

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Identificación de la estadística de canales inalámbricos 5G de
Onda Milimétrica**

Rody Paúl Chuqui Gualotuña

Ingeniería Electrónica

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Electrónico

Quito, 25 de julio de 2022

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Identificación de la estadística correspondiente al modelo de propagación en canales inalámbricos 5G de onda milimétrica

Rody Paúl Chuqui Gualotuña

René Játiva Espinoza, Ph. D.

Quito, 25 de julio de 2022

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Rody Paúl Chuqui Gualotuña

Código: 00129469

Cédula de identidad: 1722076302

Lugar y fecha: Quito, 25 de julio de 2022

Dedicatoria

A mi Padre (+), quién antes de partir lo aprobó; a mi madre, mi apoyo fundamental; a mi hermano Ismael, mi fuerza; y a mi director René, quien siempre apoyo el desarrollo de este Proyecto. A ellos, que me permitieron alzarme frente a todos los factores en contra en los que se desarrolló este trabajo.

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

Este trabajo se enfoca en la identificación de la estadística de canales inalámbricos en la banda correspondiente a ondas milimétricas. Particularmente, se respalda en mediciones experimentales realizadas por la Universidad de Nueva York y que sirvieron de base para el desarrollo de su simulador NYSIM para comunicaciones inalámbricas 5G y posteriores (B5G de Beyond 5G) a partir de entornos con línea de vista (LOS de Line Of Sight) y también sin línea de vista (NLOS de Non LOS), en escenarios polarizados y copolarizados. Para sobrellevar la dificultad de la escasez de datos aportada por las publicaciones pertinentes, se determinó y validó una metodología para la síntesis probabilística de nuevos datos, que fueron utilizados posteriormente para el desarrollo de la identificación de la estadística del canal utilizando estimación de máxima verosimilitud. Este proyecto identifica la estadística de desvanecimiento del canal a partir de pruebas de bondad de ajuste aplicados sobre modelos típicos que se utilizan en el ámbito de las telecomunicaciones inalámbricas.

Palabras clave: desvanecimiento de pequeña escala, estadística del canal, Test de Bondad de Ajuste, 5G, ondas milimétricas.

ABSTRACT

This work focuses on identification of the statistic of wireless channels operating within frequency bands related with millimetric waves (mmwaves). Particularly, it is based on experimental measurements performed by New York University to support the development of its NYSIM simulator for 5G and beyond (B5G) wireless communications for Line Of Sight (LOS) and Non LOS environments in polarized and copolarized scenarios. To overcome the difficulty of data scarcity provided by the available papers in the reference literature, a methodology was established and validated to probabilistically synthesize new data that eventually were used for performing channel statistical identification using a maximum likelihood estimation approach. This project identifies channel fading statistics by using tests of goodness of fit applying over typical models used in the ambit of Wireless telecommunications.

Key words: small-scale fading, channel statistic, Bond of Fit Test, 5G, millimeter waves.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	12
1. Desarrollo del tema	14
1.1 Estado del Arte	14
1.2 Evolución de Sistemas Inalámbricos.....	15
1.3 Canal de comunicaciones	17
1.3.1 Diagrama General de un Sistema de Comunicaciones	18
1.3.2 Fenómenos básicos de propagación	19
1.3.3 Tipos de Canales de Comunicaciones.....	21
1.4 Estadísticas del canal de comunicaciones.....	22
1.4.1 Distribución Rayleigh	23
1.4.2 Distribución Rician	24
1.4.3 Distribución de Nakagami.....	25
1.4.4 Nuevos Modelos Estadísticos del Canal de Comunicaciones.....	26
1.5 Metadatos de la Estadística del Canal utilizada como referencia	28
2. Metodología.....	31
2.1 Extracción de datos de Referencia.....	31
2.2 Modelamiento teórico de las curvas empíricas para cada escenario.....	32
2.3 Obtención del Conjunto de Datos extendido	35
2.4 Gráficas completas.....	37
2.5 Estimación de Máxima Verosimilitud	39
2.6 Métodos estadísticos de ajuste.....	40
2.6.1 Ajustador de Distribuciones de Matlab ®.....	40
2.6.2 Roots Mean Square.....	42
2.6.3 Test de Bondad de Ajuste.....	42
3. Resultados.....	43
3.1 Parámetros de las distribuciones estadísticas del ajuste aplicado.....	43
3.2 Valores resultantes de los ajustes establecidos	44
3.3 Valores RMS Calculados	45
3.4 Aplicación del Test de Kolgomorov-Smirnov.....	47
4. Conclusiones	50
Referencias bibliográficas	52
Anexos.....	56

Anexo A: Script distribución teórica de Rayleigh	56
Anexo B: Script distribución teórica de Rician	56
Anexo C: Script Distribución de Nakagami	56
Anexo D: DataTheif	57
ANEXO E: EXT_PUNTOS.m	58
ANEXO F: Puntos recuperados (data _paper).....	58
ANEXO G: Script Curvas Empíricas Escenario V-V	59
ANEXO H: Script Curvas Empíricas Escenario V-H.....	59
ANEXO I: Script Curvas Empíricas Escenario LOS-to-NLOS.....	59
ANEXO J: Conjunto de datos LOS V-V	60
ANEXO K: Conjunto de Datos NLOS V-V	60
ANEXO L: Conjunto de Datos LOS V-H.....	60
ANEXO M: Conjunto de Datos NLOS V-H	61
ANEXO N: Conjunto de Datos V-V LOS-to-NLOS	61
ANEXO O: Conjunto de Datos V-H LOS-to-NLOS.....	61
ANEXO P: Distribuciones aplicadas mediante el Ajustador de Distribuciones.....	62
ANEXO Q: Roots Mean Square	62
ANEXO R: Test Kolgomorov -Smirnov	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores K para distribuciones de Rician.....	29
Tabla 2. Parámetros de las distribuciones aplicadas, señal LOS y NLOS, escenario V-V.....	43
Tabla 3. Parámetros de las distribuciones aplicadas, señal LOS y NLOS, escenario V-H.....	43
Tabla 4. Parámetros de las distribuciones aplicadas, señal V-V y V-H, escenario LOS-to-NLOS	44
Tabla 5. Resultados del Ajustador de distribuciones, escenario V-V	44
Tabla 6. Resultados del Ajustador de distribuciones, escenario V-H.....	45
Tabla 7. Resultados del Ajustador de distribuciones, escenario LOS-to-NLOS	45
Tabla 8. RMS, escenario V-V; señal LOS y NLOS	46
Tabla 9. RMS, escenario V-H; señal LOS y NLOS	46
Tabla 10. RMS, escenario LOS-to-NLOS; señal V-V y V-H.....	46
Tabla 11. Test KS, escenario V-V; Señal LOS.....	47
Tabla 12. Test KS, escenario V-V; Señal NLOS.....	48
Tabla 13. Test KS, escenario V-H; Señal LOS.....	48
Tabla 14. Test KS, escenario V-H; Señal NLOS.....	48
Tabla 15. Test KS, escenario LOS-to-NLOS; Señal V-H.....	49
Tabla 16. Test KS, escenario LOS-to-NLOS; Señal V-H.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Servicios inalámbricos de banda ancha (Valle, L. 2022).....	16
Figura 2. Diagrama de bloques unidireccional de un sistema de comunicaciones.....	18
Figura 3. Mapa de intensidad de desvanecimiento de sombra espacialmente correlado (dB)22	22
Figura 4. Curva de la distribución Teórica de Rayleigh.....	23
Figura 5. Curvas de la Distribución Rician $k= 5-15$ y $k=0$ (Rayleigh).....	24
Figura 6. Curvas de la Distribución teórica de Nakagami m/ω variable	25
Figura 7. Desvanecimiento a pequeña escala de 28 GHz, escenario V-V (M. K. Samimi et al., 2016).....	29
Figura 8. Desvanecimiento a pequeña escala de 28 GHz, escenario V-H (M. K. Samimi et al., 2016).....	29
Figura 9. Desvanecimiento a pequeña escala de 28 GHz, escenario LOS-to-NLOS (M. K. Samimi et al., 2016).	30
Figura 10. Límites de extracción de la figura	31
Figura 11. Extracción de puntos de la figura	32
Figura 12. Curvas empíricas de desvanecimiento LOS y NLOS, escenario V-V.	32
Figura 13. Curvas empíricas de desvanecimiento LOS y NLOS, escenario V-H.	33
Figura 14. Curvas empíricas de desvanecimiento V-V y V-H, escenario LOS-to-NLOS.	33
Figura 15. Escenario V-V, Señal LOS y NLOS, Rayleigh, Rician y Nakagami	34
Figura 16. Escenario V-H, LOS, NLOS, Rayleigh, Rician y Nakagami.....	34
Figura 17. Escenario LOS-to-NLOS, V-V, V-H, Rayleigh, Rician y Nakagami.....	34
Figura 18. Escenario V-V, Señal LOS y NLOS, y Conjunto de Datos	35
Figura 19. Escenario V-H, Señal LOS y NLOS, y Conjunto de Datos	36
Figura 20. Escenario LOS-to-NLOS, Entorno V-V y V-H, y Conjunto de Datos	36
Figura 21. Escenario V-V, señal LOS y NLOS, Conjunto de Datos, Rayleigh, Rician y Nakagami.	37
Figura 22. Escenario V-H, señal LOS y NLOS, Conjunto de Datos, Rayleigh, Rician y Nakagami.	38
Figura 23. Escenario LOS-to-NLOS, Entorno V-V y V-H, Conjunto de Datos, Rayleigh, Rician y Nakagami.	39

INTRODUCCIÓN

Este Proyecto identifica la estadística de desvanecimiento de canales inalámbricos 5G. Las frecuencias crecen y la física de propagación afecta de una forma particular a la señal por lo que la caracterización de estos fenómenos es necesaria para comprender el diseño y funcionamiento del enlace de comunicación. La problemática en cuanto al desarrollo de este Proyecto se ve reflejada con respecto a la identificación de la estadística del canal de comunicaciones, considerando que para el modelamiento de las señales de desvanecimiento planteadas por los artículos disponibles en la literatura de referencia, no se dispone de un conjunto de datos extendido. Los datos disponibles ya han recibido un tratamiento matemático por parte de los autores por lo que la recreación del estudio de la Universidad de Nueva York se establece de forma experimental mediante la elaboración de curvas de desvanecimiento generadas a partir de una extracción manual punto por punto en los entornos polarizado, copolarizado y transicional.

La identificación de la estadística del modelo referencial se establece mediante un procedimiento que permite analizar el comportamiento de las curvas de desvanecimiento a pequeña escala por medio de parámetros obtenidos con la aplicación de técnicas de ajuste desarrolladas mediante distribuciones Rayleigh, Rician y Nakagami. Estos procedimientos proporcionan valores aptos para el reconocimiento de la mejor técnica de ajuste establecida sobre las señales modeladas. La importancia de este Proyecto radica en identificar la estadística del proceso mediante el cual se genera el desvanecimiento de los canales inalámbricos 5G. La literatura de referencia 28 GHz Millimeter-Wave Ultrawideband Small-Scale Fading Models in Wireless Channels (M. K. Samimi, et al.) presenta un análisis de los ajustes establecido por las distribuciones Rayleigh y Rician sobre las curvas de distribución de desvanecimiento a

pequeña escala en amplitudes de trayecto para las señales LOS (sin pérdida) y NLOS (con pérdida) en los escenarios V-V (polarizado) y V-H (copolarizado); y para los escenarios V-V (Vertical-Vertical) y V-H (Vertical-Horizontal) en el entorno LOS-to-NLOS (transicional).

La estadística identificada permite plantear un proceso de recreación de las curvas empíricas de desvanecimiento, a partir de estas se genera un conjunto de datos sintetizado y extendido mediante el cual se aplican distribuciones típicas que reflejan parámetros estadísticos sobre cada curva de desvanecimiento. Estos valores establecen el mejor ajuste para cada conjunto de datos sintetizado. El tratamiento del conjunto de datos obtenidos mediante el modelo referencial muestra el esquema de desvanecimiento como un sistema de mediciones experimentales tratadas con un enfoque estadístico direccionado hacia la interpretación de la efectividad de los enlaces de comunicación en el canal de onda milimétrica.

Las curvas obtenidas reflejan presentan variaciones despreciables con respecto a las curvas originales, esto se debe al proceso manual utilizado al recopilar los datos desde el documento referencial. El respaldo del proceso desarrollado radica en que al analizar los resultados obtenidos la identificación de la estadística correspondiente al modelo referencial de propagación en canales inalámbricos 5G de onda milimétrica, es concluyente, debido a que corrobora las métricas y la aprobación de las curvas de distribución que mejor se ajustan a las curvas empíricas de desvanecimiento.

1. DESARROLLO DEL TEMA

1.1 ESTADO DEL ARTE

El Proyecto involucra a los sistemas inalámbricos y su evolución, particularmente al canal de comunicaciones que modifica las señales transmitidas durante su trayecto hacia el receptor conforme a los fenómenos básicos de la teoría de propagación de ondas: atenuación, reflexión, dispersión y scattering. Se enfoca en la identificación estadística del canal utilizando como referencia distribuciones estadísticas típicas de uso en telecomunicaciones como Rayleigh, Rice y Nakagami. Para situar correctamente este problema, es necesario incluir en el marco conceptual al modelo básico de un Sistema de Comunicaciones. En este proyecto se trabaja con MATLAB®, los algoritmos desarrollados procuran dar respuesta fundamentada al origen de los datos, las restricciones del proceso, el modelamiento de las señales, y la solución de las problemáticas planteadas a lo largo del trabajo. Esta metodología conceptual es asequible para la realización de un estudio comparativo, a partir del comportamiento de las señales recreadas.

Este Proyecto establece una metodología pertinente para identificar la estadística del canal, utilizando un conjunto de datos sintetizado a partir de los resultados publicados por la Universidad de Nueva York mostrados en el documento *28 GHz Millimeter-Wave Ultrawideband Small-Scale Fading Models in Wireless Channels* (M. K. Samimi et al., 2016). La referencia permite estudiar la ingeniería y seguridad del enlace, para validar la estadística se necesita simular y comprobar el fenómeno de manera exacta. Se utiliza estimación de máxima verosimilitud de los parámetros asociados a cada una de las distribuciones de referencia, se las compara, se establece cuál de ellas es la más verosímil. Finalmente, se realiza una prueba de bondad de ajuste para determinar si los conjuntos de datos utilizados corresponden razonablemente a las distribuciones de referencia desarrolladas.

1.2 EVOLUCIÓN DE SISTEMAS INALÁMBRICOS

Desarrollo histórico breve

La transmisión de datos mediante redes telefónicas heredadas permitió la evolución de las comunicaciones en la segunda mitad del siglo XX mediante redes de paquetes de datos, área local (LAN), redes inalámbricas móviles, sistemas de búsqueda y satélites. Los sistemas celulares se desarrollaron a nivel analógico; no obstante, fueron reemplazados por redes digitales con mayor capacidad de transmisión y recepción de datos. Un esquema inalámbrico transmite contenido multimedia a mayor velocidad mediante teléfonos celulares. El acceso inalámbrico a Internet desde computadoras portátiles ha permitido que la industria de infraestructura digital contenga a más de mil millones de usuarios en el mundo, superando a los servicios de telefonía fija con mayor confiabilidad, capacidad y variedad de servicios.

El aumento de capacidad en la red, la reducción de costo en el servicio y la prolongación de la batería en dispositivos móviles se debe al desarrollo de los sistemas inalámbricos. Una característica de estos esquemas es la tecnología LAN inalámbrica (WLAN) utilizada por la gran demanda de acceso a Internet. En la última década se desarrollaron diseños mejorados de capa física (PHY) y capa de control de acceso medio (MAC), útiles como el núcleo técnico de diseño en el procesamiento digital de señales (Pahlavan, K. & Levesque, A. 2005).

Evolución de los sistemas inalámbricos de comunicaciones

Estos sistemas se pueden clasificar por su arquitectura y sus servicios; se han utilizado en banda angosta con radiocanales de 20 – 30 kHz hasta a convertirse en esquemas de banda ancha con radiocanales de decenas o cientos de MHz. Éstos últimos son de interés en este Proyecto ya que utilizan ondas milimétricas con señales portadoras de alrededor de 30 GHz.

La tecnología de los teléfonos inalámbricos inicio con la red 1G a principios de los 90, un tipo de ciencia apta para la comunicación mediante llamadas de voz; después surgió la red 2G, un sistema que utiliza SMS y paulatinamente dispositivos inteligentes; luego encontramos la red 3G, accesible para la navegación por internet; esta evolución permitió el desarrollo de la red 4G que continuó con estas funciones con un aumento de velocidad al momento de navegar por internet y la reproducción de videos en tiempo real (streaming) con el servicio de banda ancha.

Banda ancha

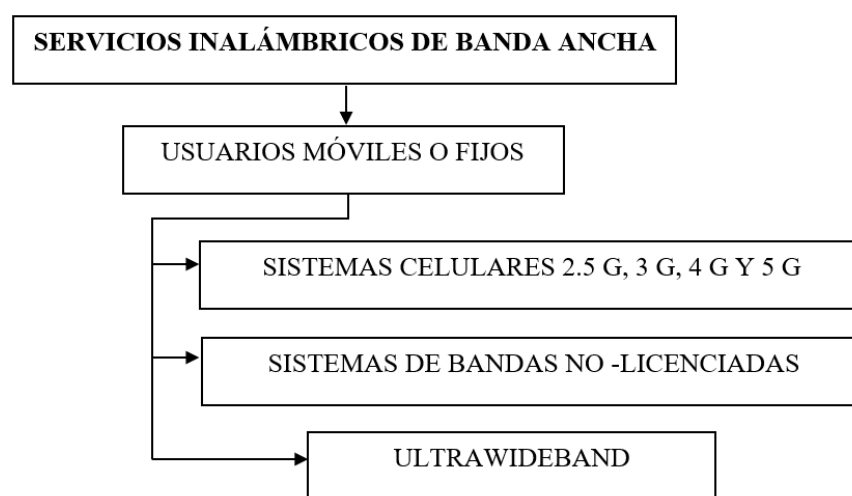


Figura 1. Servicios inalámbricos de banda ancha (Valle, L. 2022).

Estos sistemas son de tipo multimedia; transmiten imágenes, videos, música, aplicaciones, datos a gran velocidad y voz; se dividen en móviles y fijos. Los móviles contienen a los sistemas celulares de 2.5G tales como GPRS y EDGE; 3G (CDMA, GSM), multimedia de mayor velocidad con nuevo espectro; 4G (LTE), aumento de velocidad de datos pico en áreas de alta movilidad; y 5G (IoT -Internet de las cosas), redes con mayor velocidad, capacidad y latencia. Son sistemas fijos utilizan bandas espectrales no-licenciadas (de uso compartido) y sistemas Ultrawideband (UWB) que emplean bandas de otros servicios con tecnología de operación catalogada por debajo del nivel de ruido sin interferencias (Valle, L. 2012).

Red 5G -Características

Las redes inalámbricas son una de las principales fuentes de enlace a nivel mundial. La velocidad, los dispositivos móviles, el internet y las conexiones entre diversos sistemas cada vez son más amplias. La mayoría de personas utiliza internet y esto forma parte de una demanda más alta de las características de conexión para satisfacer la conectividad entre usuarios y un número creciente de dispositivos asociados al nuevo paradigma del internet de las cosas. Se han definido las comunicaciones y redes inalámbricas 5G para atender estas nuevas demandas.

La progresión de estos sistemas muestra que cada red se constituye sobre los cimientos de las anteriores; como el caso del 5G, la quinta generación de redes móviles que permite realizar llamadas, enviar mensajes y navegar por internet con una amplia velocidad de transferencia. Se estima permitirá navegar hasta a 10 GBps (gigabytes por segundo), con dicho nivel por ejemplo se podrá descargar una película completa en cuestión de segundos. Por su parte, el tiempo de respuesta de la red (latencia) tendrá un mejoramiento considerable permitiendo establecer conexiones prácticamente en tiempo real, incrementando exponencialmente el número de dispositivos conectados y su respuesta de comunicación (Flores, J. 2020).

1.3 CANAL DE COMUNICACIONES

Canal

Los sistemas de comunicaciones están constituidos de dispositivos que permiten establecer conexiones en una red. El canal de comunicación es un medio de transmisión a través del cual las señales portadoras de información viajan de emisor a receptor. Conceptualmente, el canal de comunicaciones puede caracterizarse a partir de sus entradas y salidas, es decir a partir de las señales transmitidas y recibidas, respectivamente.

Canal inalámbrico

Es considerado como un sistema estocástico, ya que además de la aleatoriedad implícita en la incertidumbre de la señal de información transmitida, introduce perturbaciones asociadas a la propagación tales como: múltiples trayectorias, excesos de retardo, desvanecimiento de la señal recibida y corrimiento Doppler. Estos factores se relacionan con la movilidad del usuario, el entorno y las condiciones ambientales. Cuando una señal transmitida es reflejada por objetos del ambiente como árboles, edificios o automóviles, entre el transmisor y receptor existen retardos en los múltiples trayectos. El receptor recibe las señales reflejadas con un desfase aleatorio ya que cada señal sigue un camino específico. El resultado es una señal aleatoria que se desvanece de manera constructiva y destructiva por la superposición de las reflexiones generando aumento o disminución de la energía en cortos períodos de tiempo. (Garg, V. 2007).

Onda Milimétrica

Se definen como las radiaciones existentes en el espectro en la banda de frecuencias muy alta (EHF -Extended high frequencies), entre 30 y 300 GHz; tienen una longitud de onda que va de 1 a 10 mm, representan un gran cambio sobre las generaciones de comunicaciones móviles que han operado entre 800 MHz y 3 GHz, y forman parte de la interfaz de radio 5G por su capacidad en el espectro con relación a la alta demanda de comunicación actual (Durán, A. 2017).

1.3.1 DIAGRAMA GENERAL DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES

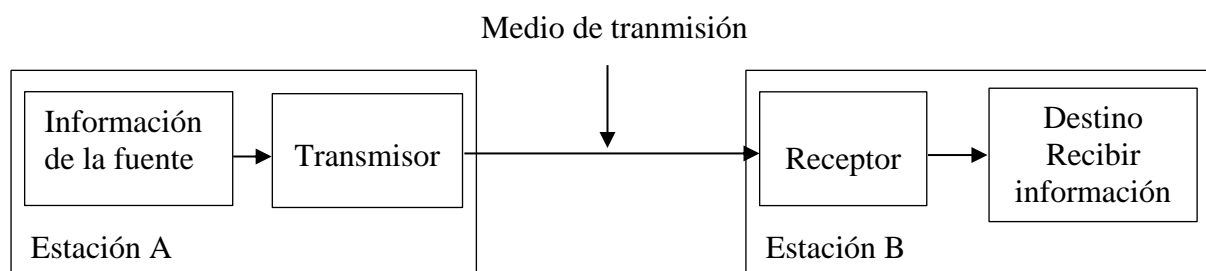


Figura 2. Diagrama de bloques unidireccional de un sistema de comunicaciones

Un sistema de comunicación involucra los procesos de transmisión, recepción y procesamiento de información. Las señales utilizan energía electromagnética para propagarse por el sistema. La Figura 2 muestra la relación entre la fuente de información, el transmisor, el medio de transmisión, el receptor y la información recibida. El transmisor convierte la información de la fuente para la comunicación; la transmisión, enlaza el transmisor y receptor; y el receptor, transforma la información recibida a su forma original para transferirla a su destino. El sistema es unidireccional, transmite desde la estación A hasta la estación B (Fernández, J. 2019).

1.3.2 FENÓMENOS BÁSICOS DE PROPAGACIÓN

Fenómenos de Propagación -El canal Radio

El comportamiento del canal involucra pérdidas en la señal recibida, relacionadas con los mecanismos básicos de propagación de ondas como: reflexión, difracción y dispersión (scattering). Estas pérdidas se acentúan con la distancia entre transmisor y receptor, con la geometría y características del terreno, con la dinámica del dispositivo y los dispersores móviles. Estas fuentes de incertidumbre proveen al canal de una naturaleza aleatoria que requiere de un tratamiento estadístico.

Reflexión

Las reflexiones se producen cuando una onda electromagnética encuentra en su camino objetos más grandes en comparación a su longitud de onda, originando múltiples trayectos de propagación entre el transmisor y el receptor. Estos trayectos difieren en su longitud, afectan la intensidad y el tiempo de propagación, y en consecuencia a la señal compuesta en el receptor con desvanecimiento de pequeña escala (small scale fading). Este fenómeno depende de la geometría de los objetos circundantes, la amplitud, fase y polarización de la señal incidente.

Difracción

El fenómeno de difracción aparece cuando la trayectoria de propagación entre el transmisor y receptor se obstruye por obstáculos en conformaciones tales como montañas o edificios; se produce por la difusión de ondas secundarias hacia la región de sombra. Este fenómeno se explica mediante el principio de Huygens en el que los puntos en un frente de ondas son fuentes principales de ondas secundarias que combinadas forman un nuevo conjunto de ondas en la dirección de propagación.

Dispersión (Scattering)

Se produce cuando el medio por el que viaja la señal está formado por una gran cantidad de objetos con dimensiones pequeñas en comparación a la longitud de onda. El número de obstáculos por unidad de volumen es grande considerando elementos como arbustos, postes o superficies rugosas. Este fenómeno depende de la geometría del objeto, la amplitud, fase y polarización de la señal incidente. Una señal se refleja en todas las direcciones cuando incide sobre una superficie rugosa debido a la dispersión (scattering). La intensidad de la señal recibida generalmente es mayor que la predicha en los fenómenos de reflexión o difracción.

Pérdidas de larga escala y fluctuaciones de pequeña escala

Un modelo de propagación de larga escala es un modelo que predice el comportamiento de la intensidad media de la señal entre el transmisor y el receptor en distancias mayores a decenas de longitudes de onda. Los valores promedio de la señal se obtienen en intervalos de 5 y 50 longitudes de onda. Por otra parte, los modelos de desvanecimiento a pequeña escala se ocupan de fluctuaciones rápidas de la señal en pequeños desplazamientos del receptor (intervalos menores a 1 s). Estas fluctuaciones alcanzan entre 30 y 40 dB (Játiva, R. 2021).

Antenas y Propagación de Ondas

Una antena está constituida por materiales conductores y dieléctricos; mediante una fuente de energía recibe el campo electromagnético por selectividad en el dominio de la frecuencia y el espacio. En la frecuencia, la antena realiza una resonancia externa permitiendo que la densidad de corriente inducida produzca campos electromagnéticos. La respuesta al impulso espacial es una función del azimut y los ángulos de elevación mediante los cuales transmite o recibe energía en varias direcciones a lo largo de un campo lejano; por su parte, en un campo cercano la antena tiene un patrón omnidireccional sin selectividad. La antena como receptor muestrea espacialmente los campos en el espacio e induce el voltaje relacionando la polarización y la fuerza de los campos electromagnéticos incidentes.

Una antena relaciona los componentes eléctricos del transmisor, receptor y el espacio libre de propagación de la onda transmitida; es análoga a un altavoz ya que permite la coincidencia de los dispositivos de generación/recepción acústica con un espacio abierto; y es un dispositivo de paso alto con diferentes respuestas al impulso de transmisión y recepción. (Sarkar, T., Salazar, M., Najib, M. 2018).

1.3.3 TIPOS DE CANALES DE COMUNICACIONES

La señal transmitida toma varias trayectorias debido a la función dispersiva del canal. Al receptor llega una señal compuesta que se suma constructiva o destructivamente originando variaciones en la amplitud de la señal recibida. Este desvanecimiento por multitrayectoria origina errores y reduce el desempeño en el receptor. En función de las relaciones que pueden establecerse en los extremos de entrada y salida del canal podemos hablar de canales MIMO, MISO, SIMO y SISO.

Diversidad y Canales MIMO, SIMO y SISO

La diversidad reduce las alteraciones en la señal. En la diversidad espacial, se usan varias antenas en el receptor para capturar diferentes señales generadas en múltiples reflexiones a lo largo del entorno de propagación. Los canales MIMO (Multiple input Multiple Output), surgen de sistemas que utilizan múltiples antenas en el transmisor (entradas del canal) y también en el receptor (salidas del canal). Por su parte, los canales SIMO (Single input Multiple Output) usan una antena única en el transmisor y varias antenas en el receptor; y los canales SISO (single input, single output) aparecen entre un transmisor y receptor que utiliza antenas de direccionalidad específica (Plaza, C., Rey, E. 2008).

1.4 ESTADÍSTICAS DEL CANAL DE COMUNICACIONES

La variación de la intensidad en la envolvente de una señal recibida a la salida de un canal inalámbrico admite un análisis estadístico sobre los múltiples trayectos de la señal. Distribuciones estadísticas típicas como Rayleigh, Rician y Nakagami son utilizadas para modelar estas señales. Las características de desvanecimiento de la señal se muestran por la densidad de la dispersión (Mathworks, 2022).

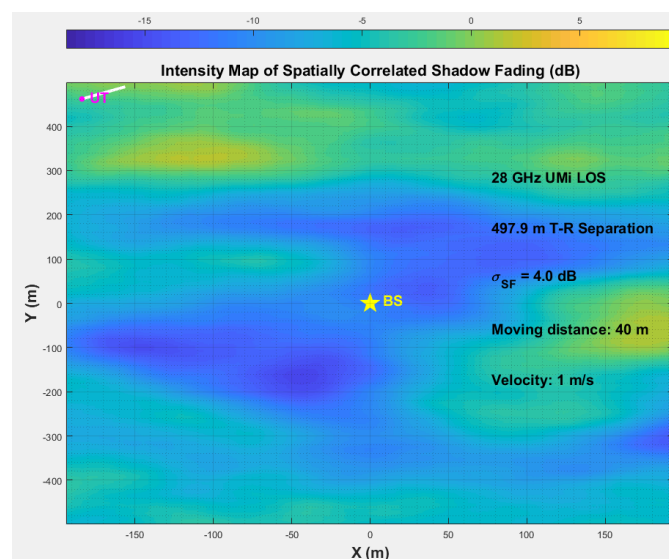


Figura 3. Mapa de intensidad de desvanecimiento de sombra espacialmente correlado (dB)

Mediante el Simulador de canales de ondas milimétricas NYUSIM se realiza un análisis de la distancia de correlación de desvanecimiento de la sombra estableciendo un parámetro de 60 m. Los parámetros en la simulación de consistencia espacial se mantienen. El móvil con respecto a la base está correlado. El desplazamiento de la señal y la cantidad de dB que necesita la misma para una distancia de movimiento de 40 m a 1 m/s de velocidad se muestra como un segmento sólido en el que la intensidad del desvanecimiento está espacialmente correlado.

1.4.1 DISTRIBUCIÓN RAYLEIGH

La distribución Rayleigh es un caso especial de la distribución de Weibull, modela dispersiones densas y señales dispersas con un receptor en múltiples caminos; además, el desvanecimiento rápido en la potencia de la señal causado por múltiples trayectos se representa por esta distribución. Si A y B son parámetros de Weibull, entonces la distribución Rayleigh con el parámetro b es equivalente a la distribución de Weibull con los parámetros $A = \sqrt{2} b$ y $B = 2$ (Garg, V. 2007; MathWorks, 2021).

La PDF de Rayleigh es $y = f(x|b) \frac{x}{b^2} e^{\left(\frac{-x^2}{2b^2}\right)}$ (1)

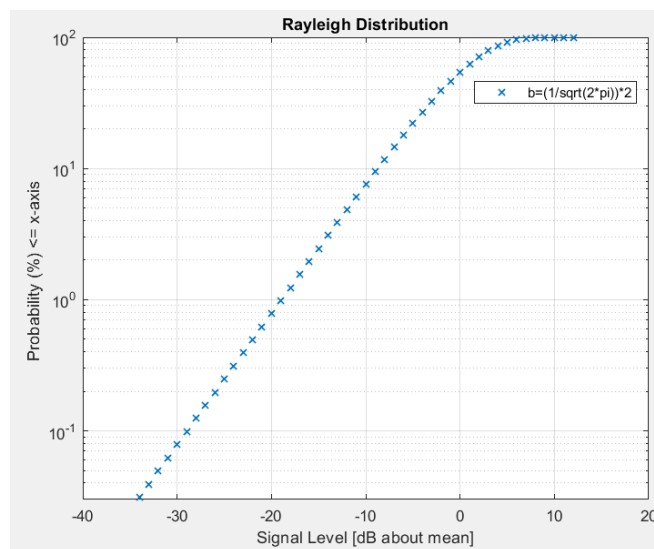


Figura 4. Curva de la distribución Teórica de Rayleigh

La distribución se genera por el código del Anexo A. Utiliza el parámetro $b = 2/\sqrt{2\pi}$

1.4.2 DISTRIBUCIÓN RICIAN

La distribución Rician modela el desvanecimiento con una línea de visión fuerte, se utiliza para un desvanecimiento rápido con una ruta de propagación LOS. Rician tiene la función de densidad con parámetro de no centralidad $s > 0$ y parámetro de escala $\sigma > 0$, para $x \geq 0$. La

función de la distribución de Rician es: $I_0 \left(\frac{xs}{\sigma^2} \right) \frac{x}{\sigma^2} e^{-\left(\frac{x^2+s^2}{2\sigma^2} \right)}$ (2)

Donde I_0 es la función de Bessel modificada de orden cero del primer tipo. La distribución de Rician se caracteriza por la relación entre las componentes directa y reflejada. Esta relación se conoce como factor K del entorno y se puede escribir como:

$$k = \frac{A^2}{2\sigma_n^2} \quad (3)$$

El factor k relaciona la potencia especular y difusa para una trayectoria de línea de visión directa. El desvanecimiento de Rician tiene un factor k entre 1-10 e intenta modular la relación entre la potencia de la señal directa (LOS de intensidad A) y la potencia de la señal dispersa, múltiples reflexiones NLOS de varianza σ_n^2 (Garg, V. 2007; MathWorks, 2021).

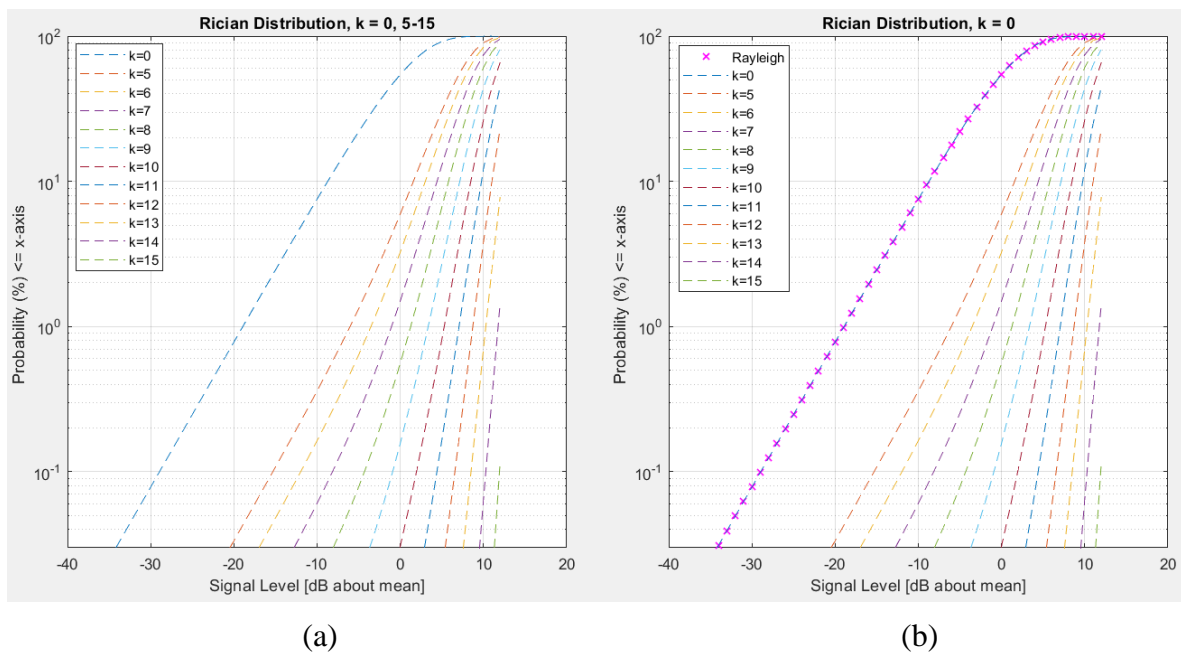


Figura 5. Curvas de la Distribución Rician k= 5-15 y k=0 (Rayleigh)

La Figura 5 (a) muestra la distribución Rician con el parámetro k variando de 0 hasta 15. La Figura 5 (b) muestra la Distribución con $k=0$, que corresponde al desvanecimiento de Rayleigh, este es un caso particular de Rician cuando $A=0$ (sin componente directa). El factor K indica la relación entre la amplitud y el parámetro b de Rayleigh. Anexo B.

1.4.3 DISTRIBUCIÓN DE NAKAGAMI

La distribución de Nakagami modela dispersiones densas proporcionando más control sobre la extensión del desvanecimiento. La función de densidad de Nakagami es:

$$2 \left(\frac{\mu}{\omega}\right)^{\mu} \frac{1}{\Gamma(\mu)} x^{(2\mu-1)} e^{-\frac{\mu x^2}{\omega}} \quad (4)$$

Esta distribución tiene un parámetro de forma μ y un parámetro de escala $\omega > 0$, para $x > 0$. Si x tiene una distribución de Nakagami con parámetros μ y ω , entonces x^2 tiene una distribución gamma con parámetro de forma μ y parámetro de escala ω/μ .

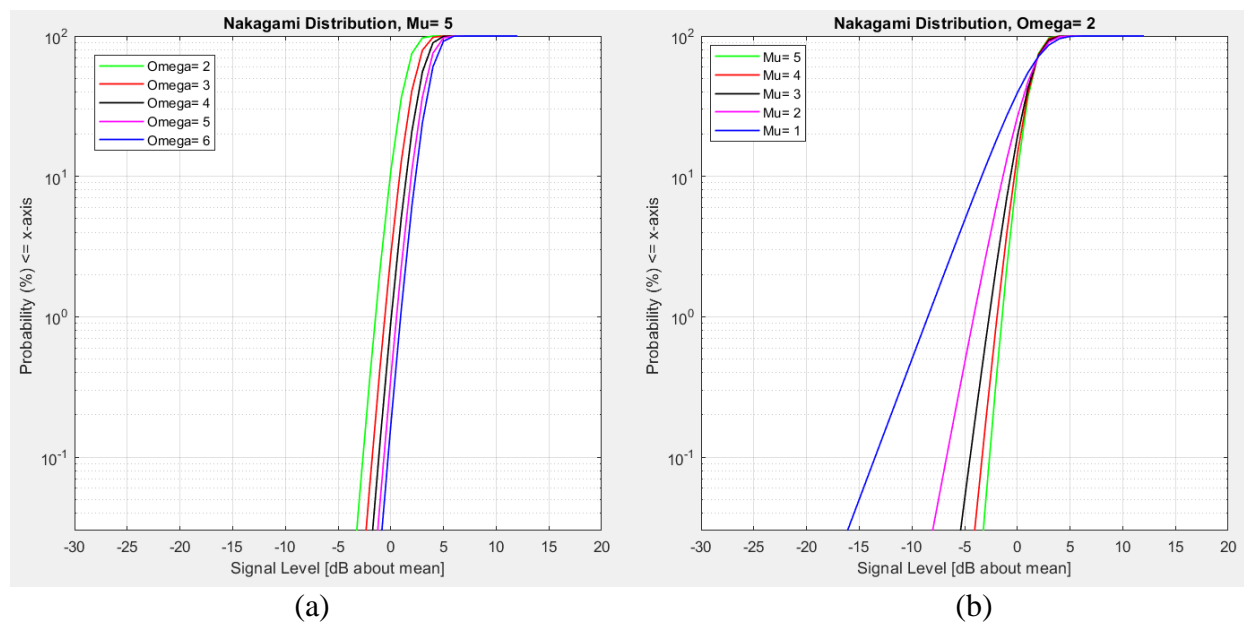


Figura 6. Curvas de la Distribución teórica de Nakagami / ω variable

La Figura 5 (a) muestra la distribución de Nakagami manteniendo el parámetro $\mu=5$ y variando el parámetro ω de 2 hasta 6. Por su parte, La Figura 5 (b) muestra la distribución manteniendo

el parámetro $\omega = 2$ y variando el parámetro μ de 5 hasta 1. Anexo C. μ es un parámetro de forma de Nakagami y ω es un parámetro de escala de la Distribución, los dos especificados como un valor escalar positivo.

1.4.4 NUEVOS MODELOS ESTADISTICOS DEL CANAL DE COMUNICACIONES

El estudio *Fading Evaluation in the mm-wave Band* (Marins et al., 2019) realiza mediciones sobre ondas milimétricas con frecuencias de 55 GHz a 65 GHz con visibilidad, sin visibilidad y polarizaciones horizontales/verticales en el transmisor y receptor, analiza el canal de desvanecimiento y evalúa los modelos Rayleigh, Rice, Nakagami-m, α - μ , κ - μ , η - μ y α - η - κ - μ . Analiza la amplitud y selectividad de frecuencia mediante funciones de densidad de probabilidad, distribución acumulativa y la tasa de cruce de nivel por unidad de ancho de banda. Estima parámetros para los modelos con datos experimentales y grafica curvas teóricas para el análisis comparativo. Las mediciones utilizan las distribuciones Rayleigh y Rician para la obtención de la estadística del desvanecimiento en los escenarios LOS y NLOS. El tratamiento de las ondas milimétricas en esta documentación requiere la utilización de los modelos Rayleigh, Hoyt, Rice, Nakagami-m y Weibull; para procesos más complejos se utilizan los modelos α - μ , κ - μ y η - μ .

Se propone el modelo de desvanecimiento α - η - κ - μ para identificar los fenómenos de propagación tales como: no linealidad, potencia de la dispersión y agrupamiento multitrayectoria. El esquema se basa en fenómenos físicos con fines teóricos por lo que unificar los modelos proporciona otros nuevos con formulaciones matemáticas complejas como el sistema α - η - κ - μ en el que las frecuencias altas muestran superficies irregulares y difusas de la longitud de onda. El desarrollo se establece por el desequilibrio en fase y cuadratura del desvanecimiento de α - η - κ - μ . Se selecciona la PDF y la distribución utilizada entre Rayleigh,

Rice, Nakagami-m, α - μ , κ - μ , η - μ , y α - η - κ - μ ; además, se ajustan los datos experimentales con las métricas de bondad de ajuste (GoF): error cuadrático medio normalizado (NMSE), Kolmogorov-Smirnov (KS) y criterio de información de Akaike (AIC). El objetivo es seleccionar el mejor modelo de desvanecimiento establecido por los ajustes aplicados.

Por otra parte, el estudio *Effective Throughput Analysis of α - η - κ - μ Fading Channels* (Ai, Y. Et al., 2020) se desarrolla sobre escenarios de propagación de ondas con un análisis del rendimiento efectivo de los sistemas de comunicación mediante canales que se desvanecen; deriva expresiones para el rendimiento efectivo de canales α - η - κ - μ , sistemas MISO y MIMO. Los resultados muestran el impacto del canal mediante la conducta asintótica de la relación señal/ruido (SNR). Una característica del estudio es que la pendiente de SNR y el rendimiento mejoran al aumentar la no linealidad del canal y el número de clústeres de múltiples trayectos.

El retardo, confiabilidad y eficiencia energética muestran el rendimiento del sistema por medio del análisis de los escenarios establecidos bajo restricciones reales. La literatura indica que la distribución de desvanecimiento α - η - κ - μ es el modelo más versátil y completo ya que incluye los modelos α - η - κ - μ , Rayleigh, Beckmann, Nakagami-m, Rice, Hoyt y Weibull en casos especiales. El nuevo modelo es flexible y versátil en los escenarios de propagación ya que considera efectos en la no unimodalidad y desequilibrio de fase y cuadratura. Se modelan los canales a partir de mediciones en ondas milimétricas (mmWave), en escenarios con línea de visión exterior (LoS) y sin línea de visión exterior (NLoS) a 28 GHz. El modelo α - η - κ - μ se ajusta mejor a las mediciones en escenarios LoS inferiores a 60 GHz; sin embargo, a pesar de las ventajas este modelo no desarrolla el rendimiento efectivo de los sistemas a través del canal de desvanecimiento por lo que es considerado como un gran potencial en escenarios emergentes y en la comunicación de ondas milimétrica.

1.5 METADATOS DE LA ESTADÍSTICA DEL CANAL UTILIZADA COMO REFERENCIA

El estudio *28 GHz Millimeter-Wave Ultrawideband Small-Scale Fading Models in Wireless Channels* (M. K. Samimi et al., 2016) obtiene mediciones de señales afectadas por desvanecimiento a pequeña escala para canales de banda ultra ancha de ondas milimétricas de 28 GHz, utilizando antenas direccionales en el transmisor y receptor en un entorno de prueba dispuesto por la Universidad de Nueva York, con el objetivo de establecer características para la formulación de modelos estadísticos en ondas milimétricas en la implementación de un simulador de este tipo de canal, conocido como NYUSIM.

Con la información empírica recolectada, el NYUSIM modela un canal estocástico (SCM) para señales RF que se propagan hasta 100 GHz. Este simulador utiliza distribuciones Rician y Rayleigh para recrear el desvanecimiento de pequeña escala de la señal en entornos LOS y NLOS. La señal se atenúa en cortas distancias (100 -500 m). Es un modelo de banda ancha que utiliza antenas de alta ganancia e incorpora coherencia espacial con un correlador deslizante. Los resultados muestran las amplitudes del voltaje para los escenarios: V-V (vertical-vertical) en antena copolarizada con una distribución Rician de factor K que varía de 5 a 15 dB para LOS y NLOS; V-H (vertical-horizontal) en antena polarizada cruzada, para LOS y NLOS con una distribución Rician de factor K que varía de 3 a 7 dB; y LOS-to-NLOS (transicional), para el escenario V-V y V-H con una distribución Rician de factor K que varía de 4 a 11 dB.

Las Figuras 7, 8 y 9 muestran las funciones de distribución acumulativa (CDF) empírica para los escenarios V-V, V-H y LOS-to-NLOS, con las CDF de la distribución de Rayleigh y Rician. El estudio muestra que Rayleigh subestima mediciones para un ancho de banda en RF de 800 MHz y concluye que Rician proporciona el mejor ajuste a los datos. La Tabla 1 extraída de la referencia compara los resultados con las distribuciones de Rayleigh y Rician.

Ambiente	K_{V-V} [dB]	K_{V-H} [dB]
LOS	9-15	3-7
NLOS	5-8	3-7
LOS-to-NLOS	4-7	6-10

Tabla 1. Factores K para distribuciones de Rician

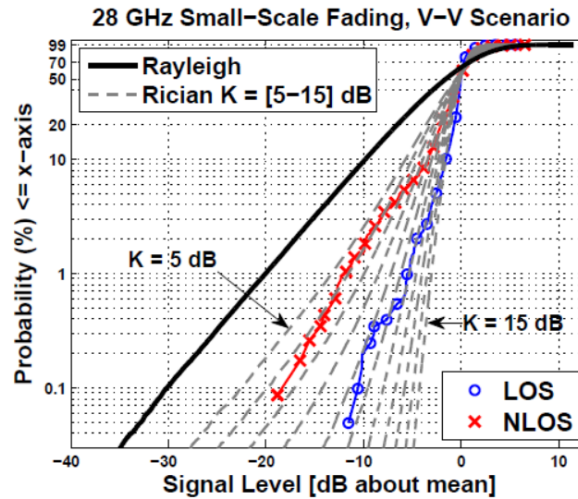


Figura 7. Desvanecimiento a pequeña escala de 28 GHz, escenario V-V (M. K. Samimi et al., 2016).

Señales LOS, NLOS, la distribución de Rayleigh, y las curvas delimitadas por 2 distribuciones de Rician con factores K de 9-15 dB en LOS, y 5-8 dB en NLOS.

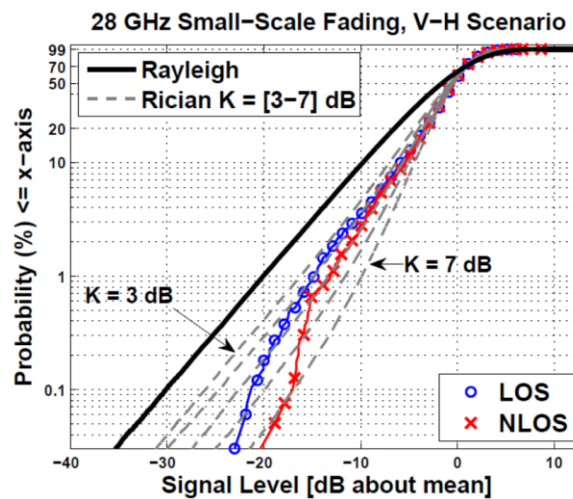


Figura 8. Desvanecimiento a pequeña escala de 28 GHz, escenario V-H (M. K. Samimi et al., 2016).

La Figura 8 muestra la CDF del desvanecimiento en las señales LOS y NLOS para el escenario V-H; la distribución de Rayleigh y las curvas delimitadas por 2 distribuciones de Rician para factores K que van desde 3 dB a 7 dB.

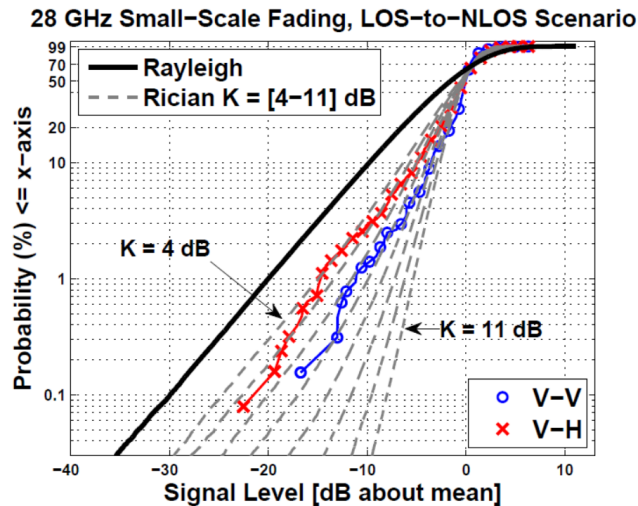


Figura 9. Desvanecimiento a pequeña escala de 28 GHz, escenario LOS-to-NLOS (M. K. Samimi et al., 2016).

Escenario LOS-to-NLOS en entorno copolarizado y de polarización cruzada; distribución Rayleigh y Rician para factores K de 4-6 dB en V-V, y 6-10 dB en V-H. (M. K. Samimi et al., 2016).

El documento de M. K. Samimi et al., 2016, presenta el desvanecimiento a pequeña escala de fluctuaciones aleatorias de amplitudes en múltiples trayectorias. Este Proyecto desarrolla la metodología adecuada para identificar la estadística del canal mediante un conjunto de datos sintetizado obtenido de la extracción punto por punto de los resultados publicados por la Universidad de Nueva York. Para la validación de la estadística se simula y comprueba el fenómeno por medio de la estimación de máxima verosimilitud de los parámetros correspondientes a las distribuciones de referencia, se realiza una comparación para establecer cuál de ellas es la más verosímil y se ejecuta un Test de Bondad de Ajuste para determinar si el conjunto de datos utilizado corresponde a las distribuciones típicas aplicadas.

2. METODOLOGÍA

2.1 EXTRACCIÓN DE DATOS DE REFERENCIA

Para identificar el modelo de desvanecimiento se extraen los puntos principales de cada curva empírica en los escenarios V-V, V-H y LOS to NLOS. Se ejecuta la función `Datatheif`, que realiza el algoritmo de extracción, Anexo D y la función `EXT_PUNTOS.m` encargada del reconocimiento; recupera la imagen, establece los límites del plano (y, origen, x) y permite la extracción de los puntos de cada curva, Anexo E (Makdah, A. 2021). Las imágenes tienen el formato “.png” y están en la misma ubicación.

El proceso genera 2 conjuntos de datos (x, y) que son almacenados en “data_paper.xlsx” (Anexo F);. Para recrear las señales los códigos generados leen el documento que contiene las celdas con los valores En este caso desarrolla un ejemplo con el Escenario V-V.

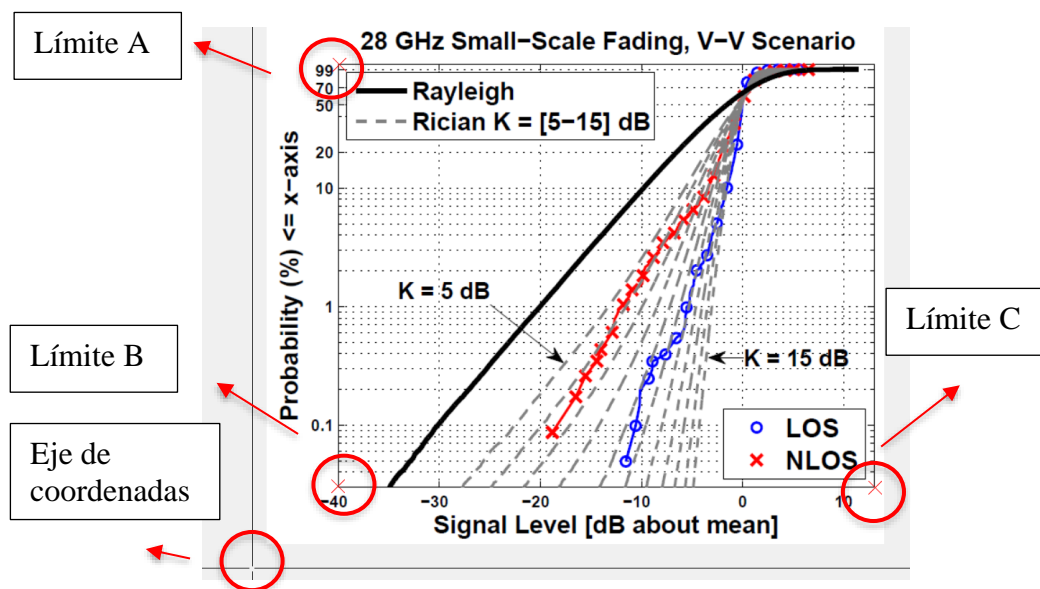


Figura 10. Límites de extracción de la figura

Con el código `EXT_PUNTOS.m` ejecutado se llama a la figura y se establecen los límites de lectura sobre el eje de coordenadas como se indica en la Figura 14.

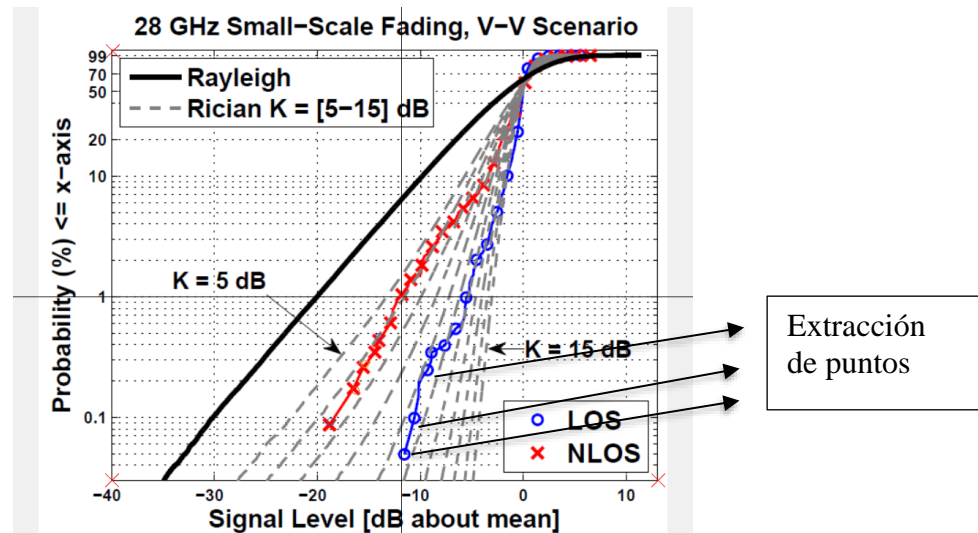


Figura 11. Extracción de puntos de la figura

La Figura 11 muestra la extracción de los puntos de las señales LOS y NLOS en el escenario polarizado. Para los escenarios: V-V se recuperan 23 puntos para la señal LOS y 27 puntos para la señal NLOS; V-H, 23 puntos para la señal LOS y 27 puntos para la señal NLOS; y LOS-to-NLOS, se recuperan 22 puntos para la señal V-V y 27 puntos para la señal V-H. La recopilación en algunas muestras indica que no hay excesos de variación.

2.2 MODELAMIENTO TEÓRICO DE LAS CURVAS EMPÍRICAS PARA CADA ESCENARIO

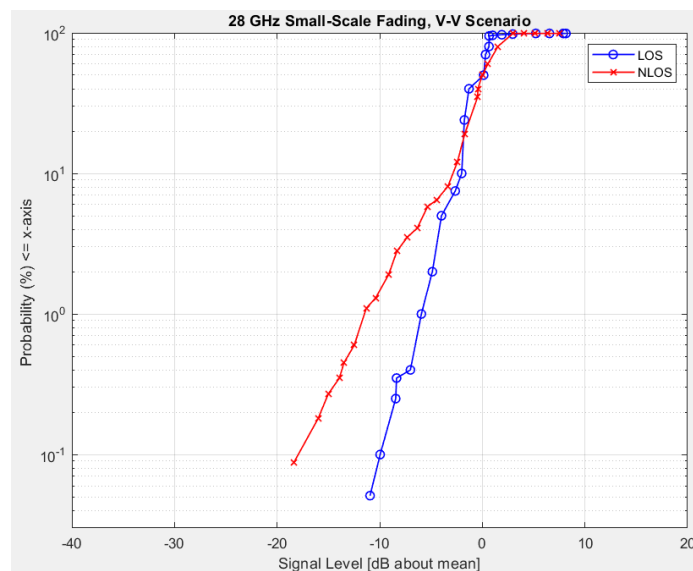


Figura 12. Curvas empíricas de desvanecimiento LOS y NLOS, escenario V-V.

Las Figuras 12, 13 y 14 muestran las señales empíricas de desvanecimiento recreadas para los escenarios polarizado, copolarizado y transicional respectivamente. Los vectores utilizados permiten generar un conjunto de datos sintetizado sobre el que se establecerán los ajustes estadísticos mediante las distribuciones típicas aplicadas, Anexo G, H e I.

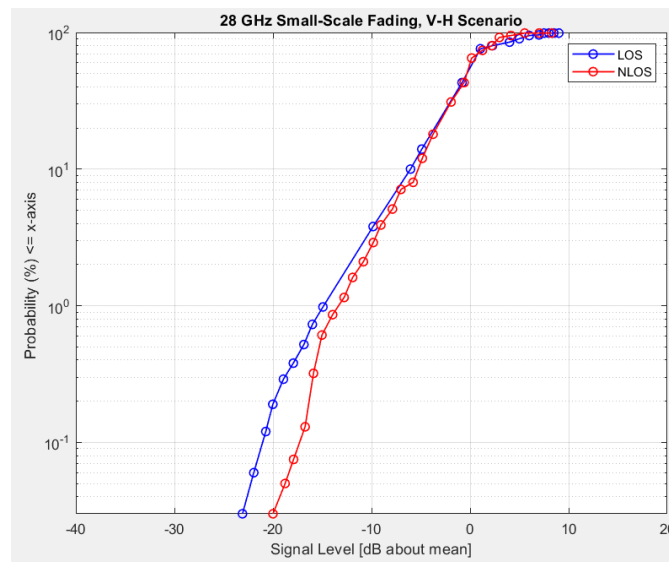


Figura 13. Curvas empíricas de desvanecimiento LOS y NLOS, escenario V-H.

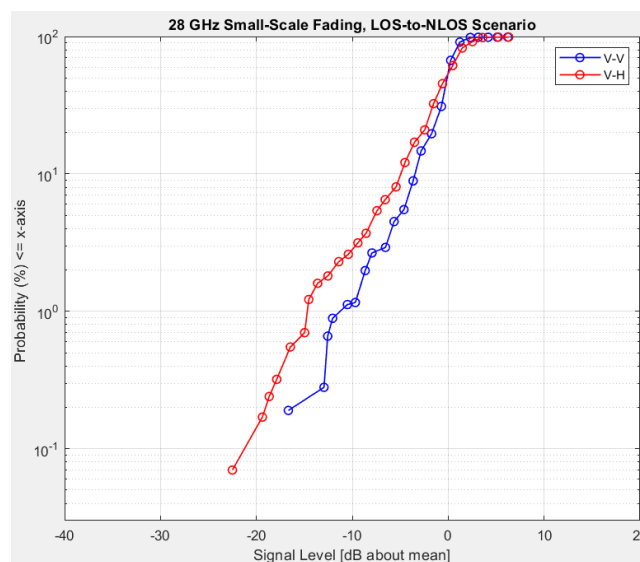


Figura 14. Curvas empíricas de desvanecimiento V-V y V-H, escenario LOS-to-NLOS.

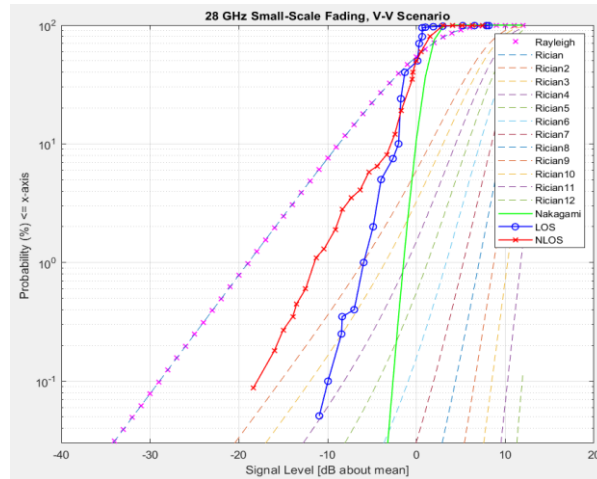


Figura 15. Escenario V-V, Señal LOS y NLOS, Rayleigh, Rician y Nakagami

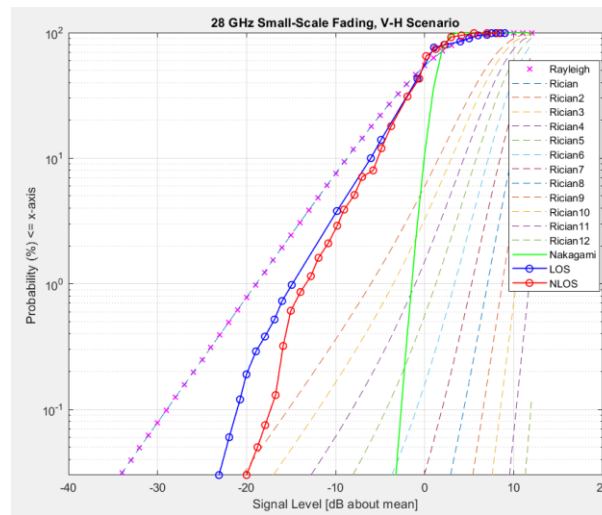


Figura 16. Escenario V-H, LOS, NLOS, Rayleigh, Rician y Nakagami.

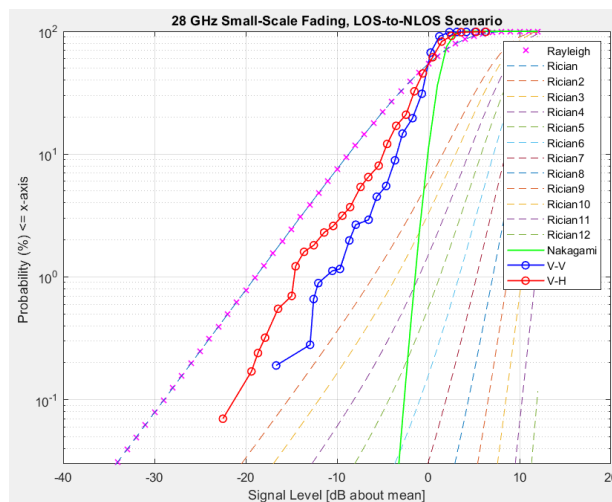


Figura 17. Escenario LOS-to-NLOS, V-V, V-H, Rayleigh, Rician y Nakagami

Las Figuras 15, 16 y 17 muestran las curvas empíricas y las distribuciones aplicadas con parámetros teóricos en cada escenario. Para cada caso la curva de Rician con $k=0$ es igual la curva de Rayleigh.

2.3 OBTENCIÓN DEL CONJUNTO DE DATOS EXTENDIDO

A partir de los puntos extraídos se genera un conjunto de datos sintetizado accesible para la aplicación de las distribuciones típicas establecidas mediante las cuales se generan los ajustes propicios para cada señal de desvanecimiento.

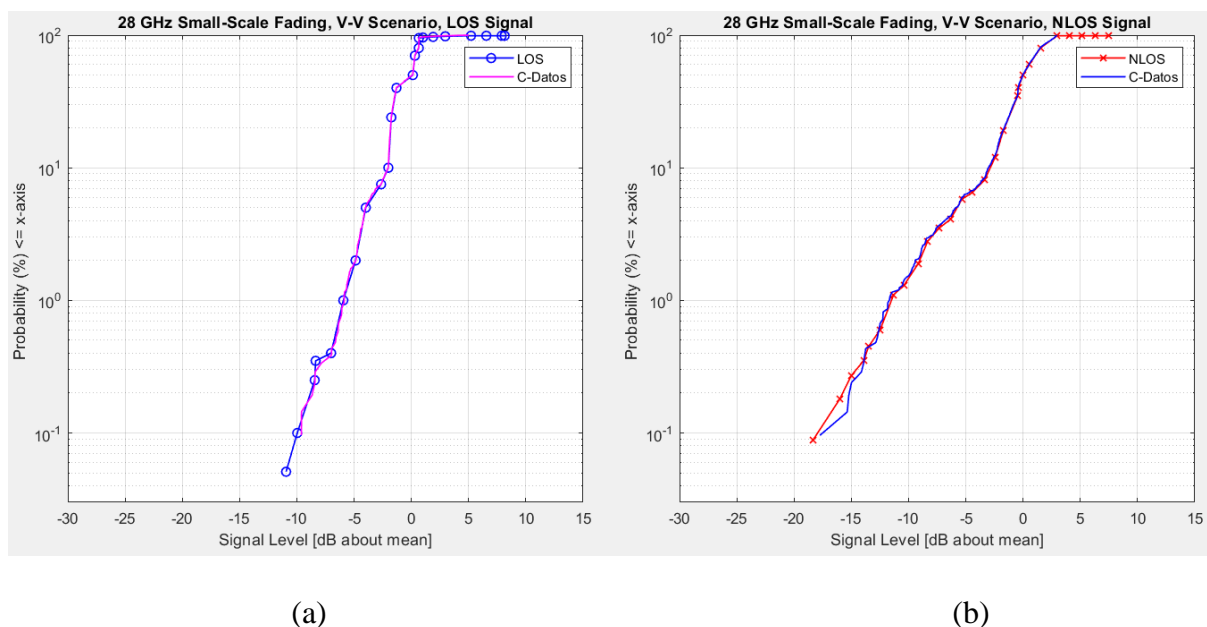


Figura 18. Escenario V-V, Señal LOS y NLOS, y Conjunto de Datos

Las curvas no muestran un desfase excesivo considerando que las curvas empíricas utilizan 27 puntos y el conjunto de datos sintetizado utiliza 2077 puntos. Para la Figura 18 (a) se utiliza comando floor (Anexo J) que genera repeticiones aleatorias. El Ajustador de Distribuciones de Matlab permite generar los vectores del conjunto de datos. Para la figura 18 (b) se generan más puntos aleatorios con el comando ceil (Anexo K) que permiten modelar el conjunto de datos sintetizado 2077 puntos en cada vector.

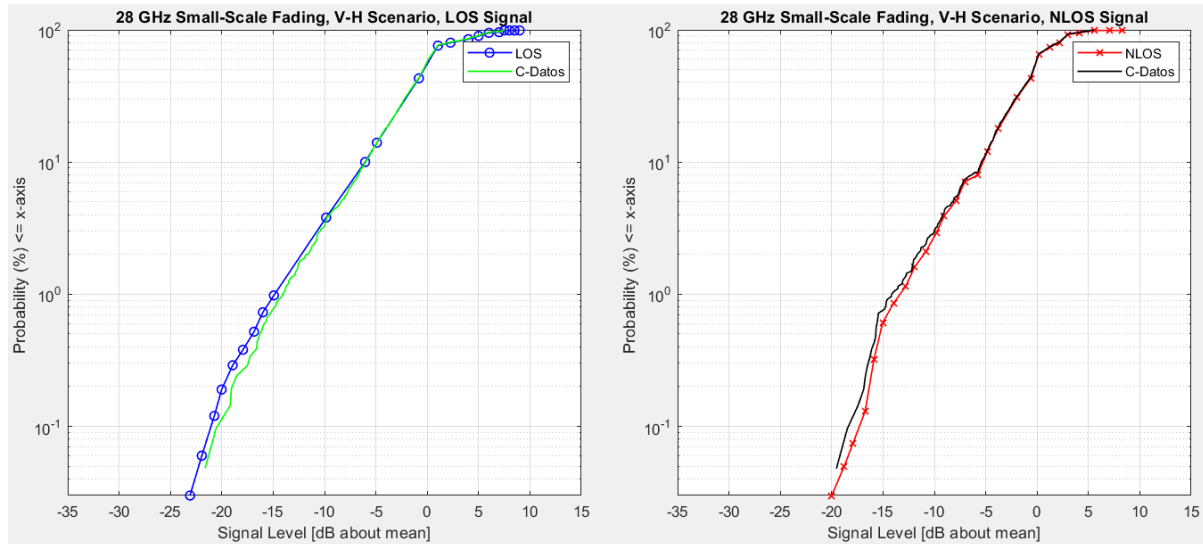
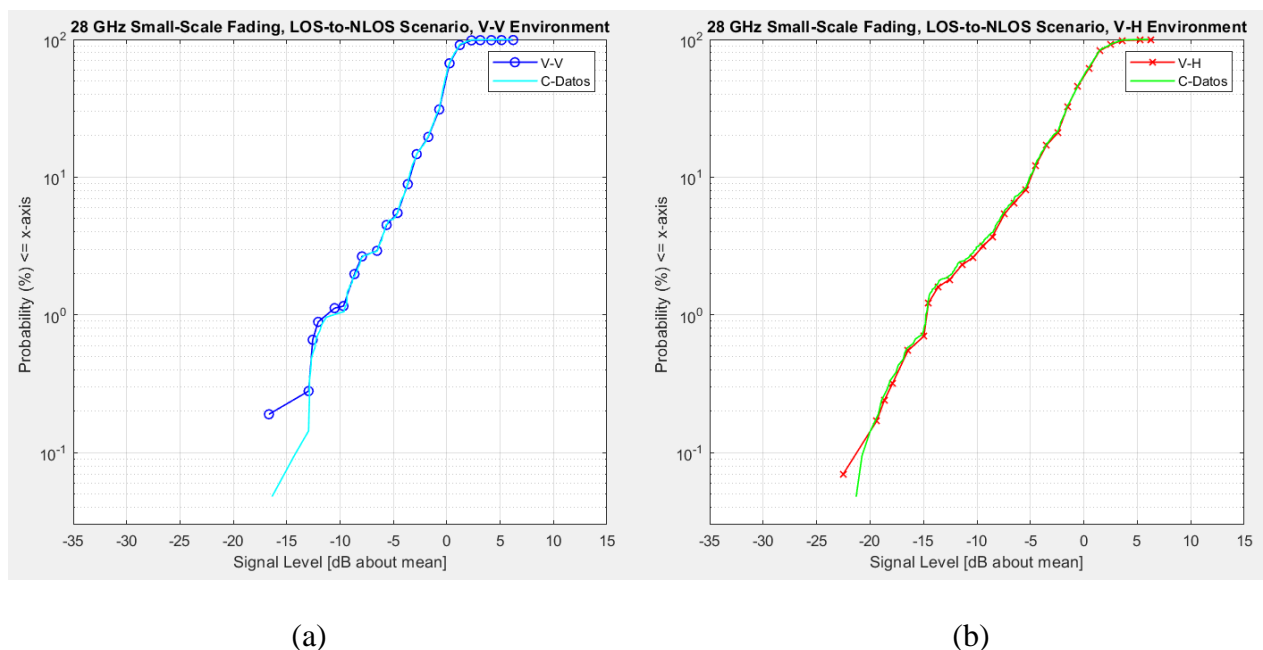


Figura 19. Escenario V-H, Señal LOS y NLOS, y Conjunto de Datos

Las dos señales muestran un desfase en la región del 1% de probabilidad, esto se debe a la cantidad de puntos extraído ya que el conjunto sintetizado se genera aleatoriamente sobre dichos puntos. La Figura 19 (a) se genera con 2075 puntos en cada vector mediante el comando floor (Anexo L). Por su parte, la Figura 19 (b) se genera con 2086 puntos aleatorios mediante el comando ceil (Anexo M) que permite una mayor aproximación de las curvas generadas.



(a)

(b)

Figura 20. Escenario LOS-to-NLOS, Entorno V-V y V-H, y Conjunto de Datos

La Figura 20 se genera con los códigos de los Anexos N y O para cada entorno; se utilizan los comandos floor y ceil para generar las repeticiones aleatorias que permitirán modelar el conjunto de datos. Las curvas muestran un desfase en la región del 0.1 % de probabilidad, esto se debe a que los primeros datos empíricos tienen una separación con respecto a la probabilidad de desvanecimiento causada por una falla en el enlace de comunicación.

2.4 GRÁFICAS COMPLETAS

Se modelan las siguientes curvas: empírica, conjunto de datos sintetizado y distribuciones de Rayleigh, Rician y Nakagami ajustadas sobre las señales requeridas para los escenarios polarizado, copolarizado y transicional. En la sección de resultados se muestran los parámetros obtenidos para cada distribución en cada entorno; además, se establece cuál es el mejor ajuste obtenido mediante una comparación desarrollada mediante el Test de Bondad de ajuste de Kolgomorov Smirnov.

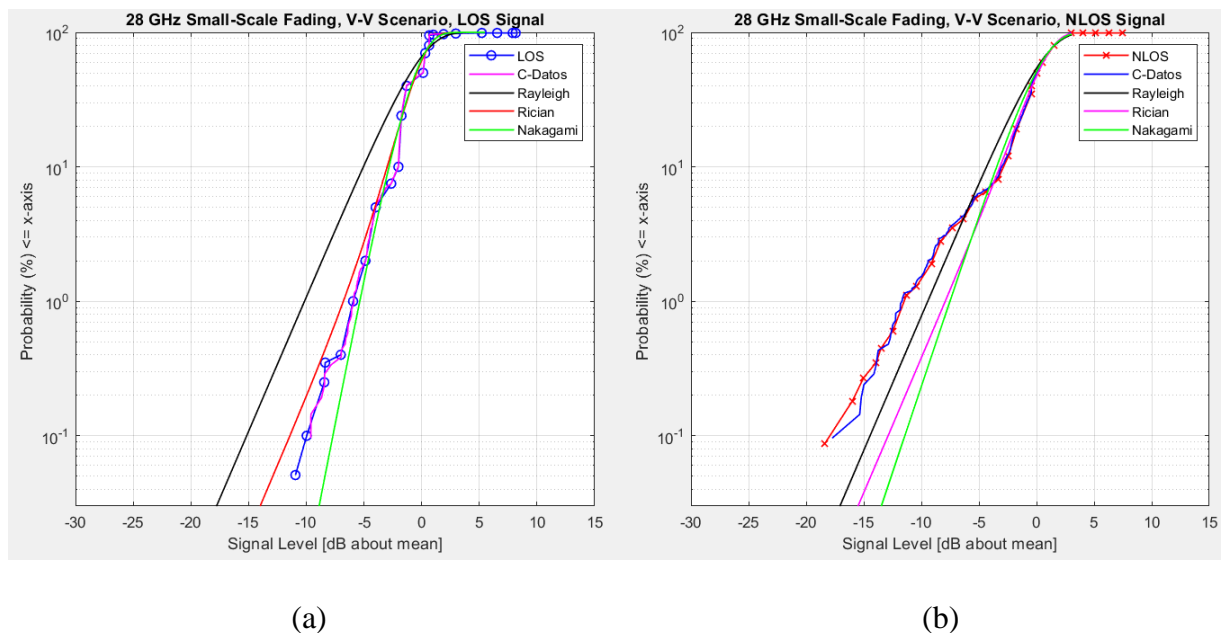


Figura 21. Escenario V-V, señal LOS y NLOS, Conjunto de Datos, Rayleigh, Rician y Nakagami.

La Figura 21 (a) muestra gráficamente que el mejor ajuste es el de la distribución Rician y Nakagami; sin embargo, en la región de mayor probabilidad de desvanecimiento la distribución Rayleigh también refleja un ajuste propicio para la señal. Por su parte, para la Figura 21 (b) las 3 distribuciones representan un buen ajuste sobre la región del 10 % de desvanecimiento.

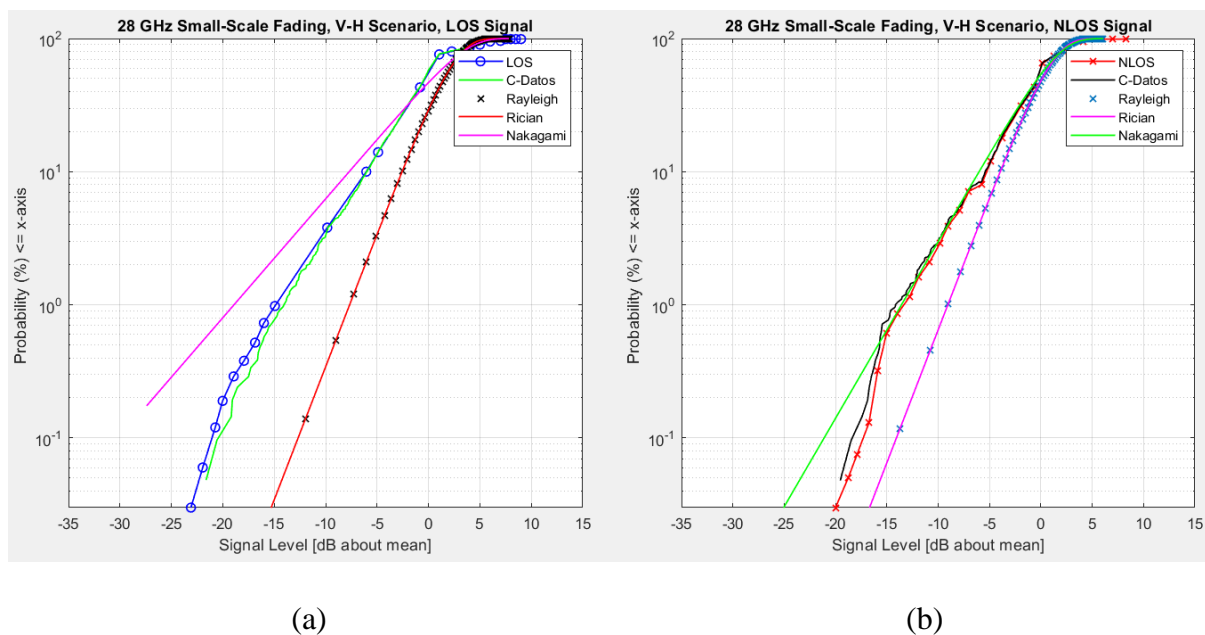


Figura 22. Escenario V-H, señal LOS y NLOS, Conjunto de Datos, Rayleigh, Rician y Nakagami.

La Figura 21 (a) denota gráficamente que las 3 distribuciones se ajustan desde aproximadamente el 5 % de probabilidad de desvanecimiento; la señal LOS representa un conjunto de datos empírico agrupado sobre esa región de probabilidad, el experimento real refleja que el desvanecimiento tiene mayor ocurrencia cuando el enlace de comunicación se estabiliza. En cambio, la Figura 21 (b) representa gráficamente un buen ajuste sobre la tercera y cuarta región de probabilidad de desvanecimiento para las 3 distribuciones reflejando que el experimento real tiene fallas en el enlace de comunicación en las colas de las distribuciones.

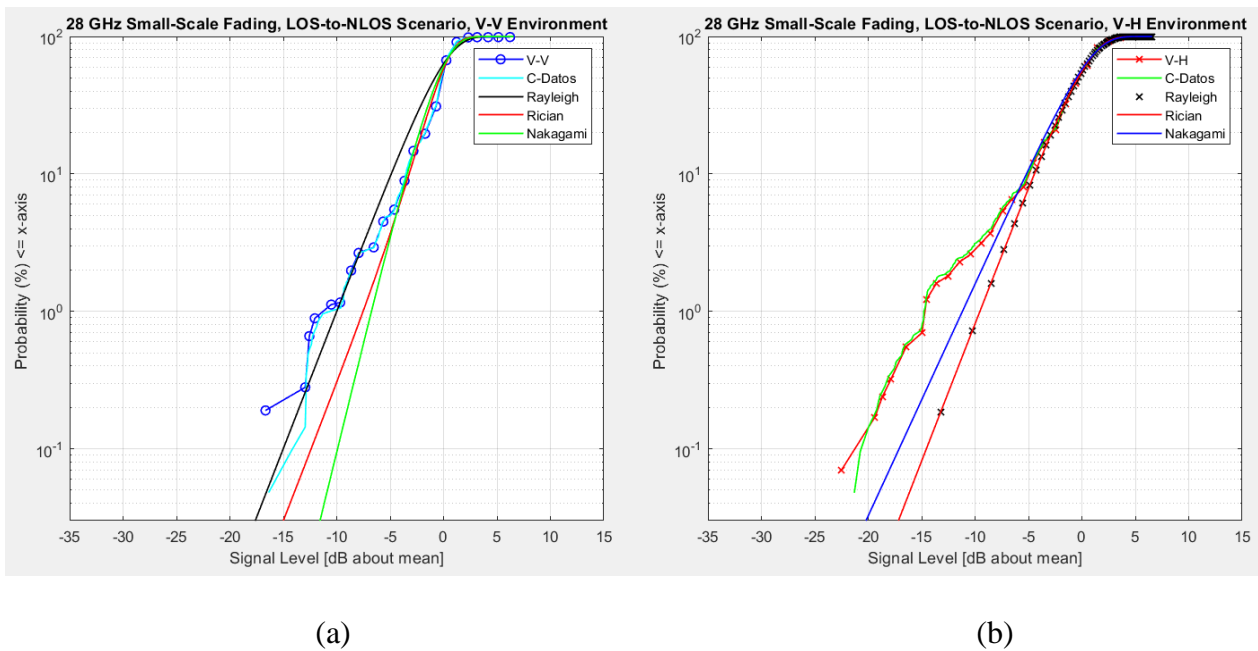


Figura 23. Escenario LOS-to-NLOS, Entorno V-V y V-H, Conjunto de Datos, Rayleigh, Rician y Nakagami.

La Figura 23 (a) representa un ajuste propicio para las distribuciones Rician y Nakagami con respecto a las 2 últimas regiones de probabilidad de desvanecimiento, Rayleigh ajusta la señal cuando existe mayor ocurrencia de enlace. La Figura 21 (b) muestra gráficamente que los tres ajustes son propicios para el entorno simulado. El ajuste de Rayleigh y Rician es el mismo; sin embargo, los resultados numéricos muestran que Rician refleja parámetros más consistentes con respecto a Rayleigh.

2.5 ESTIMACIÓN DE MÁXIMA VEROSIMILITUD

La Estimación de Máxima Verosimilitud (EMV) es un modelo general para estimar parámetros de una distribución estadística que depende de las observaciones de la muestra. Este procedimiento maximiza la probabilidad de obtención de los parámetros de las funciones de densidad que dependen de las observaciones y la distribución aplicada. Este método repite una operación determinada hasta encontrar el valor máximo o mínimo de una función y puede estar sujeto a restricciones en los valores finales de los parámetros (Rodó, P. 2020).

Si X_1, X_2, \dots, X_n tienen la PDF $f(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta_1, \theta_m)$ (5)

en donde los parámetros $\theta_1, \dots, \theta_m$ tienen valores desconocidos. Cuando x_1, \dots, x_n son los valores muestrales observados y la ecuación (5) es considerada como una función de $\theta_1, \dots, \theta_m$, recibe el nombre de función probabilidad. Las estimaciones de máxima probabilidad (mle) $\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_m$ son los valores de las θ_i que maximizan la función de probabilidad de modo que:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n; \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_m) \geq f(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m) \text{ para todo } \theta_1, \dots, \theta_m.$$

Cuando las X_i se sustituyen en lugar de las x_i , resultan los estimadores de máxima probabilidad (Devore, J. 1998).

2.6 MÉTODOS ESTADÍSTICOS DE AJUSTE

La metodología permite el tratamiento de los datos generados para la aplicación de métodos estadísticos que proporcionan parámetros y valores útiles para establecer cuál es el mejor ajuste sobre las curvas de desvanecimiento. Se utiliza el Ajustador de Distribuciones de Matlab ® para realizar el ajuste mediante las distribuciones Rayleigh, Rician y Nakagami. Se calcula el valor RMS (Raíz Cuadrática Media) para calcular la magnitud de la cantidad de datos variables utilizados. Y se aplica el Test de Kolmogorov Smirnov para determinar cuál es el mejor ajuste sobre las curvas empíricas de desvanecimiento.

2.6.1 AJUSTADOR DE DISTRIBUCIONES DE MATLAB ®

El Ajustador de Distribuciones de Matlab genera un CreateFit encargado de crear un gráfico de conjuntos de datos y ajustes de la distribución sobre el conjunto de datos de la señal empírica y elabora un gráfico utilizando el conjunto de datos de la entrada para el ajuste; la distribución de probabilidad ajustada de salida es Pd que contiene los parámetros de cada distribución. Se crean los códigos mostrados en el anexo P para cada escenario.

Parámetros de Ajuste de las Distribuciones

El ajuste aplicado mediante la Distribución Rayleigh proporciona el parámetro b , un valor escalar positivo propio de la distribución. Para el caso de Rician el Ajustador de Matlab genera el parámetro de no centralidad s , que describe los estadísticos de prueba mediante el comportamiento de la media y su desviación; y el valor de σ , un parámetro de escala que indica la dispersión de los datos, cuando es más grande muestra a la distribución más expandida, cuando es más pequeño la distribución luce más comprimida a nivel horizontal. Por su parte, la distribución de Nakagami calcula los parámetros μ y ω ; el primero un parámetro de la forma de la distribución y el segundo, un parámetro de escala (Minitab, 2022).

Valores resultantes de los ajustes aplicados

Log Likelihood

La Estimación por máxima verosimilitud es un estándar para estimación de parámetros en estadística, proporciona información completa del parámetro de interés contenido en su estimador MLE. Tiene consistencia sobre el valor del parámetro verdadero que generó los datos y eficiencia obtenida de la menor posible varianza de los estimados del parámetro (Gonzales, J., Morales, E. 2019). Los valores de la estimación no se pueden utilizar por sí solos como un índice de ajuste, ya que dependen del tamaño de la muestra; sí se pueden utilizar para comparar el ajuste de diferentes coeficientes. Como lo que se desea es maximizar la log-verosimilitud, el valor más alto es mejor (Minitab, 2022).

Media

Los estadísticos prefieren referirse a la media como media aritmética. Podemos definir la media como el promedio o el valor medio de un conjunto de datos, y su cálculo es tan sencillo como sumar todos los valores del conjunto de datos y dividirlos entre el número de valores que tiene el conjunto (Mendoza, J. 2019).

Varianza

La varianza es una medida de la dispersión de una variable aleatoria, es la sumatoria de las desviaciones al cuadrado con respecto a la media, dividida entre el número total de observaciones menos 1. Si todos los valores en un conjunto de datos son iguales, no hay dispersión, en cambio, si no todos son iguales existe dispersión (Riquelme, M. 2022).

2.6.2 ROOTS MEAN SQUARE

Roots Mean Square

Para un conjunto de n valores de una distribución discreta x_1, \dots, x_n , la media cuadrática (RMS) es la raíz cuadrada de la media de los valores x_i^2 , donde $\langle x^2 \rangle$ es la media de los valores de x_i^2

$$\text{(Wolfram 2022): } x_{RMS} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} = \sqrt{\langle x^2 \rangle} \quad (6)$$

2.6.3 TEST DE BONDAD DE AJUSTE

El GoF (Goodness of Fit) o Test de bondad de ajuste es un modelo estadístico que determina y describe si un conjunto de datos estudiados se ajusta o no a una determinada distribución. Las mediciones de esta prueba proporcionan características sobre la discrepancia entre los valores observados y esperados en el estudio (Illowsky, B., Dean, S. 2013).

Test de Kolgomorov Smirnov (KS)

El Test KS de dos muestras devuelve una decisión de prueba para la hipótesis nula de que los datos provienen de la misma distribución. La hipótesis alternativa representa diferentes distribuciones al comparar los vectores de salida. El resultado $h=0$ si la prueba acepta la hipótesis nula al nivel de significancia del 5%, y 1 si la rechaza. El p-value es un valor escalar en el rango $(0,1)$ y denota la probabilidad de observar un estadístico de prueba tan extremo o

más extremo que el valor observado bajo la hipótesis nula. Por otra parte, el valor k es la estadística de prueba establecida como un valor escalar no negativo (Mathworks, 2022).

El Proyecto identifica y recrea el Conjunto de Datos experimentales mediante la Estimación de Máxima Verosimilitud, en este proceso se obtienen parámetros que permiten modelar los ajustes de las distribuciones típicas con la mayor aproximación posible. El proceso se completa calculando, los resultados de cada ajuste y aplicando una prueba GoF que permitirá esclarecer y establecer cuál es el mejor ajuste posible aplicado sobre las curvas de desvanecimiento.

3. RESULTADOS

3.1 PARÁMETROS DE LAS DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS DEL AJUSTE APLICADO

Escenario	Señal	Rayleigh	Rician	Nakagami
V-V	LOS	b = 0.6852	s = 0.8396	mu = 2.1441
			sigma = 0.3381	omega = 0.9390
	NLOS	b = 0.7972	s = 0.90	mu = 1.2796
			sigma = 0.4805	omega = 1.2791

Tabla 2. Parámetros de las distribuciones aplicadas, señal LOS y NLOS, escenario V-V

Escenario	Señal	Rayleigh	Rician	Nakagami
V-H	LOS	b = 1.21	s = 0.0374	mu = 0.4463
			sigma = 1.2059	omega = 2.9116
	NLOS	b = 0.8738	s = 0.0362	mu = 0.6694
			sigma = 0.8760	omega = 1.5202

Tabla 3. Parámetros de las distribuciones aplicadas, señal LOS y NLOS, escenario V-H

Escenario	Señal	Rayleigh	Rician	Nakagami
LOS-to-NLOS	V-V	b = 0.7076	s = 0.8434	mu = 1.5931
			sigma = 0.3830	omega = 0.9967
	V-H	b = 0.7810	s = 0.0524	mu = 0.8497
			sigma = 0.7846	omega = 1.2188

Tabla 4. Parámetros de las distribuciones aplicadas, señal V-V y V-H, escenario LOS-to-NLOS

Las tablas 2, 3 y 4 muestran los parámetros obtenidos mediante los ajustes establecidos por las distribuciones típicas pertenecientes al Ajustador de Distribuciones de Matlab ®. Gráficamente se pueden observar en la sección 2.4. Estos valores permiten identificar el mejor ajuste que el Ajustador puede establecer sobre las curvas de desvanecimiento en función del conjunto de datos sintetizado.

3.2 VALORES RESULTANTES DE LOS AJUSTES ESTABLECIDOS

Escenario	Señal	Parámetros	Rayleigh	Rician	Nakagami
V-V	LOS	Log Likelihood	-813.906	-590.004	-532.653
		Mean	0.856	0.912	0.913
		Variance	0.200	0.105	0.101
	NLOS	Log Likelihood	-1350.780	-1242.040	-1310.310
		Mean	1.002	1.042	1.027
		Variance	0.274	0.188	0.221

Tabla 5. Resultados del Ajustador de distribuciones, escenario V-V

El valor principal de los resultados es el Log likelihood. Como se desea maximizar la log-verosimilitud se establece que mientras el valor es más alto el ajuste es mejor. En Ese caso para el escenario V-V en la señal LOS el mejor ajuste es proporcionado por la distribución de Nakagami, y para la señal NLOS el mejor ajuste se establece para la distribución de Rician.

Escenario	Señal	Parámetros	Rayleigh	Rician	Nakagami
V-H	LOS	Log Likelihood	-3260.880	-3262.420	-2609.260
		Mean	1.515	1.517	1.334
		Variance	0.627	0.629	1.152
	NLOS	Log Likelihood	-2022.210	-2055.590	-1893.140
		Mean	1.092	1.100	1.036
		Variance	0.326	0.331	0.448

Tabla 6. Resultados del Ajustador de distribuciones, escenario V-H

En el caso del escenario V-H el mejor ajuste para la señal LOS es el de la distribución de Nakagami con un valor de -2609.260 y para la señal NLOS es la distribución de Nakagami con un valor de 1893.140.

Escenario	Señal	Parámetros	Rayleigh	Rician	Nakagami
LOS-to-NLOS	V-V	Log Likelihood	-961.951	-731.999	-811.556
		Mean	0.885	0.937	0.929
		Variance	0.214	0.118	0.134
	V-H	Log Likelihood	-1574.440	-1599.830	-1577.080
		Mean	0.979	0.986	0.965
		Variance	0.262	0.266	0.307

Tabla 7. Resultados del Ajustador de distribuciones, escenario LOS-to-NLOS

Por su parte, para el entorno LOS-to-NLOS en cuanto al escenario V-V el mejor es el de la distribución de Rician con un valor de -731.999 y para el escenario V-H es la distribución de Rayleigh con un valor de 1574.440.

3.3 VALORES RMS CALCULADOS

Para obtener el valor RMS se utiliza el vector X empírico de cada señal en las distribuciones teóricas; este proceso devuelve el vector Y de la distribución. Con los dos vectores se calculan los valores RMS de cada señal. Anexo Q.

Escenario	Señal	RMS		
		Rayleigh	Rician	Nakagami
V-V	LOS	25.742	21.886	21.969
	NLOS	21.429	17.878	19.307

Tabla 8. RMS, escenario V-V; señal LOS y NLOS

En magnitud, el RMS más bajo para la señal LOS del escenario V-V es el de la distribución Rician, y para la señal NLOS del mismo escenario es el de la distribución Rician.

Escenario	Señal	RMS		
		Rayleigh	Rician	Nakagami
V-H	LOS	23.921	23.856	22.595
	NLOS	17.705	17.778	20.509

Tabla 9. RMS, escenario V-H; señal LOS y NLOS

Para el escenario V-H, la Tabla 9 muestra para la señal LOS que la distribución de Nakagami representa la magnitud con el menor valor de espacio entre la curva empírica y el ajuste. En cambio, para la señal NLOS el mejor ajuste es el proporcionado por la distribución de Rayleigh.

Escenario	Señal	RMS		
		Rayleigh	Rician	Nakagami
LOS-to-NLOS	V-V	23.874	19.497	20.736
	V-H	18.473	18.435	20.174

Tabla 10. RMS, escenario LOS-to-NLOS; señal V-V y V-H

La tabla 10 indica la relación entre el vector de probabilidad de desvanecimiento (Y) y el vector Y de cada distribución. El RMS representa la magnitud de la cantidad de datos variables utilizados, la separación entre la curva empírica de desvanecimiento y el ajuste aplicado. Para

el entorno LOS-to-NLOS, el escenario V-V refleja el menor valor en la distribución de Rayleigh; y para el entorno V-H la magnitud aceptada pertenece a la distribución de Rician.

3.4 APLICACIÓN DEL TEST DE KOLGOMOROV-SMIRNOV

Para el desarrollo del Test KS se utiliza el vector X empírico y el Y de las distribuciones teóricas, con los parámetros obtenidos al aplicar el ajuste sobre cada señal; el proceso devuelve el vector Y de la distribución. Se obtienen los parámetros h, p-value y k. h establece si el Test acepta o rechaza la hipótesis nula del ajuste a la estadística aplicada del canal (0 acepta y 1 rechaza); p-value y k corresponden a los descriptores de la prueba KS realizada. Anexo R.

Escenario	Entorno	Parámetros	Rayleigh	Rician	Nakagami
V-V	LOS	Resultado de la prueba de hipótesis (h)	1	0	0
		p-value	0.0428	0.1951	0.3599
		Estadístico de prueba KS (k)	0.3913	0.3043	0.2609

Tabla 11. Test KS, escenario V-V; Señal LOS.

El Test rechaza la distribución de Rayleigh y aprueba las distribuciones de Rician y Nakagami ($h=0$) para la señal LOS, y proporciona un valor p de 0.1951 y 0.3599 para cada distribución; este valor indica la probabilidad de observar un estadístico de prueba tan extremo o más extremo que el valor observado bajo la hipótesis nula. La tabla 11 muestra el estadístico de prueba k de dos muestras con los valores 0.1852 y 0.1853 para cada ajuste. El p-value es un parámetro válido sobre el 5% del nivel de confianza, lo que permite establecer que es un mejor indicador para aceptar el ajuste.

Escenario	Entorno	Parámetros	Rayleigh	Rician	Nakagami
V-V	NLOS	Resultado de la prueba de hipótesis (h)	0	0	0
		p-value	0.1533	0.6976	0.6977
		Estadístico de prueba KS (k)	0.2963	0.1852	0.1853

Tabla 12. Test KS, escenario V-V; Señal NLOS

El Test aprueba las distribuciones de Rayleigh, Rician y Nakagami para la señal NLOS, acepta la hipótesis nula ($h=0$) y proporciona un valor p de 0.1533, 0.6976 y 0.6977 para cada distribución; el valor indica la probabilidad de observar un estadístico de prueba más extremo que el valor observado bajo la hipótesis nula. Además, muestra los estadísticos de prueba (k) de 0.2963, 0.1852 y 0.1853 para cada ajuste.

Escenario	Entorno	Parámetros	Rayleigh	Rician	Nakagami
V-H	LOS	Resultado de la prueba de hipótesis (h)	0	0	1
		p-value	0.3599	0.3599	0.0173
		Estadístico de prueba KS (k)	0.2609	0.2609	0.4348

Tabla 13. Test KS, escenario V-H; Señal LOS

El Test rechaza la distribución de Nakagami y aprueba las distribuciones Rayleigh y Rician ($h=0$) para la señal LOS, los ajustes son similares y en el Test proporcionan un valor p de 0.3599 y un valor k de 0.2609 para cada distribución.

Escenario	Entorno	Parámetros	Rayleigh	Rician	Nakagami
V-H	NLOS	Resultado de la prueba de hipótesis (h)	0	0	1
		p-value	0.4656	0.4656	0.0156
		Estadístico de prueba KS (k)	0.2222	0.2222	0.4074

Tabla 14. Test KS, escenario V-H; Señal NLOS

El Test rechaza la distribución de Nakagami y aprueba las distribuciones Rayleigh y Rician ($h=0$) para la señal LOS, los ajustes son similares y en el Test proporcionan un valor p de 0.4656 y un valor k de 0.2222 para cada distribución.

Entorno	Escenario	Parámetros	Rayleigh	Rician	Nakagami
LOS-to-NLOS	V-V	Resultado de la prueba de hipótesis (h)	1	0	0
		p-value	0.0356	0.5628	0.5626
		Estadístico de prueba KS (k)	0.4091	0.2273	0.2271

Tabla 15. Test KS, escenario LOS-to-NLOS; Señal V-H

El Test rechaza la distribución de Rayleigh y aprueba las distribuciones Rician y Nakagami para el entorno V-V, acepta la hipótesis nula ($h=0$) y proporciona un valor p de 0.5628 y 0.5626 para cada distribución; este valor indica la probabilidad de observar un estadístico de prueba más extremo que el valor observado bajo la hipótesis nula. Además, muestra los valores del estadístico de prueba (k) de 0.2273 y 0.2271 para cada distribución.

Entorno	Escenario	Parámetros	Rayleigh	Rician	Nakagami
LOS-to-NLOS	V-V	Resultado de la prueba de hipótesis (h)	0	0	0
		p-value	0.6974	0.6976	0.1533
		Estadístico de prueba KS (k)	0.1850	0.1852	0.2963

Tabla 16. Test KS, escenario LOS-to-NLOS; Señal V-H

El Test aprueba las distribuciones de Rayleigh, Rician y Nakagami para el escenario V-H, el valor p de cada distribución es considerable por lo que la probabilidad de observación del estadístico de prueba es alta; el parámetro k refleja el estadístico de prueba que la distribución acepta con respecto al ajuste aplicado.

4. CONCLUSIONES

Se identificó la estadística del canal inalámbrico en la banda de ondas milimétricas, con base en mediciones experimentales realizadas por la Universidad de Nueva York a partir del entorno polarizado (V-V), copolarizado (V-H), con línea de vista (LOS), sin línea de vista (NLOS) y para el entorno transicional (LOS-to-NLOS) en los escenarios V-V y V-H. Se estableció un conjunto de datos sintetizado a partir de las curvas experimentales aportadas por la publicación de M. K. Samimi et al. Se determinó y validó una metodología probabilística de los nuevos datos generados que fueron utilizados para el desarrollo de la estadística del canal utilizando la estimación de máxima verosimilitud. Se identificó la estadística de desvanecimiento del canal a partir de pruebas de bondad de ajuste aplicadas sobre los modelos típicos utilizados en el ámbito de las telecomunicaciones.

Se estableció un proceso manual de extracción punto por punto, útil para recrear el experimento real. Se debería tener una cantidad suficiente de datos por lo que en este caso estamos replicando los datos para aplicar el método de máxima verosimilitud. Se recrea el trabajo para la comparación determinística que proporcione el mejor ajuste establecido sobre las curvas de desvanecimiento. Un proceso de extracción de datos tiene errores; no obstante, reconstruir el desvanecimiento permite estudiar la estadística de los parámetros de cada distribución, procedimiento accesible para comprender la conducta de cada curva de desvanecimiento con respecto a los entornos planteados en el experimento.

Se identifica que la distribución de Nakagami también representa un buen ajuste sobre las señales de desvanecimiento debido a que los parámetros obtenidos tienen una aproximación considerable hacia el ajuste de Rician aprobado por el estudio de M. K. Samimi et al. Se

estableció que la mayor exactitud del ajuste se presenta en las regiones con alta probabilidad de enlace, en las colas de las señales la comunicación falla.

El modelo utilizado accedió a un proceso de identificación de la estadística del canal. Los modelos están cambiando y lo que se requiere es tener una mejor tasa de transmisión de datos para que el enlace de comunicación no presente fallas en las colas de las distribuciones mediante las cuales se aplica el ajuste estadístico. La ventaja del modelo utilizado es que es accesible para recrear el experimento desde un marco estadístico propicio para la generación de parámetros que permitan establecer un Test de Bondad de ajuste apto para determinar el mejor modelo de desvanecimiento.

Este Proyecto permite el tratamiento futuro de las siguientes áreas:

- Utilización de ajustes no convencionales proporcionados por distribuciones paramétricas o distribución de Weibull.
- Con el proceso estadístico identificado se plantea desarrollar un modelo real generado por enlaces de comunicación móvil mediante simulaciones en sistemas de telecomunicaciones.
- Identificar de manera estadística las fallas del enlace de comunicación en las colas de las distribuciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ai, Y., Matgur, A., King, L., Cheffena, M. (2020). Effective Throughput Analysis of α - η - κ - μ Fading Channels.
- Comunicaciones, M. (2019). Modelado de Comunicaciones Móviles e Inalámbricas. *Modelo Banda Angosta : Rayleigh, Ricean noise*. (pp. 54-68). Instituto Tecnológico de Queretaro. Queretaro, México. Obtenido el 24 de febrero de 2022 desde http://www.itq.edu.mx/carreras/IngElectronica/archivos_contenido/Apuntes%20de%20materias/CDF1206_Comm_Movil_Inalamb/3_Modelado_ComunicacionMovil.pdf
- Durán, A. (2017). Introducción al uso de ondas milimétricas en móviles. Estudio y caracterización del canal y de la propagación en ondas milimétricas, orientada a su utilización en redes de comunicaciones móviles 5g. (*Tesis de Maestría*). (pp. 32-33). Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Madrid, España. Obtenido el 10 de enero de 2022 desde https://oa.upm.es/47318/1/TESIS_MASTER_ALEJANDRO_DURAN_BARRADO_2017.pdf
- Fernández, J. (2019). Telecomunicaciones digitales, dispositivos y sistemas. (*Tesis de Maestría*). (pp. 1-15). Universidad Autónoma de Nuevo León. Obtenido el 24 de febrero de 2022 desde <http://eprints.uanl.mx/7828/1/1020122965.PDF>
- Flores, J. (2020). Qué es el 5G y cómo nos cambiará la vida. *National Geographic España, Sección de Ciencia*, (Dic 04). Obtenido el 06 de enero 2021 de https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/que-es-5g-y-como-nos-cambiara-vida_14449
- Gonzales, J., Morales, E. (2019). Maximum Likelihood. Obtenido el 24 de junio de 2022 desde <https://ccc.inaoep.mx/~emorales/Cursos/NvoAprend/Acetatos/Maximum-likelihood.pdf>
- Illowsky, B., Dean, S. (2013). Prueba de Bondad de Ajuste. Introducción a la Estadística. Obtenido el 15 de junio de 2022 desde <https://openstax.org/books/introducci%C3%B3n-estad%C3%ADstica/pages/11-2-prueba-de-bondad-de-ajuste>

- Játiva, R. (2021). Modelos de Propagación. *El canal radio. Pérdidas en el trayecto de propagación*. Sistemas de Comunicaciones. (pp. 2-22). Universidad San Francisco de Quito. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Quito. Ecuador.
- Makdah, A. (2021). DataTheif. MATLAB Central File Exchange. Obtenido el 15 de septiembre de 2021 desde <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36618-data-theif>
- Marins, T., Dos Anjos, A. Peñarrocha, V. Rubio, L. Reig, J., Souza, R. & Yacoub, M. (2019). Fading Evaluation in the mm-wave Band.
- Mathworks. (2022). Two-sample Kolmogorov-Smirnov Test. *Definition*. Obtenido el 24 de julio de 2022 desde <https://la.mathworks.com/help/stats/kstest2.html>
- Mathworks. (2022). Nakagami Distribution. *Definition. Background*. Obtenido el 24 de febrero de 2022 desde <https://www.mathworks.com/help/stats/nakagami-distribution.html>
- Mathworks. (2021). Rayleigh Distribution. *Definition. Background*. Obtenido el 11 de septiembre de 2021 desde <https://la.mathworks.com/help/stats/rayleigh-distribution.html>
- Mathworks. (2021). Rician Distribution. *Definition. Background*. Obtenido el 11 de septiembre de 2021 desde <https://la.mathworks.com/help/stats/rician-distribution.html>
- Mendoza, J. (2019). Definición de media aritmética. Obtenido el 24 de junio de 2022 desde <https://estadisticamente.com/media-vs-mediana-definicion-y-diferencias/>
- Minitab. (2022). ¿Qué es log-verosimilitud? Obtenido el 24 de junio de 2022 desde <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/supporting-topics/regression-models/what-is-log-likelihood/>
- Minitab. (2022). Escala. *Interpretación*. Obtenido el 24 de julio de 2022 desde <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/probability-distributions-and-random-data/supporting-topics/parameters/scale/>

- Minitab. (2022). ¿Qué es el parámetro de no centralidad? Obtenido el 24 de julio de 2022 desde <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/probability-distributions-and-random-data/supporting-topics/data/noncentrality-parameter/>
- Ordeaña E. (2020). Análisis comparativo de los canales AWGN/Rayleigh/Rician utilizados en sistemas OFDM. (*Tesis de Grado*). Facultad de Educación Técnica para el desarrollo. Guayaquil, Ecuador. Obtenido el 15 de diciembre de 2021 desde <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/15575/1/T-UCSG-PRE-TEC-ITEL-381.pdf>
- Pahlavan, K. & Levesque, A. (2005). Overview of Wireless Networks. *Wireless Information Networks*. (pp. 3-5). Second Edition. New Jersey: Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing: John Proakis, Series Editor.
- Plaza, C. Rey, E. (2008) Análisis comparativo entre un sistema SISO y un sistema MIMO. (*Tesis de Grado*). (pp. 13-15). Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Popayán, Colombia. Obtenido el 01 de febrero desde <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2004/AN%C3%81LISIS%20COMPARATIVO%20ENTRE%20UN%20SISTEMA%20SISO%20Y%20UN%20SISTEMA%20MIMO.pdf?sequence=1>
- Riquelme, M. (2022). Varianza en Estadística (Uso, definición y formula). Obtenido el 24 de junio de 2022 desde <https://www.webyempresas.com/varianza/>
- Rodó, P. (2020). Estimación de Máxima Verosimilitud. *Definición Técnica*. Obtenido el 15 de junio de 2022 desde <https://economipedia.com/definiciones/estimacion-de-maxima-verosimilitud.html>
- Samimi, M., Rappaport, T. (2016) 3-D Millimeter-Wave Statistical Channel | 5G Wireless System Design.
- Samimi, M., MacCartney, G., Sun, S., Rappaport, T. (2016). 28 GHz Millimeter-Wave Ultrawideband Small-Scale Fading Models in Wireless Channels. NYU WIRELESS, NYU Tandon School of Engineering.

- Sánchez J. , García M., Sánchez D., Martínez A. (2012). Emulación de Entornos Complejos de Propagación en una MSC Mediante Algoritmos de Selección de Muestras.
- Sun, S., Rappaport, T., Shafi, M., Tang, P., Zhang, J., Smith, P. (2018) Propagation Models and Performance Evaluation for 5G Millimeter-Wave Bands.
- Sarkar, T., Salazar, M., Najib, M. (2018). The Physics and Mathematics of Electromagnetic Wave Propagation in Cellular Wireless Communication. The Mystery of Wave Propagation and Radiation from an Antenna (pp. 16-20). First Edition. New Jersey: 2018 John Wiley & Sons, Inc.
- Garg, V. (2007) Wireless Communications and Networking. San Francisco, CA: The Morgan Kaufmann Series in Networking. Series Editor, David Clark, M.I.T.
- Valle, L. (2012). Clasificación de los servicios inalámbricos. *Servicios Inalámbricos*. Facultad de Ingeniería. Buenos Aires, Argentina. Obtenido el 12 de enero de 2022 desde <https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/CyT6/6CyT%2012.pdf>
- Wolfram. (2022). MathWorld. Probability and Statistics. Moments. Calculus and Analysis. Special Functions. Means. *Root-Mean-Square*. Obtenido el 24 de julio de 2022 desde <https://mathworld.wolfram.com/Root-Mean-Square.html>
- Yacoub, M. (2016). The $\alpha, \eta, \kappa, \mu$ fading model," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 64, no. 8, pp. 3597-3610, Aug. 2016.

ANEXOS

ANEXO A: SCRIPT DISTRIBUCIÓN TEÓRICA DE RAYLEIGH

```

1 %% DISTRIBUCIÓN TEÓRICA DE RAYLEIGH
2 % Para b = 1/sqrt(2*pi) más 5 dB
3
4 x = -45:1:12; % Rango de la distribución en dB
5 b = (1/sqrt(2*pi))*2 % El FIT proporciona un valor de b. La función normalizada es b.
6 pd = makedist('Rayleigh','b',b);
7
8 y1 = (10.^(x/20)); % Escalamiento: multiplicando por b. y1 = (10.^(x/20))*sqrt(2*pi);
9 Y1 = cdf(pd,y1); Y1=Y1*100
10
11 semilogy(x,Y1,'mx','linewidth',1)
12 axis([-40 20 0.03 100])
13 grid on

```

ANEXO B: SCRIPT DISTRIBUCIÓN TEÓRICA DE RICIAN

```

15 %% DISTRIBUCION TEÓRICA DE RICIAN
16 x=-45:1:12; % Rango de la distribución en dB
17 b = (1/sqrt(2*pi))*2 % b normalizado: b = 1/sqrt(2*pi)
18 k = 10.^(5:1:15)/10;
19 k = [0,k];
20
21 y1 = (10.^(x/20)); Y1= zeros(1,length(x)); % y1 = (10.^(x/20))*sqrt(2*pi)
22
23 for j = 1:length(k)
24     s = (sqrt(2*k))*b
25     pd = makedist('Rician','s',s(j),'sigma',b)
26     Y1(j,:) = cdf(pd,y1); Y1=Y1*100
27     semilogy(x,Y1(j,:),'--');
28     hold on
29 end
30 axis([-40 20 0.03 100])
31 grid on

```

ANEXO C: SCRIPT DISTRIBUCIÓN DE NAKAGAMI

```

74 %% DISTRIBUCIÓN TEÓRICA DE NAKAGAMI
75
76 xn=-45:1:12; % Rango de la distribución en dB
77 y1n = (10.^(xn/10));
78
79 pdn1 = makedist('Nakagami','mu',5,'omega',2)
80 Y1n = cdf(pdn1,y1n); Y1n=Y1n*100
81 pdn2 = makedist('Nakagami','mu',5,'omega',3)
82 Y2n = cdf(pdn2,y1n); Y2n=Y2n*100
83 pdn3 = makedist('Nakagami','mu',5,'omega',4)
84 Y3n = cdf(pdn3,y1n); Y3n=Y3n*100
85 pdn4 = makedist('Nakagami','mu',5,'omega',5)
86 Y4n = cdf(pdn4,y1n); Y4n=Y4n*100
87 pdn5 = makedist('Nakagami','mu',5,'omega',6)
88 Y5n = cdf(pdn5,y1n); Y5n=Y5n*100
89
90 semilogy(xn,Y1n,'g','linewidth',1)
91 hold on
92 semilogy(xn,Y2n,'r','linewidth',1)
93 semilogy(xn,Y3n,'k','linewidth',1)
94 semilogy(xn,Y4n,'m','linewidth',1)
95 semilogy(xn,Y5n,'b','linewidth',1)
96 hold off

```



```

73     %% DISTRIBUCIÓN TEÓRICA DE NAKAGAMI
74
75     xn=-45:1:12; % Rango de la distribución en dB
76     yln = (10.^(xn/10));
77
78     pdn1 = makedist('Nakagami','mu',5,'omega',2)
79     Yln = cdf(pdn1,yln); Yln=Yln*100
80     pdn2 = makedist('Nakagami','mu',4,'omega',2)
81     Y2n = cdf(pdn2,yln); Y2n=Y2n*100
82     pdn3 = makedist('Nakagami','mu',3,'omega',2)
83     Y3n = cdf(pdn3,yln); Y3n=Y3n*100
84     pdn4 = makedist('Nakagami','mu',2,'omega',2)
85     Y4n = cdf(pdn4,yln); Y4n=Y4n*100
86     pdn5 = makedist('Nakagami','mu',1,'omega',2)
87     Y5n = cdf(pdn5,yln); Y5n=Y5n*100
88
89     semilogy(xn,Yln,'g','linewidth',1)
90     hold on
91     semilogy(xn,Y2n,'r','linewidth',1)
92     semilogy(xn,Y3n,'k','linewidth',1)
93     semilogy(xn,Y4n,'m','linewidth',1)
94     semilogy(xn,Y5n,'b','linewidth',1)
95     hold off

```

ANEXO D: DATATHEIF

```

1  function [x,y] = DataTheif(Image,A,B,C)
2
3  figure, imshow(Image);
4
5  for i = 1:3
6      Axis(i,:) = ginput(1);
7      hold on;
8      plot(Axis(i,1),Axis(i,2),'rx','markersize',15);
9  end
10
11  YScale = abs(A(2)-B(2))/abs(Axis(1,2)-Axis(2,2));
12  XScale = abs(C(1)-B(1))/abs(Axis(3,1)-Axis(2,1));
13
14  for i=1:100
15      try
16          Points(i,:) = ginput(1);
17      catch
18          break;
19      end
20      hold on;
21      plot(Points(i,1),Points(i,2),'o');
22  end
23
24  Points(:,1) = (Points(:,1)- Axis(2,1))*XScale;
25  Points(:,2) = (( Axis(3,2)-Points(:,2)))*YScale;
26  x = Points(:,1)+B(1);
27  y = Points(:,2)+B(2);
28

```

ANEXO E: EXT_PUNTOS.M

```

1 %% Extracción de puntos
2 - Image=imread('Figura5.png'); % Ejemplo: Escenario LOS To NLOS
3
4 - A=[-40 100]; % Límite (0,y)
5 - B=[-40 -1.5229]; % Límite (0,0), Valor inicial: B=[-40 0.01];
6 - C=[10 -1.5229]; % Límite (x,0), Valor inicial: C=[10 0.01];
7
8 - [x,y]=DataTheif(Image,A,B,C) % x, y = conjunto de datos recuperado
9
10 % Gráfica -Extracción de puntos
11 - plot(x,y,'linewidth',2) % semilogy(x,y,'linewidth',2) Ajuste de escala
12 - title('DATATHEIF')
13 - xlabel('x')
14 - ylabel('y')
15 - legend('DATATHEIF -Figure')
16 - grid on
17 - axis([-40 20 0.03 100])
    
```

ANEXO F: PUNTOS RECUPERADOS (DATA_PAPER)

Escenario	V-H		V-V		Escenario	V-H		V-V		Escenario	V-H		V-V	
	CDF(%)	dB	CDF(%)	dB		CDF(%)	dB	CDF(%)	dB		CDF(%)	dB	CDF(%)	dB
L O S	0.03	-23.09	0.05	-10.94	N L O S	0.03	-20.00	0.09	-18.36	L O S t o N L O S	0.07	-22.50	0.19	-16.67
	0.06	-21.95	0.10	-9.96		0.05	-18.77	0.18	-16.01		0.17	-19.37	0.28	-12.95
	0.12	-20.73	0.25	-8.44		0.08	-17.91	0.27	-15.01		0.24	-18.66	0.66	-12.56
	0.19	-20.01	0.35	-8.36		0.13	-16.74	0.35	-13.93		0.32	-17.88	0.89	-12.05
	0.29	-18.94	0.40	-7.01		0.32	-15.89	0.45	-13.48		0.55	-16.46	1.12	-10.51
	0.38	-17.94	1.00	-5.94		0.61	-15.03	0.60	-12.48		0.70	-14.96	1.16	-9.68
	0.52	-16.86	2.00	-4.87		0.86	-13.95	1.10	-11.31		1.22	-14.54	1.98	-8.65
	0.73	-16.00	5.00	-3.98		1.15	-12.78	1.30	-10.40		1.60	-13.61	2.66	-7.95
	0.98	-14.93	7.50	-2.64		1.61	-11.92	1.90	-9.14		1.81	-12.55	2.92	-6.54
	3.80	-9.84	10.00	-2.01		2.10	-10.83	2.80	-8.32		2.30	-11.41	4.50	-5.64
	10.00	-6.05	24.00	-1.75		2.90	-9.82	3.50	-7.33		2.60	-10.41	5.50	-4.62
	14.00	-4.90	40.00	-1.30		3.90	-9.05	4.10	-6.33		3.15	-9.42	8.90	-3.65
	43.00	-0.82	50.00	0.13		5.10	-7.88	5.80	-5.34		3.70	-8.56	14.70	-2.82
	76.00	1.05	70.00	0.31		7.10	-7.02	6.50	-4.43		5.40	-7.43	19.60	-1.73
	80.00	2.26	80.00	0.65		8.00	-5.78	8.10	-3.35		6.50	-6.57	31.00	-0.71
	85.00	4.00	95.00	0.66		12.00	-4.85	12.00	-2.44		8.05	-5.43	67.11	0.26
	90.00	5.00	96.00	1.01		18.00	-3.76	19.00	-1.72		12.10	-4.51	91.08	1.22
	95.00	6.00	97.00	1.90		31.00	-1.93	35.00	-0.46		17.00	-3.51	98.45	2.31
	96.00	7.00	98.00	2.96		43.00	-0.61	40.00	-0.43		20.92	-2.45	98.76	3.14
	99.00	7.50	99.00	5.21		65.00	0.16	50.00	0.00		32.47	-1.52	98.76	4.17
99.00	8.00	99.00	6.55	74.00	1.25	60.00	0.54	45.39	-0.60	98.86	5.13			
99.00	8.50	99.00	7.89	80.00	2.19	80.00	1.52	61.43	0.47	98.98	6.22			
99.00	9.00	99.00	8.15	92.00	2.97	99.00	2.97	82.48	1.47					
				95.00	4.14	99.00	4.06	91.76	2.53					
				99.00	5.54	99.00	5.14	98.28	3.60					
				99.00	7.02	99.00	6.32	98.96	5.23					
				99.00	8.27	99.00	7.49	98.97	6.30					

ANEXO G: SCRIPT CURVAS EMPÍRICAS ESCENARIO V-V

```

82 %% CURVAS EMPÍRICAS DEL ESCENARIO V-V (FIGURA 5)
83
84 % SEÑAL LOS
85 Y_LOSVV=xlswread('data_paper.xlsx','D3:D25');
86 X_LOSVV=xlswread('data_paper.xlsx','E3:E25');
87
88 % SEÑAL NLOS
89 Y_NLOSVV=xlswread('data_paper.xlsx','D27:D53');
90 X_NLOSVV=xlswread('data_paper.xlsx','E27:E53');
91
92 semilogy(X_LOSVV,Y_LOSVV,'b-o','linewidth',1)
93 hold on
94 semilogy(X_NLOSVV,Y_NLOSVV,'r-x','linewidth',1)
95 title('28 GHz Small-Scale Fading, V-V Scenario')
96 xlabel('Signal Level [dB about mean]')
97 ylabel('Probability (%) <= x-axis ')
98 legend('LOS','NLOS')
99 axis ([-40 20 0.03 100])
100 grid on

```

ANEXO H: SCRIPT CURVAS EMPÍRICAS ESCENARIO V-H

```

76 %% CURVAS EMPÍRICAS DEL ESCENARIO V-H
77
78 % SEÑAL LOS
79 X_LOSVH=xlswread('data_paper.xlsx','C3:C25');
80 Y_LOSVH=xlswread('data_paper.xlsx','B3:B25');
81
82 % SEÑAL NLOS
83 X_NLOSVH=xlswread('data_paper.xlsx','C27:C53');
84 Y_NLOSVH=xlswread('data_paper.xlsx','B27:B53');
85
86 semilogy(X_LOSVH,Y_LOSVH,'b-o','linewidth',1)
87 hold on
88 semilogy(X_NLOSVH,Y_NLOSVH,'r-o','linewidth',1)
89 title('28 GHz Small-Scale Fading, V-H Scenario')
90 xlabel('Signal Level [dB about mean]')
91 ylabel('Probability (%) <= x-axis ')
92 legend('LOS','NLOS')
93 axis ([-40 20 0.03 100])
94 grid on

```

ANEXO I: SCRIPT CURVAS EMPÍRICAS ESCENARIO LOS-TO-NLOS

```

100 %% CURVAS EMPÍRICAS DEL ESCENARIO LOS-to-NLOS
101
102 % SEÑAL V-V
103 X_VV=xlswread('data_paper.xlsx','E55:E76');
104 Y_VV=xlswread('data_paper.xlsx','D55:D76');
105
106 % SEÑAL V-H
107 X_VH=xlswread('data_paper.xlsx','C55:C81');
108 Y_VH=xlswread('data_paper.xlsx','B55:B81');
109
110 semilogy(X_VV,Y_VV,'b-o','linewidth',1)
111 hold on
112 semilogy(X_VH,Y_VH,'r-o','linewidth',1)
113 title('28 GHz Small-Scale Fading, LOS-to-NLOS Scenario')
114 xlabel('Signal Level [dB about mean]')
115 ylabel('Probability (%) <= x-axis ')
116 legend('V-V','V-H')
117 axis ([-40 20 0.03 100])
118 grid on

```

ANEXO J: CONJUNTO DE DATOS LOS V-V

```

1  %% Escenario V-V: Curva LOS, Conjunto de Datos
2  X_LOSVV=xlsread('data_paper.xlsx','E3:E25');
3  Y_LOSVV=xlsread('data_paper.xlsx','D3:D25');
4
5  XDIF = 10.^(X_LOSVV/10)
6  YDIF = floor(21*diff(Y_LOSVV)); % Numero de repeticiones de las mediciones en XDIF, Floor indica menos puntos.
7  data_LVV = []
8  inicio = 0
9  fin = 0
10
11 for k = 1:length(XDIF)-1
12     if YDIF(k)~=0
13         inicio = inicio + 1;
14         aux = (XDIF(k+1)-XDIF(k))*rand(1,YDIF(k))+XDIF(k),
15         fin = inicio + YDIF(k) - 1
16         data_LVV (inicio:fin) = aux;
17         inicio = fin
18     end
19 end

```

ANEXO K: CONJUNTO DE DATOS NLOS V-V

```

43 %% Escenario V-V: Curva NLOS, Conjunto de Datos
44 X_NLOSVV=xlsread('data_paper.xlsx','E27:E53');
45 Y_NLOSVV=xlsread('data_paper.xlsx','D27:D53');
46
47 XDIF2 = 10.^(X_NLOSVV/10)
48 YDIF2 = ceil(21*diff(Y_NLOSVV)); % Numero de repeticiones de las mediciones en XDIF, Ceil indica más puntos.
49 data_NLVV = []
50 inicio2 = 0
51 fin2 = 0
52
53 for k2 = 1:length(XDIF2)-1
54     if YDIF2(k2)~=0
55         inicio2 = inicio2 + 1;
56         aux2 = (XDIF2(k2+1)-XDIF2(k2))*rand(1,YDIF2(k2))+XDIF2(k2),
57         fin2 = inicio2 + YDIF2(k2) - 1
58         data_NLVV (inicio2:fin2) = aux2;
59         inicio2 = fin2
60     end
61 end

```

ANEXO L: CONJUNTO DE DATOS LOS V-H

```

1  %% Escenario V-H: Curva LOS, Conjunto de Datos
2  X_LOSVH=xlsread('data_paper.xlsx','C3:C25');
3  Y_LOSVH=xlsread('data_paper.xlsx','B3:B25');
4
5  XDIF = 10.^(X_LOSVH/10)
6  YDIF = floor(21*diff(Y_LOSVH)); % Numero de repeticiones de las mediciones en XDIF, Floor indica menos puntos.
7  data_LVH = []
8  inicio = 0
9  fin = 0
10
11 for k = 1:length(XDIF)-1
12     if YDIF(k)~=0
13         inicio = inicio + 1;
14         aux = (XDIF(k+1)-XDIF(k))*rand(1,YDIF(k))+XDIF(k),
15         fin = inicio + YDIF(k) - 1
16         data_LVH (inicio:fin) = aux;
17         inicio = fin
18     end
19 end

```

ANEXO M: CONJUNTO DE DATOS NLOS V-H

```

43 %% Escenario V-H: Curva NLOS, Conjunto de Datos
44 X_NLOSVH=xlsread('data_paper.xlsx','C27:C53');
45 Y_NLOSVH=xlsread('data_paper.xlsx','B27:B53');
46
47 XDIF2 = 10.^(X_NLOSVH/10)
48 YDIF2 = ceil(21*diff(Y_NLOSVH)); % Numero de repeticiones de las mediciones en XDIF, Ceil indica más puntos.
49 data_NLVH = []
50 inicio2 = 0
51 fin2 = 0
52
53 for k2 = 1:length(XDIF2)-1
54     if YDIF2(k2)~=0
55         inicio2 = inicio2 + 1;
56         aux2 = (XDIF2(k2+1)-XDIF2(k2))*rand(1,YDIF2(k2))+XDIF2(k2),
57         fin2 = inicio2 + YDIF2(k2) - 1
58         data_NLVH (inicio2:fin2) = aux2;
59         inicio2 = fin2
60     end
61 end

```

ANEXO N: CONJUNTO DE DATOS V-V LOS-TO-NLOS

```

1 %% Escenario LOS-to-NLOS: Curva V-V, Conjunto de Datos
2 X_VVLNL=xlsread('data_paper.xlsx','E55:E76');
3 Y_VVLNL=xlsread('data_paper.xlsx','D55:D76');
4
5 XDIF = 10.^(X_VVLNL/10)
6 YDIF = ceil(21*diff(Y_VVLNL)); % Numero de repeticiones de las mediciones en XDIF, Floor indica menos puntos.
7 data_VVLNL = []
8 inicio = 0
9 fin = 0
10
11 for k = 1:length(XDIF)-1
12     if YDIF(k)~=0
13         inicio = inicio + 1;
14         aux = (XDIF(k+1)-XDIF(k))*rand(1,YDIF(k))+XDIF(k),
15         fin = inicio + YDIF(k) - 1
16         data_VVLNL (inicio:fin) = aux;
17         inicio = fin
18     end
19 end

```

ANEXO O: CONJUNTO DE DATOS V-H LOS-TO-NLOS

```

43 %% Escenario LOS-to-NLOS: Curva V-H, Conjunto de Datos
44 X_VHLNL=xlsread('data_paper.xlsx','C55:C81');
45 Y_VHLNL=xlsread('data_paper.xlsx','B55:B81');
46
47 XDIF2 = 10.^(X_VHLNL/10)
48 YDIF2 = ceil(21*diff(Y_VHLNL)); % Numero de repeticiones de las mediciones en XDIF, Ceil indica más puntos.
49 data_VHLNL = []
50 inicio2 = 0
51 fin2 = 0
52
53 for k2 = 1:length(XDIF2)-1
54     if YDIF2(k2)~=0
55         inicio2 = inicio2 + 1;
56         aux2 = (XDIF2(k2+1)-XDIF2(k2))*rand(1,YDIF2(k2))+XDIF2(k2),
57         fin2 = inicio2 + YDIF2(k2) - 1
58         data_VHLNL (inicio2:fin2) = aux2;
59         inicio2 = fin2
60     end
61 end

```

ANEXO P: DISTRIBUCIONES APLICADAS MEDIANTE EL AJUSTADOR DE DISTRIBUCIONES

		Códigos de las Distribuciones		
Escenario	Señal	Rayleigh	Rician	Nakagami
V-V	LOS	RAY_LVV.m	RIC_LVV.m	NKG_LVV.m
	NLOS	RAY_NLVH.m	RIC_NLVH.m	NKG_NLVH.m

		Códigos de las Distribuciones		
Escenario	Señal	Rayleigh	Rician	Nakagami
V-H	LOS	RAY_LVH.m	RIC_LVH.m	NKG_LVH.m
	NLOS	RAY_NLVH.m	RIC_NLVH.m	NKG_LVH.m

		Códigos de las Distribuciones		
Escenario	Señal	Rayleigh	Rician	Nakagami
LOS-to-NLOS	V-V	RAY_VVLNL.m	RIC_VVLNL.m	NKG_VVLNL.m
	V-H	RAY_VHLNL.m	RIC_VHLNL.m	NKG_VHLNL.m

ANEXO Q: ROOTS MEAN SQUARE

Escenario V-V

```

%% ERROR RAYLEIGH / LOS_VV
ERAY_LVV = Y_LOSVV - Y1
rms = 20*log10(sqrt(sum(ERAY_LVV.^2)/length(ERAY_LVV)))
semilogy(X_LOSVV,ERAY_LVV,'g','linewidth',1)

%% ERROR RICIAN / LOS_VV
ERIC_LVV = Y_LOSVV - Y1
rms = 20*log10(sqrt(sum(ERIC_LVV.^2)/length(ERIC_LVV)))
semilogy(X_LOSVV,ERIC_LVV,'g','linewidth',1)

%% ERROR NAKAGAMI / LOS_VV
ENKG_LVV = Y_LOSVV - Y1n
rms = 20*log10(sqrt(sum(ENKG_LVV.^2)/length(ENKG_LVV)))
semilogy(X_LOSVV,ENKG_LVV,'r','linewidth',1)

%% ERROR RAYLEIGH / NLOS_VV
ERAY_NLVV = Y_NLOSVV - Y1
rms = 20*log10(sqrt(sum(ERAY_NLVV.^2)/length(ERAY_NLVV)))
semilogy(X_NLOSVV,ERAY_NLVV,'g','linewidth',1)

%% ERROR RICIAN / NLOS_VV
ERIC_NLVV = Y_NLOSVV - Y1
rms = 20*log10(sqrt(sum(ERIC_NLVV.^2)/length(ERIC_NLVV)))
semilogy(X_NLOSVV,ERIC_NLVV,'g','linewidth',1)

```

```

%% ERROR NAKAGAMI / NLOS_VV
ENKG_NLVV = Y_NLOS_VV - Y1n
rms = 20*log10(sqrt(sum(ENKG_NLVV.^2)/length(ENKG_NLVV)))
semilogy(X_NLOS_VV,ENKG_NLVV,'b','linewidth',1)

```

Escenario V-H

```

%% ERROR RAYLEIGH / LOS_VH
ERAY_LVH = Y_LOS_VH - Y1
rms = 20*log10(sqrt(sum(ERAY_LVH.^2)/length(ERAY_LVH)))
semilogy(X_LOS_VH,ERAY_LVH,'g','linewidth',1)

%% ERROR RICIAN / LOS_VH
ERIC_LVH = Y_LOS_VH - Y1
rms = 20*log10(sqrt(sum(ERIC_LVH.^2)/length(ERIC_LVH)))
semilogy(X_LOS_VH,ERIC_LVH,'g','linewidth',1)

%% ERROR NAKAGAMI / LOS_VH
ENKG_LVH = Y_LOS_VH - Y1n
rms = 20*log10(sqrt(sum(ENKG_LVH.^2)/length(ENKG_LVH)))
semilogy(X_LOS_VH,ENKG_LVH,'r','linewidth',1)

%% ERROR RAYLEIGH / NLOS_VH
ERAY_NLVH = Y_NLOS_VH - Y1
rms = 20*log10(sqrt(sum(ERAY_NLVH.^2)/length(ERAY_NLVH)))
semilogy(X_NLOS_VH,ERAY_NLVH,'g','linewidth',1)

%% ERROR RICIAN / NLOS_VH
ERIC_NLVH = Y_NLOS_VH - Y1
rms = 20*log10(sqrt(sum(ERIC_NLVH.^2)/length(ERIC_NLVH)))
semilogy(X_NLOS_VH,ERIC_NLVH,'g','linewidth',1)

%% ERROR NAKAGAMI / NLOS_VH
ENKG_NLVH = Y_NLOS_VH - Y1n
rms = 20*log10(sqrt(sum(ENKG_NLVH.^2)/length(ENKG_NLVH)))
semilogy(X_NLOS_VH,ENKG_NLVH,'b','linewidth',1)

```

Escenario LOS-to-NLOS

```

%% ERROR RAYLEIGH / V-V_LOS-to-NLOS
ERAY_VVLNL = Y_VVLNL - Y1
rms = 20*log10(sqrt(sum(ERAY_VVLNL.^2)/length(ERAY_VVLNL)))
semilogy(X_VVLNL,ERAY_VVLNL,'g','linewidth',1)

%% ERROR RICIAN / V-V_LOS-to-NLOS
ERIC_VVLNL = Y_VVLNL - Y1
rms = 20*log10(sqrt(sum(ERIC_VVLNL.^2)/length(ERIC_VVLNL)))
semilogy(X_VVLNL,ERIC_VVLNL,'g','linewidth',1)

%% ERROR NAKAGAMI / V-V_LOS-to-NLOS
ENKG_VVLNL = Y_VVLNL - Y1n
rms = 20*log10(sqrt(sum(ENKG_VVLNL.^2)/length(ENKG_VVLNL)))
semilogy(X_VVLNL,ENKG_VVLNL,'r','linewidth',1)

%% ERROR RAYLEIGH / V-H_LOS-to-NLOS
ERAY_VHLNL = Y_VHLNL - Y1
rms = 20*log10(sqrt(sum(ERAY_VHLNL.^2)/length(ERAY_VHLNL)))
semilogy(X_VHLNL,ERAY_VHLNL,'g','linewidth',1)

%% ERROR RICIAN / V-H_LOS-to-NLOS
ERIC_VHLNL = Y_VHLNL - Y1
rms = 20*log10(sqrt(sum(ERIC_VHLNL.^2)/length(ERIC_VHLNL)))
semilogy(X_VHLNL,ERIC_VHLNL,'g','linewidth',1)

%% ERROR NAKAGAMI / V-H_LOS-to-NLOS
ENKG_VHLNL = Y_VHLNL - Y1n
rms = 20*log10(sqrt(sum(ENKG_VHLNL.^2)/length(ENKG_VHLNL)))
semilogy(X_VHLNL,ENKG_VHLNL,'b','linewidth',1)

```

ANEXO R: TEST KOLGOMOROV -SMIRNOV

Escenario V-V

```

1 %% Test KS de dos muestras: Escenario V-V, Curva LOS
2
3 %% Test KS / Rayleigh
4 [h1,p1,k1] kstest2(Y_LOSVV,Y1) % Y EMP., Y RAY TEÓRICA.
5
6 %% Test KS / Rician
7 [h2,p2,k2] kstest2(Y_LOSVV,Y1) % Y EMP., Y RIC TEÓRICA.
8
9 %% Test KS / Nakagami
10 [h3,p3,k3] kstest2(Y_LOSVV,Y1n) % Y EMP., Y NKG TEÓRICA.
11
12 %% Test KS de dos muestras: Escenario V-V, Curva NLOS
13
14 %% Test KS / Rayleigh
15 [h4,p4,k4] kstest2(Y_NLOSVV,Y1) % Y EMP., Y RAY TEÓRICA.
16
17 %% Test KS / Rician
18 [h5,p5,k5] kstest2(Y_NLOSVV,Y1) % Y EMP., Y RIC TEÓRICA.
19
20 %% Test KS / Nakagami
21 [h6,p6,k6] kstest2(Y_NLOSVV,Y1n) % Y EMP., Y NKG TEÓRICA.

```

Escenario V-H

```

1 %% Test KS de dos muestras: Escenario V-H, Curva LOS
2
3 %% Test KS / Rayleigh
4 [h1,p1,k1] kstest2(Y_LOSVH,Y1) % Y EMP., Y RAY TEÓRICA.
5
6 %% Test KS / Rician
7 [h2,p2,k2] kstest2(Y_LOSVH,Y1) % Y EMP., Y RIC TEÓRICA.
8
9 %% Test KS / Nakagami
10 [h3,p3,k3] kstest2(Y_LOSVH,Y1n) % Y EMP., Y NKG TEÓRICA.
11
12 %% Test KS de dos muestras: Escenario V-H, Curva NLOS
13
14 %% Test KS / Rayleigh
15 [h4,p4,k4] kstest2(Y_NLOSVH,Y1) % Y EMP., Y RAY TEÓRICA.
16
17 %% Test KS / Rician
18 [h5,p5,k5] kstest2(Y_NLOSVH,Y1) % Y EMP., Y RIC TEÓRICA.
19
20 %% Test KS / Nakagami
21 [h6,p6,k6] kstest2(Y_NLOSVH,Y1n) % Y EMP., Y NKG TEÓRICA.

```

Entorno LOS-to-NLOS

```

1 %% Test KS de dos muestras: Escenario L-t-NL, Curva V-V
2
3 %% Test KS / Rayleigh
4 [h1,p1,k1] kstest2(Y_VVLNL,Y1) % Y EMP., Y RAY TEÓRICA.
5
6 %% Test KS / Rician
7 [h2,p2,k2] kstest2(Y_VVLNL,Y1) % Y EMP., Y RIC TEÓRICA.
8
9 %% Test KS / Nakagami
10 [h3,p3,k3] kstest2(Y_VVLNL,Y1n) % Y EMP., Y NKG TEÓRICA.
11
12 %% Test KS de dos muestras: Escenario L-t-NL, Curva V-H
13
14 %% Test KS / Rayleigh
15 [h4,p4,k4] kstest2(Y_VHLNL,Y1) % Y EMP., Y RAY TEÓRICA.
16
17 %% Test KS / Rician
18 [h5,p5,k5] kstest2(Y_VHLNL,Y1) % Y EMP., Y RIC TEÓRICA.
19
20 %% Test KS / Nakagami
21 [h6,p6,k6] kstest2(Y_VHLNL,Y1n) % Y EMP., Y NKG TEÓRICA.

```