

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Memoria de Título

IMPACTO DEL MOVIMIENTO DE UN DRON EN LA ATENUACIÓN DE SEÑAL: UN ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL PATH LOSS

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil Electrónico, mención Computadores

Alumno
Juliana Rebolledo Bloch

Profesor Guía
Melissa Diago

Profesor Co-Referente
Ricardo Olivares

Diciembre 10 2025, Valparaíso, Chile

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): X Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Impacto del movimiento de un dron en la atenuación de señal: un análisis experimental del path loss

Nombre del candidato(a): Juliana Beatriz Rebolledo Bloch

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Electrónica

Campus: Casa Central **Departamento:** Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Melissa Eugenia Diago Mosquera, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

X El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

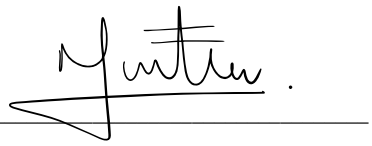
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 02/03/2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28/02/2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, en especial a mi padre Jaime y a mi madre Jinky, por su apoyo incondicional, por cada palabra de aliento y por enseñarme a perseverar incluso en los momentos más difíciles. A mi hermana Antonia, por acompañarme siempre con cariño y admiración mutua.

A mis amigos y amigas que formaron parte de este largo camino universitario, tanto de mi primera carrera como de Electrónica. En particular, agradezco a mis amigos electrónicos, quienes hicieron de una carrera tan exigente una experiencia más liviana y alegre. Su compañía, apoyo y comprensión fueron fundamentales para avanzar incluso cuando todo parecía complejo.

A mis compañeras de la selección de fútbol, quienes me enseñaron que la disciplina, la constancia y el amor por el deporte pueden convivir con las exigencias académicas. Gracias por ayudarme a encontrar equilibrio.

A mi gatita Kira, quien me ha acompañado desde el colegio y ha estado conmigo en tantas noches de estudio. Su compañía silenciosa pero incondicional fue un refugio constante en este proceso.

A mi profesora guía, Melissa, por su dedicación, cercanía y respaldo permanente. Más que una guía académica, ha sido una mujer en quien pude apoyarme y confiar, lo que hizo de este proceso un aprendizaje profundo y humano.

Finalmente, un mensaje para todas las mujeres que estudian en espacios aún marcados por la presencia masculina: sigamos abriendo caminos con valentía, seguridad y orgullo. Que nuestro esfuerzo inspire a las generaciones que vienen.

RESUMEN

EL uso creciente de drones en aplicaciones de monitoreo, inspección y *smart farming* ha impulsado el interés por comprender cómo estos dispositivos afectan la propagación de señales inalámbricas cuando se desplazan en las cercanías de un enlace fijo. En particular, en bandas de alta frecuencia como 18 GHz, pequeñas obstrucciones pueden introducir pérdidas adicionales que modifican temporalmente la potencia recibida.

En este trabajo se estudia el desvanecimiento por obstrucción generado por un dron al interceptar un enlace fijo en línea de vista a 18 GHz. El objetivo es caracterizar cómo varía la atenuación producida por el dron bajo distintas trayectorias de movimiento y describir el comportamiento temporal del *Path Loss* asociado a cada una de ellas. Para ello se analiza cómo la potencia recibida evoluciona a medida que el dron modifica su posición relativa respecto de la LoS, manteniéndose constante la geometría transmisor–receptor.

La campaña experimental se llevó a cabo en terreno utilizando antenas horn de 21,1 y un analizador de espectros para registrar la potencia recibida a lo largo del tiempo. Se consideraron cuatro configuraciones geométricas: trayectoria en suspensión sobre la LoS, trayectoria horizontal, trayectoria vertical y desplazamientos por sobre y bajo la LoS. Estas mediciones permitieron obtener series temporales de potencia recibida y del *Path Loss* asociado a cada caso, posibilitando una comparación detallada entre trayectorias.

Los resultados muestran que la trayectoria en suspensión presenta pérdidas reducidas, típicamente del orden de 1 dB a 2 dB, asociadas únicamente a la obstrucción física del dron sobre el haz directo. Este comportamiento es coherente con el tamaño relativo del UAV respecto de la primera zona de Fresnel, cuya extensión transversal en el enlace estudiado es significativamente mayor que el diámetro efectivo del dron, de modo que la obstrucción observada corresponde a una intrusión parcial del volumen de propagación.

Las trayectorias horizontales exhiben un comportamiento muy similar, lo que indica que el movimiento del dron a lo largo de la LoS no altera significativamente el nivel de atenuación mientras permanezca dentro del haz principal. Por su parte, las trayectorias verticales presentan variaciones abruptas pero de baja magnitud

(1 dB a 3 dB), atribuibles al cruce entre posiciones alineadas y no alineadas con el enlace. Finalmente, los desplazamientos por sobre y bajo la LoS evidencian pérdidas levemente menores, consistentes con una obstrucción marginal del haz y con una intrusión reducida en la zona de Fresnel.

En conjunto, los resultados permiten concluir que el desvanecimiento observado depende principalmente del grado de obstrucción geométrica introducido por el dron, más que de su movimiento. Estos hallazgos aportan evidencia experimental para la caracterización del *shadowing* dinámico en enlaces de alta frecuencia y constituyen una base para futuros estudios orientados al modelado predictivo y a la planificación de sistemas donde drones y enlaces fijos coexisten.

Palabras Claves

Desvanecimiento por obstrucción, *shadowing*, propagación en alta frecuencia, 18 GHz, *Path Loss*, canal inalámbrico en LoS, trayectorias de dron, mediciones experimentales en terreno.

ABSTRACT

THE growing use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in monitoring, inspection and *smart farming* applications has increased the need to understand how these platforms affect wireless propagation when operating near a fixed line-of-sight (LoS) link. At high frequencies such as 18 GHz, even small obstructions can introduce additional losses that momentarily reduce the received power.

This work investigates the obstruction-induced fading produced by a drone when intersecting a fixed LoS link at 18 GHz. The objective is to characterize how the attenuation varies under different flight trajectories and to describe the temporal behavior of the associated *Path Loss*. The analysis focuses on how the received power evolves as the drone modifies its position relative to the LoS, while keeping the transmitter–receiver geometry constant.

A field measurement campaign was conducted using 21,1 horn antennas and a spectrum analyzer to record received power over time. Four geometric configurations were considered: hovering directly over the LoS, horizontal motion, vertical motion, and displacements above and below the LoS. These measurements enabled the comparison of received power time series and the corresponding *Path Loss* across all scenarios.

Results show that the hovering trajectory exhibits small and stable losses, typically on the order of 1 dB a 2 dB, caused solely by the physical presence of the drone within the main beam. This behavior is consistent with the relative size of the UAV compared to the first Fresnel zone: the transverse extent of the zone in the studied link is significantly larger than the drone's effective diameter, meaning that the obstruction corresponds to a partial rather than complete intrusion into the propagation volume.

Horizontal trajectories display nearly identical behavior, indicating that the drone's movement along the LoS does not significantly change the attenuation as long as it remains within the main beam. Vertical trajectories exhibit brief but low-magnitude variations (1 dB a 3 dB), attributable to transitions between aligned and non-aligned positions. Finally, trajectories above and below the LoS result in even smaller losses, consistent with marginal obstruction of the direct path and reduced intrusion into the Fresnel region.

Overall, the results show that the observed fading depends primarily on the degree of geometric obstruction introduced by the drone, rather than on its motion. These findings provide experimental insight into dynamic *shadowing* at high frequencies and form a basis for future work on predictive modelling and link planning in scenarios where UAVs and fixed LoS systems coexist.

Keywords

Obstruction fading, *shadowing*, high-frequency propagation, 18 GHz, *Path Loss*, LoS wireless channel, UAV trajectories, outdoor measurement campaign.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS I

RESUMEN II

ABSTRACT IV

ÍNDICE DE FIGURAS IX

ABREVIACIONES XI

1. INTRODUCCIÓN 1
- 1.1. Estado del Arte . . . 2
- 1.2. Contribuciones . . . 3
- 1.3. Objetivos . . . 5
- 1.4. Estructura del Documento . . . 6

2. MARCO TEÓRICO 7
- 2.1. Fundamentos del enlace y del canal . . . 8
- 2.2. Contexto general de la propagación en enlaces LoS . . . 11
  - 2.2.1. Campo lejano (criterio de Fraunhofer) . . . 12
  - 2.2.2. Zona de Fresnel y criterio de despeje . . . 13
  - 2.2.3. Referencia de espacio libre: ecuación de Friis y FSPL . . . 15
- 2.3. Influencia de la frecuencia en la propagación de señales . . . 15
  - 2.3.1. Longitud de onda y su relación con la frecuencia . . . 15
  - 2.3.2. Robustez de frecuencias bajas frente a obstáculos . . . 16
  - 2.3.3. Consideraciones de propagación en bandas bajas vs. sub-mmWave . . . 16
- 2.4. Caracterización del Path Loss en presencia del dron . . . 17
- 2.5. Tratamiento de la variabilidad temporal . . . 18

3. METODOLOGÍA 21

3.1. Preparación y calibración de equipos 22
3.1.1. Antenas 22
3.1.2. Analizador de espectro 23
3.1.3. Generador de señal 24
3.1.4. Pruebas en cámara anecoica 24
3.1.5. Enlace base en terreno a 18 GHz (sin dron) 25
3.2. Trayectorias del dron y planificación de mediciones 25
3.3. Campaña de medición en terreno 28

4. RESULTADOS **30**
4.1. Trayectoria de referencia: suspensión en LoS 30
4.2. Trayectoria horizontal en LoS 32
4.2.1. Potencia recibida 32
4.2.2. Histogramas de Path Loss 33
4.2.3. CDF unificada y selección de modelos estadísticos 34
4.3. Trayectoria vertical 35
4.4. Trayectorias en suspensión sobre y bajo la LoS 36
4.5. Trayectorias horizontales desplazadas respecto de la LoS 38

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS **41**
5.1. Interpretación general del comportamiento observado 41
5.2. Comparación entre suspensión y trayectoria horizontal en LoS 41
5.3. Trayectoria vertical: variaciones breves y de baja magnitud 42
5.4. Trayectorias sobre y bajo la LoS 42
5.5. Variabilidad estadística y análisis mediante CDF 42
5.6. Síntesis interpretativa 43

6. CONCLUSIONES **44**

Referencias **47**

BIBLIOGRAFíA **47**

COPYRIGHT **49**

A. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA TRAYECTORIAS HORIZONTALES FUERA DE LA LOS **50**

A. CDF DEL PL PARA TRAYECTORIAS EN SUSPENSIÓN DESPLAZADAS VERTICALMENTE **52**
A.1. CDF del PL para la trayectoria en suspensión bajo la LoS 52
A.2. CDF del PL para la trayectoria en suspensión sobre la LoS 53

A. CDF DEL PL PARA TRAYECTORIAS HORIZONTALES BAJO

Y SOBRE LA LOS **55**
A.1. Trayectoria horizontal bajo la LoS 55
A.2. Trayectoria horizontal sobre la LoS 56

Índice de figuras

2.1. Representación conceptual de un enlace inalámbrico en espacio libre: transmisor, canal de propagación y receptor. 8
2.2. Esquema del presupuesto de enlace en dB: contribuciones de P_T, G_T, G_R, L_{cables} y L_{canal}. 11
2.3. Esquema de campo cercano/lejano para una antena con apertura D_{ap}. La condición $d \geq R_{\text{FF}} = 2D_{\text{ap}}^2/\lambda$ garantiza frente de onda casi plano y patrón estable. 13
2.4. Primera zona de Fresnel (n=1) y línea de vista. El criterio $c(P) \geq 0{,}6\, r_1(P)$ orienta la fijación de alturas y distancias operativas del enlace. 14
2.5. Radio de la primera zona de Fresnel a lo largo del enlace experimental de 20 m a 18 GHz. Se incluye el radio completo $r_1(P)$ y el 60 % del radio, valor utilizado como criterio de despeje. 14
2.6. Representación conceptual de la pérdida LoS medida ($PL_{\text{LoS,medido}}$) y el aumento de pérdida producido por la presencia del dron durante el vuelo. 18

3.1. Línea de tiempo de la metodología: secuencia de actividades desde la preparación y calibración de equipos hasta la interpretación de los resultados. 22
3.2. Medidas de la antena horn para 18 GHz. 23
3.3. Analizador SAF Spectrum Compact utilizado para 18 GHz. 23
3.4. Generador de señal para 18 GHz. 24
3.5. Montaje experimental en cámara anecoica utilizado para la verificación del enlace a 18 GHz y la determinación de la pérdida de la cadena de RF. 25
3.6. Trayectoria de suspensión del dron en el punto medio del enlace. . 26
3.7. Trayectoria horizontal del dron desplazándose sobre la LoS. . . . 26
3.8. Trayectoria de paso del dron a través de la LoS. 27
3.9. Suspensión con desplazamiento vertical respecto a la LoS: por encima (arriba) y por debajo (abajo). 27

3.10. Movimiento horizontal con desplazamiento vertical respecto a la LoS: por encima (arriba) y por debajo (abajo). 28
3.11. Dron utilizado en la campaña corresponde a un DJI Matrice 30T, cuyo fuselaje está construido principalmente en polímero reforzado y aleaciones livianas. Posee dimensiones compactas de aproximadamente $365 \times 215 \times 195$ mm (con brazos plegados), lo que determina el volumen físico que actúa como obstáculo durante las trayectorias. 29
3.12. Dron en suspensión en el punto medio del enlace a 18 GHz, bloqueando parcialmente la LoS. 29

4.1. Resultados para la trayectoria de referencia en suspensión bajo línea de vista. 32
4.2. Potencia recibida en ambas direcciones de desplazamiento horizontal en LoS. 33
4.3. Histogramas del Path Loss para trayectorias horizontales en LoS. . 34
4.4. CDF unificada del Path Loss horizontal obtenida a partir de las mediciones, junto con las distribuciones ajustadas. 35
4.5. Comparación temporal y estadística entre la trayectoria en suspensión y la trayectoria vertical en la LoS. 36
4.6. Comparación entre trayectorias en suspensión sobre y bajo la LoS. . 38
4.7. Potencia recibida para la trayectoria horizontal sobre la LoS. . . . 39
4.8. Potencia recibida para la trayectoria horizontal bajo la LoS. . . . 39
4.9. Histograma del Path Loss para la trayectoria horizontal sobre la LoS. 40
4.10. Histograma del Path Loss para la trayectoria horizontal bajo la LoS. 40

A.1. CDF unificada del Path Loss horizontal desplazado, junto con modelos estadísticos ajustados. 51

A.1. CDF empírica y modelos ajustados para la trayectoria en suspensión bajo la LoS. 53
A.2. CDF empírica y modelos ajustados para la trayectoria en suspensión sobre la LoS. 53

A.1. CDF empírica y modelos ajustados para la trayectoria horizontal bajo la LoS. 56
A.2. CDF empírica y modelos ajustados para la trayectoria horizontal sobre la LoS. 56

ABREVIACIONES

Mayúsculas

TX	: transmisor
RX	: receptor
LOS	: line-of-sight (línea de vista)
NLOS	: non-line-of-sight (no línea de vista)
UAV	: unmanned aerial vehicle (vehículo aéreo no tripulado)
FSPL	: free space path loss (pérdida en espacio libre)
PL	: Path Loss (pérdida de trayectoria)
CDF	: Cumulative Distribution Function (función de distribución acumulada).
dB	: decibel
RMSE	: root mean square error (error cuadrático medio)

Minúsculas

d	: distancia
f	: frecuencia
λ	: longitud de onda
P_T	: potencia transmitida
P_R	: potencia recibida
L_{cables}	: pérdidas en la cadena de RF
X_σ	: shadowing (variación lenta del canal)

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

LA integración de vehículos aéreos no tripulados en tareas de monitoreo, inspección y gestión de recursos ha aumentado de manera significativa en los últimos años. En ámbitos como la agricultura de precisión, la industria minera y la logística, los drones operan con frecuencia en entornos donde coexisten con enlaces inalámbricos fijos utilizados para telemetría, redes de sensores o transmisión de datos. En estos escenarios, la presencia física del dron puede interrumpir parcial o totalmente la línea de vista, afectando la potencia recibida y comprometiendo la continuidad del servicio.

El impacto de un dron como obstáculo resulta especialmente relevante en bandas de alta frecuencia, como los 18 GHz, donde la propagación es altamente sensible a obstrucciones debido a la menor longitud de onda y a la concentración del haz en antenas direccionales. A diferencia de las obstrucciones típicamente estudiadas —vehículos, peatones o vegetación— un UAV presenta una geometría, dinámica y trayectoria propias que pueden generar patrones de desvanecimiento distintos a los observados en escenarios terrestres.

A pesar del creciente uso de drones en aplicaciones críticas, la literatura disponible sobre su efecto como bloqueadores pasivos en enlaces inalámbricos es nula. La mayoría de los estudios se ha centrado en caracterizar la propagación aire–tierra cuando el dron actúa como transmisor o receptor, mientras que el caso particular de un dron que se desplaza cerca de un enlace fijo y produce obstrucción dinámica no ha sido explorado. La escasez de datos experimentales es especialmente marcada en bandas elevadas como 18 GHz, donde incluso pequeñas variaciones geométricas pueden alterar la potencia recibida de manera significativa.

En este contexto, surge la necesidad de estudiar de forma sistemática cómo la posición y trayectoria de un UAV afectan la atenuación observada en un enlace fijo. Comprender este fenómeno es fundamental para el diseño de redes robustas

en entornos donde drones y enlaces terrestres coexisten, permitiendo mejorar estrategias de despliegue, planificación y mitigación de interferencias causadas por obstrucciones temporales.

Este trabajo se enmarca precisamente en ese desafío: aportar evidencia experimental que permita entender el desvanecimiento por obstrucción generado por un dron en distintas trayectorias cercanas a la LoS de un enlace a 18 GHz. Con ello, se busca contribuir a un área donde actualmente existe una brecha significativa entre las necesidades prácticas de los sistemas modernos y la disponibilidad de modelos y mediciones reales.

1.1. Estado del Arte

La propagación de ondas electromagnéticas en presencia de obstáculos móviles ha sido ampliamente estudiada, principalmente en entornos urbanos y rurales donde la interacción con vehículos, peatones u otros objetos transitorios genera fluctuaciones significativas en la potencia recibida. Estas variaciones, conocidas como *dynamic shadowing*, se distinguen del *small-scale fading* —asociado al multitrayecto— y del *path loss* promedio determinado por la separación transmisor–receptor. En escenarios urbanos, por ejemplo, se ha reportado que vehículos cruzando perpendicularmente un enlace en banda milimétrica a 28 GHz pueden provocar pérdidas instantáneas del orden de 20–30 dB, con duraciones medias de algunos cientos de milisegundos, dependiendo de la geometría del enlace y del tipo de vehículo involucrado [1], [2]. La velocidad del obstáculo también modula la duración del evento de bloqueo: a velocidades del orden de 60 km/h los bloqueos típicamente duran menos de 150 ms, mientras que a velocidades inferiores a 10 km/h pueden extenderse por más de un segundo [2]. En entornos rurales, mediciones de canales vehiculares y WLAN en bandas en torno a 2.4–5.9 GHz muestran que la presencia de camiones u otros vehículos de gran tamaño puede inducir pérdidas superiores a 20–25 dB, poniendo en evidencia una fuerte dependencia entre la geometría del obstáculo y la severidad del *fading* por sombra [3].

En interiores y entornos densos, la presencia de peatones frente a enlaces en bandas altas puede generar atenuaciones significativas debido a la combinación de obstrucción directa y pérdida de trayectorias reflejadas. Estudios experimentales a 60 GHz han reportado que una persona caminando frente al haz puede provocar pérdidas del orden de 20–30 dB, con duraciones que aumentan a medida que crece la separación entre transmisor y receptor [4], [5]. Asimismo, modelos estocásticos desarrollados para enlaces interiores muestran que la probabilidad de mantener línea de vista libre durante un intervalo de un segundo puede caer por debajo del 40 %, acompañada de profundidades de *fading* que superan los 30–35 dB [4].

El tipo de entorno influye también de manera determinante en la severidad del *shadowing*. En escenarios urbanos se han observado exponentes de pérdida efectivos en torno a 3.0–3.5 y desviaciones estándar de *shadowing* superiores a 8–10 dB, mientras que zonas rurales o semiabiertas muestran comportamientos más estables,

con exponentes cercanos a 2.0 y desviaciones estándar inferiores a 5 dB [3], [6]. En entornos abiertos, pérdidas instantáneas mayores a 15 dB suelen ser poco frecuentes en presencia de obstáculos moderados, lo que resalta el papel del contexto geométrico y del tipo de bloqueador.

A lo anterior se suma el efecto de las condiciones atmosféricas, especialmente relevante en bandas elevadas. Variables como humedad, lluvia o vapor de agua pueden incrementar la atenuación mediante absorción molecular y dispersión. En el rango de 18–20 GHz, niveles altos de humedad relativa pueden añadir algunos decibelios de pérdida incluso en ausencia de precipitaciones [7], [8], mientras que en bandas más altas, como 38 GHz, lluvias intensas pueden producir atenuaciones superiores a 8 dB/km [9]. Esto evidencia que la estabilidad de enlaces de alta frecuencia depende tanto de los obstáculos como del estado del medio.

En el caso específico de 18 GHz, la propagación presenta una alta sensibilidad a la alineación de antenas, a la geometría del escenario y a obstrucciones parciales del haz. Mediciones en interiores han mostrado que el exponente de pérdida en condiciones LoS puede alcanzar valores cercanos a 3.1, aumentando a 4.6 en condiciones *Non-LoS*, con desviaciones estándar de *shadowing* de 5.2 dB y 9.7 dB respectivamente [10]. Estos valores refuerzan la importancia de estudiar el bloqueo dinámico, en particular cuando se emplean antenas altamente directivas.

Finalmente, aunque los UAVs han sido estudiados extensamente como transmisores, receptores o repetidores en el enlace aire–tierra, el caso en que el dron actúa como obstáculo pasivo para un enlace terrestre ha recibido considerablemente menos atención. Resultados recientes muestran que fluctuaciones de altura y actitud durante vuelo estacionario pueden inducir variaciones de entre 2 y 6 dB en enlaces *mmWave*, incluso cuando el dron se mantiene nominalmente en modo de suspensión [11]. Sin embargo, aún no existe consenso experimental respecto a la profundidad típica del *fading* inducido por un dron, la dependencia con el ángulo de bloqueo ni la duración de los eventos según trayectoria de vuelo. Esta brecha justifica la necesidad de campañas de medición controladas como la presentada en este estudio.

En conjunto, la literatura demuestra una fuerte dependencia entre la severidad del *shadowing*, la frecuencia de operación, el entorno de propagación y la geometría relativa del obstáculo. Al mismo tiempo, evidencia una clara ausencia de estudios experimentales que analicen de forma específica el efecto de un UAV como bloqueador dinámico en enlaces terrestres a 18 GHz, lo que constituye la principal motivación de este trabajo.

1.2. Contribuciones

A partir de la revisión del estado del arte, se identificó una brecha clara en el estudio del desvanecimiento por obstrucción generado por UAVs en enlaces fijos en bandas altas. Para contextualizar los aportes de este trabajo, la Tabla 1.1 resume las principales diferencias entre lo reportado en la literatura y lo desarrollado en

esta memoria.

Estado del Arte	**Trabajo Desarrollado**
Los estudios de *shadowing* dinámico en bandas altas se enfocan en vehículos y peatones como obstáculos móviles.	Se analiza un dron como bloqueador pasivo de un enlace terrestre, una condición no documentada en la literatura.
La mayoría de las mediciones experimentales se concentran en 28, 60 y 73 GHz, con muy poca evidencia disponible en 18 GHz.	Se desarrolla una campaña experimental específica en 18 GHz, aportando información empírica para una banda donde existe una brecha de mediciones.
La literatura indica que la geometría del obstáculo influye fuertemente en el shadowing, pero no existen estudios sistemáticos que analicen trayectorias definidas de UAVs.	Se evalúan trayectorias de vuelo predefinidas (suspensión en LoS, horizontal, vertical, sobre y bajo la LoS), permitiendo estudiar de manera controlada la relación entre geometría del vuelo y pérdida de trayectoria.
Los trabajos previos describen el bloqueo dinámico, pero no abordan cómo evoluciona el path loss en función de la posición relativa de un UAV.	Se caracteriza experimentalmente la evolución del path loss a medida que el dron modifica su posición respecto de la LoS, distinguiendo entre obstrucción directa y desplazamientos laterales.
Los modelos estadísticos utilizados en shadowing se han aplicado a obstáculos terrestres, sin considerar UAVs como bloqueadores pasivos.	Se realiza un análisis estadístico de la trayectoria horizontal en LoS, única con bloqueo sostenido suficiente para ajustar distribuciones teóricas.

Tabla 1.1: Comparación entre el estado del arte y el trabajo desarrollado.

Las contribuciones concretas de este estudio se presentan a continuación:

- Obtención de un conjunto de mediciones experimentales en 18 GHz que caracterizan el *shadowing* dinámico producido por un dron actuando como obstáculo pasivo en un enlace terrestre en línea de vista.
- Análisis comparativo del comportamiento temporal del path loss en distintas geometrías de vuelo, distinguiendo entre trayectorias que intersectan la LoS y trayectorias desplazadas respecto de ella, lo que permite evaluar la influencia de la posición relativa del UAV sobre la atenuación observada.
- Identificación experimental de que, para el tipo de dron utilizado y la

configuración del enlace, las pérdidas inducidas por obstrucción se mantienen típicamente en un rango reducido (1–3 dB).

- Generación de series temporales que permiten describir la evolución del path loss en función del movimiento del dron, proporcionando datos inéditos para esta banda de operación y estableciendo un marco experimental para futuros estudios de modelado.

- Desarrollo de un análisis estadístico aplicado exclusivamente a la trayectoria horizontal sobre LoS. Esta trayectoria es la única en la que el dron permaneció bloqueando el haz directo durante un periodo prolongado, condición necesaria para obtener un conjunto de muestras representativo. Sobre esta base fue posible ajustar distribuciones teóricas y evaluar su capacidad descriptiva mediante los criterios de información AIC (*Akaike Information Criterion*) y BIC (*Bayesian Information Criterion*).

1.3. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es caracterizar la atenuación producida por un dron al interferir un enlace inalámbrico fijo a 18 GHz, analizando cómo el *Path Loss* evoluciona en el tiempo bajo distintas trayectorias de movimiento. Para ello se estudia la variación de la potencia recibida a medida que el dron modifica su posición relativa respecto de la línea de vista, manteniéndose fija la geometría transmisor–receptor.

Objetivos Específicos

1. Configurar y calibrar el equipamiento de transmisión y recepción para asegurar la correcta adquisición de datos durante la campaña experimental a 18 GHz.

2. Medir la potencia recibida y cuantificar el *Path Loss* del enlace en presencia de un dron siguiendo trayectorias que intersectan directamente la LoS y trayectorias desplazadas por sobre y por debajo de ella.

3. Procesar los registros experimentales para obtener series temporales de potencia recibida y del correspondiente *Path Loss* en cada trayectoria, permitiendo su análisis y comparación bajo distintas condiciones de vuelo.

4. Comparar la pérdida observada en cada trayectoria respecto de la referencia obtenida con el dron en suspensión en la LoS, identificando diferencias atribuibles a la geometría del vuelo y al grado de obstrucción del haz.

5. Realizar el análisis estadístico de la trayectoria horizontal en LoS. Este análisis considera el ajuste de distribuciones teóricas y la evaluación de su capacidad descriptiva mediante los criterios de información AIC y BIC.

1.4. Estructura del Documento

La organización de este trabajo sigue la lógica del problema abordado: comprender experimentalmente cómo un dron modifica la propagación de un enlace fijo en línea de vista a 18 GHz. Para ello, el documento avanza desde los fundamentos teóricos necesarios para contextualizar el fenómeno, hacia la descripción detallada de la metodología experimental, el análisis de resultados y la interpretación final de los hallazgos.

En el **Capítulo 2** se presentan los conceptos básicos de propagación electromagnética y pérdida de trayectoria que sustentan el estudio, incluyendo la ecuación de Friis, el *Free-Space Path Loss*, la distancia de Fraunhofer, las zonas de Fresnel y los modelos estadísticos empleados para describir fluctuaciones en presencia de obstrucciones.

El **Capítulo 3** describe cómo se abordó experimentalmente el problema: se detalla el equipamiento utilizado, la configuración del enlace a 18 GHz, las trayectorias de vuelo planificadas y el procedimiento de medición en terreno.

El **Capítulo 4** presenta los resultados obtenidos a partir de las mediciones, comparando la trayectoria de referencia (suspensión en LoS) con las demás trayectorias evaluadas. Se analizan la evolución temporal de la potencia recibida, la atenuación inducida por el dron y el comportamiento del *Path Loss* bajo cada escenario.

En el **Capítulo 5** se interpreta el efecto observado del dron sobre el enlace, discutiendo la influencia geométrica de cada trayectoria, la sensibilidad del canal y la consistencia de los resultados con el marco teórico.

El **Capítulo 6** sintetiza los principales hallazgos, destaca su relevancia para la caracterización de obstrucciones dinámicas en bandas altas y propone líneas de investigación futura.

Finalmente, los **Anexos** reúnen material complementario que respaldan el desarrollo del estudio.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

PARA sustentar esta investigación, este capítulo establece un marco conceptual que progresa desde los fundamentos de propagación y enlace inalámbrico hasta los elementos necesarios para interpretar las mediciones experimentales obtenidas en terreno. El propósito es fijar definiciones, supuestos y métricas comunes que permitan analizar con rigor los resultados y mantener coherencia entre los modelos teóricos y las observaciones prácticas.

En primer lugar, se revisan los conceptos esenciales del sistema transmisor–canal–receptor, incluyendo potencia transmitida, potencia recibida, ganancias y pérdidas asociadas a las antenas, además del presupuesto de enlace (*link budget*). También se describe el comportamiento básico de la propagación en condiciones LoS, considerando la atenuación con la distancia y los efectos derivados de obstrucciones parciales del haz.

A continuación, se establecen las condiciones de validez de los modelos empleados en este trabajo. Se verifica que la campaña experimental opera en régimen de campo lejano, utilizando el criterio de Fraunhofer para asegurar un frente de onda aproximadamente plano en la zona de medición. Asimismo, se analiza la primera zona de Fresnel para confirmar que el enlace de referencia se encuentra despejado en ausencia del dron, evitando pérdidas por difracción no asociadas al fenómeno estudiado.

Bajo estas condiciones, la ecuación de Friis se utiliza como referencia ideal para estimar la potencia recibida en línea de vista, mientras que la pérdida en espacio libre se adopta como punto de comparación teórico. Sin embargo, debido a las particularidades del entorno experimental, este estudio emplea como referencia principal la pérdida de trayectoria medida en terreno sin la presencia del dron. Esta referencia incorpora efectos reales como desalineamientos, pérdidas por cableado y características propias del entorno, proporcionando una base más representativa

para el análisis.

Todas las trayectorias de vuelo se comparan con la referencia adquirida con el dron en suspensión en la línea de vista, la cual representa exclusivamente la atenuación asociada a la obstrucción física del UAV en el haz directo. Este enfoque permite evaluar cómo la geometría del vuelo —ya sea horizontal, vertical o desplazada respecto de la línea de vista— modifica la pérdida observada.

Finalmente, se introducen los elementos necesarios para el análisis estadístico. Se describen las distribuciones habitualmente utilizadas en estudios de propagación (log-normal, Weibull y Gamma) junto con los criterios de información AIC (*Akaike Information Criterion*) y BIC (*Bayesian Information Criterion*), los cuales permiten evaluar el grado de ajuste de cada modelo. Estos conceptos sustentan el análisis estadístico presentado en el capítulo de resultados.

2.1. Fundamentos del enlace y del canal

En un enlace inalámbrico, la transmisión de la señal se puede modelar como un sistema compuesto por tres elementos: el transmisor, el canal de propagación y el receptor. El transmisor genera una señal que es irradiada al espacio libre por la antena, la cual, al atravesar el medio de propagación, sufre transformaciones causadas por diversos factores, como la atenuación, el desvanecimiento y las interferencias. Una vez que la señal llega al receptor, la antena receptora convierte la señal propagada de nuevo en señal eléctrica, que puede ser procesada y utilizada.

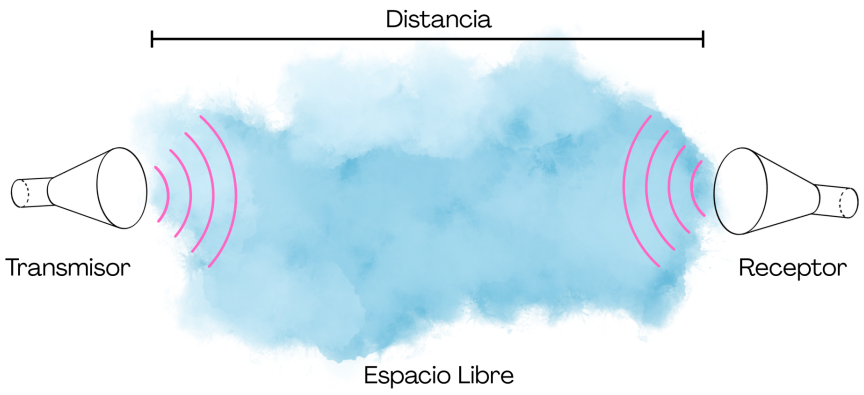


Figura 2.1. Representación conceptual de un enlace inalámbrico en espacio libre: transmisor, canal de propagación y receptor.

Para facilitar el análisis y diseño de estos sistemas, se utiliza la notación logarítmica en decibelios (dB), que permite representar las ganancias y pérdidas

de señal de manera aditiva. Esta representación simplifica los cálculos, ya que en lugar de trabajar con multiplicaciones o divisiones de potencias, se pueden realizar sumas y restas de los valores correspondientes en dB.

El canal de propagación, por tanto, se convierte en un factor crucial que influye directamente en la calidad de la señal recibida. Las características del medio de propagación, como su densidad, las condiciones atmosféricas, y la presencia de obstáculos o interferencias, alteran el comportamiento de la señal a lo largo de su trayecto. Estos efectos deben ser modelados adecuadamente para poder predecir el rendimiento del enlace inalámbrico y optimizar el diseño de los sistemas de comunicación.

Magnitudes operativas y unidades

En los enlaces inalámbricos, es esencial comprender cómo se manejan las magnitudes de potencia, ya que influyen directamente en el desempeño del sistema. La potencia transmitida, P_T, y la potencia recibida, P_R, se expresan en dBm[1], lo que permite trabajar con valores más manejables cuando se tratan señales de diferente intensidad.

Las ganancias de las antenas, G_T y G_R, se indican en dBi, que hace referencia a la ganancia de la antena en comparación con una antena ideal isotrópica, es decir, una antena que irradia uniformemente en todas las direcciones. Esta medida es importante porque nos da una idea de cuán eficaz es la antena en concentrar la energía en una dirección particular.

Por otro lado, las pérdidas que ocurren en la cadena de RF (como las causadas por cables, conectores, adaptadores o atenuadores) se suman en decibelios y se denotan como L_{cables}. Estas pérdidas son inevitables, pero es crucial tenerlas en cuenta para una medición precisa de la potencia disponible en el receptor.

Finalmente, la potencia isotrópica radiada equivalente o EIRP se define como la potencia que una antena ideal isotrópica debería radiar para generar, en la dirección de máxima ganancia, el mismo campo electromagnético que el conjunto transmisor-antena real. Se calcula como la suma de la potencia transmitida P_T y la ganancia de la antena G_T en dBm, y se expresa de la siguiente manera:

$$\text{EIRP} = P_T + G_T \quad (\text{dBm}).$$

Este parámetro es fundamental para evaluar la efectividad de la transmisión en función de la antena utilizada y la potencia transmitida, ya que representa el nivel de potencia radiada en la mejor dirección posible.

Ganancia de antena y acoplamiento

La ganancia de una antena, medida en dBi, refleja la capacidad de la antena para concentrar la potencia en una dirección específica, en detrimento de otras

[1] $P\,[\text{dBm}] = 10\log_{10}\big(P\,[\text{mW}]\big)$.

direcciones. Este parámetro está directamente relacionado con la directividad del patrón de radiación de la antena. En enlaces con LoS, el acoplamiento efectivo depende no solo de la ganancia, sino también de la correcta alineación de las antenas y la coincidencia de la polarización. Desalineaciones angulares o polarizaciones cruzadas pueden introducir pérdidas adicionales en la señal recibida. En antenas direccionales, el ancho de haz (HPBW) es un indicador práctico de las tolerancias angulares permitidas para mantener una alineación efectiva y minimizar las pérdidas de señal.

Atenuación y pérdidas en la cadena

Las pérdidas en la cadena de transmisión incluyen los efectos de conectores, adaptadores y tramos de cable coaxial tanto en el transmisor como en el receptor. Estas pérdidas se modelan colectivamente como L_{cables} (dB) y se suman al balance de potencia total del sistema. La cuantificación precisa de estas pérdidas, mediante procedimientos de calibración, es esencial para comparar las mediciones experimentales con las predicciones teóricas, como el modelo de Friis o el FSPL, y garantizar la exactitud de los resultados obtenidos.

Link Budget

Considerando los conceptos previamente descritos —la ganancia de antenas, la atenuación del canal y las pérdidas en la cadena de transmisión— es posible cuantificar de manera integral la potencia que realmente llega al receptor. Esta evaluación se realiza mediante el presupuesto de enlace o *link budget*, que representa la sumatoria de todas las contribuciones de ganancia y pérdida en el sistema de comunicación. De manera general, el *link budget* se expresa en decibelios como:

$$\boxed{P_R \;=\; P_T \;+\; G_T \;+\; G_R \;-\; L_{\text{canal}} \;-\; L_{\text{cables}}},$$

donde P_T es la potencia transmitida, G_T y G_R son las ganancias de las antenas transmisora y receptora respectivamente, y L_{canal} y L_{cables} representan las atenuaciones debidas al medio de propagación y a la cadena de RF, todas consideradas como valores positivos.

En escenarios de espacio libre y bajo condiciones físicas específicas —como el cumplimiento del campo lejano y el despeje de Fresnel—, la atenuación del canal puede modelarse mediante FSPL, de modo que $L_{\text{canal}} = \text{FSPL}(d, f)$. El *link budget* permite, por tanto, prever de manera completa la potencia recibida y evaluar el desempeño del enlace antes de realizar mediciones experimentales.

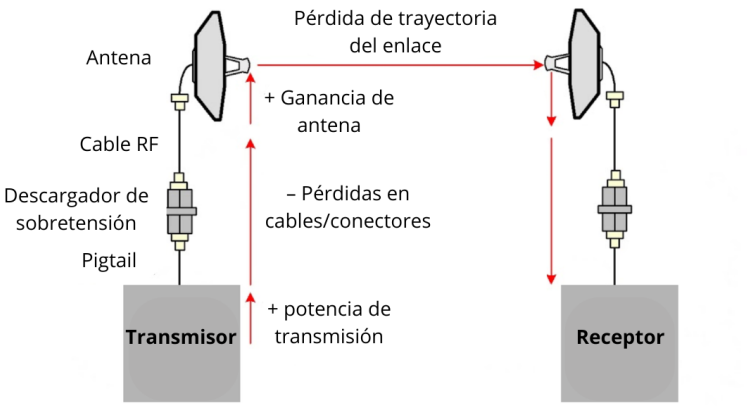


Figura 2.2. Esquema del presupuesto de enlace en dB: contribuciones de P_T, G_T, G_R, L_{cables} y L_{canal}.

2.2. Contexto general de la propagación en enlaces LoS

Habiendo establecido previamente el concepto de *link budget*, es crucial entender cómo la señal se propaga en el medio para poder predecir con precisión la potencia recibida. En este sentido, el comportamiento de la propagación en un enlace inalámbrico LoS es fundamental para comprender cómo se determina la atenuación de la señal a medida que esta viaja de TX a RX.

En un enlace LoS, la energía se transmite principalmente por un rayo directo entre el transmisor y el receptor. En el caso ideal de espacio libre, el frente de onda puede considerarse prácticamente plano, y la atenuación de la señal con la distancia sigue una ley conocida, que se ajusta bien a modelos como el de Friis para el cálculo del PL. Sin embargo, en la práctica, incluso en entornos abiertos, la propagación real introduce desviaciones con respecto a este ideal, lo que afecta el rendimiento del enlace.

Cuando la línea de vista se ve comprometida parcial o temporalmente —como ocurre en escenarios NLoS—, tres mecanismos fundamentales alteran el nivel de la señal recibida. La difracción, por ejemplo, permite que la onda rodee un obstáculo cercano a la LoS, introduciendo pérdidas adicionales que aumentan conforme se invade una mayor porción de la primera zona de Fresnel, lo que depende también de la frecuencia portadora. La reflexión, que ocurre en superficies como el suelo, genera una réplica de la señal directa. Esta réplica se suma vectorialmente al rayo directo, y dependiendo de la fase relativa y el coeficiente de reflexión del material,

puede reforzar o debilitar la señal, dando lugar a lo que se conoce como el modelo de dos rayos a grandes distancias. Finalmente, la dispersión, generada por pequeñas irregularidades en el entorno (como hojas, bordes u objetos móviles como hélices de drones), redistribuye la energía de la señal, lo que puede ocasionar fluctuaciones rápidas cuando el objeto que dispersa se mueve.

Para que el enlace se acerque al caso ideal y pueda utilizarse una referencia física consistente, es necesario que el sistema opere bajo dos condiciones fundamentales: (i) el campo lejano (criterio de Fraunhofer); y (ii) el despeje de la primera zona de Fresnel, lo que garantiza que el volumen de energía principal no sea bloqueado por obstáculos en el entorno. Una vez que estas condiciones sean satisfechas, el escenario de espacio libre puede considerarse como una referencia válida para realizar comparaciones teóricas y experimentales en el estudio de la propagación de señales en enlaces LoS.

En las siguientes secciones se formalizarán estos dos criterios, y una vez cumplidos, se utilizará el modelo de espacio libre como referencia a lo largo de todo el análisis.

2.2.1. Campo lejano (criterio de Fraunhofer)

En los enlaces inalámbricos, el comportamiento del frente de onda es crucial para determinar cómo se propaga la señal a lo largo de la distancia entre TX y RX. En el régimen de campo lejano, el frente de onda se aproxima a un plano, lo que permite que el patrón de radiación de la antena sea estable con la distancia. Este comportamiento es fundamental para garantizar que la propagación sea predecible y que los modelos de propagación, como FSPL, sean aplicables.

Para determinar cuándo un enlace opera en el régimen de campo lejano, se considera la dimensión efectiva de apertura de la antena D_{ap} y la longitud de onda λ. La distancia mínima necesaria para alcanzar el campo lejano, denotada como R_{FF}, se puede aproximar con la siguiente fórmula:

$$\boxed{R_{\text{FF}} = \frac{2D_{\text{ap}}^2}{\lambda}}$$

Es recomendable diseñar el enlace con un margen de seguridad, asegurando que la distancia entre las antenas, d, sea mayor que $2 \cdot R_{\text{FF}}$ cuando sea posible. Esta condición debe verificarse en ambos extremos del enlace (TX y RX) para justificar el uso de ganancias en dBi y para aplicar modelos asintóticos como FSPL.

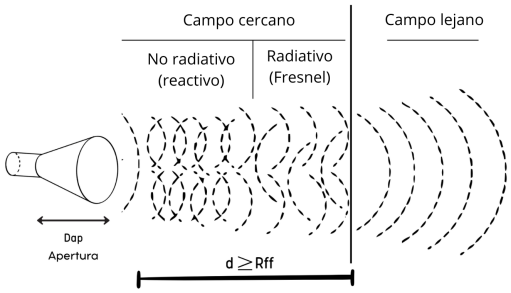


Figura 2.3. Esquema de campo cercano/lejano para una antena con apertura D_{ap}. La condición $d \geq R_{\mathrm{FF}} = 2D_{\mathrm{ap}}^2/\lambda$ garantiza frente de onda casi plano y patrón estable.

2.2.2. Zona de Fresnel y criterio de despeje

Además de la LoS, la propagación en un enlace inalámbrico está determinada por las zonas de Fresnel, las cuales corresponden a superficies elipsoidales concéntricas que rodean la trayectoria directa entre transmisor y receptor. La primera zona ($n = 1$) concentra la mayor parte de la energía útil del campo, por lo que su obstrucción tiene un efecto directo sobre la potencia recibida.

En un punto P del trayecto, situado a distancias d_1 y d_2 del transmisor y del receptor respectivamente, el radio local de la primera zona de Fresnel viene dado por:

$$r_1(P) \;=\; \sqrt{\frac{\lambda\, d_1\, d_2}{d_1 + d_2}}, \qquad r_{1,\mathrm{máx}} = r_1\Big|_{d_1=d_2=D/2} = \sqrt{\frac{\lambda\, D}{4}}.$$

En general, para minimizar las pérdidas por difracción se emplea el criterio del 60 %, el cual establece que la separación perpendicular mínima entre la LoS y cualquier obstáculo debe satisfacer:

$$\boxed{c(P) \;\geq\; 0{,}6\, r_1(P) \quad \text{en todo el enlace.}}$$

Pequeñas intrusiones por debajo del 60 % del radio local suelen generar pérdidas reducidas (típicamente inferiores a 1 dB), mientras que obstrucciones superiores a este umbral pueden producir atenuaciones apreciables. El punto más crítico corresponde al punto medio del enlace, donde $r_1(P)$ alcanza su valor máximo.

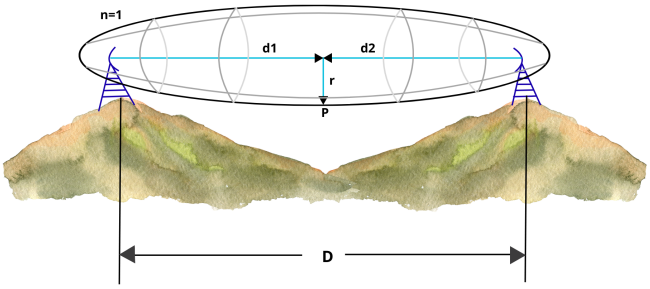


Figura 2.4. Primera zona de Fresnel (n=1) y línea de vista. El criterio $c(P) \geq 0{,}6\, r_1(P)$ orienta la fijación de alturas y distancias operativas del enlace.

Aplicación al enlace experimental de 18 GHz

Para el enlace utilizado en las mediciones, con distancia total $D = 20\,\text{m}$ y frecuencia de operación $f = 18\,\text{GHz}$, la longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{c}{f} = 0{,}0167\,\text{m}.$$

Sustituyendo en la expresión del radio máximo de la primera zona de Fresnel se obtiene:

$$r_{1,\text{máx}} = \sqrt{\frac{\lambda D}{4}} = \sqrt{\frac{0{,}0167 \cdot 20}{4}} = 0{,}289\,\text{m}.$$

Esto implica que, en el punto medio del enlace, la primera zona de Fresnel posee un radio aproximado de 29 cm (lo que equivale a un diámetro cercano a 60 cm). La Figura 2.5 muestra la variación del radio $r_1(P)$ a lo largo del enlace, junto con el valor correspondiente al 60 % de dicho radio.

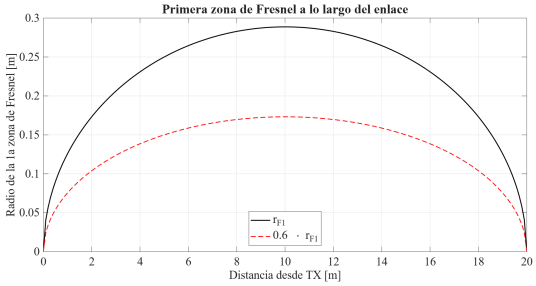


Figura 2.5. Radio de la primera zona de Fresnel a lo largo del enlace experimental de 20 m a 18 GHz. Se incluye el radio completo $r_1(P)$ y el 60 % del radio, valor utilizado como criterio de despeje.

2.2.3. Referencia de espacio libre: ecuación de Friis y FSPL

Habiendo establecido el *link budget* como la sumatoria de ganancias y pérdidas en un enlace inalámbrico, podemos formalizar la potencia recibida en el caso ideal de propagación en espacio libre mediante la ecuación de Friis:

$$\boxed{P_R\ (\text{dBm}) \;=\; P_T\ (\text{dBm}) + G_T\ (\text{dBi}) + G_R\ (\text{dBi}) - \text{FSPL}\ (\text{dB}) - L_{\text{cables}}\ (\text{dB})}.$$

Esta expresión es, en esencia, un *link budget* donde la atenuación del canal L_{canal} se reemplaza por la FSPL, que depende únicamente de la distancia d entre el transmisor y el receptor, y de la longitud de onda λ de la señal. Así, FSPL representa la disminución de la potencia de la señal debido a la propagación en un medio ideal, sin obstáculos ni interferencias adicionales.

En notación logarítmica, la pérdida en espacio libre se expresa como:

$$\text{FSPL}\ (\text{dB}) \;=\; 20\log_{10}\Big(\frac{4\pi d}{\lambda}\Big),$$

lo que evidencia que la atenuación aumenta tanto con la distancia como con la frecuencia de operación, ya que $\lambda = c/f$. En su forma práctica para frecuencias en GHz y distancias en km, se puede escribir como:

$$\text{FSPL}\ (\text{dB}) \;=\; 32{,}45 + 20\log_{10}\big(f_{\text{GHz}}\big) + 20\log_{10}\big(d_{\text{km}}\big).$$

De esta manera, la ecuación de Friis se convierte en una herramienta directa para evaluar la potencia recibida considerando ganancias de antena, pérdidas de la cadena y la atenuación inherente del canal de espacio libre. Esta referencia es fundamental para: (i) las mediciones en cámara anecoica, donde se verifica la alineación y se estima L_{cables}, y (ii) las mediciones de campo sin obstáculos, que establecen la línea base con la cual se compararán los efectos de obstrucciones dinámicas, como la presencia de un dron.

2.3. Influencia de la frecuencia en la propagación de señales

La frecuencia de operación es uno de los factores fundamentales que determina el comportamiento de un enlace inalámbrico. Aunque la potencia transmitida y las ganancias de antena son comunes a todas las bandas, la elección de la frecuencia afecta directamente la eficiencia de propagación, la sensibilidad a obstáculos, la difracción, la dispersión y, en general, la calidad de la señal recibida. Esta sección aborda los efectos de la frecuencia desde un enfoque conceptual.

2.3.1. Longitud de onda y su relación con la frecuencia

La longitud de onda λ está inversamente relacionada con la frecuencia f de la señal según la ecuación fundamental de la propagación electromagnética:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

donde c es la velocidad de la luz en el medio libre. La longitud de onda define la "escala" de la onda y condiciona directamente fenómenos como la difracción, la reflexión y la dispersión. En términos prácticos, ondas con mayor longitud de onda (frecuencia más baja) tienden a rodear obstáculos más fácilmente y penetrar materiales, mientras que ondas de longitud corta (frecuencia alta) interactúan más fuertemente con pequeñas irregularidades del entorno, generando mayor atenuación y variaciones rápidas en la señal.

2.3.2. Robustez de frecuencias bajas frente a obstáculos

La capacidad de una onda para superar obstáculos y mantener una señal detectable está íntimamente ligada a su longitud de onda. Las ondas de baja frecuencia (mayor longitud de onda) presentan mayor difracción y son menos sensibles a pequeñas obstrucciones, por lo que sufren menores pérdidas en escenarios con obstáculos parciales o irregularidades del terreno. En cambio, las ondas de alta frecuencia (menor longitud de onda) se atenúan más rápidamente al encontrarse con obstáculos, paredes o superficies reflectantes, y son más susceptibles a pérdidas por difracción y dispersión.

2.3.3. Consideraciones de propagación en bandas bajas vs. sub-mmWave

Las propiedades de propagación dependen fuertemente de la frecuencia de operación. En bandas más bajas (sub-6 GHz), la mayor longitud de onda implica:

- Mayor capacidad de difracción y penetración en obstáculos.
- Menor sensibilidad a la alineación precisa entre antenas.
- Atenuaciones moderadas frente a obstrucciones parciales.

En contraste, las bandas elevadas —como 18 GHz dentro del rango sub-mmWave— presentan:

- Alta sensibilidad a la geometría del enlace, alineación y polarización.
- Pérdidas más severas en presencia de obstáculos, aun de tamaño reducido.
- Mayor dependencia de condiciones ambientales y rugosidad de superficies.

Estas diferencias motivan el estudio experimental de la atenuación por obstrucciones dinámicas a 18 GHz, donde pequeños cambios en la trayectoria del bloqueador pueden generar variaciones significativas en la señal recibida.

2.4. Caracterización del Path Loss en presencia del dron

Con las condiciones de operación verificadas y la referencia experimental establecida, el siguiente paso consiste en describir la pérdida total del canal y analizar cómo esta varía cuando el dron ocupa distintas posiciones relativas respecto de la línea de vista.

El PL representa la reducción de potencia experimentada por la señal entre TX y RX, e incluye tanto los efectos determinísticos del enlace como las interacciones producidas por el entorno. En unidades logarítmicas puede expresarse como:

$$PL(d, f) = P_{\text{tx}} + G_t + G_r - P_{\text{rx}} - L_{\text{cables}},$$

donde P_{tx} es la potencia transmitida, P_{rx} la potencia recibida, G_t y G_r las ganancias de transmisión y recepción, y L_{cables} las pérdidas asociadas al sistema de conexión.

Referencia LoS experimental

Se define la pérdida de trayectoria LoS medida ($PL_{\text{LoS,medido}}$) como la pérdida registrada en ausencia del dron, manteniendo fija la distancia entre antenas y su alineación. Esta magnitud representa el nivel real del enlace en condiciones libres de obstrucción y constituye el punto de comparación para todas las trayectorias de vuelo.

Variación del Path Loss con la presencia del dron

Cuando el dron intercepta total o parcialmente el haz entre las antenas, modifica el nivel recibido mediante mecanismos como obstrucción geométrica, difracción en sus bordes y dispersión sobre su superficie. Estos efectos producen un aumento de la pérdida de trayectoria respecto de la condición LoS de referencia. Para ilustrar este concepto, la Figura 2.6 muestra de manera conceptual la relación entre el path loss medido durante el vuelo del dron y la pérdida LoS obtenida experimentalmente en ausencia de obstrucciones.

En esta representación, la línea roja corresponde al valor de pérdida LoS medido, considerado como referencia basal del enlace. La curva azul representa el path loss registrado durante una trayectoria en la que el dron se desplaza interceptando de forma progresiva el haz directo. La diferencia entre ambas curvas corresponde al exceso de pérdida introducido por el dron, también denominado *Excess Loss*.

Formalmente, la variación del path loss se expresa como

$$\Delta PL(t) = PL_{\text{medido}}(t) - PL_{\text{LoS,medido}},$$

lo que permite comparar cada trayectoria con la referencia LoS realista y evaluar la severidad del bloqueo en función de la posición instantánea del dron. Este parámetro no se utiliza como una magnitud estadística independiente, sino como

una herramienta comparativa que facilita la interpretación física de las distintas geometrías de vuelo.

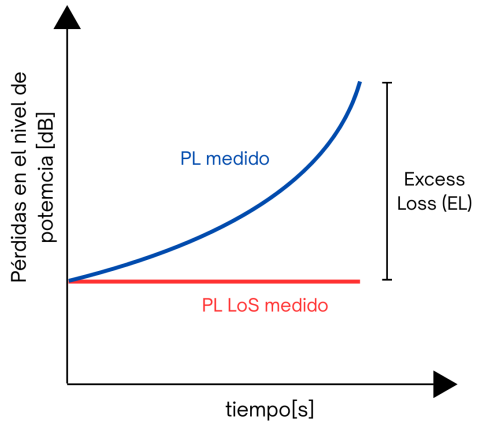


Figura 2.6. Representación conceptual de la pérdida LoS medida ($PL_{\text{LoS,medido}}$) y el aumento de pérdida producido por la presencia del dron durante el vuelo.

2.5. Tratamiento de la variabilidad temporal

La presencia del dron introduce fluctuaciones en la potencia recibida, las cuales dependen de su posición instantánea respecto del haz directo. Para caracterizar esta variabilidad se analiza, en cada trayectoria, la evolución temporal de la potencia recibida, el PL asociado a cada instante y su comparación directa con la trayectoria de referencia en suspensión sobre la LoS.

Entre todas las trayectorias evaluadas, la trayectoria horizontal en LoS es la única que mantiene una obstrucción continua y prolongada del haz directo. Esto produce una secuencia suficientemente extensa y estable de valores de PL, lo que permite realizar un análisis estadístico significativo del desvanecimiento asociado al bloqueo sostenido. Por esta razón, las herramientas estadísticas se aplican exclusivamente a esta trayectoria.

Construcción de la CDF a partir de las mediciones

El análisis estadístico se basa en la función de distribución acumulada (CDF), la cual describe la probabilidad de que el PL sea menor o igual que un cierto valor. Para construir la CDF a partir de las mediciones:

1. Se ordenan los valores de PL obtenidos durante la trayectoria horizontal.
2. A cada valor ordenado $PL_{(i)}$ se asocia la probabilidad empírica $F(i) = i/N$, donde N es el número total de muestras.

3. La curva resultante representa la distribución acumulada observada del PL.

Este procedimiento genera una CDF empírica que resume la variabilidad del PL sin imponer suposiciones previas sobre el modelo estadístico.

Modelos probabilísticos considerados

Para describir el comportamiento estadístico del PL se ajustan tres modelos clásicos utilizados en la caracterización de desvanecimiento lento: log-normal, Weibull y Gamma. La elección de estos modelos se fundamenta en su capacidad para representar distintos mecanismos físicos de variación:

- Log-normal: ampliamente utilizada para modelar *shadowing* debido a su relación con fenómenos multiplicativos y variaciones geométricas en obstrucciones parciales del enlace.
- Weibull: adecuada para escenarios donde la distribución presenta colas más pronunciadas, permitiendo caracterizar casos con mayor sensibilidad a fluctuaciones del bloqueo o inestabilidad del movimiento.
- Gamma: modelo flexible que captura asimetrías moderadas en la distribución del PL, típica de situaciones donde la obstrucción es parcialmente estable pero su intensidad varía en torno a un valor central.

Los parámetros de cada modelo se estiman mediante máxima verosimilitud, permitiendo obtener un ajuste consistente con los datos observados.

Selección del modelo

Para determinar cuál de los modelos probabilísticos propuestos describe de manera más adecuada la variabilidad del PL, se emplean criterios de selección basados en información estadística, particularmente el *Akaike Information Criterion* (AIC) y el *Bayesian Information Criterion* (BIC). Ambos criterios permiten comparar modelos no sólo en función de qué tan bien se ajustan a los datos, sino también considerando su complejidad.

En términos generales, el AIC y el BIC se calculan a partir de la verosimilitud del modelo ajustado y de un término de penalización asociado al número de parámetros del modelo. Un ajuste con verosimilitud elevada indica que el modelo describe adecuadamente los datos observados; sin embargo, añadir más parámetros tiende a aumentar artificialmente dicha verosimilitud. Los criterios AIC y BIC corrigen este efecto penalizando a los modelos más complejos.

- El AIC favorece modelos con buen ajuste, penalizando la complejidad de manera moderada. Es adecuado cuando el objetivo es la predicción o la descripción general del fenómeno.

- El BIC incorpora una penalización más estricta al número de parámetros, por lo que tiende a seleccionar modelos más simples. Es especialmente útil cuando se busca identificar el modelo más plausible desde un punto de vista probabilístico.

En ambos casos, el principio de selección es el mismo:

el modelo preferido es aquel que presenta el valor más bajo de AIC o BIC.

La comparación simultánea de AIC y BIC ofrece una evaluación equilibrada entre bondad de ajuste y parquedad del modelo. Si ambos criterios coinciden en la selección, se obtiene una decisión robusta; si divergen, puede considerarse el propósito del análisis para preferir un modelo más flexible (AIC) o uno más simple (BIC).

Bajo este marco, la elección del modelo que mejor representa la distribución del PL se realiza evaluando estos criterios sobre los ajustes log-normal, Weibull y Gamma calculados a partir de la CDF empírica.

Capítulo 3

METODOLOGÍA

EN este capítulo se describe la metodología seguida para estudiar el efecto de un dron actuando como obstáculo pasivo sobre un enlace fijo a 18 GHz en condiciones LoS. El objetivo es documentar de forma clara cómo se diseñó, ejecutó y procesó la campaña experimental que permitió analizar la variación de la potencia recibida y del PL bajo distintas trayectorias de vuelo.

La metodología se estructura en torno a tres etapas principales. En primer lugar, se define y verifica un escenario de referencia LoS sin obstrucciones, que se utiliza como base experimental para todas las comparaciones posteriores. Luego, se planifican y ejecutan varias trayectorias de vuelo del dron, diseñadas para generar diferentes configuraciones geométricas de bloqueo sobre el enlace. Finalmente, se realiza la adquisición de datos en terreno y el procesamiento posterior de las mediciones, obteniendo series de potencia recibida y *path loss* asociadas a cada trayectoria.

La Figura 3.1 resume esta secuencia de trabajo como una línea de tiempo, desde la preparación y calibración del equipamiento hasta la interpretación de los resultados. Este flujo guía la organización del capítulo: primero se detalla la configuración del enlace y el equipamiento utilizado, luego se describe el procedimiento de medición y las trayectorias de vuelo, y finalmente se presentan las etapas de procesamiento de los datos y los criterios de comparación frente a la referencia LoS.



Figura 3.1. Línea de tiempo de la metodología: secuencia de actividades desde la preparación y calibración de equipos hasta la interpretación de los resultados.

3.1. Preparación y calibración de equipos

La correcta selección, configuración y alineación del equipamiento es fundamental para garantizar mediciones precisas y comparables de la pérdida de trayectoria a 18 GHz. El sistema experimental está compuesto por una antena transmisora, una antena receptora, un generador de señal de banda milimétrica, un analizador de espectros y las conexiones asociadas (cables coaxiales, adaptadores y cargas).

Antes de realizar mediciones en terreno, todo el equipamiento fue instalado en la cámara anecoica para validar su funcionamiento y asegurar condiciones controladas de propagación. En particular, se comprobó que el nivel recibido fuera consistente con la potencia esperada para la configuración seleccionada, que la cadena de RF no presentara pérdidas adicionales no consideradas y que el analizador registrara correctamente el tono transmitido.

La información obtenida en estas pruebas permitió confirmar el correcto funcionamiento del enlace, establecer el nivel nominal de referencia a 18 GHz y asegurar que la posterior medición LoS realizada en terreno fuese representativa del comportamiento real del sistema en condiciones sin obstrucciones.

3.1.1. Antenas

Para la banda de 18 GHz se utilizaron antenas horn de alta directividad. Según el datasheet, la dimensión lineal más grande de la antena es de 14 cm (considerando la guía de onda). Con este valor se calculó la distancia mínima de Fraunhofer, que asegura un frente de onda cuasi plano en la zona de medición:

$$R_{\mathrm{FF}} \approx 2{,}34 \text{ m}.$$

En la cámara anecoica se estableció una separación de 3.15 m, superior a la mínima requerida, garantizando operación en campo lejano. Para asegurar la condición de línea de vista sin intersecciones con el suelo, se verificó el despeje del 60 % de la primera zona de Fresnel, obteniéndose una altura mínima de aproximadamente 7 cm. En la práctica, la altura utilizada fue 1.84 m, ampliamente superior al mínimo teórico.

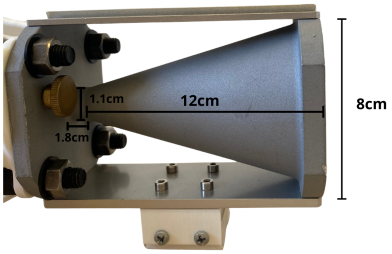


Figura 3.2. Medidas de la antena horn para 18 GHz.

3.1.2. Analizador de espectro

Para registrar la señal recibida se empleó el analizador SAF Spectrum Compact (16–26.5 GHz), adecuado para mediciones en campo y cámaras anecoicas sin necesidad de equipos voluminosos o con pérdidas añadidas en front-end. Se configuró el span, RBW y nivel de referencia de forma consistente entre todas las mediciones para asegurar repetibilidad.



Figura 3.3. Analizador SAF Spectrum Compact utilizado para 18 GHz.

3.1.3. Generador de señal

Para la transmisión se utilizó un generador capaz de operar en 18 GHz, configurado en onda continua (CW) con potencia de salida ajustada a 0 dBm. La estabilidad en potencia y frecuencia del generador permite que cualquier variación observada en recepción se atribuya exclusivamente al canal.



Figura 3.4. Generador de señal para 18 GHz.

3.1.4. Pruebas en cámara anecoica

Las pruebas realizadas en la cámara anecoica tuvieron como propósito verificar el comportamiento del enlace en un entorno libre de reflexiones y determinar la pérdida total de la cadena de RF (L_{cables}). Para ello se dispusieron las antenas a una separación de $d = 3{,}15$ m y se registró el nivel recibido por el analizador para una señal continua a 18 GHz.

En condiciones ideales de espacio libre, la pérdida teórica viene dada por

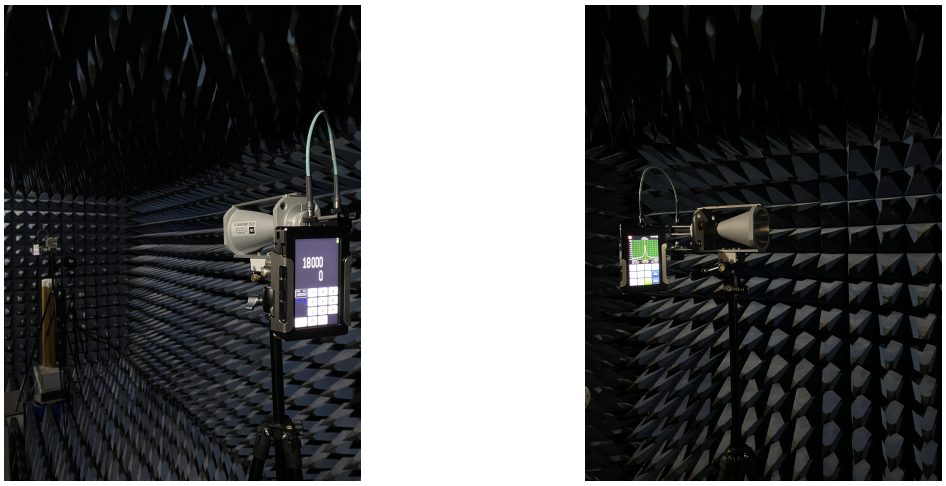
$$PL_{\text{FS}} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \approx 67{,}51 \text{ dB},$$

donde $\lambda = 0{,}0167$ m corresponde a la longitud de onda a 18 GHz. La potencia medida en recepción fue $-29{,}00$ dBm, lo que permitió determinar la pérdida total asociada a cables, adaptadores y conexiones:

$$L_{\text{cables}} = 3{,}69 \text{ dB}.$$

Este valor se emplea de manera consistente en todas las mediciones en terreno, de modo que cualquier variación observada en la potencia recibida sea atribuible al canal y no a cambios en el hardware.

La Figura 3.5 muestra el montaje utilizado durante las pruebas en cámara anecoica.



TX RX

Figura 3.5. Montaje experimental en cámara anecoica utilizado para la verificación del enlace a 18 GHz y la determinación de la pérdida de la cadena de RF.

3.1.5. Enlace base en terreno a 18 GHz (sin dron)

Para obtener una referencia del canal en condiciones reales de propagación sin obstrucción, se replicó la geometría del montaje en ambiente abierto. Se fijó una distancia $d = 20$ m y alturas de 1.80 m para TX y RX. Se registró la potencia recibida $P_R(t)$ durante varios segundos de medición estable.

A partir de estas mediciones se definió la pérdida de trayectoria LoS medida en terreno:

$$PL_{\text{LoS,med}}(t) = P_T + G_T + G_R - P_R(t) - L_{\text{cables}}.$$

La mediana obtenida fue:

$$PL_{\text{base, med}} = 83{,}51 \text{ dB}.$$

Este valor se adopta como referencia experimental del enlace LoS en terreno. Todas las mediciones posteriores con dron se compararán con esta referencia para cuantificar la pérdida adicional inducida por el UAV.

3.2. Trayectorias del dron y planificación de mediciones

Definido el enlace base en terreno a 18 GHz, el siguiente paso consiste en establecer las trayectorias de vuelo que seguirá el dron durante la campaña

experimental. Estas trayectorias se diseñaron para inducir obstrucciones controladas de la LoS y caracterizar cómo la geometría del bloqueo afecta la pérdida adicional sobre el enlace fijo. El objetivo es capturar la variabilidad temporal del canal bajo distintas configuraciones de movimiento y posición relativa del UAV.

En este estudio se consideran cinco trayectorias principales, agrupadas en dos categorías: obstrucción directa sobre la LoS y obstrucción desplazada respecto a ella.

Trayectorias que intersectan la LoS

1. **Suspensión en el punto medio del enlace**: El dron se mantiene estacionario en la línea de vista, bloqueando de manera estable el enlace. Esta configuración permite estimar la atenuación máxima sostenida y el comportamiento del canal en condiciones de *shadowing* casi estático.

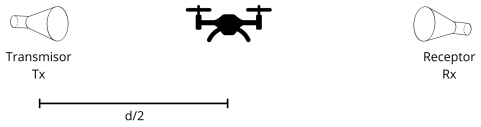


Figura 3.6. Trayectoria de suspensión del dron en el punto medio del enlace.

2. **Movimiento horizontal sobre la LoS**: El dron se desplaza lateralmente sobre la línea de vista, manteniendo el bloqueo durante todo el recorrido transversal. Esta trayectoria permite observar cómo varía la atenuación cuando la obstrucción se mueve de un extremo al otro del enlace.

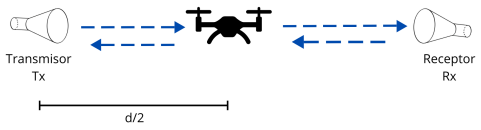


Figura 3.7. Trayectoria horizontal del dron desplazándose sobre la LoS.

3. **Paso a través de la LoS (trayectoria vertical)**: El dron se aproxima desde atrás del transmisor o receptor, cruza directamente la línea de vista en

el punto medio del enlace y continúa su movimiento. Esta trayectoria permite medir el bloqueo transitorio y caracterizar la profundidad y duración del *fading* inducido.

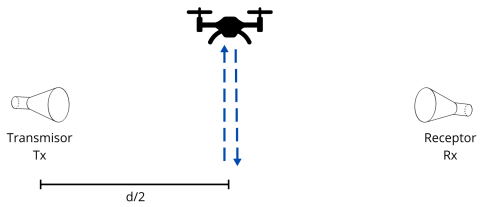


Figura 3.8. Trayectoria de paso del dron a través de la LoS.

Trayectorias desplazadas respecto a la LoS

Además de las trayectorias que intersectan directamente la línea de vista, se consideraron configuraciones adicionales en las que el dron no bloquea completamente la LoS, pero se desplaza dentro del volumen de la primera zona de Fresnel. Estas trayectorias permiten estudiar cómo varía la pérdida adicional cuando la obstrucción es parcial y depende de la posición vertical del UAV.

Se evaluaron dos tipos de movimiento, cada uno ejecutado tanto por encima como por debajo de la línea de vista:

- **Suspensión desplazada respecto a la LoS**: El dron se mantiene estacionario en el punto medio del enlace, pero ubicado a una altura superior o inferior a la línea de vista. Estas configuraciones permiten analizar atenuaciones moderadas o leves según el grado de intersección con la zona de Fresnel, diferenciando entre obstrucción parcial alta y obstrucción parcial baja.

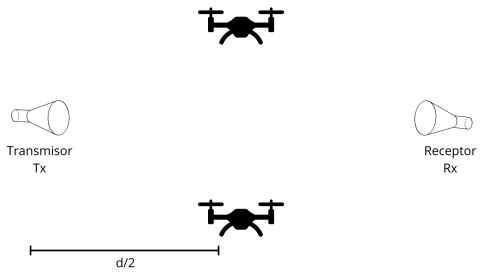


Figura 3.9. Suspensión con desplazamiento vertical respecto a la LoS: por encima (arriba) y por debajo (abajo).

- **Movimiento horizontal desplazado respecto a la LoS**: El dron se desplaza horizontalmente a lo largo del enlace, pero situado por encima o por debajo de la línea de vista. Con esta trayectoria se observa cómo evoluciona la pérdida cuando el UAV recorre la zona superior o inferior de la primera zona de Fresnel, generando obstrucciones parciales dinámicas.

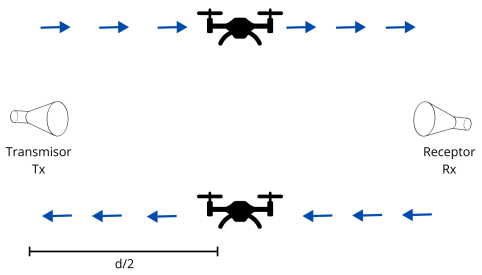


Figura 3.10. Movimiento horizontal con desplazamiento vertical respecto a la LoS: por encima (arriba) y por debajo (abajo).

Estas variantes complementan las trayectorias que intersectan directamente la LoS, permitiendo obtener una caracterización más completa del enlace. En conjunto, abarcan desde bloqueos totales hasta obstrucciones parciales —tanto estáticas como dinámicas— proporcionando una visión detallada de cómo la geometría del vuelo afecta la pérdida adicional sobre el canal a 18 GHz.

3.3. Campaña de medición en terreno

Con la calibración de la cadena de RF completada y el enlace base LoS definido en terreno, se procedió a ejecutar la campaña experimental a 18 GHz. El hardware utilizado fue exactamente el mismo que en la caracterización anecoica, asegurando uniformidad entre las mediciones y permitiendo que cualquier variación registrada se atribuya únicamente al canal.

Para cada trayectoria descrita anteriormente se registraron muestras continuas de potencia recibida $P_R(t)$ mediante el analizador de espectros. Cada medición se realizó manteniendo fija la distancia entre antenas, la altura del enlace y la potencia transmitida, de modo que la única variable modificada fuera la posición y el movimiento del dron.

A continuación se presentan algunas imágenes ilustrativas del despliegue experimental, en las que se observa el dron, las antenas y la geometría del enlace durante las mediciones en terreno:



Figura 3.11. Dron utilizado en la campaña corresponde a un DJI Matrice 30T, cuyo fuselaje está construido principalmente en polímero reforzado y aleaciones livianas. Posee dimensiones compactas de aproximadamente $365 \times 215 \times 195$ mm (con brazos plegados), lo que determina el volumen físico que actúa como obstáculo durante las trayectorias.

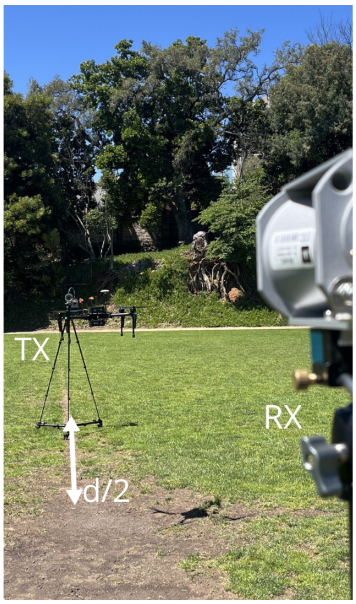


Figura 3.12. Dron en suspensión en el punto medio del enlace a 18 GHz, bloqueando parcialmente la LoS.

Capítulo 4

RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la campaña de medición realizada en terreno. El propósito central del análisis es describir cómo la presencia del dron modifica la potencia recibida y la correspondiente pérdida de trayectoria medida, en comparación con la condición de referencia LoS obtenida sin obstrucciones.

Los resultados se organizan en función de cada una de las trayectorias de vuelo ejecutadas, permitiendo examinar la variación temporal del nivel recibido, la profundidad de la atenuación inducida por el dron y los patrones asociados a la geometría del bloqueo. Para las trayectorias en las que el dron permaneció interfiriendo el haz durante un intervalo prolongado —particularmente el vuelo horizontal en LoS— se complementa el análisis temporal con una caracterización estadística basada CDF y modelos de ajuste probabilístico.

4.1. Trayectoria de referencia: suspensión en LoS

La trayectoria en suspensión sobre la LoS constituye la referencia principal del análisis, pues corresponde al caso en que el dron se mantiene detenido sobre el eje del haz, actuando como un bloqueador estático del enlace. Esta condición permite aislar la atenuación introducida exclusivamente por la presencia física del UAV, sin efectos adicionales asociados a desplazamientos laterales o variaciones geométricas significativas.

La Figura 4.1a muestra la potencia recibida a lo largo del tiempo, junto con la potencia LoS medida en terreno sin dron y la media global de la serie temporal. Aunque el UAV se mantiene en modo de suspensión, la señal presenta oscilaciones suaves debidas a los ajustes continuos del controlador de vuelo. Estos pequeños cambios de posición y actitud modifican ligeramente la sección efectiva del bloqueo sobre el haz directo, generando la tendencia suave observada en la serie temporal.

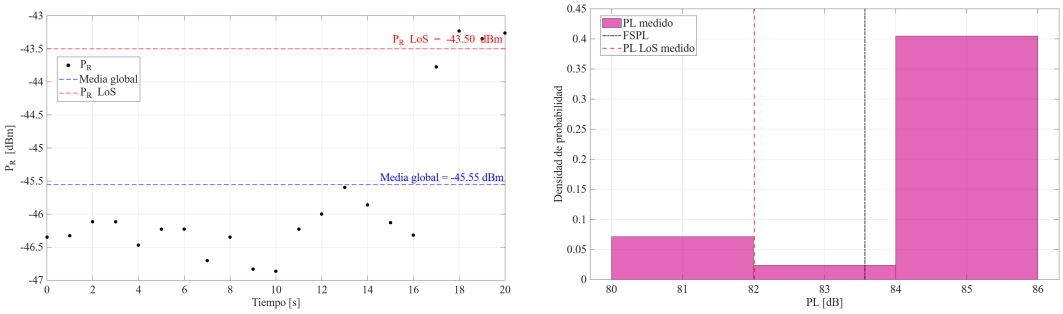
Aun así, el nivel recibido permanece sistemáticamente por debajo de la condición LoS, con una atenuación promedio del orden de 2 dB.

Este valor de atenuación resulta coherente con la geometría del enlace. Para una distancia de 20 m a 18 GHz, el radio máximo de la primera zona de Fresnel es aproximadamente 0,29 m, mientras que el dron utilizado posee un diámetro efectivo (fuselaje más envergadura de hélices) del orden de $20 - -30$ cm. Esto implica que, al ubicarse exactamente sobre la LoS, el UAV obstruye una fracción significativa pero no total de la primera zona de Fresnel. La teoría de propagación predice que una intrusión parcial de esta magnitud produce atenuaciones moderadas —típicamente entre 2 y 3 dB— lo cual coincide estrechamente con los valores medidos. En otras palabras, la pérdida observada en esta trayectoria no sólo es estable, sino también físicamente esperada dadas las dimensiones relativas entre el dron y el volumen efectivo de propagación del enlace.

Este comportamiento constituye además un punto de referencia para todas las trayectorias que intersectan la LoS. Cada vez que el dron cruza el eje del haz, ya sea en movimiento horizontal o vertical, la fracción de la zona de Fresnel interceptada es esencialmente la misma que en suspensión, por lo que se espera —y efectivamente se observa— que el nivel de pérdida converja temporalmente hacia el mismo valor característico registrado en esta configuración estática.

Por contraste, en las trayectorias donde el UAV se desplaza sobre o bajo la LoS, la intersección con la zona de Fresnel es considerablemente menor, pues el dron se ubica en regiones laterales del haz donde la densidad de energía es mucho más baja. En consecuencia, la atenuación medida en esos casos es reducida y permanece cercana al nivel LoS, coherente con un escenario en el que el enlace sólo experimenta una obstrucción marginal y donde la zona de Fresnel se mantiene prácticamente despejada.

La Figura 4.1b presenta el histograma del *Path Loss* asociado a esta trayectoria. La distribución unimodal y concentrada del PL refuerza que, bajo una obstrucción fija del haz, la pérdida de trayectoria se mantiene en un rango estrecho y reproducible. Este valor característico será el punto de comparación para evaluar la severidad del bloqueo en las trayectorias dinámicas estudiadas en las siguientes secciones.



(a) Potencia recibida en suspensión sobre la LoS.

(b) Histograma del *Path Loss* para la trayectoria en suspensión.

Figura 4.1. Resultados para la trayectoria de referencia en suspensión bajo línea de vista.

4.2. Trayectoria horizontal en LoS

En esta sección se analiza el comportamiento del canal cuando el dron se desplaza horizontalmente manteniéndose dentro de la LoS entre TX y RX. Esta trayectoria permite evaluar cómo cambia la potencia recibida y el PL cuando el dron intercepta el haz principal durante un movimiento lateral, en contraste con la trayectoria de referencia en suspensión, donde el bloqueo es estático.

La hipótesis física es que, mientras el dron permanezca dentro de la región central del haz y siga obstruyendo la LoS, el nivel dominante de PL debe ser similar al observado en suspensión, variando únicamente en función de la estabilidad del vuelo.

4.2.1. Potencia recibida

La Figura 4.2 muestra la potencia recibida $P_R(t)$ para ambas direcciones del desplazamiento horizontal (ida y retorno). En cada gráfico se incluyen:

- la línea roja correspondiente al P_R LoS sin dron,
- la línea azul con la media global de cada trayectoria,
- la potencia registrada en la trayectoria en suspensión, usada como referencia.

Ida horizontal. Durante la ida, el dron mantuvo un vuelo relativamente estable dentro de la LoS. Esto se refleja en una baja dispersión de las muestras de potencia recibida. La media global obtenida fue:

$$\overline{P_R}_{\text{ida}} = -45{,}64 \text{ dBm},$$

prácticamente igual a la registrada en la trayectoria de suspensión:

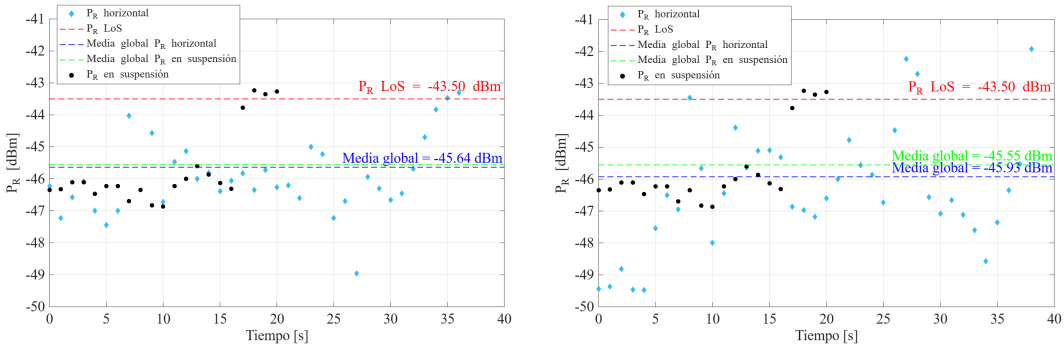
$$\overline{P_R}_{\text{susp}} = -45{,}55 \text{ dBm}.$$

Comparada con la suspensión, la ida horizontal produce la misma atenuación media, lo cual evidencia que la presencia del dron bloqueando la LoS genera un efecto consistente e independiente del movimiento cuando este es estable.

Retorno horizontal. Durante el retorno se observaron oscilaciones laterales y variaciones menores de altura, lo que produjo una dispersión mayor en la potencia recibida. La media global fue:

$$\overline{P_{R\text{retorno}}} = -45{,}93 \text{ dBm}.$$

Comparada con la ida y con la suspensión, la trayectoria de retorno presenta mayor variabilidad, pero el nivel medio de atenuación permanece similar. Esto indica que el dron introduce una sombra prácticamente constante siempre que permanece dentro del haz principal.



(a) Ida horizontal en LoS.

(b) Retorno horizontal en LoS.

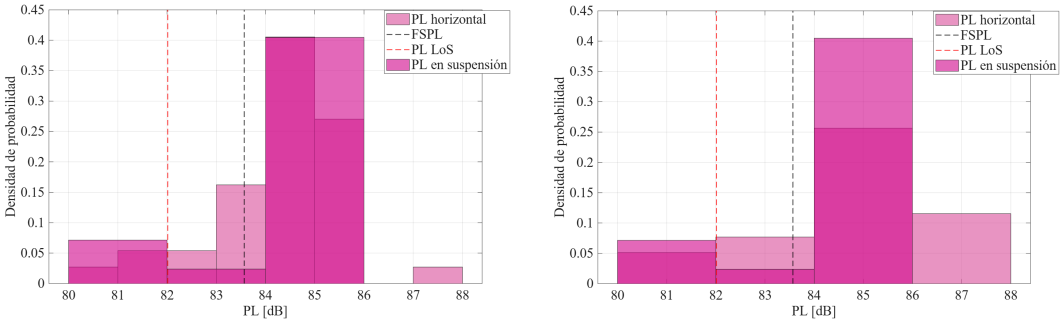
Figura 4.2. Potencia recibida en ambas direcciones de desplazamiento horizontal en LoS.

4.2.2. Histogramas de Path Loss

Las Figuras 4.3a y 4.3b muestran los histogramas del PL para ida y retorno. En ambos se incluyen el FSPL teórico para 20 m, el PL LoS medido en terreno y el histograma de la trayectoria en suspensión, presentado para referencia.

Ida horizontal. Se observa una distribución unimodal y estrecha, centrada en el rango también observado durante la suspensión. Esto confirma que el dron introduce una atenuación estable mientras mantenga un vuelo controlado dentro de la LoS.

Retorno horizontal. El retorno muestra un histograma más amplio, lo que refleja la mayor inestabilidad del vuelo. Comparado con la ida y con la suspensión, el ensanchamiento proviene de las variaciones dinámicas, pero no de un cambio sistemático del canal.



(a) Histograma del PL en ida horizontal.

(b) Histograma del PL en retorno horizontal.

Figura 4.3. Histogramas del Path Loss para trayectorias horizontales en LoS.

4.2.3. CDF unificada y selección de modelos estadísticos

Siguiendo las indicaciones metodológicas, las mediciones obtenidas durante la ida y el retorno se unificaron en un único conjunto con el fin de caracterizar de forma global el comportamiento del PL en la trayectoria horizontal. La Figura 4.4 muestra las mediciones ordenadas empleadas para construir la CDF, junto con las curvas ajustadas a los modelos Log-normal, Weibull y Gamma, además de una línea vertical que indica el valor de PL LoS medido.

Para comparar cuantitativamente la calidad de ajuste de cada modelo se utilizaron los criterios de información AIC y BIC, cuyos valores se resumen en la Tabla 4.1.

Modelo	**AIC**	**BIC**
Log-normal	293.96	298.63
Weibull	299.27	303.93
Gamma	293.78	298.44

Tabla 4.1: Criterios AIC y BIC para los modelos ajustados al Path Loss horizontal.

El modelo Gamma presenta el valor AIC más bajo, por lo que se identifica como el mejor ajuste entre las distribuciones consideradas. Este resultado es coherente con la forma de la CDF observada: el PL horizontal exhibe una asimetría moderada y una variabilidad adicional asociada a las fluctuaciones dinámicas del vuelo, características que la distribución Gamma describe adecuadamente en canales con *shadowing* variable.

Sin embargo, los valores AIC y BIC de la distribución Weibull son cercanos a los de Gamma, lo que indica que el comportamiento estadístico también puede interpretarse razonablemente mediante un modelo Weibull, especialmente al considerar la presencia de colas moderadamente pesadas y variabilidad suave

en torno a un nivel de pérdida dominante. En este sentido, ambos modelos son físicamente plausibles, aunque Gamma ofrece el mejor compromiso cuantitativo.

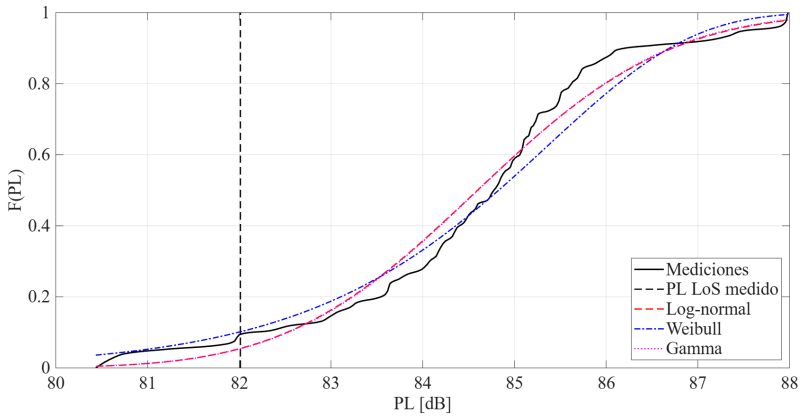


Figura 4.4. CDF unificada del Path Loss horizontal obtenida a partir de las mediciones, junto con las distribuciones ajustadas.

En términos físicos, el dron actúa como un obstructor cuasi-estático del haz principal: mientras permanezca dentro de la LoS, la fracción del frente de onda interceptada se mantiene casi constante y el nivel dominante de atenuación no varía de forma significativa entre ida y retorno. Las diferencias observadas en la dispersión del Path Loss se explican principalmente por las variaciones en la estabilidad del vuelo, más que por cambios inherentes del canal, lo que se refleja en la forma de las distribuciones Gamma y Weibull ajustadas.

4.3. Trayectoria vertical

La trayectoria vertical corresponde al movimiento del dron a lo largo del eje perpendicular a la línea que une al transmisor y al receptor, intersectando la LoS únicamente en un instante. A diferencia de la trayectoria horizontal —en la que el dron permanece un tiempo prolongado dentro del haz principal—, en el movimiento vertical la obstrucción es breve y ocurre sólo cuando el dron cruza directamente la LoS. Esta trayectoria se analiza en comparación con la referencia establecida en la Sección 4.1, correspondiente al dron suspendido en la LoS.

Potencia recibida y pérdida de trayectoria

La Figura 4.5b muestra la potencia recibida a lo largo del tiempo. A partir de la comparación con el caso en suspensión, se observa que:

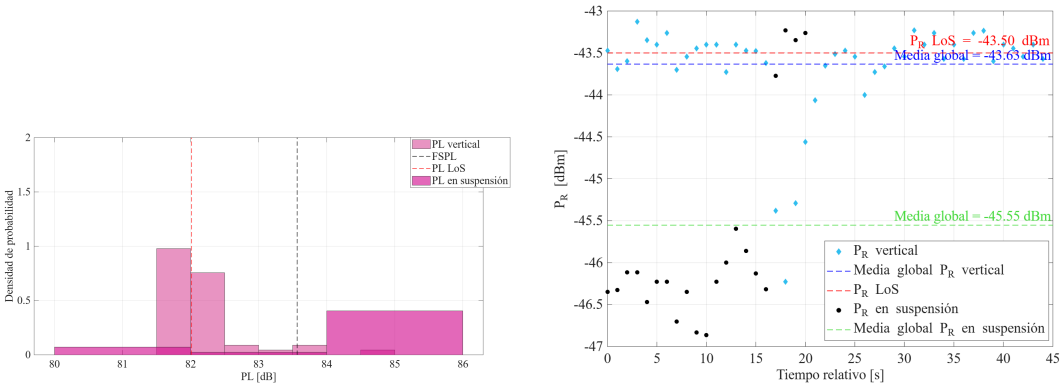
- Antes del cruce de la LoS, la potencia recibida coincide con el valor nominal del enlace libre, con niveles muy cercanos a $-43{,}6$ dBm, lo que confirma que el dron no afecta al enlace fuera de la región del haz principal.

- Durante la intersección con la LoS, la potencia cae abruptamente hasta valores cercanos a −45,5 dBm, exactamente coincidentes con la atenuación registrada en la trayectoria en suspensión. Esto demuestra que el mecanismo dominante es el mismo: la obstrucción física del haz.
- Después de abandonar la LoS, la potencia vuelve inmediatamente al nivel LoS, sin presentar fluctuaciones residuales ni efectos persistentes.

La Figura 4.5a refuerza esta interpretación. El histograma del Path Loss presenta:

- una gran concentración de muestras alrededor del valor LoS, y
- un conjunto reducido de muestras en torno al nivel atenuado (86 dB),

lo que evidencia que el dron sólo afecta la propagación en el instante en que intersecta directamente el haz principal. El resto del tiempo, el canal se comporta como un enlace en espacio libre.



(a) Histograma del Path Loss: suspensión vs. vertical.

(b) Potencia recibida: suspensión vs. vertical.

Figura 4.5. Comparación temporal y estadística entre la trayectoria en suspensión y la trayectoria vertical en la LoS.

En conjunto, la trayectoria vertical confirma que la atenuación introducida por el dron es un fenómeno puramente geométrico: se manifiesta únicamente cuando el dron invade la región del haz principal y desaparece inmediatamente al salir de ella. No se observan efectos dinámicos adicionales ni cambios estructurales en el canal.

4.4. Trayectorias en suspensión sobre y bajo la LoS

En estas dos trayectorias, el dron se mantiene en suspensión pero con un desplazamiento vertical respecto de la línea de vista: una medición se realiza con

el dron ubicado por encima, mientras que la otra se registra con el dron situado por debajo de dicha línea. El objetivo es determinar si pequeñas variaciones en la posición vertical del dron modifican la atenuación observada cuando éste no intersecta directamente el haz principal.

Ambas trayectorias se comparan con la referencia obtenida en suspensión exacta sobre la LoS (Sección 4.1), donde se registró una atenuación estable de aproximadamente −2 dB respecto del enlace libre.

Potencia recibida en suspensión sobre la LoS

La Figura 4.6a muestra la potencia recibida cuando el dron se encuentra suspendido levemente *por encima* de la LoS. Se observa que:

- La potencia se mantiene prácticamente idéntica al nivel LoS, con una media de −43,60 dBm.
- No se registra ningún cruce geométrico del haz, por lo que la serie temporal se mantiene estable.
- La referencia de suspensión en la LoS (−45,55 dBm) aparece notablemente más atenuada, lo que confirma que en esta trayectoria el dron no obstruye el canal.

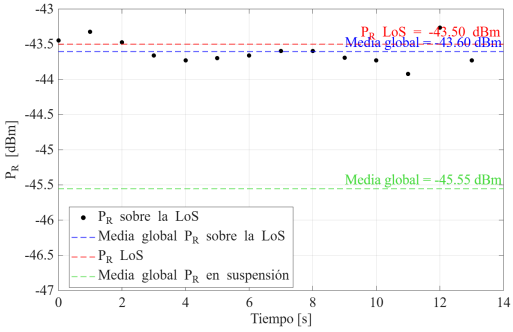
El histograma correspondiente (Figura 4.6b) presenta una distribución altamente concentrada alrededor del valor LoS, con ausencia de muestras en la región atenuada. Esta evidencia demuestra que, mientras el dron se mantenga fuera del haz principal, la propagación es indistinguible de la condición libre.

Potencia recibida en suspensión bajo la LoS

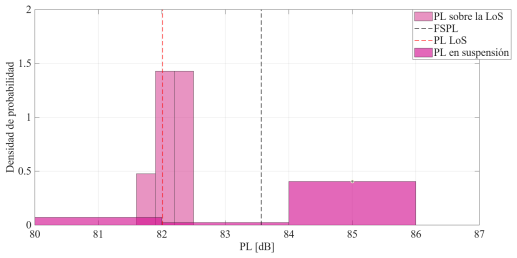
La Figura 4.6c muestra la potencia cuando el dron se ubica *por debajo* del eje de propagación. Al igual que en el caso anterior:

- La potencia recibida permanece cercana al valor LoS (−43,59 dBm).
- No se observa la atenuación característica del bloqueo directo, ya que el dron no intercepta el haz.
- La referencia proveniente de la suspensión con intersección en la LoS conserva el nivel esperado de −45,55 dBm.

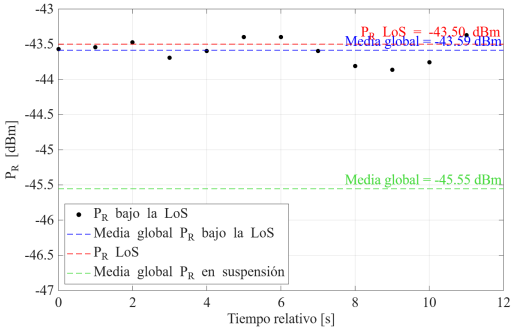
El histograma (Figura 4.6d) confirma esta tendencia, mostrando una distribución estrecha alrededor del nivel LoS, con un pequeño número de muestras de mayor Path Loss asociadas a oscilaciones marginales del dron, pero sin impacto significativo en el canal.



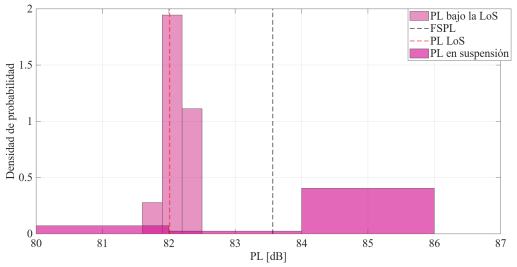
(a) Potencia recibida — suspensión sobre la LoS.



(b) Histograma del Path Loss — suspensión sobre la LoS.



(c) Potencia recibida — suspensión bajo la LoS.



(d) Histograma del Path Loss — suspensión bajo la LoS.

Figura 4.6. Comparación entre trayectorias en suspensión sobre y bajo la LoS.

4.5. Trayectorias horizontales desplazadas respecto de la LoS

A diferencia de la trayectoria horizontal que intersecta directamente la LoS (Sección 4.2), en este caso el dron se desplaza de manera paralela a la LoS, pero manteniendo una separación vertical fija, ya sea por encima o por debajo del eje del haz principal. Esta configuración permite evaluar si la atenuación inducida por el dron depende estrictamente de la obstrucción geométrica directa o si el campo radiado presenta sensibilidad adicional ante desplazamientos laterales de pequeña magnitud.

En ambas trayectorias (sobre y bajo la LoS) se observan tendencias prácticamente idénticas tanto en la potencia recibida como en la pérdida de trayectoria estimada, lo que confirma que el dron únicamente introduce atenuación apreciable cuando ingresa directamente en la región de máxima concentración de energía del haz. Al mantenerse desplazado, su efecto electromagnético sobre el vínculo es mínimo.

Potencia recibida

Las Figuras 4.7 y 4.8 muestran las potencias recibidas para las trayectorias sobre y bajo la LoS, respectivamente. En ambos casos se incluyen como referencia:

- la potencia LoS sin dron,
- la media global de cada medición horizontal,
- la media global de la trayectoria en suspensión en LoS, que representa el caso de obstrucción directa.

Los resultados permiten concluir que la potencia recibida permanece extremadamente cercana al nivel LoS, con variaciones menores a 0,3 dB, lo que indica que el dron no produce alteraciones apreciables en el enlace mientras se desplaza por encima o por debajo de la línea de vista. Ninguna de las dos trayectorias muestra una caída de potencia comparable a la observada en la trayectoria en suspensión —cuya media global es −45,55 dBm— lo que confirma que, en estas condiciones, el dron no interseca el haz principal y, por tanto, no introduce atenuación significativa.

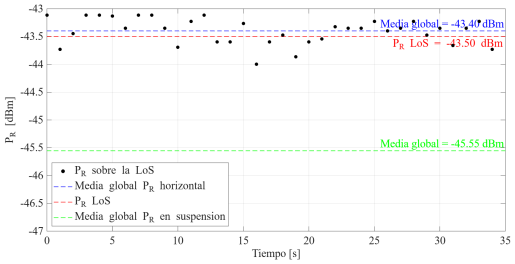


Figura 4.7. Potencia recibida para la trayectoria horizontal sobre la LoS.

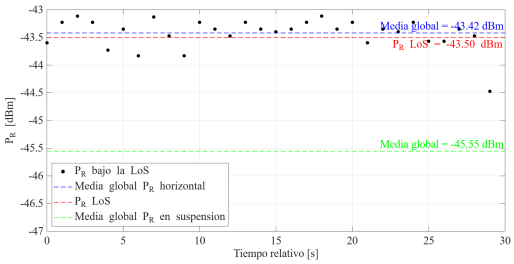


Figura 4.8. Potencia recibida para la trayectoria horizontal bajo la LoS.

Histogramas de Path Loss

Las Figuras 4.9 y 4.10 presentan los histogramas de la pérdida de trayectoria para ambas trayectorias, junto con las referencias del FSPL teórico y la pérdida LoS medida.

Los histogramas muestran:

- Una alta concentración de valores alrededor de 82 dB, prácticamente coincidente con la condición LoS.
- Ausencia de un segundo modo alrededor de 84,5 dB, característico de la trayectoria en suspensión.

Esto demuestra que el dron no ingresa en la región del haz principal y que la propagación se mantiene en condiciones equivalentes al enlace libre.

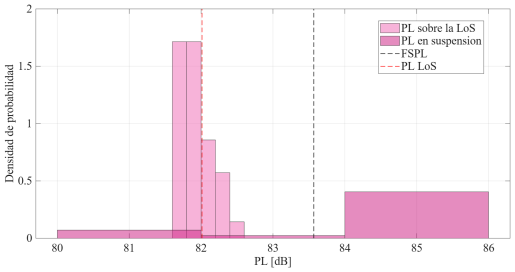


Figura 4.9. Histograma del Path Loss para la trayectoria horizontal sobre la LoS.

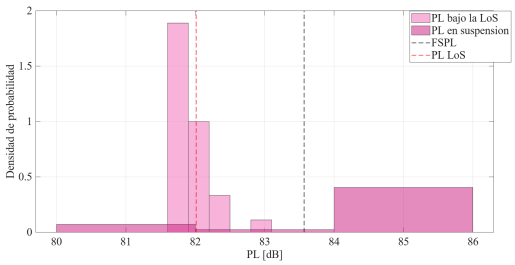


Figura 4.10. Histograma del Path Loss para la trayectoria horizontal bajo la LoS.

Capítulo 5

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

EL análisis de las mediciones realizadas a 18 GHz permite comprender cómo la presencia del dron modifica la propagación en un enlace fijo bajo condiciones LoS. Esta discusión integra los resultados experimentales con los principios de propagación relevantes y con la geometría del enlace.

5.1. Interpretación general del comportamiento observado

Los resultados muestran que la atenuación inducida por el dron depende principalmente de su posición relativa a la línea de vista. En todas las trayectorias donde el UAV intersecta la región de mayor energía del enlace, la pérdida de trayectoria el PL se mantiene dentro de un rango estable y reproducible, lo que indica un comportamiento fuertemente determinado por la obstrucción geométrica y no por la dinámica del movimiento.

Un elemento clave para interpretar estos resultados es el tamaño de la primera zona de Fresnel, donde se observa que el UAV produce una obstrucción parcial de esta cuando cruza la LoS. Esta relación geométrica explica la magnitud de las pérdidas medidas experimentalmente, las cuales se sitúan típicamente en torno a $2--3\,\mathrm{dB}$, valores esperables de una intrusión significativa pero no total dentro de la primera zona de Fresnel.

Así, el tamaño relativo entre el dron y el radio $r_1(P)$ permite interpretar de forma directa el origen físico de la atenuación observada, estableciendo la obstrucción parcial de la zona de Fresnel como el mecanismo dominante en el enlace.

5.2. Comparación entre suspensión y trayectoria horizontal en LoS

Un resultado especialmente consistente es que la trayectoria horizontal en LoS produce un nivel de PL prácticamente idéntico al observado cuando el dron está

suspendido en el centro del enlace. Aunque el UAV se desplaza lateralmente, permanece dentro de la zona donde la energía del enlace se concentra, por lo que la fracción de energía que intercepta cambia muy poco. En consecuencia, el nivel promedio de PL permanece casi inalterado entre estas dos trayectorias.

Las diferencias entre la ida y el retorno se manifiestan únicamente como fluctuaciones locales de la potencia recibida, atribuibles a variaciones de estabilidad del vuelo, pero no afectan el nivel medio de la pérdida.

5.3. Trayectoria vertical: variaciones breves y de baja magnitud

La trayectoria vertical genera una caída abrupta de la potencia únicamente durante el instante en que el dron intersecta la LoS. Antes y después de ese cruce, la potencia coincide prácticamente con la del enlace libre. La magnitud de la atenuación registrada es similar a la observada cuando el dron permanece suspendido en la LoS, lo que confirma que el mecanismo dominante sigue siendo la obstrucción parcial de la zona de Fresnel.

Este comportamiento se explica por tres factores: (i) el dron nunca llega a bloquear completamente la primera zona de Fresnel; (ii) la difracción en los bordes del UAV aporta energía aun durante el cruce; y (iii) la obstrucción tiene una duración breve en comparación con las trayectorias horizontales.

5.4. Trayectorias sobre y bajo la LoS

Cuando el dron vuela por encima o por debajo de la LoS, ya sea en suspensión o en movimiento horizontal, la atenuación medida es sustancialmente menor. En estas trayectorias, el UAV no intersecta el núcleo energético del enlace, sino regiones laterales donde la intensidad del campo es considerablemente menor. Esto reduce tanto la fracción de la zona de Fresnel afectada como el impacto global sobre el enlace.

Los valores obtenidos para ambas trayectorias son coherentes entre sí, lo que muestra que el factor determinante es la separación vertical respecto del eje del enlace y no la dirección del desplazamiento horizontal.

5.5. Variabilidad estadística y análisis mediante CDF

La trayectoria horizontal en LoS fue la única en la que el dron mantuvo una obstrucción sostenida del haz, generando un número suficiente de muestras para describir estadísticamente la variabilidad del PL. A partir de la CDF empírica se evaluó el ajuste de distintos modelos probabilísticos mediante máxima verosimilitud.

Los criterios de información indican que la distribución Gamma representa de mejor forma los datos, lo cual es consistente con una variabilidad suave y ligeramente asimétrica alrededor de un nivel dominante de pérdida. Este patrón refleja las pequeñas fluctuaciones de posición y actitud del dron durante el desplazamiento, sin cambios abruptos en la geometría del bloqueo.

Aunque los modelos Log-normal y Weibull también reproducen parcialmente la forma de la CDF, sus ajustes son menos adecuados y no superan el desempeño obtenido con la distribución Gamma. En conjunto, este análisis confirma que la variabilidad temporal observada no corresponde a un fenómeno de *fading* aleatorio intenso, sino a variaciones deterministas acotadas derivadas del mismo mecanismo geométrico de obstrucción que domina el comportamiento promedio del enlace.

5.6. Síntesis interpretativa

La atenuación inducida por el dron es un fenómeno esencialmente geométrico: depende de cuánto y cómo el UAV interseca la primera zona de Fresnel. El movimiento introduce variaciones secundarias, pero no modifica el nivel medio de PL mientras la geometría de la obstrucción se mantenga similar.

Las trayectorias que no cruzan la LoS presentan valores de PL prácticamente idénticos a los del enlace libre, lo que confirma que los lóbulos laterales del campo tienen un aporte marginal respecto del núcleo central del enlace. Además, no se observaron efectos significativos de *fading* profundo ni multipath, lo que valida el supuesto experimental de obstrucción dominante.

En conjunto, estos resultados permiten caracterizar con claridad el impacto del UAV sobre un enlace LoS a 18 GHz, estableciendo una relación directa entre la posición geométrica del dron y la pérdida inducida.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

ESTE trabajo tuvo por objetivo caracterizar experimentalmente la pérdida de trayectoria inducida por un dron actuando como obstáculo en un enlace inalámbrico fijo a 18 GHz. A partir de una campaña de medición en terreno y del análisis comparativo entre distintas trayectorias de vuelo, fue posible identificar los mecanismos físicos dominantes, cuantificar la magnitud de la atenuación generada y evaluar la sensibilidad del enlace frente a obstrucciones dinámicas. Los principales resultados se resumen a continuación.

Conclusiones generales

- La atenuación introducida por el dron depende principalmente del grado de obstrucción geométrica sobre la línea de vista. El UAV actúa como un bloqueador pasivo cuyo efecto sobre el PL es estable y reproducible mientras su posición relativa al enlace se mantenga similar.

- El análisis de la primera zona de Fresnel permitió interpretar el origen físico de la atenuación. Para la distancia de 20 m y 18 GHz, el radio máximo calculado es de aproximadamente 0,29 m. Dado que las dimensiones efectivas del dron utilizado son del orden de $20 - -30$ cm, el UAV genera una obstrucción parcial de la zona de Fresnel, coherente con las pérdidas experimentales de $2 - -3$ dB.

- La trayectoria en suspensión sobre la LoS constituye una referencia estable y representativa del efecto del dron sobre el enlace. Su baja dispersión temporal la convierte en una línea base válida para comparar otras trayectorias.

- Las trayectorias horizontales que intersectan la LoS presentan valores de PL prácticamente idénticos a los observados en suspensión. El movimiento horizontal no introduce mecanismos adicionales de atenuación, ya que el dron

permanece siempre dentro de la región donde se concentra la energía del enlace.

- La trayectoria vertical genera transiciones breves en la potencia recibida cuando el dron cruza la LoS. No obstante, la magnitud de estas variaciones se mantiene acotada, lo que confirma que el UAV nunca llega a bloquear completamente la primera zona de Fresnel.

- Los desplazamientos sobre y bajo la LoS producen una atenuación claramente menor, acorde a que el dron no intersecta el núcleo energético del enlace. La pérdida disminuye a medida que la trayectoria se aleja verticalmente del eje de propagación.

- En ningún caso se observaron *deep fades* ni multipath severo. El fenómeno dominante fue siempre la obstrucción parcial del enlace en campo lejano, lo que valida el diseño experimental y las hipótesis asumidas.

Implicancias para el diseño de enlaces

- En enlaces directivos, un dron de tamaño comparable al radio de la primera zona de Fresnel puede introducir pérdidas moderadas pero estables, cuya magnitud depende casi exclusivamente de su posición relativa a la LoS.

- Mientras el UAV permanezca dentro del volumen principal de energía, la pérdida será aproximadamente constante. El impacto del movimiento es predecible y no requiere modelos de *fast fading*.

- Para aplicaciones donde drones y enlaces fijos coexisten, los resultados muestran que el dron utilizado genera atenuaciones moderadas (1–2 dB en la mayoría de los casos). Sin embargo, este comportamiento depende directamente del tamaño relativo entre el UAV y la zona de Fresnel, por lo que no debe extrapolarse a drones de dimensiones mayores.

Limitaciones del estudio

- La distancia fija entre antenas implica que los resultados describen un escenario puntual y no permiten estudiar la evolución del PL con la distancia.

- El análisis consideró un entorno sin superficies reflectantes, por lo que no se evaluaron efectos de multipath complejo.

- Solo se consideró un modelo de dron y una única configuración de antenas; variaciones en tamaño, forma o apertura del haz podrían alterar los resultados.

Trabajo futuro

- Realizar campañas adicionales variando el tamaño del dron, la altura y la apertura de las antenas, con el fin de evaluar la sensibilidad del enlace al tamaño relativo del bloqueador.
- Extender el análisis a entornos con multipath, incorporando reflexión en superficies naturales o artificiales.
- Analizar enlaces a mayor distancia para estudiar cómo evoluciona la obstrucción de la zona de Fresnel y su impacto sobre el PL.
- Desarrollar modelos predictivos simplificados que estimen la pérdida inducida por un dron en función de su posición tridimensional, útiles en planificación de redes que operen en presencia de UAVs.

En conjunto, estos resultados permiten caracterizar con claridad el impacto del UAV sobre un enlace LoS a 18 GHz, estableciendo una relación directa entre la posición geométrica del dron, su relación con la zona de Fresnel y la pérdida inducida en el enlace.

Bibliografía

[1] J.-J. Park, J. Lee, J. Liang, K.-W. Kim, K.-C. Lee y M.-D. Kim, "Millimeter wave vehicular blockage characteristics based on 28 GHz measurements," en *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2017, págs. 1-5.

[2] M. Rodriguez, M. E. Diago-Mosquera, R. Feick et al., "Fading statics of 28 GHz LOS link blockage due to vehicular traffic," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, n.º 4, págs. 4012-4023, 2024.

[3] V. Dasarathan, M. Muthukumar, K. N. Elankumaran et al., "Outdoor channel measurement, pathloss modelling and system simulation of 2.4 GHz WLAN IEEE 802.11g in Indian rural environments," en *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC*, 2007, págs. 234-239.

[4] A. Angles-Vazquez, E. Carreño y L. S. Ahumada, "Modeling the effect of pedestrian traffic in 60-GHz wireless links," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, págs. 1234-1238, 2017.

[5] L. A. Fierro, E. C. Maggi, A. A. Vazquez y D. Schkolnik, "Empirical results for human-induced shadowing events for indoor 60 GHz wireless links," *IEEE Access*, vol. 8, págs. 123 456-123 465, 2020.

[6] O. O. Erunkulu, T. I. Gwebu, A. M. Zungeru, C. Lebekwe y M. Modisa, "Propagation channel characterization for mobile communication based on measurement campaign and simulation," *Results in Engineering*, vol. 18, págs. 100-110, 2023.

[7] C. Han y S. Duan, "Impact of atmospheric parameters on the propagated signal power of millimeter-wave bands based on real measurement data," *IEEE Access*, vol. 7, págs. 12 345-12 354, 2019.

[8] Q. Dai, Y. Huang, L. Wang, R. Ruby y K. Wu, "mm-Humidity: Fine-grained humidity sensing with millimeter wave signals," *2018 IEEE 24th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, págs. 204-211, 2018.

[9] A. A. Budalal y M. R. Islam, "Path loss models for outdoor environment—with a focus on rain attenuation impact on short-range millimeter-wave links," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 6, págs. 45-52, 2023.

[10] M. K. Elmezughi, T. J. Afullo y N. O. Oyie, "Performance study of path loss models at 14, 18, and 22 GHz in an indoor corridor environment for wireless communications," *SAIEE Africa Research Journal*, vol. 112, n.º 1, págs. 32-45, 2021.

[11] M. T. Dabiri, H. Safi, S. Parsaeefard y W. Saad, "Analytical channel models for millimeter wave UAV networks under hovering fluctuations," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, n.º 8, págs. 5412-5425, 2020.

COPYRIGHT

Some sections and figures of this document are protected by copyright laws. Please contact the Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE, the Universidad Técnica Federico Santa María or the author prior to any non-personal use of this material.

Apéndice A

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA TRAYECTORIAS HORIZONTALES FUERA DE LA LOS

En este anexo se presenta el análisis estadístico correspondiente a las trayectorias horizontales realizadas por encima y por debajo de la LoS. Estas trayectorias no se incluyeron en el cuerpo principal debido a que la variabilidad del PL es extremadamente reducida y no influye en la interpretación física del canal. Sin embargo, se documentan aquí para completar el estudio y mostrar explícitamente el comportamiento de los modelos estadísticos frente a un escenario prácticamente determinista.

CDF unificada y modelos estadísticos

Para caracterizar globalmente el comportamiento del PL en condiciones donde el dron se desplaza horizontalmente fuera del haz principal, se fusionaron las mediciones de ambas trayectorias (sobre y bajo la LoS) en un único conjunto de datos.

La Figura A.1 muestra:

- la CDF empírica obtenida a partir de las mediciones,
- los modelos Log-normal, Weibull y Gamma ajustados mediante máxima verosimilitud,

- una línea vertical que indica el valor LoS medido en terreno.

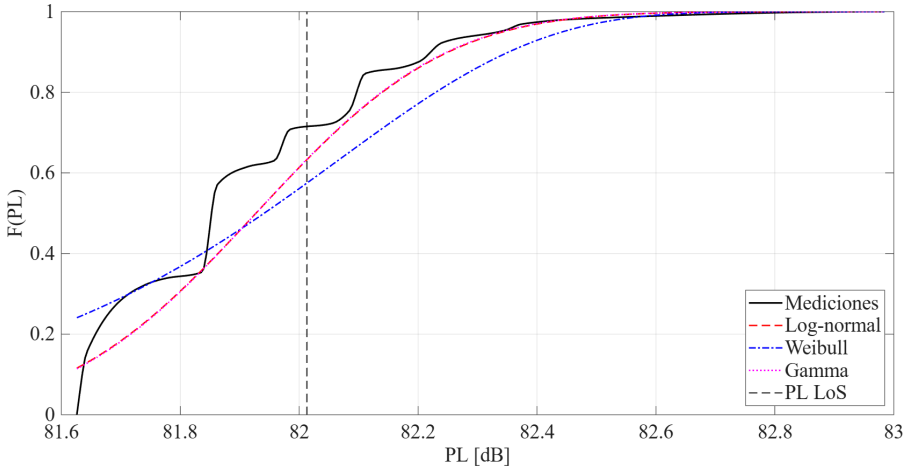


Figura A.1. CDF unificada del Path Loss horizontal desplazado, junto con modelos estadísticos ajustados.

La Tabla A.1 resume los valores obtenidos para los criterios de información AIC y BIC, empleados para comparar la calidad de los modelos ajustados.

Modelo	**AIC**	**BIC**
Log-normal	8.32	12.67
Weibull	47.34	51.69
Gamma	8.40	12.75

Tabla A.1: Criterios AIC y BIC para modelos ajustados al Path Loss horizontal desplazado.

Los resultados muestran que los modelos Log-normal y Gamma presentan valores muy similares de AIC y BIC, reflejando la baja dispersión del PL. El modelo Weibull, en cambio, exhibe un desempeño marcadamente inferior. La similitud entre los dos mejores modelos confirma que el comportamiento observado responde a una variación mínima alrededor del valor LoS, más que a un fenómeno de fading estadísticamente relevante.

En conjunto, las mediciones y los ajustes estadísticos demuestran que el dron no introduce atenuación apreciable cuando se desplaza horizontalmente fuera del haz principal. La pérdida de trayectoria permanece prácticamente idéntica a la condición LoS, lo que refuerza que la atenuación observada en otras trayectorias proviene exclusivamente de la intersección del dron con la región de mayor densidad de potencia del enlace.

Apéndice A

CDF DEL PL PARA TRAYECTORIAS EN SUSPENSIÓN DESPLAZADAS VERTICALMENTE

En este anexo se presentan las CDF correspondientes a las trayectorias en suspensión realizadas por encima y por debajo de la línea de vista (LoS). Estas curvas no fueron incluidas en el cuerpo principal del Capítulo 4, ya que la variabilidad del PL en estos casos es muy reducida y el ajuste estadístico aporta información limitada para la caracterización del canal. No obstante, se muestran aquí para completar la documentación del proceso de modelado y evidenciar el comportamiento de los modelos log-normal, Weibull y Gamma sobre la CDF empírica.

El objetivo es ilustrar que, debido al rango extremadamente estrecho de los valores de PL_{med}, las diferencias entre modelos son mínimas y el análisis estadístico tiene un valor principalmente ilustrativo.

A.1. CDF del PL para la trayectoria en suspensión bajo la LoS

La Fig. A.1 muestra la CDF empírica para la trayectoria en suspensión bajo la LoS, junto con los modelos log-normal, Weibull y Gamma ajustados mediante máxima verosimilitud. Se observa que todos los modelos siguen el comportamiento general de la CDF, con discrepancias muy pequeñas asociadas al escaso número de muestras y al rango dinámico estrecho del PL.

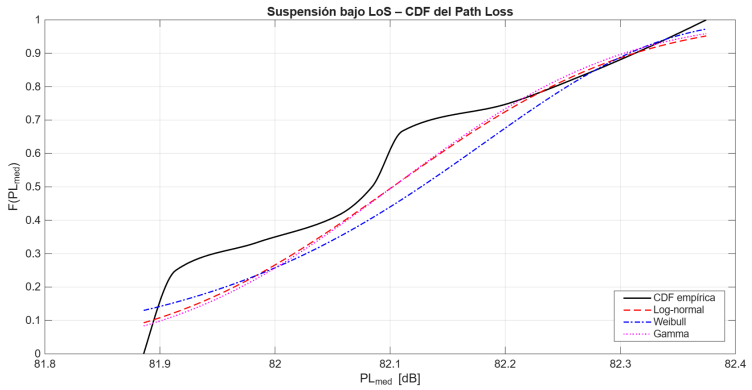


Figura A.1. CDF empírica y modelos ajustados para la trayectoria en suspensión bajo la LoS.

En este caso, los tres modelos presentan errores muy similares, sin que exista un ajuste que destaque claramente sobre los demás. La dispersión reducida del PL hace que los percentiles difieran solo en décimas de decibel, por lo que la elección de un modelo específico no modifica la interpretación física del escenario.

A.2. CDF del PL para la trayectoria en suspensión sobre la LoS

La Fig. A.2 muestra la CDF empírica correspondiente a la trayectoria en suspensión sobre la LoS. De forma análoga al caso anterior, los tres modelos probabilísticos reproducen razonablemente la forma de la CDF, pero las diferencias entre ellos son muy pequeñas y no permiten identificar un modelo claramente superior.

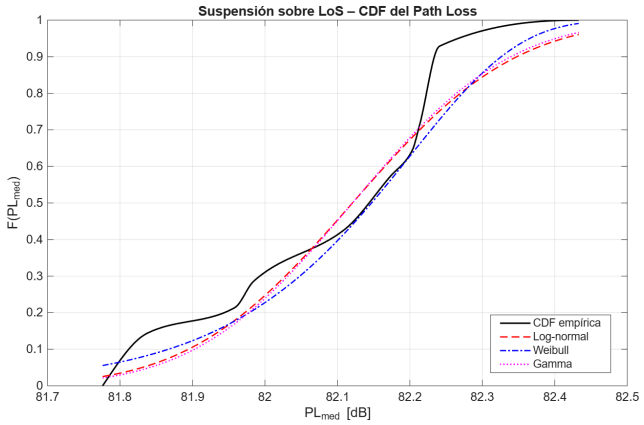


Figura A.2. CDF empírica y modelos ajustados para la trayectoria en suspensión sobre la LoS.

La similitud entre los casos sobre y bajo la LoS confirma que, una vez que el

dron deja de bloquear directamente la línea de vista, el comportamiento estadístico del PL se vuelve casi determinista, sin presencia de *fading* significativo. En ambos escenarios:

- la CDF evidencia una variabilidad extremadamente reducida del PL cuando el dron se desplaza pocos centímetros por encima o por debajo de la LoS;
- los modelos log-normal, Weibull y Gamma producen ajustes prácticamente equivalentes debido al rango dinámico tan acotado;
- el PL queda dominado por una obstrucción muy localizada, fuertemente dependiente de la coincidencia exacta del dron con el haz principal.

En consecuencia, las CDF de estas trayectorias se incluyen como complemento al análisis estadístico, pero su impacto en las conclusiones del capítulo de resultados es limitado frente a las trayectorias que intersectan directamente la LoS.

Apéndice A

CDF DEL PL PARA TRAYECTORIAS HORIZONTALES BAJO Y SOBRE LA LOS

En este anexo se presentan las funciones de distribución acumulada (CDF) correspondientes a las trayectorias horizontales realizadas por debajo y por encima de la línea de vista (LoS). Si bien estas trayectorias fueron analizadas en el Capítulo 4, sus CDF no se incorporaron en el cuerpo principal debido a que la variabilidad del PL en estos casos es extremadamente reducida, lo que limita el valor interpretativo del ajuste estadístico y hace que los modelos probabilísticos resulten prácticamente indistinguibles entre sí.

La presentación de estas CDF permite visualizar la coherencia entre los distintos ajustes y refuerza la conclusión de que, cuando el dron no bloquea directamente la LoS, la pérdida de trayectoria permanece prácticamente constante. De esta manera, este anexo complementa el análisis desarrollado en el capítulo principal y proporciona una referencia detallada del comportamiento estadístico en las trayectorias donde la obstrucción del dron es mínima.

A.1. Trayectoria horizontal bajo la LoS

La Fig. A.1 presenta la CDF empírica y los modelos log-normal, Weibull y Gamma ajustados mediante máxima verosimilitud. Dado que la dispersión del PL es inferior a 0.2 dB, los tres modelos se superponen de forma casi indistinguible.

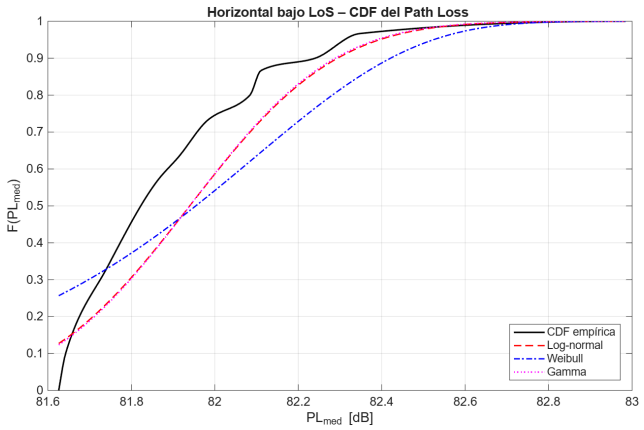


Figura A.1. CDF empírica y modelos ajustados para la trayectoria horizontal bajo la LoS.

La similitud entre modelos refleja que, al no interceptar el haz principal, el dron introduce un cambio mínimo en la potencia recibida y el PL presenta un comportamiento casi determinista.

A.2. Trayectoria horizontal sobre la LoS

La Fig. A.2 muestra la CDF correspondiente a la trayectoria horizontal sobre la LoS. Al igual que en el caso bajo la LoS, el rango dinámico del PL es muy estrecho, por lo que los modelos probabilísticos ajustados resultan prácticamente coincidentes.

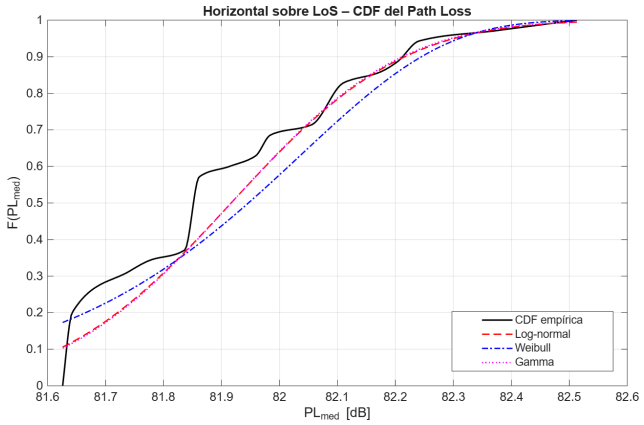


Figura A.2. CDF empírica y modelos ajustados para la trayectoria horizontal sobre la LoS.

En ambos escenarios (sobre y bajo LoS), las CDF evidencian:

- una variabilidad muy reducida del PL, inferior a 0.2 dB,

- ajustes estadísticos prácticamente equivalentes entre modelos,
- un comportamiento dominado por una obstrucción marginal del haz, sin presencia de *fading* significativo.

En consecuencia, estas CDF se incluyen únicamente para completar el registro del proceso de modelado, pero no aportan información adicional relevante para la interpretación del canal en comparación con las trayectorias que sí intersectan la LoS.