móviles de 5G.

6. TRABAJOS FUTUROS

- Generar modelos que permitan estimar el comportamiento de un escenario con movimiento de personas y vegetación.
- Investigar la precisión del lanzador de rayos implementado en motores de juego y acelerado por hardware en frecuencias alrededor de 100 GHz o superiores comparándole con campañas de medición y otras herramientas computacionales.
- Comparar la precisión del lanzador de rayos implementado en motores de juego y acelerado por hardware con un software comercial de reconocido prestigio, ajustándole para hacerle más competitivo y rentable.

REFERENCIAS

- [1] J. Calabuig, J. F. Monserrat, and D. Gomez-Barquero, "5th generation mobile networks: A new opportunity for the convergence of mobile broadband and broadcast services," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 2, pp. 198–205, Feb. 2015.
- [2] G. Fettweis and S. Alamouti, "5G: Personal mobile internet beyond what cellular did to telephony," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 140–145, 2014.
- [3] S. Oh and N. Myung, "MIMO channel estimation method using ray-tracing propagation model," *Electron. Lett.*, 2004.
- [4] E. Björnson, E. G. Larsson, and M. Debbah, "Massive MIMO for Maximal Spectral Efficiency: How Many Users and Pilots Should Be Allocated?," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 15, no. submitted, p. 30, 2014.
- [5] S. Yost, "mmWave : Battle of the Bands," 2016.
- [6] R. Bhagavatula, C. Oestges, and R. W. Heath, "A new double-directional channel model including antenna patterns, array orientation, and depolarization," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 2219–2231, 2010.
- [7] S. Soni and A. Bhattacharya, "An efficient two-dimensional ray-tracing algorithm for modeling of urban microcellular environments," *AEUE - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 66, no. 6, pp. 439–447, 2012.
- [8] V. Degli-Esposti, "Ray Tracing propagation modelling: Future prospects," *Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP 2014)*, no. EuCAP, p. 2232, 2014.
- [9] J. Pascual-garcía, "On the Importance of Diffuse Scattering Model Parameterization in Indoor Wireless Channels at mm-Wave Frequencies," vol. 4, pp. 1–14, 2016.
- [10] M. Martinez-Ingles and J. Pascual-García, "Indoor radio channel characterization at 60 GHz," (*EuCAP*), 2013 7th ..., 2013.
- [11] D. Dupleich *et al.*, "Polarimetric wide-band directional characterization at mm-Wave in a small office scenario," in *European Cooperation In The Field Of Scientific And Technical Research*, 2014, no. 14.
- [12] J. Järveläinen and K. Haneda, "Sixty gigahertz indoor radiowave propagation prediction method based on full scattering model," *Radio Sci.*, vol. 49, pp. 293–305, 2014.
- [13] A. Navarro and D. Guevara, "Applicability of game engine for ray tracing techniques in a complex urban environment," in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2010, no. 122.
- [14] V. Degli-Esposti *et al.*, "Ray-tracing-based mm-wave beamforming assessment," *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1314–1325, 2014.

-
- [15] A. Navarro and D. Guevara, "Using Game Engines for ray tracing techniques and channel characterization," in *COST 2100 TD(09) 851*, 2009, no. 122, pp. 1–5.
- [16] A. Navarro, D. Guevara, and N. Cardona, "Using game engines and graphic technologies for ray-tracing in future wireless," *Antennas Propag. (EuCAP), 8th Eur. Conf.*, no. EuCAP, pp. 1780–1784, 2014.
- [17] J. Yu *et al.*, "Channel maps and stochastic models in elevation based on measurements in operating networks," in *2013 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, WCSP 2013*, 2013, pp. 1–6.
- [18] H. Suzuki, S. Member, and A. S. Mohan, "Measurement and Prediction of High Spatial Resolution Indoor Radio Channel Characteristic Map," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 4, pp. 1321–1333, 2000.
- [19] J. Weng, X. Tu, Z. Lai, S. Salous, and J. Zhang, "Modelling the mmWave channel based on intelligent ray launching model," *2015 9th Eur. Conf. Antennas Propag.*, no. 2, pp. 1–4, 2015.
- [20] J. Weng, J. Rigelsford, and J. Zhang, "A Simulation Based Distributed MIMO Network Optimisation Using Channel Map," *piers.org*, 2010.
- [21] M. Zhu, A. Singh, and F. Tufvesson, "Measurement based ray launching for analysis of outdoor propagation," *Proc. 6th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2012*, pp. 3332–3336, 2012.
- [22] C. Gustafson, K. Haneda, S. Wyne, and F. Tufvesson, "On mm-wave multipath clustering and channel modeling," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 3, pp. 1445–1455, 2014.
- [23] IEEE 802.15 WPAN and G. Task, "Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), Amendment 2: Millimeter-Wavebased Alternative Physical Layer Extension," 2009.
- [24] IEEE, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band, IEEE802.11ad draft," 2011.
- [25] P. Smulders, "Exploiting the 60 GHz band for local wireless multimedia access: Prospects and future directions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 1, pp. 140–147, 2002.
- [26] J. Pascual-garcia, J. Molin, and V. Degli-esposti, "Experimental parameterization of a diffuse scattering model at 60 GHz," in *Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 2015 IEEE-APS Topical Conference on*, 2015, pp. 734–737.
- [27] J. Ahmadi-Shokouh, S. Noghianian, and H. Keshavarz, "Reflection coefficient measurement for north american house flooring at 57-64 GHz," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 10, no. 2, pp. 1321–1324, 2011.
- [28] I. Wald, W. Mark, and J. Günther, "State of the art in ray tracing animated scenes,"

- Comput. Graph. ...*, 2009.
- [29] P. Ufimtsev, "Fundamentals of the physical theory of diffraction," 2007.
- [30] J. Jemai and P. Eggers, "Calibration of a UWB sub-band channel model using simulated annealing," ... *Propagation, IEEE ...*, 2009.
- [31] F. Ikegami, S. Yoshida, and T. Takeuchi, "Theoretical prediction of mean field strength for urban mobile radio," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 39, no. 3, p. 4, 1991.
- [32] J. P. Rossi and A. J. Levy, "A ray model for decimetric radiowave propagation in an urban area," *Radio Sci.*, vol. 27, no. 6, pp. 971–979, 1992.
- [33] J. W. McKown and R. L. Hamilton, "Ray tracing as a design tool for radio networks," *IEEE Netw.*, vol. 5, no. 6, pp. 27–30, 1991.
- [34] J. G. Rubio, "Aplicación del método de monte Carlo en la simulación numérica de respuestas impulsivas en salas. validación y determinación del error de da técnica del trazado de rayos," Universidad de la Laguna, 1997.
- [35] A. G. Dimitriou, S. M. Ieee, and G. D. Sergiadis, "A Novel , Shooting and Bouncing Rays Tech- nique for Propagation Prediction , Based on a Varying-Step Calculation Procedure," in *5th Mediterranean Microwave Symposium*, 2005, vol. 54124, pp. 1–6.
- [36] N. Razavi-Ghods, "Characterisation of MIMO radio propagation channels," Durham University, 2007.
- [37] M. F. Iskander, "Propagation prediction models for wireless communication systems," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 662–673, Mar. 2002.
- [38] F. Fuschini, V. Degli-Esposti, and E. M. Vitucci, "A model for forward-diffuse scattering through a wall," *4th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP 2010)*, pp. 1–4, 2010.
- [39] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*. Pearson Education, Limited, 2013.
- [40] R. J. Luebbers, "Comparison of lossy wedge diffraction coefficients with application to mixed path propagation loss prediction," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 36, no. 7, pp. 1031–1034, 1988.
- [41] R. Luebbers, "Finite Conductivity Uniform GTD Versus Knife Edge Diffraction in Prediction of Propagation Path Loss," *Antennas Propagation, IEEE Trans.*, pp. 70–76, 1984.
- [42] A. Navarro, D. Guevara, and J. Gomez, "Prediction of delay spread using ray tracing and game engine based on measurement," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2015, 2015.
- [43] D. Tami *et al.*, "Comparison of heuristic UTD coefficients in an outdoor scenario," in *9th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP*, 2015, pp. 2–5.
- [44] R. J. Luebbers, "Heuristic UTD slope diffraction coefficient for rough lossy wedges," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 37, no. 2, pp. 206–211, 1989.
- [45] P. B. S. Kumar and G. S. Ranganath, "Geometrical theory of diffraction," *Pramana*, vol. 37, no. 6. pp. 457–488, 1991.
- [46] T. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*, 2°. Prentice Hall, 1996.

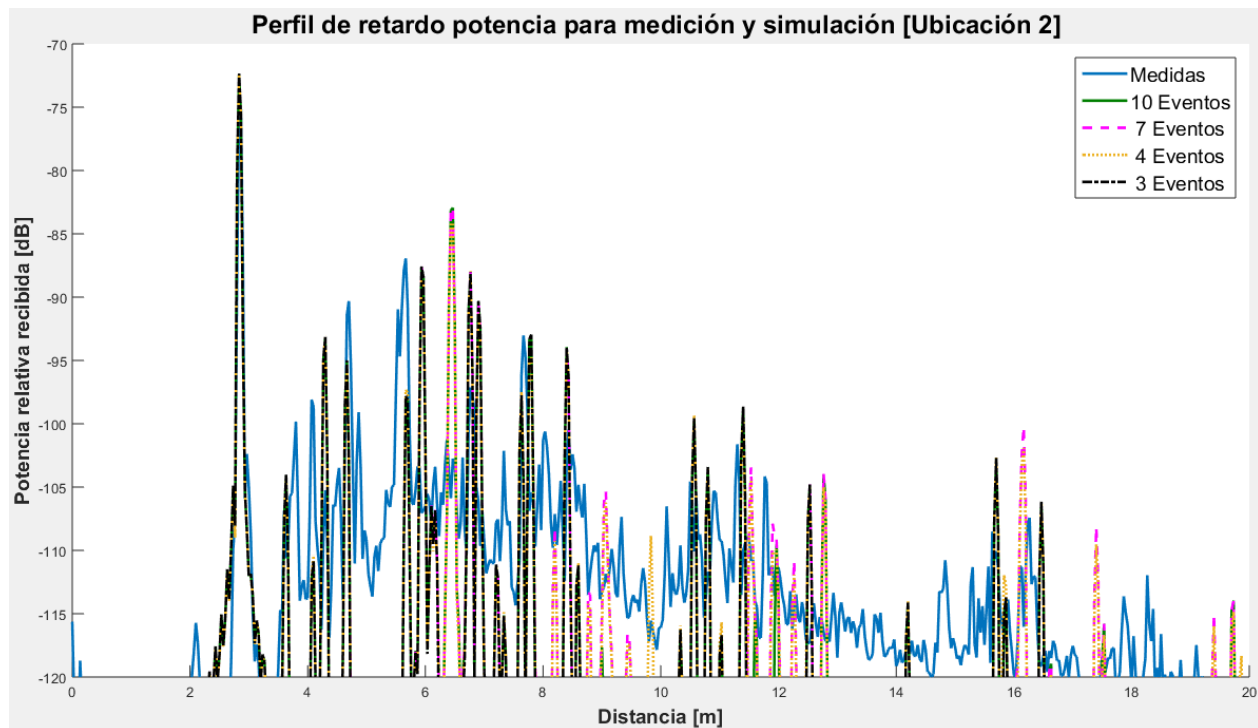
-
- [47] L. Dong, G. Xu, and H. Ling, "Prediction of fast fading mobile radio channels in wideband communication systems," *Glob. Telecommun. Conf. ...*, 2001.
- [48] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [49] T. K. Sarkar, M. C. Wicks, M. Salazar-Palma, and R. J. Bonneau, *Smart Antennas*. John Wiley & Sons, 2005.
- [50] J. Liberti and T. Rappaport, "A geometrically based model for line-of-sight multipath radio channels," ... *Hum. Race., IEEE 46th*, 1996.
- [51] N. Jaldén, "Modelling angle spread autocorrelations and the impact on multi-user diversity gains," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2010, pp. 1–6.
- [52] J. Foutz, A. Spanias, and M. K. Banavar, *Narrowband Direction of Arrival Estimation for Antenna Arrays*. Morgan & Claypool Publishers, 2008.
- [53] J. R. Hampton, *Introduction to MIMO Communications*, vol. 28. Cambridge University Press, 2013.
- [54] E. Bonek and Y. Karasawa, "MIMO Propagation Channel Modeling," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E88–B, no. 5, pp. 1829–1842, 2005.
- [55] a. F. Molisch, M. Steinbauer, M. Toeltsch, E. Bonek, and R. S. Thoma, "Capacity of MIMO systems based on measured wireless channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 561–569, 2002.
- [56] Y. Azar *et al.*, "28 GHz propagation measurements for outdoor cellular communications using steerable beam antennas in New York city," *2013 IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 5143–5147, Jun. 2013.
- [57] M. Marques and F. A. Monteiro, *MIMO Processing for 4G and Beyond: Fundamentals and Evolution*. CRC Press, 2014.
- [58] V. Degli-Esposti, "Ray Tracing Propagation Modelling: Future Prospects," *8th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP 2014)*, no. EuCAP, pp. 2232–2232, 2014.
- [59] F. Mani and C. Oestgesy, "Ray-tracing evaluation of diffuse scattering in an outdoor scenario," *Proc. 5th Eur. Conf. Antennas Propag.*, pp. 3439–3443, 2011.
- [60] G. Gougeon, Y. Lohanen, and L. Maviel, "Coupling a deterministic propagation model with diffuse scattering and urban furniture for small cells," *5th Eur. Conf. Antennas Propag.*, pp. 3448–3452, 2011.
- [61] V. Degli-espsti, F. Fuschini, and E. M. Vitucci, "Implementation of a Fast Distributed Scattering Model for Ray Tracing Prediction," *EuCAP 2013*, no. Eucap, pp. 2929–2932, 2013.
- [62] V. Degli-Esposti, F. Fuschini, D. Guiducci, and E. M. Vitucci, "Studying the multi-dispersive characteristics of the radio channel - A story of collaboration and friendship with Pertti Vainikainen," *8th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2014*, vol. 273, no. October 2001, pp. 454–458, 2014.

-
- [63] L. Minghini, R. D'Errico, V. Degli Esposti, and E. M. Vitucci, "Electromagnetic simulation and measurement of diffuse scattering from building walls," *8th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2014*, no. EuCAP, pp. 1298–1302, 2014.
- [64] F. Mani and C. Oestges, "Evaluation of diffuse scattering contribution for delay spread and crosspolarization ratio prediction in an indoor scenario," *Antennas Propag. (EuCAP), 2010 Proc. Fourth Eur. Conf.*, no. 5, pp. 1–4, 2010.
- [65] V. Degli-Esposti, F. Fuschini, E. M. Vitucci, and G. Falciasecca, "Measurement and modelling of scattering from buildings," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 1, pp. 143–153, 2007.
- [66] V. Degli-Esposti, D. Guiducci, A. de'Marsi, P. Azzi, and F. Fuschini, "An advanced field prediction model including diffuse scattering," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 7, pp. 1717–1728, 2004.
- [67] F. J. Ros, J. a. Martinez, and P. M. Ruiz, "A Survey on Modeling and Simulation of Vehicular Networks: Communications, Mobility, and Tools," *Comput. Commun.*, pp. 1–15, Feb. 2014.
- [68] S. Feng and D. Li, "A research on novel direct vector method for ray tracing," *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.*, vol. 124, no. 23, pp. 6377–6381, Dec. 2013.
- [69] A. Doicu and T. Wriedt, "Plane wave spectrum of electromagnetic beams," *Opt. Commun.*, vol. 4018, no. 96, 1997.
- [70] F. Agelet, "Efficient ray-tracing acceleration techniques for radio propagation modeling," *Veh. Technol. IEEE Trans.*, vol. 49, no. 6, pp. 2089–2104, 2000.
- [71] A. Cadavid, D. Ibarra, A. Navarro Cadavid, and D. Guevara Ibarra, "Using game engines in ray tracing physics," in *2010 IEEE Latin-American Conference on Communications*, 2010, pp. 1–5.
- [72] V. Erceg, S. Fortune, and J. Ling, "Comparisons of a computer-based propagation prediction tool with experimental data collected in urban microcellular environments," *Sel. Areas Commun. IEEE J.*, vol. 15, no. 4, pp. 677–684, 1997.
- [73] K. H. Ng, E. K. Tameh, A. Doufexi, M. Hunukumbure, and A. R. Nix, "Efficient Multielement Ray Tracing With Site-Specific Comparisons Using Measured MIMO Channel Data," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 56, no. 3, pp. 1019–1032, 2007.
- [74] A. Kanatas and I. Kountouris, "A UTD propagation model in urban microcellular environments," *Veh. Technol. IEEE Trans.*, vol. 46, no. 1, pp. 185–193, 1997.
- [75] A. Cavalcante and M. de Sousa, "A Parallel Approach for 3D Ray-Tracing Techniques in the Radio Propagation Prediction," *Lat. Am. Trans. IEEE*, vol. 6, no. 1, pp. 207–219, 2007.
- [76] T. Fugen and S. Knorz, "A 3-D Ray Tracing Model for Macrocell Urban Environments and its Verification with Measurements," *Eur. Conf. Antennas Propag.*, pp. 1–6, 2007.
- [77] T. Zhou, H. Sharif, M. Hempel, P. Mahasukhon, W. Wang, and S. Ci, "A Novel Ray Tracing Based Multipath Modeling Approach for Site-Specific WLAN Simulations," *2009 IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 1–6, Jun. 2009.

-
- [78] Z. Lai, N. Bessis, and G. de LaRoche, "An intelligent ray launching for urban prediction," *Eur. Conf. Antennas Propag.*, pp. 2867–2871, 2009.
- [79] A. Navarro and D. Guevara, "Using Game Engines for Wideband Channel Estimation Parameters in Andean Cities," in *European Association on Antennas and Propagation (EurAAP)*, 2010, no. 122.
- [80] U. Macro, C. Schneider, M. Narandzic, M. Käske, G. Sommerkorn, and R. S. Thomä, "Large Scale Parameter for the WINNER II Channel," *Veh. Technol. Conf. (VTC 2010-Spring)*, 2010 *IEEE 71st*, vol. 21, 2010.
- [81] J. H. Whitteker, "Measurements of path loss at 910 MHz for proposed microcell urban mobile systems," *Veh. Technol. IEEE Trans.*, vol. 37, no. 3, pp. 125–129, 1988.
- [82] Y. Jiawang and A. R. T. Algorithm, "A new method for reducing simulation time based on ray-tracing algorithm," *Asia-Pacific Conf. Environ. Electromagn.*, pp. 163–166, 2011.
- [83] A. Gohil, H. Modi, and S. K. Patel, "5G technology of mobile communication: A survey," *2013 Int. Conf. Intell. Syst. Signal Process.*, pp. 288–292, Mar. 2013.
- [84] M. T. Martinez-Ingles, D. P. Gaillot, J. Pascual-Garcia, J. M. Molina-Garcia-Pardo, M. Lienard, and J. V. Rodríguez, "Deterministic and experimental indoor mmW channel modeling," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 13, pp. 1047–1050, 2014.
- [85] A. Navarro, D. Guevara, N. Cardon, and J. Gimenez, "Using 3D game engines and GPU for ray launching based channel modeling in indoor," in *General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, 2014 *XXXIth URSI*, 2014, pp. 14–17.
- [86] D. Guevara, "Estimación De Parámetros De Canal En Entornos 3D," Universidad Pontificia Bolivariana, 2011.
- [87] J. Philip and D. Schneider, *Geometry tools for computer graphics*. Morgan Kaufmann, 2005.
- [88] R. T. S., *Wireless Communications: Principles And Practice, 2/E*. Pearson Education, 2010.
- [89] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "A ray tracing technique to predict path loss and delay spread inside buildings," [*Conference Rec. GLOBECOM '92 - Commun. Glob. Users IEEE*], pp. 2–6, 1992.
- [90] S. Seidel and T. Rappaport, "Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design," *Veh. Technol. IEEE ...*, 1994.
- [91] M. C. Lawton and J. P. McGeehan, "The Application of a Deterministic Ray Launching Algorithm for the Prediction of Radio Channel Characteristics in Small-Cell Environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 4, pp. 955–969, 1994.
- [92] G. Durgin, N. Patwari, and T. S. Rappaport, "An advanced 3D ray launching method for wireless propagation prediction," *IEEE 47th Veh. Technol. Conf.*, vol. 2, pp. 785–789, 1997.
- [93] G. Liang and H. L. Bertoni, "A New Approach to 3-D Ray Tracing for Propagation

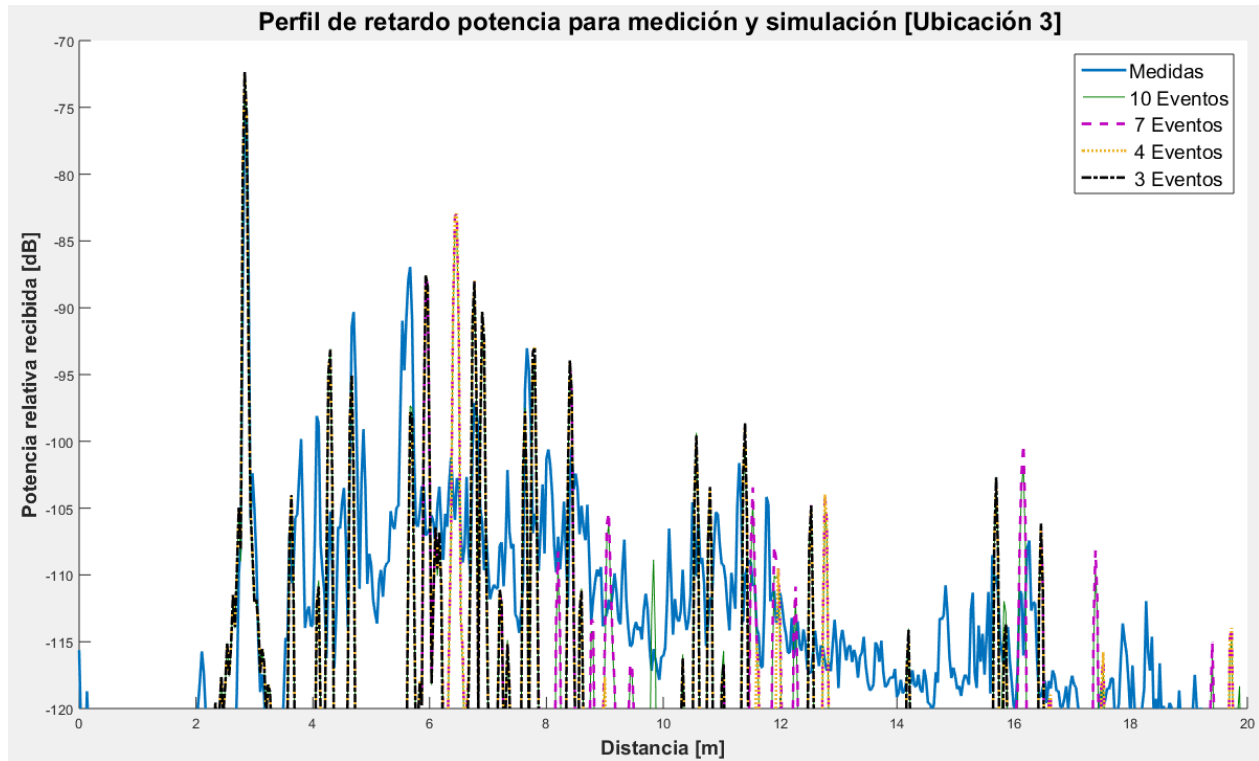
-
- Prediction in Cities,” *Antennas Propagation, IEEE Trans.*, vol. 46, no. 6, pp. 853–863, 1998.
- [94] C. ; Schneider *et al.*, “Multi-User MIMO Channel Reference Data for Channel Modelling and System Evaluation from Measurements,” *Int. ITG Work. Smart Antennas WSA*, vol. 21, 2009.
- [95] V. Mohtashami and a. a. Shishegar, “Effects of inaccuracy of material permittivities on ray tracing results for site- specific indoor propagation modeling,” *2013 IEEE-APS Top. Conf. Antennas Propag. Wirel. Commun.*, pp. 1172–1175, Sep. 2013.
- [96] C. Schneider, M. Narandzic, M. Kaske, G. Sommmerkorn, and R. Thoma, “Large scale parameter for the WINNER II channel model at 2.53 GHz in urban macro cell,” in *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), IEEE 71st*, 2010, vol. 21, pp. 1–5.
- [97] T. Rautiainen, G. Wolfle, and R. Hoppe, “Verifying path loss and delay spread predictions of a 3D ray tracing propagation model in urban environment,” *Proc. VTC*, pp. 2–6, 2002.

A.1. Gráficas y estadísticas de error para todas las ubicaciones.



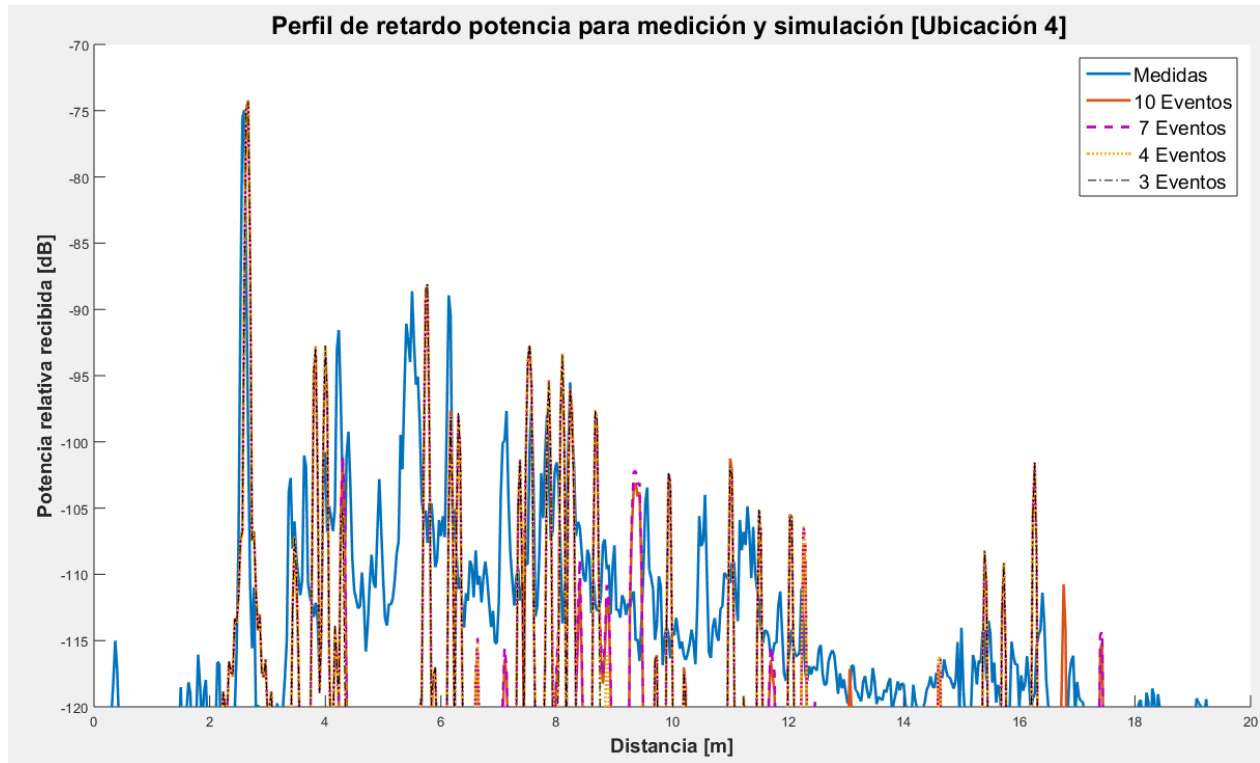
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|---------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 2 | 3 eventos | 3.939 | 4.0344 | 97.6 | 12.2761 | 11.781 | 96.0 | 71.6376 | 70.0133 | 1.62 |
| | 4 eventos | | 4.2264 | 92.7 | | 11.943 | 97.3 | | 69.9464 | 1.69 |
| | 7 eventos | | 4.1998 | 93.4 | | 11.918 | 97.1 | | 69.9476 | 1.69 |
| | 10 eventos | | 4.1603 | 94.4 | | 11.846 | 96.5 | | 69.8761 | 1.76 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 2



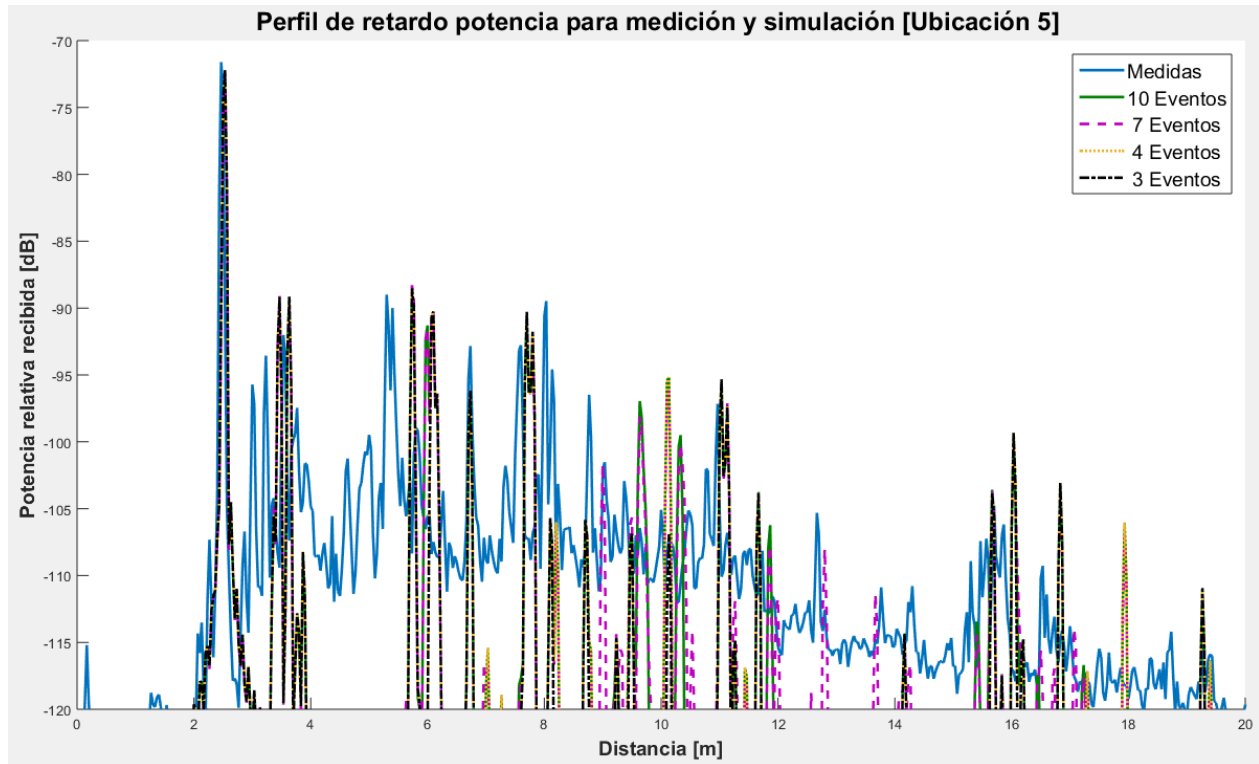
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 3 | 3 eventos | 4.227 | 3.9966 | 94.5 | 11.227 | 10.759 | 95.8 | 70.9873 | 69.6571 | 1.33 |
| | 4 eventos | | 4.955 | 82.8 | | 11.805 | 94.9 | | 69.2116 | 1.78 |
| | 7 eventos | | 5.0921 | 79.5 | | 11.838 | 94.6 | | 69.1951 | 1.79 |
| | 10 eventos | | 4.8356 | 85.6 | | 11.568 | 97.0 | | 69.4018 | 1.59 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 3



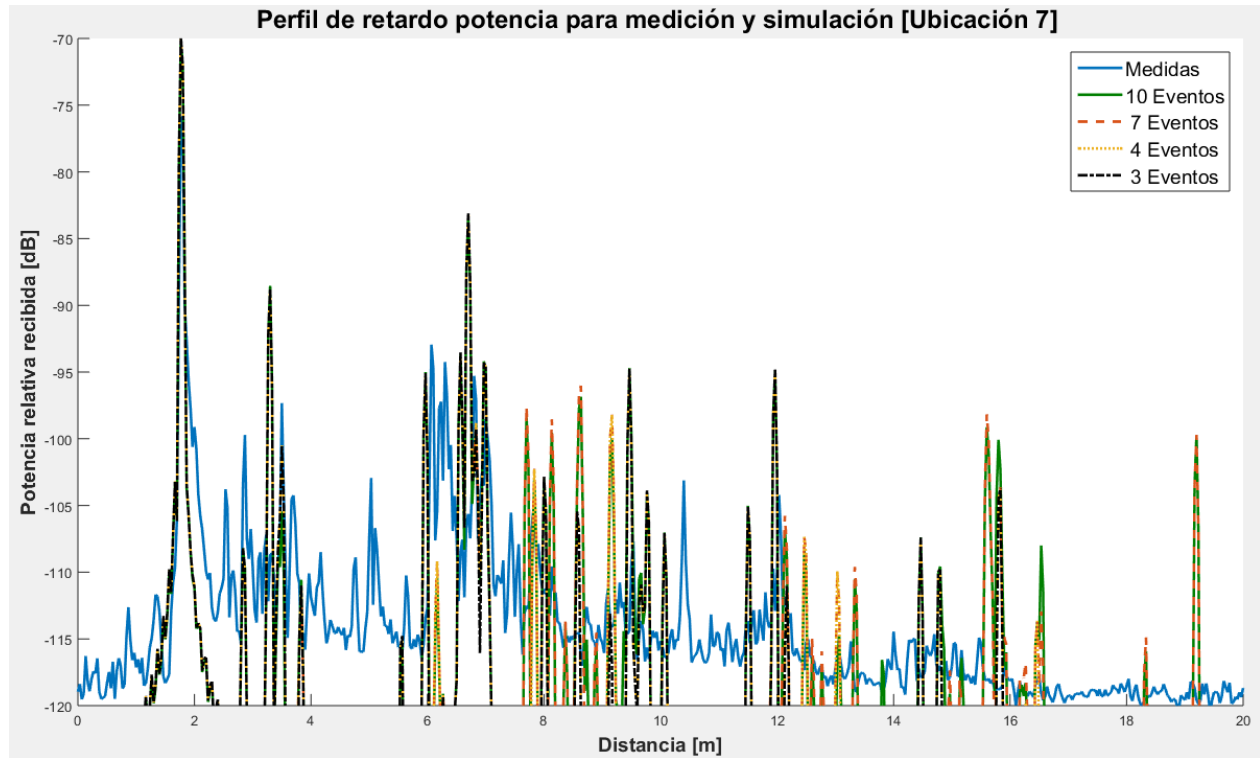
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|----------|--------|---------|----------|--------|----------------|----------|------------|------|
| | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia | |
| 4 | 3 eventos | 4.1856 | 4.3906 | 95.1 | 10.2659 | 10.189 | 99.2 | 71.1341 | 70.7816 | 0.35 |
| | 4 eventos | | 4.3907 | 95.1 | | 10.189 | 99.2 | | 70.7777 | 0.36 |
| | 7 eventos | | 4.5143 | 92.1 | | 10.248 | 99.8 | | 70.7561 | 0.38 |
| | 10 eventos | | 4.4474 | 93.7 | | 10.184 | 99.2 | | 70.7429 | 0.39 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 4



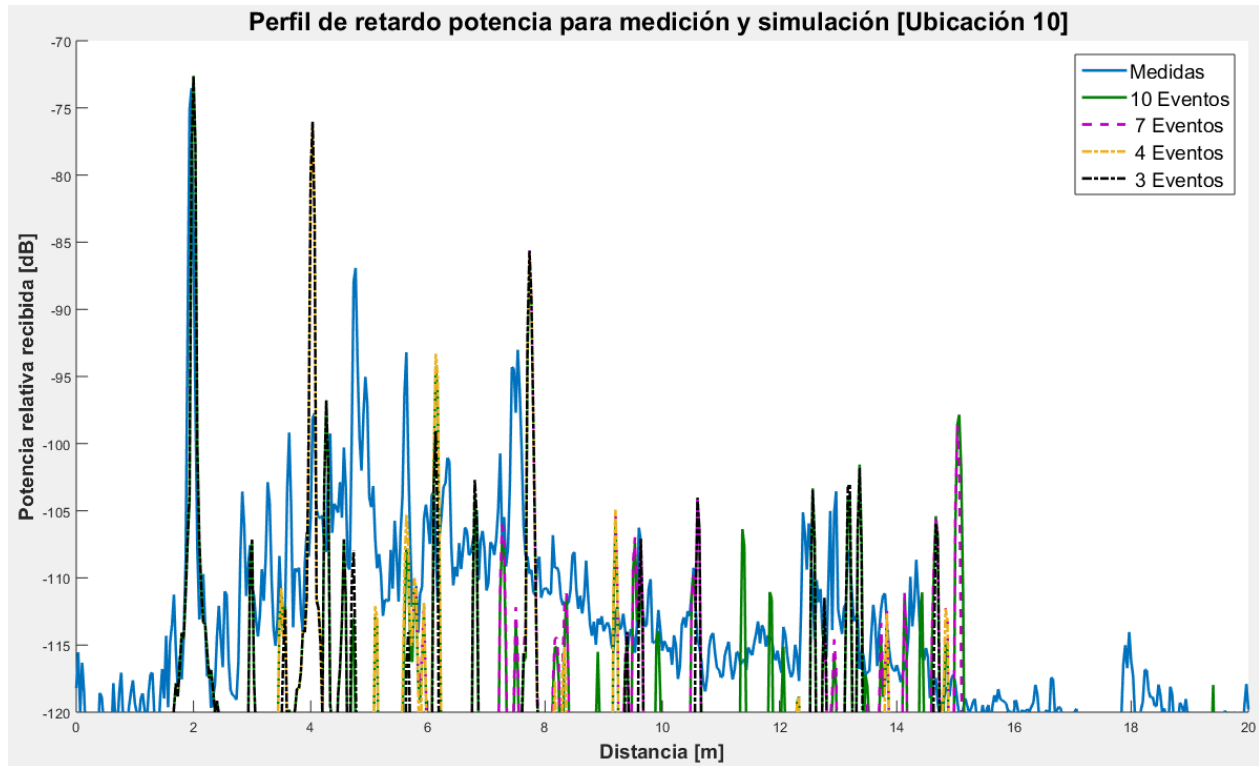
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 5 | 3 eventos | 4.0801 | 4.2376 | 96.1 | 9.4513 | 9.612 | 98.3 | 68.5624 | 69.2860 | 0.72 |
| | 4 eventos | | 4.5587 | 88.3 | | 9.7337 | 97.0 | | 69.2586 | 0.70 |
| | 7 eventos | | 4.9443 | 78.8 | | 9.9796 | 94.4 | | 69.1759 | 0.61 |
| | 10 eventos | | 4.907 | 79.7 | | 9.9747 | 94.5 | | 69.2475 | 0.69 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 5



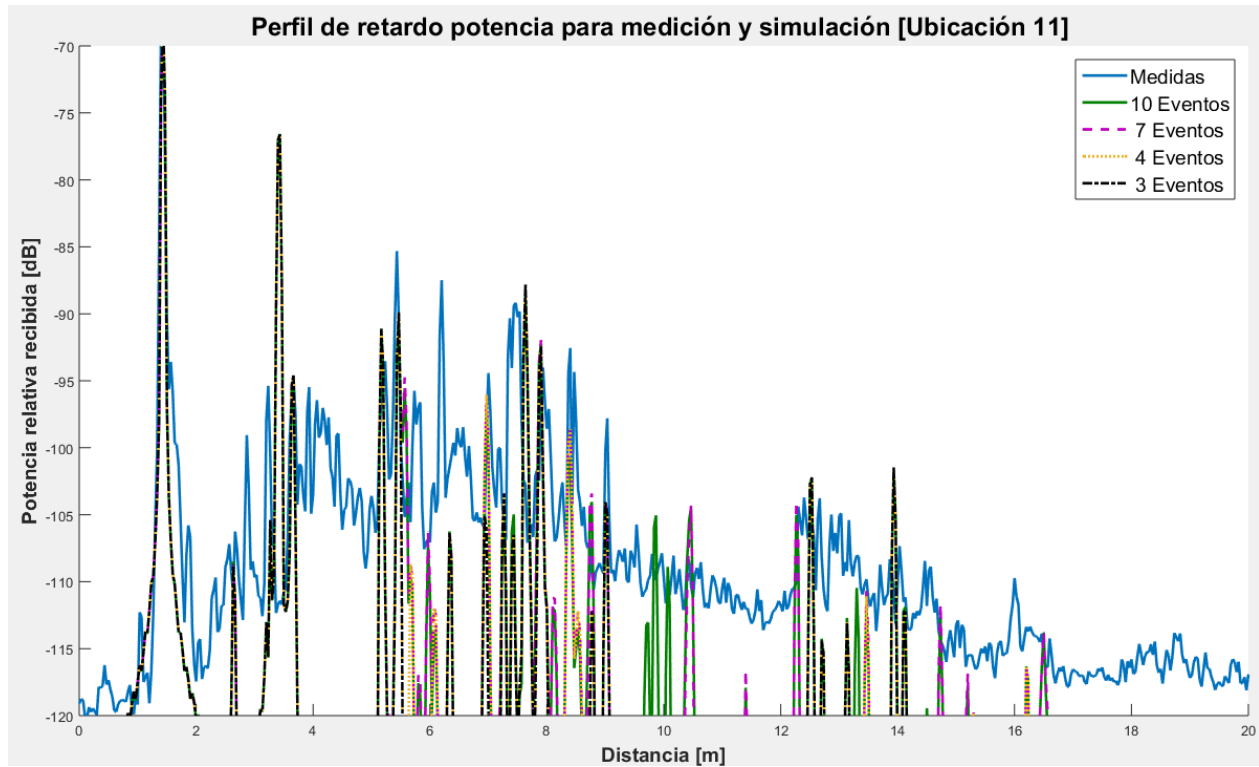
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 7 | 3 eventos | 3.7708 | 4.1649 | 89.5 | 6.906 | 6.973 | 99.0 | 72.0829 | 67.1486 | 4.93 |
| | 4 eventos | | 4.2181 | 88.1 | | 6.9929 | 98.7 | | 67.1372 | 4.95 |
| | 7 eventos | | 4.7776 | 73.3 | | 7.1438 | 96.6 | | 67.1015 | 4.98 |
| | 10 eventos | | 4.8689 | 70.9 | | 7.1654 | 96.2 | | 67.2502 | 4.83 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 7



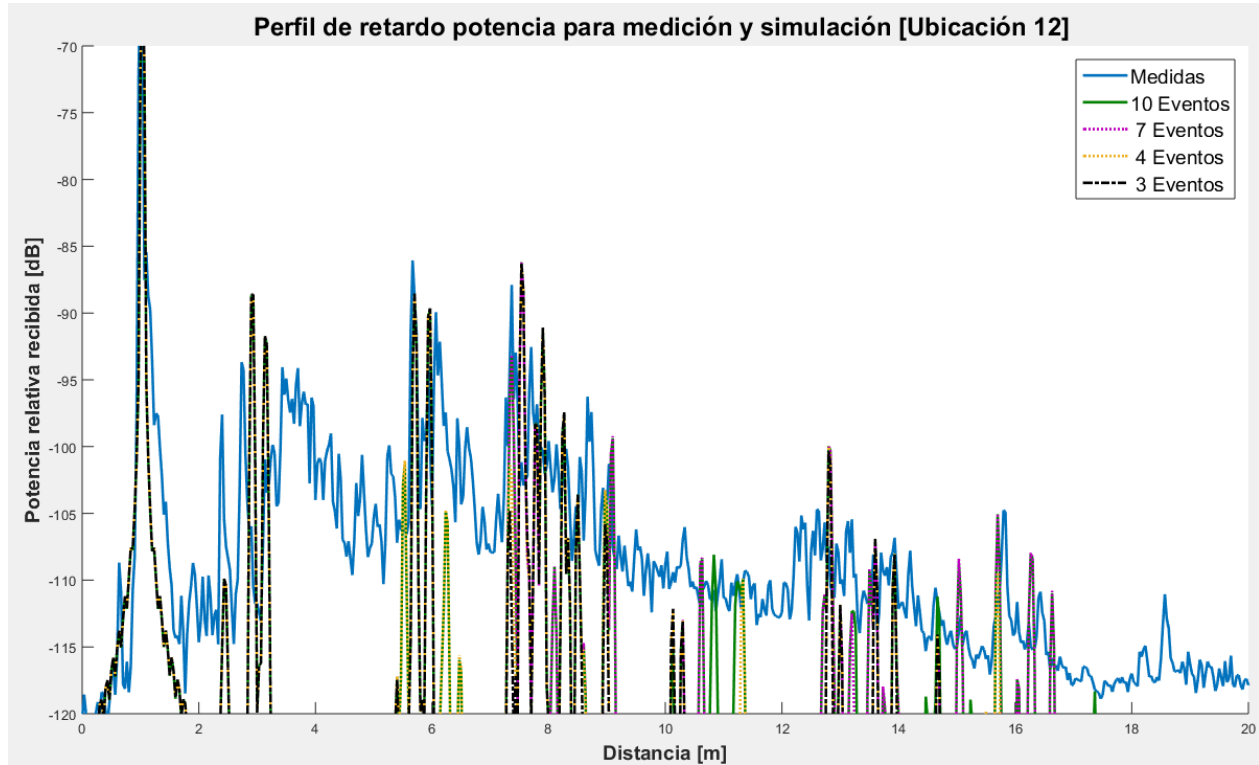
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 10 | 3 eventos | 3.6714 | 4.5043 | 77.3 | 7.6702 | 9.473 | 76.5 | 70.3607 | 68.8058 | 1.55 |
| | 4 eventos | | 4.5662 | 75.6 | | 9.5348 | 75.7 | | 68.7767 | 1.58 |
| | 7 eventos | | 4.8473 | 68.0 | | 9.6059 | 74.8 | | 68.7603 | 1.60 |
| | 10 eventos | | 4.9003 | 66.5 | | 9.5439 | 75.6 | | 68.7944 | 1.57 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 10



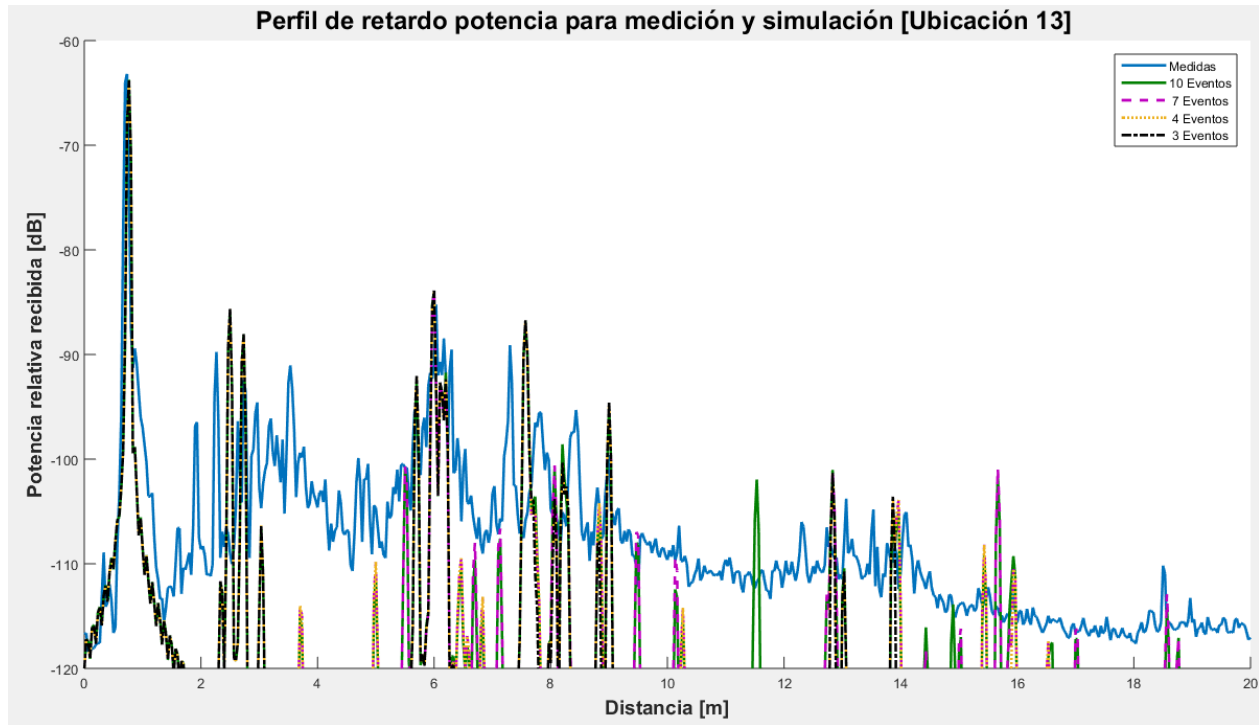
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 11 | 3 eventos | 3.653 | 3.4068 | 93.3 | 5.5278 | 6.1663 | 88.4 | 63.7790 | 65.3086 | 1.53 |
| | 4 eventos | | 3.4416 | 94.2 | | 6.1808 | 88.2 | | 65.2974 | 1.52 |
| | 7 eventos | | 3.5054 | 96.0 | | 6.2124 | 87.6 | | 65.2800 | 1.50 |
| | 10 eventos | | 3.4328 | 94.0 | | 6.1888 | 88.0 | | 65.3173 | 1.54 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 11



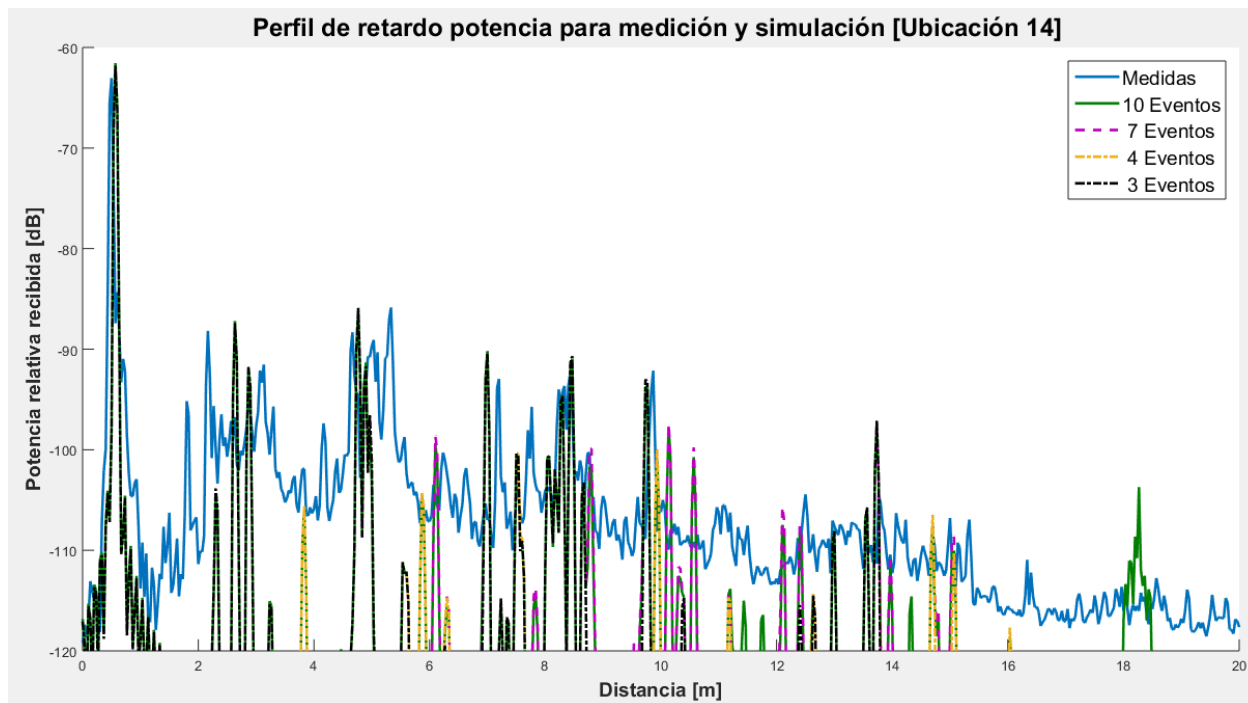
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|----------|--------|---------|----------|--------|----------------|----------|------------|------|
| | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia | |
| 12 | 3 eventos | 2.119 | 2.8725 | 64.4 | 3.6148 | 3.9162 | 91.7 | 61.4365 | 63.6363 | 2.20 |
| | 4 eventos | | 2.8728 | 64.4 | | 3.9163 | 91.7 | | 63.6322 | 2.20 |
| | 7 eventos | | 2.9538 | 60.6 | | 3.9396 | 91.0 | | 63.6200 | 2.18 |
| | 10 eventos | | 2.9653 | 60.1 | | 3.9436 | 90.9 | | 63.6635 | 2.23 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 12



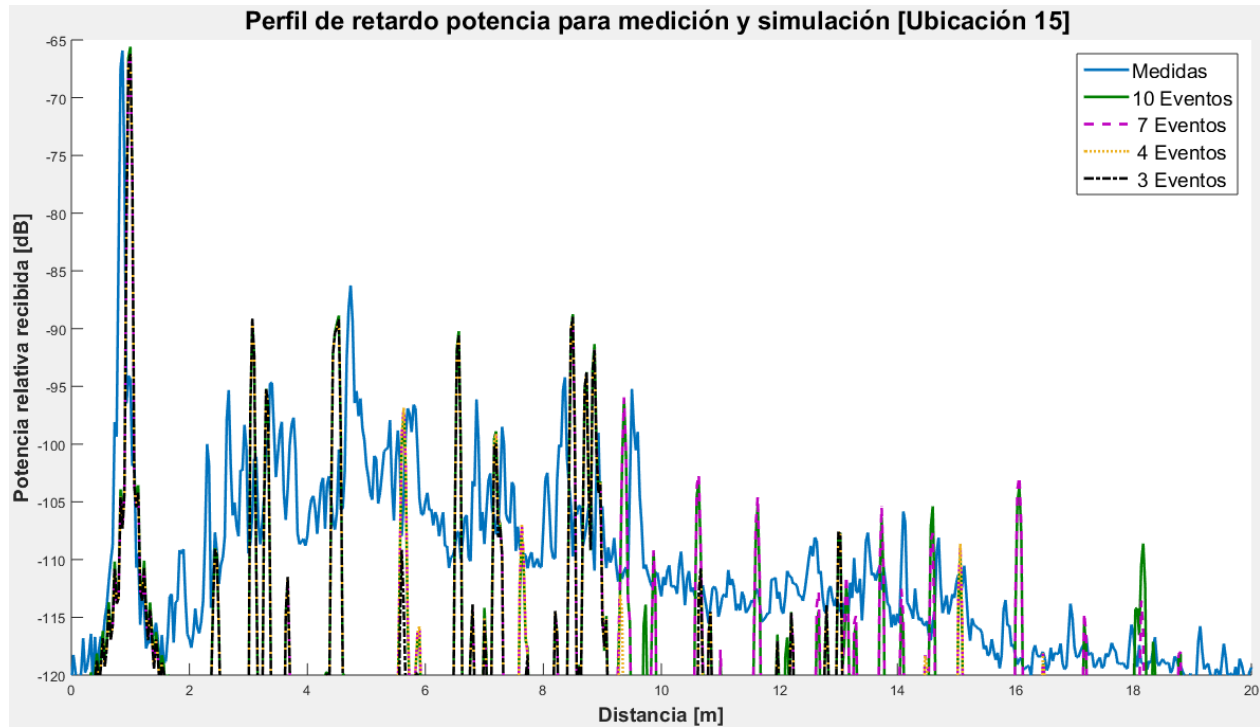
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 13 | 3 eventos | 2.2102 | 2.7491 | 75.6 | 2.6802 | 2.9833 | 88.7 | 60.1227 | 61.6521 | 1.53 |
| | 4 eventos | | 2.7506 | 75.5 | | 2.9837 | 88.7 | | 61.6503 | 1.53 |
| | 7 eventos | | 2.7506 | 75.5 | | 2.9837 | 88.7 | | 61.6468 | 1.52 |
| | 10 eventos | | 2.7423 | 75.9 | | 2.983 | 88.7 | | 61.6116 | 1.49 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 13



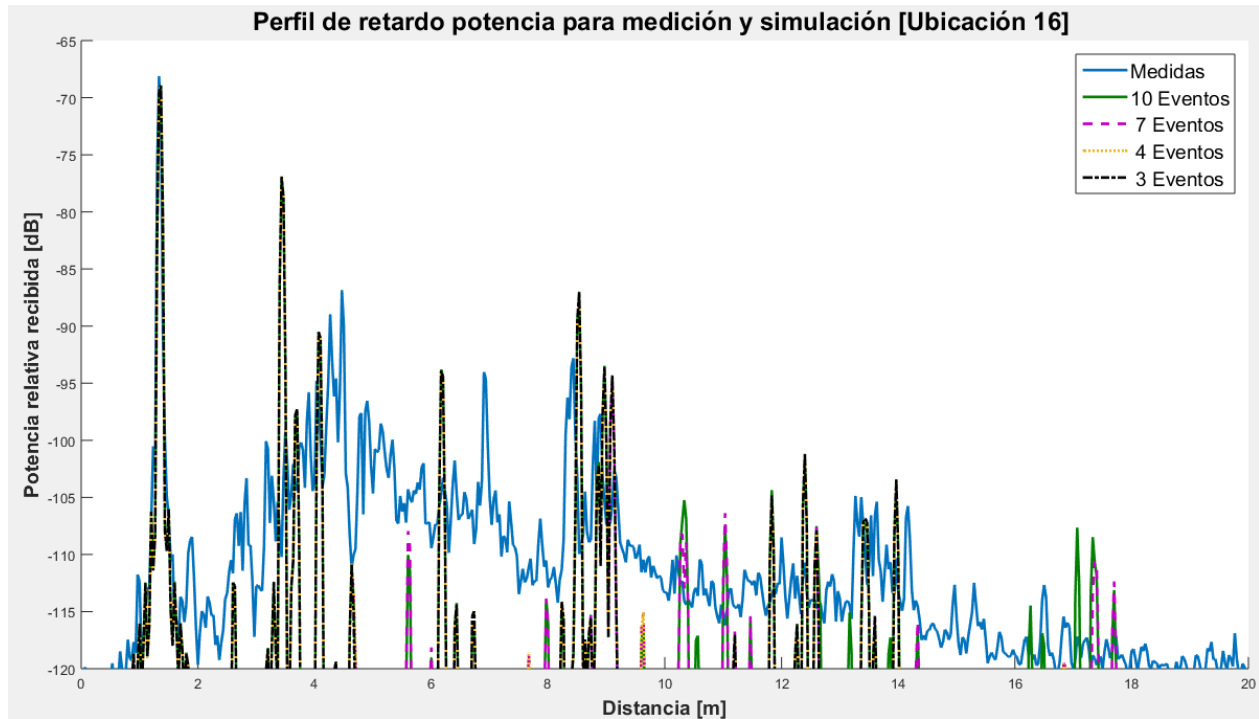
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 14 | 3 eventos | 2.372 | 1.5463 | 65.2 | 1.9849 | 2.0372 | 97.4 | 60.5717 | 59.8136 | 0.76 |
| | 4 eventos | | 1.5462 | 65.2 | | 2.0372 | 97.4 | | 58.8120 | 1.76 |
| | 7 eventos | | 1.5461 | 65.2 | | 2.0372 | 97.4 | | 59.8074 | 0.76 |
| | 10 eventos | | 1.3345 | 56.3 | | 2.0087 | 98.8 | | 59.5384 | 1.03 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 14



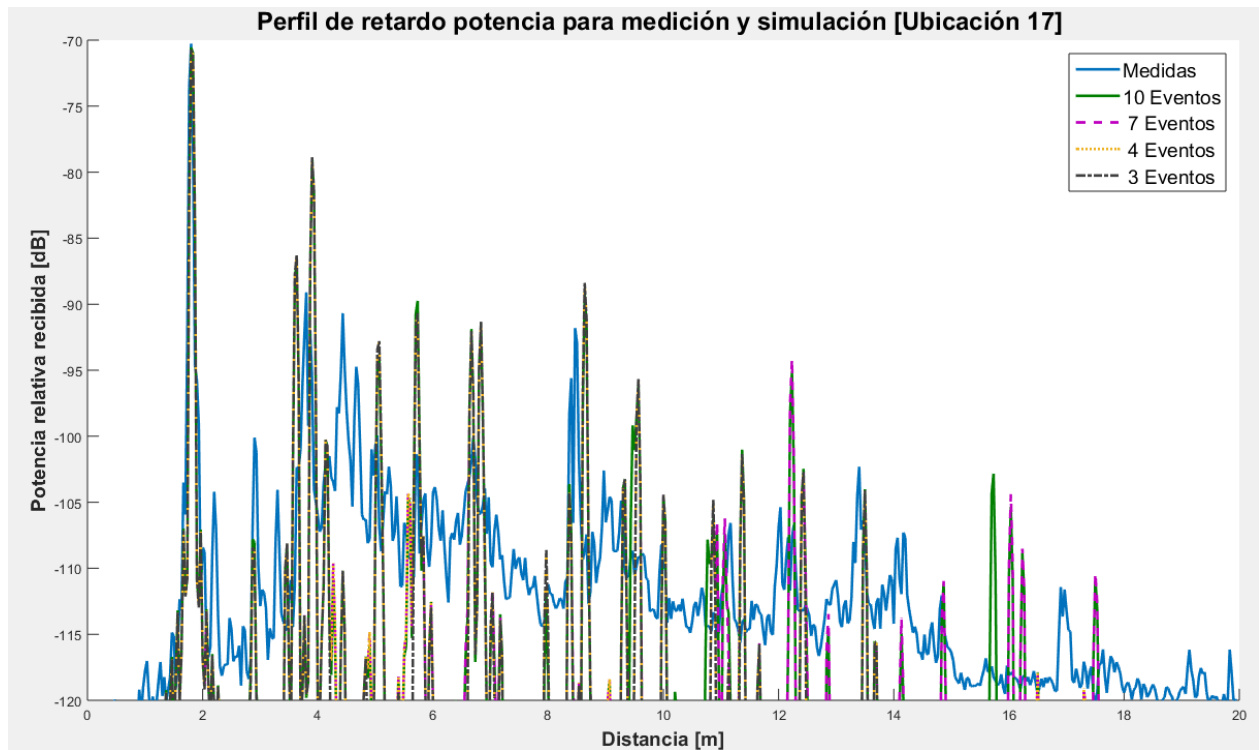
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 15 | 3 eventos | 1.8821 | 2.8021 | 51.1 | 3.079 | 3.6923 | 80.1 | 63.1250 | 63.3021 | 0.18 |
| | 4 eventos | | 2.8021 | 51.1 | | 3.6921 | 80.1 | | 63.2972 | 0.17 |
| | 7 eventos | | 2.8755 | 47.2 | | 3.7077 | 79.6 | | 63.2889 | 0.16 |
| | 10 eventos | | 2.6706 | 58.1 | | 3.6543 | 81.3 | | 62.6706 | 0.45 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 15



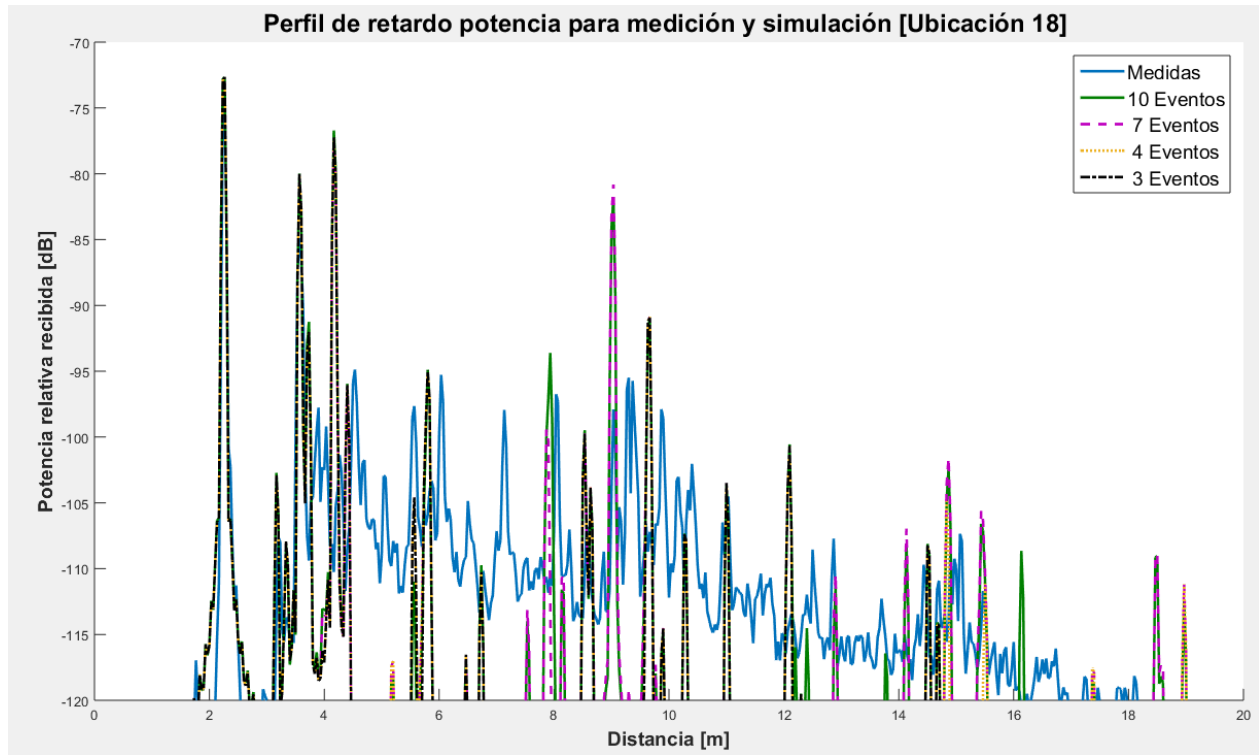
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|----------|--------|---------|----------|--------|----------------|----------|------------|------|
| | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia | |
| 16 | 3 eventos | 2.6726 | 3.7894 | 58.2 | 4.9585 | 5.8319 | 82.4 | 65.7165 | 65.2641 | 0.45 |
| | 4 eventos | | 3.7895 | 58.2 | | 5.832 | 82.4 | | 65.2639 | 0.45 |
| | 7 eventos | | 3.7895 | 58.2 | | 5.832 | 82.4 | | 65.2613 | 0.46 |
| | 10 eventos | | 3.7737 | 58.8 | | 5.8201 | 82.6 | | 65.2229 | 0.49 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 16



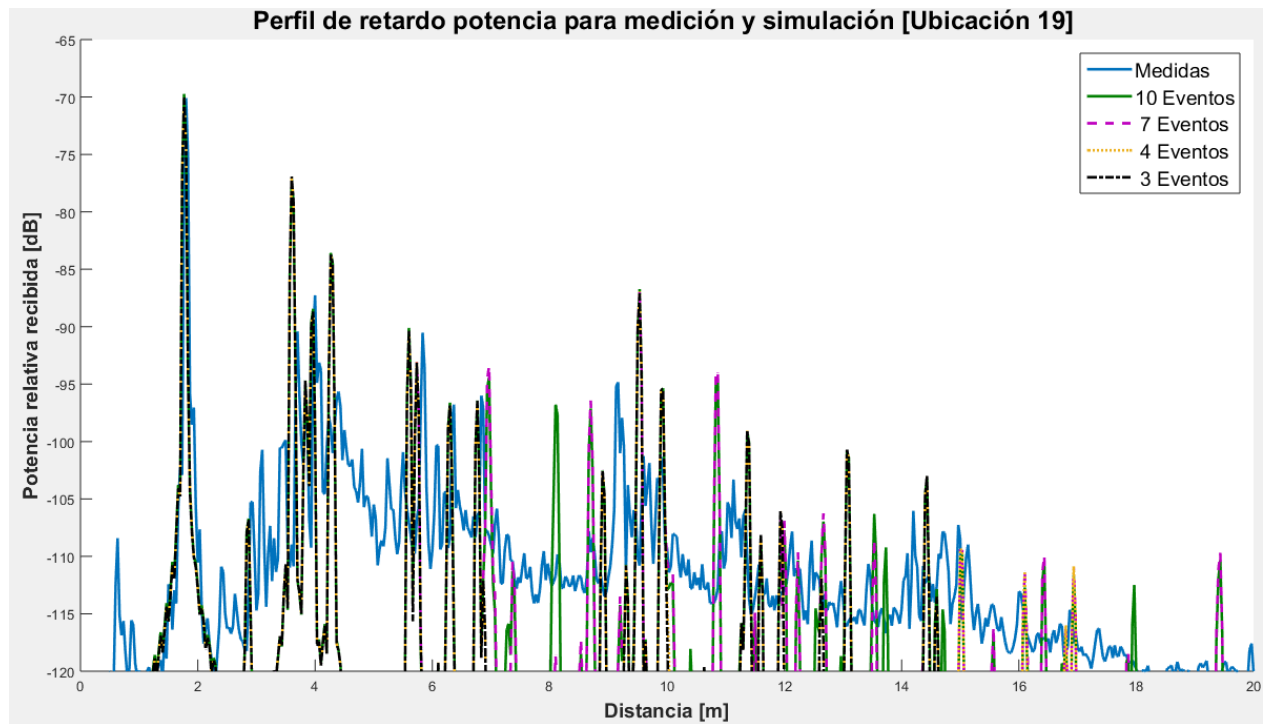
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 17 | 3 eventos | 2.6505 | 3.9877 | 49.5 | 6.4933 | 7.5806 | 83.3 | 67.7367 | 66.8583 | 0.88 |
| | 4 eventos | | 3.9868 | 49.6 | | 7.5801 | 83.3 | | 66.8560 | 0.88 |
| | 7 eventos | | 4.3407 | 36.2 | | 7.6703 | 81.9 | | 66.8388 | 0.90 |
| | 10 eventos | | 4.1845 | 42.1 | | 7.5894 | 83.1 | | 66.7242 | 1.01 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 17



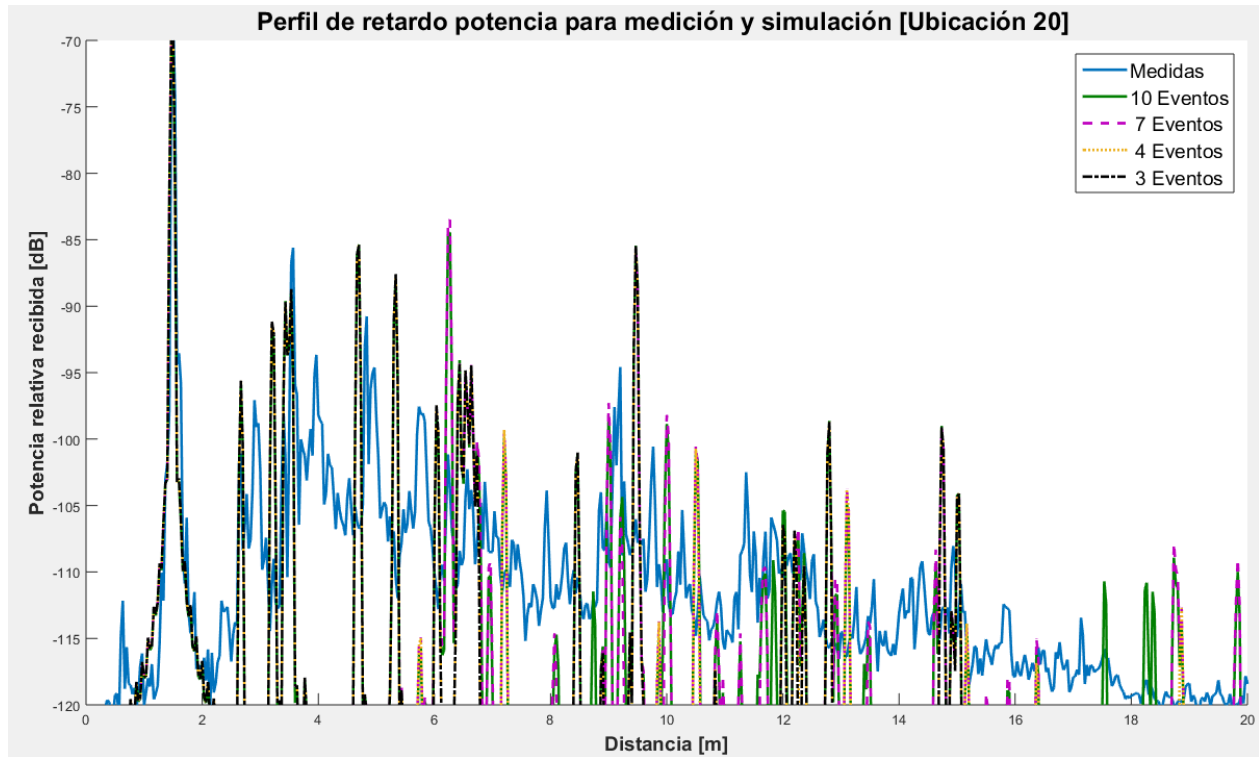
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 18 | 3 eventos | 3.675 | 3.6512 | 99.4 | 8.38 | 9.5466 | 86.1 | 68.8000 | 67.8272 | 0.97 |
| | 4 eventos | | 3.6595 | 99.6 | | 9.5494 | 86.0 | | 67.8236 | 0.98 |
| | 7 eventos | | 6.7279 | 16.9 | | 11.293 | 65.2 | | 67.4362 | 1.36 |
| | 10 eventos | | 6.2543 | 29.8 | | 11.037 | 68.3 | | 67.3745 | 1.43 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 18



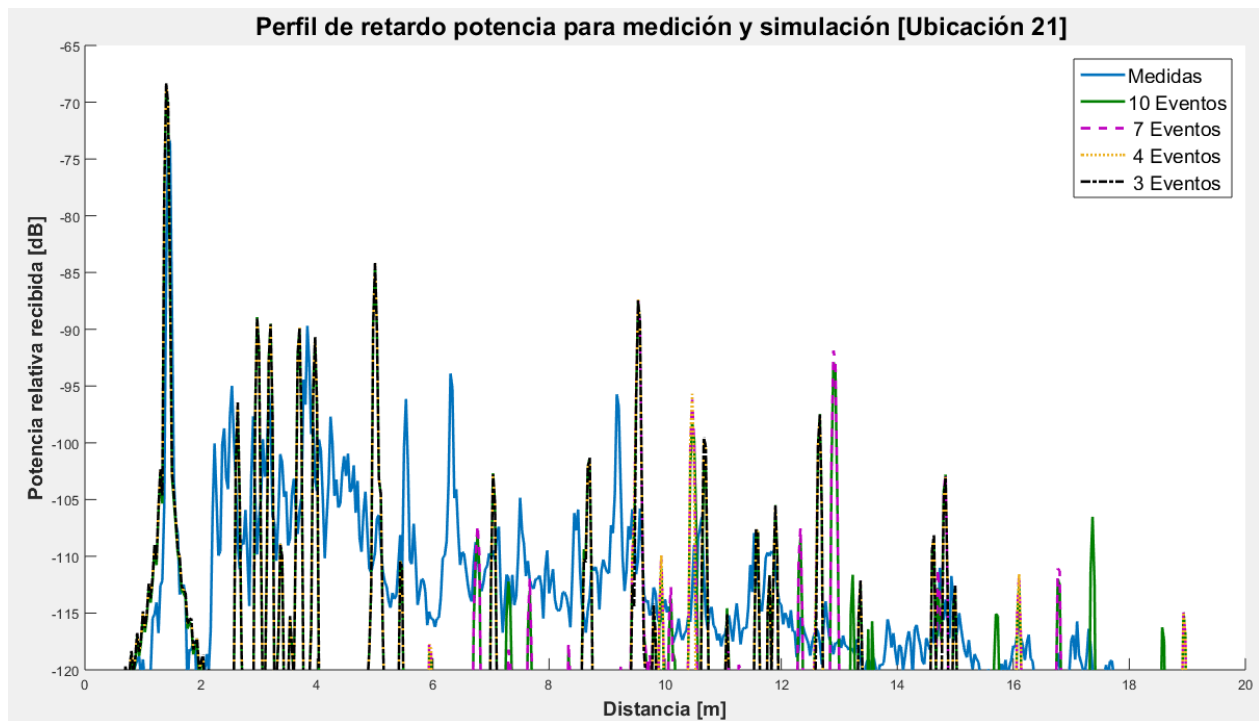
| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 19 | 3 eventos | 2.822 | 4.5312 | 39.4 | 6.6594 | 4.5312 | 68.0 | 67.7788 | 66.7271 | 1.05 |
| | 4 eventos | | 4.5631 | 38.3 | | 8.0352 | 79.3 | | 66.7225 | 1.06 |
| | 7 eventos | | 5.0142 | 22.3 | | 8.2304 | 76.4 | | 66.6736 | 1.11 |
| | 10 eventos | | 4.9224 | 25.6 | | 8.1244 | 78.0 | | 66.4724 | 1.31 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 19



| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|--------|----------|---------|--------|----------|----------------|---------|----------|------------|
| | | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia |
| 20 | 3 eventos | 2.1509 | 4.4352 | -6.2 | 5.3946 | 6.0549 | 87.8 | 66.0598 | 65.7729 | 0.29 |
| | 4 eventos | | 4.4054 | -4.8 | | 6.0442 | 88.0 | | 65.7672 | 0.29 |
| | 7 eventos | | 5.1696 | 40.3 | | 6.5817 | 78.0 | | 65.6916 | 0.37 |
| | 10 eventos | | 5.1256 | 38.3 | | 6.5225 | 79.1 | | 65.7060 | 0.35 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 20



| Posición | RMS (ns) | | | MD (ns) | | | Path Loss (dB) | | | |
|----------|------------|----------|--------|---------|----------|--------|----------------|----------|------------|------|
| | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | % | Medido | Simulado | diferencia | |
| 21_2 | 3 eventos | 2.22 | 3.5722 | 39.1 | 4.8 | 5.4505 | 86.4 | 65.9900 | 65.5241 | 0.47 |
| | 4 eventos | | 3.7176 | 32.5 | | 5.4881 | 85.7 | | 65.5145 | 0.48 |
| | 7 eventos | | 4.4258 | 0.6 | | 5.6431 | 82.4 | | 65.4905 | 0.50 |
| | 10 eventos | | 4.4203 | 0.9 | | 5.6718 | 81.8 | | 65.8298 | 0.16 |

Tabla comparativa de los resultados para la ubicación 21