

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**“DINÁMICA DE DESVANECIMIENTO POR LLUVIA EN
ENLACES TERRENALES”**



**INFORME TÉCNICO POR EXPERIENCIA PROFESIONAL
CALIFICADA PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

PRESENTADO POR: EDUARDO MARTÍN SOTO ISLA

LIMA-PERÚ - AÑO: 2013

Este título profesional está dedicado a mi madre Dora que siempre estuvo a mi lado, a toda mi familia, a las personas que nunca dejaron de alentarme de forma especial a mi tío Arturo, a mi tía Lucy por su confianza y cariño de siempre; a la memoria de mi padre y abuelos; y como no, a mi esposa Ceci e hija Camila.

A todos gracias.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Organización del trabajo.....	5
1.3 Objetivos.....	7
CAPÍTULO 2 : MODELADO DE PROPAGACIÓN EN ENLACES SATELITALES .	8
2.1 Introducción.....	8
2.2 Atenuación debido a gases atmosféricos	10
2.2.1 Modelos de predicción de atenuación por gases atmosféricos	11
2.3 Atenuación por nubes	13
2.3.1 Modelos de predicción de atenuación por nubes.....	13
2.4 Tempestades de arena y polvo.....	17
2.5 Atenuación por hidrometeoros	17
2.5.1 Tipos de lluvia	18
2.5.2 Altura de lluvia	20
2.5.3 Atenuación específica por lluvia	21
2.5.4 Métodos de predicción de atenuación por lluvia	23
2.6 Despolarización por hidrometeoros	39
2.7 Centelleo troposférico	40
2.8 Atenuación total debida a múltiples fuentes de atenuación atmosférica que actúan simultáneamente.....	41
CAPÍTULO 3: DINÁMICA DE DESVANECIMIENTOS EN ENLACES SATELITALES	44
3.1 Aspectos de la dinámica de desvanecimientos	44
3.1.1 Duración de los desvanecimientos	45
3.1.2 Periodo entre desvanecimientos.	46
3.1.3 Pendiente de los desvanecimientos	46
3.2 Modelos de predicción de las duraciones de los desvanecimientos	47
3.2.1 Modelo del proyecto COST 205.....	48
3.2.2 Modelo de vilar, Burgueño, Puigcerver y Austin.....	50
3.2.3 Modelo de Moupfouma, Martin, Spanjaard y Hughes	51

3.2.4 Modelo de Goldhirsh	52
3.2.5 Modelo de Lekkla, McCormick y Rogers	53
3.2.6 Modelo de Timothy, Mondal y Sarkar	55
3.2.7 Modelo de Gibbins, Paulson, Kormanyos y Pedersen.....	55
3.2.8 Modelo de Bráten, Amaya y Rogers	57
3.2.9 Modelo de Cheffena-Amaya	60
3.2.10 Modelo estocástico dinámico de la atenuación por lluvia de Masseng y Bakken	61
3.3 Modelos de predicción de la pendiente de desvanecimientos	64
3.3.1 Modelo de Nelson y Stutzman	64
3.3.2 Modelo de Timothy, Ong y Choo.....	67
3.3.3 Modelo de Kastamonitis, Gremont y Filip	70
3.3.4 Modelo de Sweeney y Bostian	71
3.3.5 Modelo de Max Van de Kamp	74
3.3.6 Método completo de predicción de la dinámica de los desvanecimientos Recomendación UIT-R P.1623-1	74
CAPÍTULO 4 : PROPAGACIÓN EN ENLACES TERRENALES	82
4.1 Introducción.....	82
4.2 Atenuación por gases	82
4.3 Modelos de atenuación por lluvia.....	83
4.3.1 Modelo de Crane	83
4.3.2 Modelo de Pérez García y Silva Mello.....	85
4.3.3 Modelo Crane de dos Componentes	86
4.3.4 Modelo de García para enlaces terrenales	90
4.3.5 Modelo de Moupfouma	91
4.3.6 Modelo de la UIT-R P.530-14.....	97
4.4 Dinámica de desvanecimiento	99
4.4.1 Estadística de la duración de los desvanecimientos (Cheffena).....	99
CAPÍTULO 5 : RESULTADOS DE LA DINÁMICA DE DESVANECIMIENTOS	102
5.1 Procesado previo	102
5.1.1 Descripción y ubicación del enlace	102
5.1.2 Tratamiento de la información recopilada.....	104
5.2 Duración de los desvanecimientos	104
5.2.1 Número de desvanecimientos (datos filtrados)	105

5.2.2 Probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos (datos filtrados)	107
5.2.3 Tiempo total de desvanecimientos (datos filtrados).....	108
5.2.4 Fracción de tiempo total de desvanecimientos (datos filtrados).....	110
5.2.5 Número de desvanecimientos (datos sin filtrar).....	111
5.2.6 Probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos (datos sin filtrar).....	112
5.2.7 Tiempo total de desvanecimientos (datos sin filtrar)	113
5.2.8 Fracción de tiempo total de desvanecimientos (datos sin filtrar).....	114
5.3 Comparación entre datos filtrados y datos sin filtrar.....	116
5.3.1 Número de desvanecimientos.....	116
5.3.2 Probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos.....	117
5.3.3 Tiempo total de desvanecimientos	118
5.3.4 Fracción de tiempo total de desvanecimientos	119
5.4 Comparación de las funciones establecidas por la UIT con otros modelos	120
5.4.1 Probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos.....	120
5.4.2 Número de desvanecimientos.....	124
5.4.3 Fracción de tiempo total de desvanecimientos.....	128
5.4.4 Tiempo total de desvanecimientos	129
CAPÍTULO 6: RESULTADOS DE LA PENDIENTE DE LOS DESVANECIMIENTOS.....	130
6.1 Introducción.....	130
6.2 Estadísticas de las pendientes	131
6.2.1 Estadísticas de pendientes a 3 dB.....	131
6.2.2 Estadísticas de pendientes a 5 dB.....	133
6.2.3 Estadísticas de pendientes a 10 dB.....	135
6.2.4 Estadísticas de pendientes a 15 dB.....	138
6.2.5 Pendientes positivas y negativas	140
6.2.6 Función de distribución acumulada de las pendientes.....	142
6.3 Función de distribución acumulada complementaria de las pendientes de desvanecimiento	144
6.3.1 Función de distribución acumulada complementaria con $\Delta t=2$ s.....	144
6.3.2 Función de distribución acumulada complementaria con $\Delta t=10, 30, 60$ y 120 s.....	145
6.4 Desviación estándar (σ).....	146
6.4.1 Comparación entre los valores experimentales y teóricos de la UIT	146

6.4.2 Comparación entre los valores experimentales y teóricos de la UIT con $s=0,005$	147
6.4.3 Ajuste del parámetro “s” para cada valor de Δt	148
6.5 Función de distribución de probabilidades de las pendientes (PDF).....	149
6.5.1 Comparación de la PDF experimental y el modelo UIT	149
6.5.2 Comparación de la PDF experimental y el modelo UIT ajustado	150
6.5.3 Comparación de la PDF experimental y el modelo UIT, con $\Delta t=120$ s.....	151
CAPÍTULO 7 : CONCLUSIONES	152
BIBLIOGRAFÍA	154

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En el presente trabajo, se pretendió comprender y comparar los fenómenos atmosféricos que intervienen en la propagación de las ondas milimétricas y de tener en cuenta la relevancia que dichos fenómenos tienen en los enlaces satelitales o terrenales.

Las bandas llamadas milimétricas, permiten transmitir mucha información puesto que, son bandas poco explotadas y podemos encontrar anchos de banda disponibles con mayor facilidad a medida que pasa el tiempo, por la constante demanda de transmitir información; esto se ve afectado por la propia atenuación debido a la frecuencia en donde tiene importancia el centelleo y la lluvia.

Para mantener un enlace de manera eficiente, los sistemas modernos cuentan con un sistema de control automático que permite variar la potencia para mantener niveles de comunicación aceptables, estos sistemas son llamados FMT (Técnicas de mitigación de pérdidas), esta técnica es producto del análisis de la atenuación de segundo orden, que estudian y modelan la duración, la ocurrencia y la rapidez de dicha atenuación.

Con el presente trabajo, se trató de aportar al estudio y análisis de la dinámica de segundo orden para enlaces terrenales y así poder entender el comportamiento de la atenuación con estos valores de ángulo de elevación que rondan los 0° . Dado que no existen muchas publicaciones sobre la dinámica de desvanecimientos en enlaces horizontales, los resultados se compararon con los modelos de duraciones y pendientes propuestos para enlaces satelitales.

1.2 Organización del trabajo

A continuación se presenta una breve explicación sobre la estructura del presente trabajo:

Capítulo 1: Se da una introducción sobre el trabajo, y se explica la importancia del estudio de la propagación de las ondas milimétricas para su aplicación en los enlaces satelitales y terrenales.

Capítulo 2: Se explican los fenómenos y modelos de atenuación en enlaces satelitales, hidrometeoros, gases, nubes y centelleo, poniendo mayor énfasis en los efectos de lluvia, que para el caso de atenuación de primer orden se comenta de forma resumida.

Capítulo 3: Se explica la dinámica de desvanecimientos para enlaces satelitales, la duración, la ocurrencia y la pendiente de los mismos; en este capítulo se podrán encontrar principalmente dos secciones, la del modelo de duración y la del modelo de pendiente de los desvanecimientos, en cada una de estas se detallan y se muestran las expresiones matemáticas que caracterizan dichos modelos.

Capítulo 4: En este capítulo se explican los modelos de atenuación para enlaces terrenales como es el caso de los gases, atenuación por lluvia de primer orden y algunas pruebas realizadas donde se observa el comportamiento de la dinámica de desvanecimiento a través de algunos artículos publicados.

Capítulo 5: Se describe el enlace, se procesan los resultados realizando comparaciones entre las funciones UIT de los datos filtrados y no filtrados; además teniendo como referencia las funciones UIT se realizan comparaciones con los distintos modelos de predicción.

Capítulo 6: Se procesa y se analiza estadísticamente las pendientes, según su atenuación A y su intervalo de tiempo Δt , se estudia la CDF de las pendientes, en dos casos, por signos y por valor absoluto; también se realiza la CDF complementaria de las pendientes, se estudia la desviación estándar de las pendientes y por último se verá la función de distribución de probabilidad de las pendientes de desvanecimiento.

Capítulo 7: Se comenta las conclusiones del presente trabajo y por último se reseña la bibliografía utilizada, para la elaboración del mismo.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar la dinámica de desvanecimiento debido a la lluvia en un enlace horizontal, estudiando la duración de los desvanecimientos y sus pendientes.

Comparar los resultados experimentales de atenuación con los modelos de predicción existentes para enlaces satelitales y anotando cuales son los que mejor se adaptan para este tipo de experimentos.

Ajustar algunos parámetros para la presentación de las gráficas de pendientes de los desvanecimientos para el caso de enlaces horizontales realizados en otras zonas geográficas.

CAPÍTULO 2 : MODELADO DE PROPAGACIÓN EN ENLACES SATELITALES

2.1 Introducción

En este capítulo se explican los distintos fenómenos atmosféricos que afectan a un enlace satelital o terrenal, y los modelos que existen para su estudio, describiendo y reseñando cada uno de estos; se prestó principal atención a los modelos de predicción de lluvia de primer orden y, de forma más detallada a los modelos de duración y pendientes de desvanecimientos, describiendo y comparando las funciones matemáticas propuestas por sus autores. En cuanto a los otros modelos que también se mencionan, se podrá encontrar mayor información en la referencia bibliográfica que se adjunta al final del presente trabajo [1][2][3][51].

Con la finalidad de optimizar los recursos, pudiendo lograr un enlace con el mayor tiempo posible y con la menor cantidad de energía, es indispensable el estudio de la propagación atmosférica, caracterizando la atenuación de primer y segundo orden.

Por esta razón en la última década se le da mucha importancia a la propagación de las llamadas bandas milimétricas (20 a 100 GHz).

A continuación veremos los principales efectos de propagación:

Atenuación por gases. La atenuación por gases en bandas milimétricas, se debe principalmente a la absorción de las moléculas de oxígeno y vapor de agua. Puede ser muy elevada para frecuencias cercanas a los picos de resonancia de estas moléculas (La resonancia del vapor de agua se localiza en 22 GHz), donde los valores de atenuación por gases son pequeños. En general, la contribución del oxígeno es aproximadamente constante, mientras que la atenuación por vapor de agua es muy variable ya que depende de la humedad.

Atenuación por nubes. Las nubes se componen de minúsculas gotas de agua en suspensión. En frecuencias milimétricas, la atenuación que provocan depende básicamente del contenido de agua líquida y de su temperatura. Puede ser un factor importante para los sistemas de baja disponibilidad, debido a la elevada probabilidad de que una nube cruce el trayecto de propagación.

Atenuación por arena y polvo

Atenuación por hidrometeoros: La atenuación por lluvia está causada por la absorción y dispersión de las gotas de agua. Es el principal fenómeno que afecta a la propagación en los porcentajes bajos de tiempo, provocando fuertes y rápidos desvanecimientos de la potencia de la señal recibida. Se presentarán los modelos existentes de predicción de la atenuación a partir de datos experimentales de intensidad de lluvia.

Despolarización por hidrometeoros. La despolarización se produce cuando la onda de radio se propaga a través de medios anisótropos respecto a la polarización incidente. En frecuencias milimétricas se debe principalmente a las gotas de lluvia. El estudio de este efecto es importante a la hora de poder transmitir simultáneamente con varias polarizaciones.

Centelleo troposférico. El centelleo troposférico está causado por turbulencias y, consiste en rápidas fluctuaciones de amplitud y fase de la señal recibida. La atenuación que provoca puede ser importante en sistemas con pequeño margen y bajos ángulos de elevación. Además, las rápidas variaciones en el nivel de potencia pueden repercutir negativamente sobre la correcta recepción de la señal. Este efecto suele apreciarse en las estaciones más calurosas del año.

Combinación de efectos. Todos los fenómenos anteriores no se presentan de manera aislada. Para combinarlos no se puede hacer una suma de distribuciones acumuladas ya que, obtendríamos resultados falseados, siendo necesario tener en cuenta las relaciones mutuas que se establecen entre los distintos fenómenos.

Diversidad espacial. Para asegurar la disponibilidad de recepción de la señal, se puede utilizar estos sistemas que se basan en la utilización de varios receptores. El tráfico se encaminará hacia uno u otro receptor en función de las condiciones meteorológicas.

Dinámica de desvanecimientos. En el diseño de los sistemas de comunicaciones debe tenerse en cuenta además la caracterización dinámica de los eventos de atenuación. Para ello, suelen utilizarse tres parámetros: las duraciones de los desvanecimientos, las duraciones de los intervalos entre desvanecimientos y las pendientes de los desvanecimientos. Estos dos últimos serán tratados de forma exhaustiva en un capítulo independiente.

2.2 Atenuación debido a gases atmosféricos

La absorción atmosférica en frecuencias de microondas y ondas milimétricas se debe a las resonancias moleculares de las moléculas de oxígeno y vapor de agua. En concreto, el oxígeno tiene una línea de absorción aislada a 118,7 GHz y varias líneas de absorción entre 50 y 70 GHz. El vapor de agua tiene tres líneas de absorción por debajo de 350 GHz, a las frecuencias de 22,3, 183,3 y 323,8 GHz. Fuera de estas líneas la atenuación puede llegar a ser apreciable por encima de 10 GHz. En la parte baja de la atmósfera la serie de líneas del oxígeno se expande debido a la presión y forma un único espectro de absorción centrado en 60 GHz. La absorción es despreciable para otros compuestos de la atmósfera en comparación con el oxígeno y el vapor de agua.

La atenuación provocada por el oxígeno es aproximadamente constante con el tiempo y la localización debido a la uniformidad de la concentración de este gas en la atmósfera. La absorción se produce principalmente en determinadas líneas espectrales. Existe un

grupo de líneas de absorción centrado en 60 GHz y una línea aislada en 118,74 GHz. El momento magnético de la molécula de oxígeno produce también una línea a frecuencia cero en el espectro de absorción; este efecto se denomina espectro no resonante o de Debye. La atenuación debido a los gases en nuestra frecuencia de interés 38 a 40 GHz es despreciable para nuestro trabajo, esto debido a la atenuación específica que estos producen y también debido a la distancia del enlace terrenal (aproximadamente 1 km).

La atenuación provocada por el vapor de agua es más variable debido a que los cambios en su concentración son mayores. La absorción se produce también en determinadas líneas espectrales. Existe una línea débil en 22,2 GHz y líneas mucho más intensas en 183,3 y 325 GHz, así como otras en la región del infrarrojo. El ensanchado por efecto de la presión y de las líneas de frecuencias más altas provoca efectos significativos en longitudes de ondas milimétricas ya que, la absorción de estas líneas se extiende hasta las frecuencias más bajas.

Suele considerarse que, la contribución del oxígeno a la absorción atmosférica es relativamente constante, aunque sufre pequeñas variaciones con la temperatura. En cambio, la atenuación por vapor de agua sufre mayores oscilaciones debido a que los perfiles verticales de humedad son muy variables. En la mayoría de los climas debe considerarse la elevada correlación entre la atenuación producida por el vapor de agua y la producida por la lluvia al estimar las estadísticas de atenuación total.

2.2.1 Modelos de predicción de atenuación por gases atmosféricos

La atenuación introducida por los gases atmosféricos se puede describir usando una aproximación física, como la del modelo de Liebe, o una aproximación mediante modelos probabilísticos como el propuesto por el ITU-R o el modelo de Salonen.

El modelo de Liebe desarrolla de forma precisa cálculos de la retroactividad del aire para frecuencias comprendidas entre 1 y 1000 GHz, pero requiere mucho gasto computacional y requiere datos verticales de parámetros meteorológicos, cuya precisión debe de ser cuidadosamente comprobada. Además, el modelo de Liebe se usa principalmente tanto como referencia para la comparación con otros modelos o para

obtener parámetros de propagación, como coeficientes de absorción o altitudes de atenuación equivalente.

Los modelos del UIT-R y Salonen predicen la atenuación gaseosa para banda Ku y superiores, usando como parámetros climáticos de entrada los que están disponibles en los mapas radio-climatológicos del UIT-R. La Recomendación 676 de la UIT-R también incluye el modelo línea a línea, basado en el modelo de Liebe.

Parámetro	Modelo	Parámetros de entrada
Absorción gaseosa O ₂ -H ₂ O	Liebe [4]	Frecuencia, temperatura, presión y humedad
	Salonen [5]	Frecuencia, elevación, mapas climatológicos de la ITU-R, presión atmosférica media, contenido total de agua.
	ITU-R P.676-8 [6]	

Tabla 2.1 Modelos de predicción de atenuación por gases

2.3 Atenuación por nubes

Las nubes y la niebla consisten en pequeñas partículas de agua líquida con diámetros entre 1 y 100 μm . Las nubes pueden dar lugar a valores apreciables de atenuación en frecuencias milimétricas. Esta atenuación puede ser incluso, la degradación predominante en sistemas de baja disponibilidad. Por otra parte, la atenuación de las nubes de hielo no es significativa aunque sí puede ser causa de despolarización.

La atenuación debido a las gotas de agua contenidas en las nubes se puede determinar con gran precisión, usando el modelo Rayleigh de scattering electromagnético. Esta aproximación requiere la evaluación de los datos verticales de nubes, los cuales se pueden obtener a partir de medidas de radiosonda.

Para la predicción de la atenuación de las nubes necesitamos numerosos parámetros, tales como la distribución del tamaño de las partículas constituyentes de las nubes, la temperatura de las partículas, la cantidad total de agua, la forma de las partículas o la extensión vertical y horizontal de la nube.

En general, se prefiere realizar el cálculo de atenuación a partir del contenido de agua líquida en una columna vertical. Este es el procedimiento de la Recomendación 840-5 [7] de la UIT, en la que se proporciona un mapa global de contenido de agua líquida y la atenuación específica se calcula mediante un modelo matemático basado en la dispersión de Rayleigh.

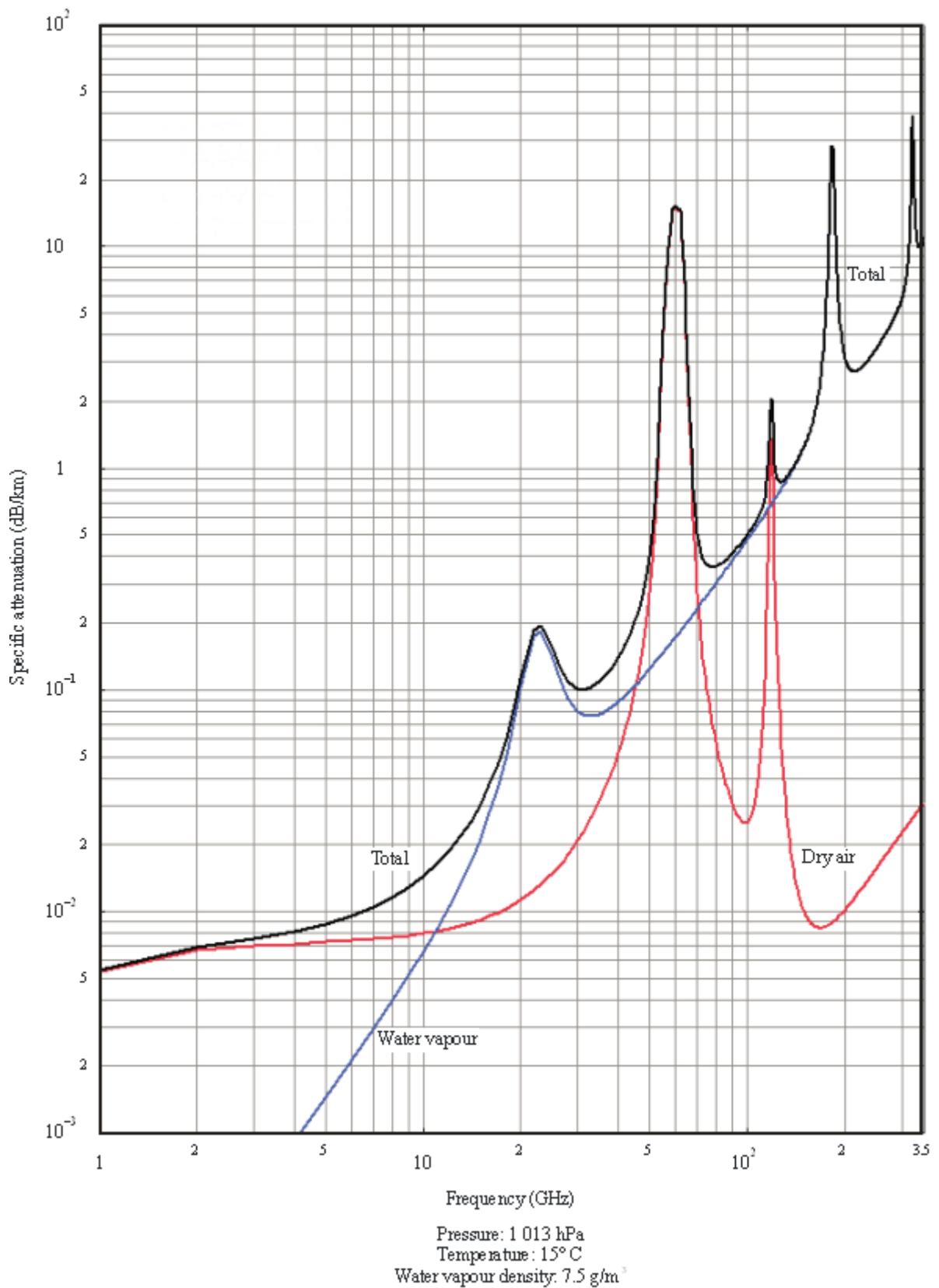
La niebla está compuesta por aire saturado, del cual parte del agua se ha precipitado en pequeñas gotas. Las gotas son usualmente más pequeñas de 0,1 mm de diámetro. Esta atenuación sólo es significativa en frecuencias superiores a 100 GHz. Su atenuación específica se calcula en función de la densidad de agua líquida, que toma valores entre 0,05 g/m^3 y 0,5 g/m^3 .

2.3.1 Modelos de predicción de atenuación por nubes

En la tabla 2.2 que se muestra a continuación veremos algunos métodos de atenuación por nubes [8], y posteriormente en la figura 2.1 se muestra la atenuación específica del vapor de agua.

Parámetro	Modelo	Parámetros de Entrada
Atenuación por nubes	Salonen y Uppala [9]	Perfiles verticales de parámetros meteorológicos, frecuencia, ángulo de elevación
	Rayleigh [10]	Frecuencia, temperatura, humedad, tipo de nubes
	UIT-R P.840-4 [7]	Frecuencia, elevación. Cantidad total de agua reducida a 0°C
	Dissanayake, Allnut y Haidara [11]	Información de los tipos de nubes

Tabla 2.2 Modelos de predicción de atenuación por nubes



ITU-R P.06-11-1

Figura 2.1 Gráfica de atenuación específica del vapor de agua y aire seco

2.4 Tempestades de arena y polvo

La arena y el polvo atenúan las ondas electromagnéticas mediante los mismos mecanismos que las precipitaciones de hidrometeoros. Las tempestades se componen de nubes densas de partículas de arena y polvo en suspensión, en la que, en condiciones límite la visibilidad puede reducirse a 10 metros, o incluso menos, y el polvo puede llegar a alturas de unos 1000 metros por encima de la superficie y extenderse centenares de kilómetros a lo largo del terreno [1].

Las características de atenuación pueden evaluarse en longitudes de onda centimétricas a merced de la teoría de dispersión de Rayleigh y la teoría de Mie, en longitudes de onda más cortas. Las nubes las componen principalmente partículas de arena y arcilla con dimensiones típicas de 0,05 cm y 0,08 cm respectivamente. La concentración de partículas se puede relacionar de forma empírica con la visibilidad óptica, y ésta parece ser inversamente proporcional a la atenuación. También, los valores dependen fuertemente de la humedad. Para la distribución de tamaño de partículas habitual en estos casos, la atenuación a 14 GHz es de 0,03 dB/km para partículas secas, y 0,65 dB/km para partículas húmedas, teniendo una visibilidad de 100 metros.

En todo caso, la atenuación es importante sólo para altas concentraciones de partículas, elevada humedad o ambos factores a la vez y, esto sólo se da en zonas tropicales desérticas o semidesérticas.

2.5 Atenuación por hidrometeoros

Dentro de los factores descritos que producen atenuación como los gases, vapor de agua, nubes y lluvia, esta última es precisamente la que guarda principal interés, por sus diferentes características en cuanto a su presentación entre tamaño y cantidad. La atenuación debido a la propagación está causada normalmente por varios componentes atmosféricos: gases, vapor de agua, nubes y lluvia. La atenuación por lluvia, causada por scattering y absorción por parte de las gotas de lluvia, es una de las limitaciones fundamentales en el desarrollo de enlaces de comunicación por satélite en la banda Ka, causando grandes variaciones en la potencia de la señal recibida, con escasa probabilidad de predecirla y con muchos cambios repentinos. Este tipo de desvanecimiento de señal también prevalece en los enlaces tierra- espacio en las bandas Ku y C, sin embargo, la profundidad de los desvanecimientos en estas bandas de

frecuencia es lo suficientemente pequeña como para ser compensada, incluyendo un pequeño margen en el enlace para mantener el rendimiento requerido de manera de mantener un enlace permanente.

En las bandas Ka y V la atenuación causada por lluvia es muy importante como para tenerla en cuenta, con un margen fijo en el balance del enlace. Con el objetivo de proporcionar el mismo rendimiento que en las bandas de frecuencia inferiores, sería necesario incluir un margen muy grande. Considerando que este margen de potencia es necesario solo ocasionalmente, esto es claramente poco económico. Además, el margen de potencia necesario resultaría prohibitivo para los requisitos de potencia del satélite, e interferiría a otros sistemas de comunicación operando en la misma banda de frecuencia en los momentos de cielo despejado.

Para evitar estos problemas, se han desarrollado métodos alternativos para reducir el corte en comunicaciones debido a desvanecimientos causados por lluvia. Estos métodos compensan la atenuación por lluvia adaptativamente, como puede ser el Control de Potencia Adaptativo (Adaptative Power Control 'APC') en el cual, la potencia transmitida se incrementa para compensar los desvanecimientos causados por lluvia en el trayecto de propagación. El Control de Potencia es una de las técnicas conocidas como Fade Mitigation Techniques (FMT), las cuales contrarrestan los efectos perjudiciales. Las técnicas FMT necesitan abundante información sobre la dinámica de los desvanecimientos, pendiente de desvanecimiento para conocer con qué rapidez se atenúa la señal, duración de desvanecimiento e intervalos entre desvanecimientos, además de la estadística de la zona de estudio por medio de pluviómetros que nos permiten saber con exactitud la cantidad de precipitación que se produce en un lugar determinado.

2.5.1 Tipos de lluvia

Los tipos de lluvia se clasifican en [12]:

Precipitación estratiforme. La precipitación está horizontalmente estratificada con lluvia hasta la altitud de la banda brillante (región de alta reflectividad estrecha de unos 300 metros situada alrededor de la isoterma 0 °C, formada por partículas de nieve y

nieve en fusión), nieve hasta unos 7 Km y cristales de hielo hasta altitudes cercanas a los 9 Km. Corresponde a lluvias de baja intensidad y de gran duración (más de 1 hora).

Precipitación conectiva. Caracterizada por fuertes corrientes ascendentes y descendentes que se extienden a través de una región profunda de la tropósfera. Corresponde a lluvias que pueden ser muy intensas con extensiones horizontales de varios kilómetros y corta duración (decenas de minutos). Ver figura 2.2.



Figura 2.2 Formación de lluvia conectiva

Lluvias monzónicas. Secuencia de bandas de precipitación convectiva intensa seguidas de precipitación estratiforme. Las bandas suelen tener una extensión de 50 km y centenares de kilómetros de largo. Producen lluvias intensas que duran varias horas.

Tormentas tropicales. Estos dos últimos tipos se caracterizan por precipitaciones muy intensas y extensas aunque no son típicas en la zona donde se desarrolló el presente experimento.

2.5.2 Altura de lluvia

La altura de la lluvia supone un límite para la extensión vertical de la atenuación. Actualmente depende de los modelos la consideración de esta altura. En general la altura de lluvia no coincide con la isoterma a 0° C, aunque está relacionada. Por otro lado, existen otros modelos que consideran la altura isoterma 0 °C como la máxima altura de la lluvia para precipitaciones estratiformes. Por encima se supone precipitaciones en forma de hielo y nieve que no afectan significativamente a la propagación para frecuencias menores de 60 GHz. La Recomendación UIT-R-P.839-3 [13] propone unos mapas mundiales estacionales para la isoterma 0 °C y una expresión empírica en función de la latitud:

$$h_0 = \begin{cases} 5 - 0,075 (\varphi - 23) & \text{para } \varphi > 23 \quad \text{Hemisferio Norte} \\ 5 & \text{para } 0 \leq \varphi \leq 23 \quad \text{Hemisferio Norte} \\ 5 + 0,1 (\varphi + 21) & \text{para } 0 \geq \varphi \geq -21 \quad \text{Hemisferio Sur} \\ 0 & \text{para } -71 \leq \varphi < -21 \quad \text{Hemisferio Sur} \\ & \text{para } \varphi < -71 \quad \text{Hemisferio Sur} \end{cases} \quad (2.1)$$

donde h_0 viene expresada en kilómetros sobre el nivel medio del mar y φ es la latitud (grados); y recomienda además que para América del Norte y Europa, al oeste de la longitud 60° E se utilice el siguiente modelo para la altura media de la isoterma de 0° C en condiciones de lluvia, como una estimación del valor medio de la altura de la lluvia:

$$h_R = 3,2 - 0,075 (\varphi - 35) \quad \text{para } 35 \leq \varphi \leq 70 \quad (2.2)$$

donde h_R viene expresada en kilómetros sobre el suelo.

En precipitaciones convectivas se producen movimientos de aire verticales que dan lugar a la mezcla a gran escala de distintos tipos de partículas. Puede suceder, además,

que la altura de lluvia tenga un valor superior debido a la presencia de agua líquida enfriada (puede existir en la atmósfera a temperaturas de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) en capas más altas de la atmósfera. Por tanto, la correspondencia entre altura de la lluvia y la isoterma 0°C es incierta para células convectivas.

2.5.3 Atenuación específica por lluvia

Efecto del tamaño de las gotas

La forma de las gotas de lluvia queda determinada principalmente por las fuerzas aerodinámicas que actúan a medida que caen hacia la tierra. Cuanto mayor sean las gotas de lluvia, serán distorsionadas de la forma esférica con mayor facilidad. La forma exacta no alterará el volumen de agua presente, pero para una polarización lineal, la atenuación será dependiente de la orientación relativa del vector eléctrico y el eje principal de la gota distorsionada.

Efecto de la distribución de las gotas

Las gotas causan mayor atenuación si la longitud de onda se aproxima al tamaño de la gota. Por debajo de 10 GHz, el efecto de las gotas de lluvia pequeñas es poco significativo; sobre 10 GHz este efecto va a comenzar a ejercer su influencia. Aunque los tamaños, formas y orientaciones de las gotas de lluvia pueden variar dentro de una lluvia, puede suponerse que la distribución del tamaño de las gotas es relativamente estable, variando fundamentalmente con la intensidad de la precipitación.

La primera determinación experimental fiable del tamaño de las gotas de lluvia fue la de Laws y Parson. Esta se basaba en mediciones para intensidades de lluvia de hasta 50 mm/h, aunque su modelo puede extrapolarse para intensidades superiores.

En las últimas décadas la instrumentación ha mejorado sustancialmente y es posible determinar con mayor exactitud el tamaño de las gotas. Se han propuesto modelos basados en distribuciones log-normal, gamma o Weibull. Sin embargo, las medidas de distribuciones de gotas con tamaños por encima de 0,5 mm parecen confirmar la precisión de la distribución de Laws y Parson.

Efecto de la temperatura

El índice de refracción complejo del agua varía con la temperatura, mientras que la parte real generalmente decrece con la frecuencia. La parte imaginaria es máxima para frecuencias entre 10 y 100 GHz.

Para un conjunto de gotas, el índice de refracción del volumen total de aire y agua se calcula para permitir estimar el efecto completo de la lluvia. Además este índice muestra una tendencia igual que la del agua, particularmente con tasas de lluvia altas. El pico de la parte imaginaria del índice de refracción del agua cambia hacia arriba en frecuencia si la temperatura se incrementa. Esto se refleja en la retroactividad del conjunto de gotas.

Las variaciones de la temperatura de las gotas con respecto al valor supuesto sólo tienen importancia en frecuencias inferiores a 20 GHz, pudiendo ser causa de divergencias de hasta un 20% en la atenuación específica.

2.5.3.1 Cálculo de la atenuación específica por lluvia

En la Recomendación 838-3 [14] se recoge una relación aproximada entre la atenuación específica y la intensidad de lluvia R , mediante la siguiente ley exponencial:

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad \text{dB/km} \quad (2.3)$$

Para ello es necesario calcular los valores de los coeficientes k y α que se determinan a partir de la frecuencia en GHz y de la polarización. Para el cálculo se deben utilizar unas ecuaciones que fueron obtenidas mediante el ajuste de curvas a los coeficientes de la ley potencia derivados de los cálculos de dispersión. Los coeficientes se determinan en función de los parámetros mostrados anteriormente, como pueden ser temperatura, distribución de las gotas de lluvia, etc. La Recomendación ofrece unas gráficas para facilitar la consulta de los coeficientes así como un cuadro con frecuencias entre 1 y 1000 GHz con los valores numéricos asociados. De esta manera, no sería necesario

utilizar las ecuaciones del inicio de la recomendación que resultan especialmente tediosas cuando se hacen cálculos a mano. Para el correcto uso de estos valores y para todas las frecuencias, se debe realizar una interpolación con escala logarítmica para la frecuencia y para k , y una escala lineal para α .

2.5.4 Métodos de predicción de atenuación por lluvia

Debido a la enorme importancia de la predicción de la atenuación por lluvia en el diseño de sistemas de comunicaciones por satélite, se han elaborado numerosos modelos en las últimas décadas. De manera simplificada, los modelos pueden agruparse en dos categorías:

Modelos físicos. Intentan definir la física del fenómeno y modelar la estructura horizontal y vertical de la lluvia. Suelen basarse en medidas de radares meteorológicos sobre las que se han extraído parámetros como la altura de la lluvia, la extensión horizontal y vertical de las precipitaciones o la distribución de intensidades en una célula de lluvia.

Modelos semiempíricos. Obtenidos mediante el ajuste a medidas experimentales de atenuación en varios emplazamientos, frecuencias y ángulos de elevación. Cuentan con una base física subyacente. Requieren de la utilización de parámetros estadísticos como por ejemplo, la longitud de trayecto efectiva o los coeficientes de reducción horizontal y vertical.

Aunque, a priori, los modelos físicos son los más adecuados para la predicción de la atenuación, suele ser escasa la información acerca de muchos de los parámetros necesarios para obtener resultados fiables. Por ello, los modelos semiempíricos se han utilizado más hasta ahora y han obtenido mejores resultados.

A continuación se presenta una tabla resumen con todos los métodos de predicción que se van a exponer en este apartado:

Método de predicción de atenuación por lluvia.	Célula de lluvia. Coeficiente de reducción	Información de entrada
Assis-Einloft [15]	Célula de lluvia	- Información geográfica y geométrica (latitud,
Australiano [16]	El coeficiente de lluvia	
Brasil [17]	Célula de lluvia	longitud, elevación del enlace, etc) - Información eléctrica (frecuencia, polarización) - Información meteorológica - Mapa de lluvia de la UIT-R
Bryant [18]	Célula de lluvia	
Crane global [19]	Célula de lluvia	
Crane de dos componentes [20]	Célula de lluvia	
EXCELL [21]	Célula de lluvia	
García [22]	Coeficiente de reducción	
UIT-R 618.10 [23]	Coeficiente de Reducción	
Karasawa [24]	Coeficiente de Reducción	
Leitao-Watson [25]	A partir de información Radar	
Matricciani [26]	Algorítmico	
Misme-Waldteufel [27]	Célula de lluvia	
SAM [28]	Célula de lluvia	
Sviatogor [29]	Coeficiente de Reducción	

Tabla 2.3 Modelos de predicción de atenuación por lluvia

Los modelos descritos se basan en uno de estos dos conceptos para describir la no uniformidad espacial de la lluvia:

Celdas de lluvia: Más adecuado para el cálculo de la ganancia por diversidad de localizaciones con distintos perfiles de precipitación.

Coefficiente de reducción: Expresa una reducción de la atenuación respecto al hipotético caso que la atenuación sea producida por una lluvia uniforme. Un enfoque que proporciona más precisión es el que considera coeficientes de reducción vertical y horizontal de manera separada.

En la siguiente tabla se detalla los parámetros de entrada necesarios para cada uno de los modelos de atenuación por lluvia:

	λ	H_s	θ	f	τ	k, α	P_0	$R_p(p)$	$R_{0.1}$	$R_{0.01}$	h_R	$H_0(p)$	H_0	$H_{.15}$
Assis-Einloft	✓	✓	✓			✓		✓			✓			
Australian	✓	✓	✓	✓		✓		✓						
Brazil		✓	✓			✓		✓						
Bryant		✓	✓			✓		✓						
Crane Global		✓	✓	✓				✓				✓		
Crane two components	✓	✓	✓			✓		✓						
EXCELL	✓	✓	✓			✓		✓			✓			
Garcia	✓	✓	✓			✓		✓						
ITU-R 618-5		✓	✓			✓				✓	✓			
ITU-R 618-6	✓	✓	✓	✓		✓				✓				
Karasawa	✓	✓	✓			✓			✓	✓	✓			
Leitao-Watson		✓	✓	✓	✓			✓			✓			
Matricciani	✓	✓	✓	✓	✓			✓						
Misme Waldteufel		✓	✓			✓	✓	✓					✓	✓
SAM	✓	✓	✓			✓		✓						
Svjatogor		✓	✓			✓		✓						

Tabla 2.4 Parámetros de entrada necesarios para los modelos de atenuación por lluvia [30]

El significado y unidades de los mismos se detallan en la tabla 2.5:

Parámetro	Unidad	Significado
A	Grados	Latitud de la estación terrena.
H_s	Km	Altitud de la estación terrena.
F	Ghz	Frecuencia del enlace.
T	Grados	Ángulo de polarización del enlace.
Θ	Grados	Ángulo de elevación del enlace.
k, α	Adim.	Coefficientes dependientes de la frecuencia y la polarización, especificados por la UIT-R para calcular la atenuación específica causada por la lluvia.
P_o	%	Probabilidad de superar una intensidad de lluvia de 0 mm/h.
P	%	Porcentaje de tiempo genérico en un año.
$R_p(p)$	mm/h	Distribución de probabilidad de intensidad de lluvia puntual en el lugar de la estación terrena para el año promedio.
$R_{0.1}$	mm/h	Intensidad de lluvia superada el 0.1% del tiempo del año promedio en el lugar de la estación terrena.
$R_{0.01}$	Mm/h	Intensidad de lluvia superada el 0.01% del tiempo del año promedio en el lugar de la estación terrena.
H_r	Km	Valor promedio de la altura de lluvia efectiva.
$H_0(p)$	Km	Distribución promedio anual de la altura efectiva de lluvia.
H_0	Km	Altura promedio isoterma 0°C.
H_{-15}	Km	Altura promedio isoterma -15°C.

Tabla 2-5. Unidades y significado de los parámetros de entrada.

2.5.4.1 Modelo de la UIT. Recomendación UIT-R P.618-10

El método que sigue proporciona estimaciones a largo plazo de las estadísticas que facilitan la atenuación debido a la lluvia, sobre trayectos oblicuos en un determinado punto para frecuencias de hasta 55 GHz [23]. Se precisan conocer los parámetros siguientes:

$R_{0,01}$:intensidad de la lluvia en el punto de que se trate, para el 0,01% de un año medio (mm/h).

h_s :altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar (km).

θ : ángulo de elevación (grados).

φ : latitud de la estación terrena (grados).

f : frecuencia (GHz).

R_e :radio efectivo de la Tierra (8 500 km).

Si no se dispone de datos locales de la altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar, se puede obtener una estimación a partir de los mapas de altitud topográfica de la Recomendación UIT R P.1511.

El fichero de datos TOPO0DOT5.TXT contiene la altura (km) sobre el nivel medio del mar de la superficie de la Tierra con una resolución de 0,5° en latitud y en longitud. Los ficheros de datos complementarios TOPOLAT.TXT y TOPOLON.TXT contienen respectivamente la latitud y la longitud de las entradas correspondientes (puntos de la cuadrícula) en el fichero de datos TOPO0DOT5.TXT.

Los datos van de 0° a 360° de longitud y de +90° a -90° de latitud. En el caso de un emplazamiento distinto del de los puntos de la cuadrícula indicados, la altura sobre el nivel del mar en el emplazamiento deseado se obtiene efectuando una interpolación bicúbica a partir de los valores en los dieciséis puntos de la cuadrícula más cercanos.

Los ficheros de datos se pueden obtener en la Oficina de Radiocomunicaciones (BR) de la UIT. La información sobre las líneas costeras y las fronteras entre países se puede obtener en el mapa del mundo digitalizado de la UIT, que también se consigue en la BR.

También la UIT proporciona un mapa con datos para determinar la altura sobre el nivel del mar. Este se presenta en la figura 2.3.

FIGURA 1
Altura sobre el nivel del mar (km)

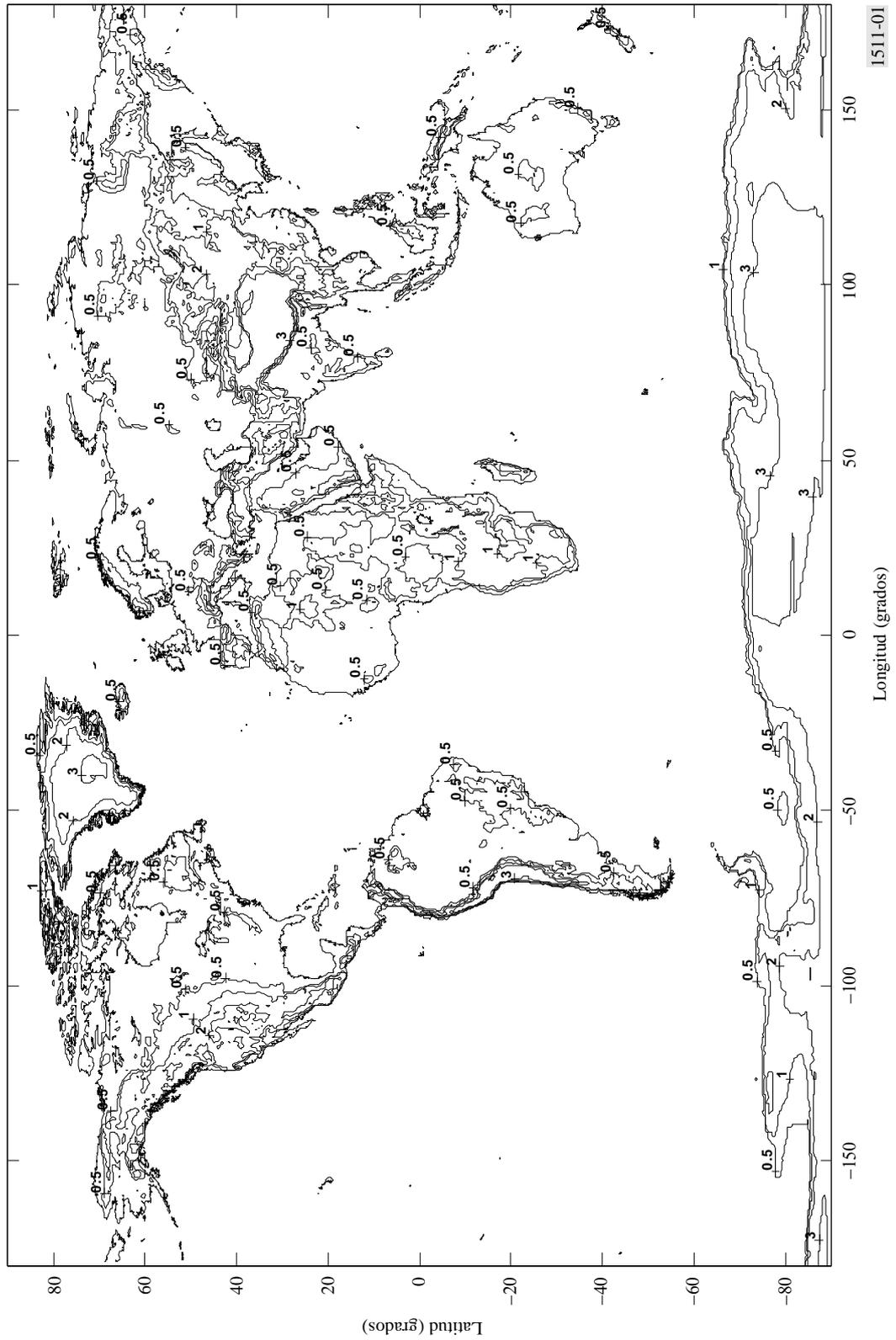
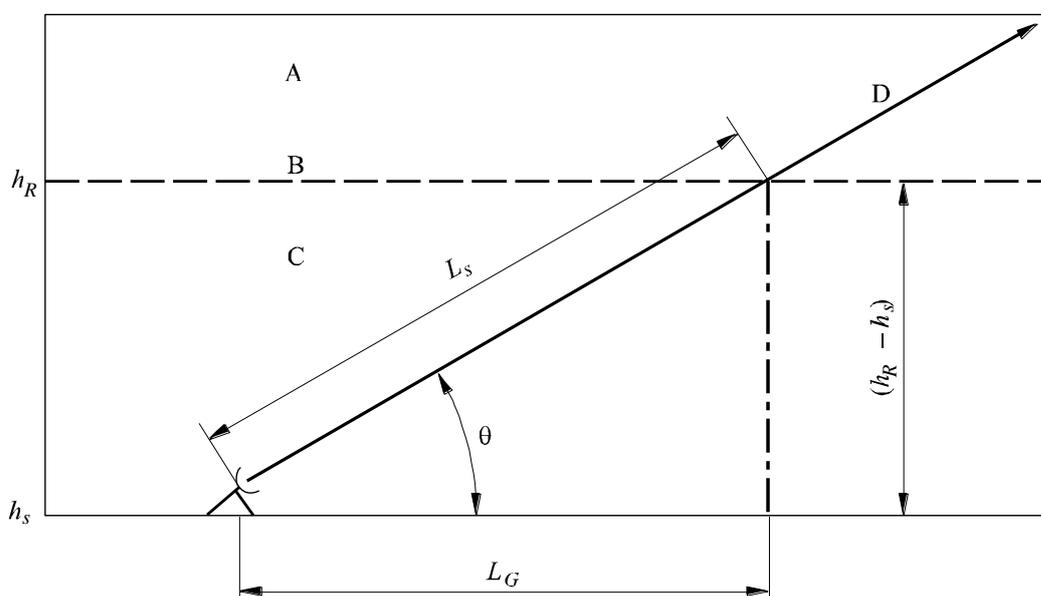


Figura 2.3 Mapa para calcular la altura sobre el nivel del mar

La configuración geométrica se muestra en la Fig. 2.4

Figura 2.4 Representación esquemática de un trayecto Tierra-espacio con indicación de los parámetros que se utilizarán en el proceso de predicción de la atenuación



- A: Precipitación helada
- B: Altura de la lluvia
- C: Precipitación líquida
- D: Trayecto Tierra-espacio

0618-01

Paso 1: Se determina la altura de la lluvia h_R , indicada en la Recomendación UIT-R P.839 [13].

Paso 2: Para $\theta \geq 5^\circ$ se calcula la longitud del trayecto oblicuo L_s , en el espacio correspondiente a la altura de la lluvia mediante la fórmula:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\text{sen } \theta} \quad \text{km} \quad (2.4)$$

Para $\theta < 5^\circ$ se utiliza la fórmula siguiente:

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\text{sen}^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right)^{1/2} + \text{sen } \theta} \quad \text{km} \quad (2.5)$$

Si $h_R - h_s$ es menor o igual a cero, la atenuación debido a la lluvia prevista para cualquier porcentaje de tiempo es cero y no son necesarios los pasos siguientes.

Paso 3: Se determina la proyección horizontal L_G , de la longitud del trayecto oblicuo aplicando la siguiente ecuación:

$$L_G = L_s \cos \theta \quad \text{km} \quad (2.6)$$

Paso 4: Se obtiene la intensidad de la lluvia $R_{0,01}$, rebasada durante el 0,01% de un año medio (con un tiempo de integración de 1 min). Si no pueden obtenerse datos estadísticos a largo plazo a partir de fuentes locales de información, puede hacerse una estimación utilizando los mapas de intensidad de lluvia que aparecen en la Recomendación UIT-R P.837. Si $R_{0,01}$ es cero, la atenuación debido a la lluvia prevista para cualquier porcentaje de tiempo es cero y no son necesarios los pasos siguientes.

Paso 5: Se halla la atenuación específica γ_R , utilizando los coeficientes dependientes de la frecuencia que aparecen en la Recomendación UIT-R P.838 y el índice de intensidad de la lluvia $R_{0,01}$, determinado según el Paso 4, aplicando la ecuación:

$$\gamma_R = k (R_{0,01})^\alpha \quad \text{dB/km} \quad (2.7)$$

Paso 6: Se calcula el factor de reducción horizontal $r_{0,01}$, para el 0,01% del tiempo:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f} - 0,38 \left(-e^{-2L_G} \right)}} \quad (2.8)$$

Paso 7: Se calcula el factor de ajuste vertical $v_{0,01}$, para 0,01% del tiempo:

$$\zeta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{h_R - h_s}{L_G r_{0,01}} \right) \quad \text{grados} \quad (2.9)$$

$$\text{Para } \zeta > \theta, \quad L_R = \frac{L_G r_{0,01}}{\cos \theta} \quad \text{km} \quad (2.10)$$

$$\text{De otro modo,} \quad L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\text{sen } \theta} \quad \text{km} \quad (2.11)$$

$$\text{Si } |\varphi| < 36^\circ, \quad \chi = 36 - |\varphi| \quad \text{grados} \quad (2.12)$$

$$\text{De otro modo,} \quad \chi = 0 \quad \text{grados} \quad (2.13)$$

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(-e^{-\theta/(1+\chi)} \right)^{\sqrt{L_R \gamma_R}} - 0,45 \right) f^2} \quad (2.14)$$

Paso 8: La longitud de trayecto efectiva es:

$$L_E = L_R v_{0,01} \quad \text{km} \quad (2.15)$$

Paso 9: La atenuación de rebasamiento prevista para el 0,01% de un año medio $A_{0,01}$ se obtiene mediante:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E \quad \text{dB} \quad (2.16)$$

Paso 10: La atenuación de rebasamiento estimada para otros porcentajes de un año medio, en el margen del 0,001% al 5%, se determina a partir de la atenuación de rebasamiento para el 0,01% de un año medio:

$$\text{Si } p \geq 1\% \text{ o } |\varphi| \geq 36^\circ: \quad \beta = 0$$

$$\text{Si } p < 1\% \text{ y } |\varphi| < 36^\circ \text{ y } \theta \geq 25^\circ: \quad \beta = -0,005(|\varphi| - 36)$$

$$\text{De otro modo: } \beta = -0,005(|\varphi| - 36) + 1,8 - 4,25 \sin \theta$$

$$A_p = A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-(0,655 + 0,033 \ln(p) - 0,045 \ln(A_{0,01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad \text{dB} \quad (2.17)$$

Este método proporciona una estimación de las estadísticas a largo plazo de la atenuación debido a la lluvia. Si se comparan los datos obtenidos con los datos previstos, habrá de tenerse en cuenta la importante variación anual que registran las estadísticas de intensidad de lluvia (véase la Recomendación UIT-R P.678).

2.5.4.2 Modelo Assis-Einloft

Este modelo [15] fue diseñado originalmente para enlaces terrestres, y posteriormente fue extendido para enlaces por satélite utilizando la altura de lluvia del UIT-R, considerando la elevación del enlace, así como, la altura de la estación terrena sobre el nivel del mar.

Emplea una estructura de celda de lluvia de una longitud de 33 km que consta de dos partes. La parte interior tiene forma cilíndrica y es donde se registra una intensidad de lluvia mayor, mientras que la parte externa es la parte externa concéntrica a la primera, y en ella se registra una intensidad de lluvia menor, de carácter residual.

2.5.4.3 Modelo australiano

El modelo australiano [16] es válido para frecuencias comprendidas entre 5 y 60 GHz, y ángulos de elevación entre 5 y 90°. Reconocido como uno de los mejores modelos para frecuencias inferiores a 50 GHz, es válido para probabilidades de indisponibilidad en el margen de 0.001-1%. Calcula la atenuación total (debido a lluvia y gases) del enlace tierra-satélite. Al estar pensado para enlaces tierra-espacio fijos no es apto para comunicaciones móviles por satélite o aplicaciones de radionavegación.

Emplea una distribución de intensidad de lluvia uniforme en todo el trayecto correspondiente al emplazamiento de la estación terrena. Esta distribución de intensidad de lluvia, se considera dependiente de un factor de reducción del trayecto vertical y horizontal que tienen en cuenta la no uniformidad de la intensidad de lluvia en un caso real.

2.5.4.4 Modelo Brasil

Este modelo se basa en el modelo del UIT-R, optimizándolo para alta probabilidad de lluvia y baja disponibilidad. Es el más empleado en la zona ecuatorial y tropical [17].

Emplea el concepto de celda de lluvia equivalente original del UIT-R, calculando la longitud y la altura de la celda de lluvia equivalente en función del porcentaje y la intensidad de lluvia superada en dicho porcentaje. Calcula también un factor de promediado de la longitud del trayecto.

2.5.4.5 Modelo de Bryant

Este modelo [18] se basa en el comportamiento físico del medio de propagación, utilizando para ello tres parámetros de entrada para el cálculo de la atenuación: la distribución completa de intensidades de lluvia, una altura de lluvia variable en función de la intensidad de lluvia y el ángulo de elevación de la estación. Emplea el concepto de celda de lluvia equivalente. El número de celdas, su diámetro, y la altura de lluvia son variables en función de la intensidad de lluvia que se considera constante en todo su volumen. Se elaboró comparando medidas experimentales de atenuación a 12 GHz en zonas tropicales y registros pluviométricos. Se ha comparado con la base de datos de la UIT, obteniéndose buenos resultados en todo el rango de probabilidades y frecuencias hasta 50 GHz.

2.5.4.6 Modelo Crane global

Este modelo [19] tiene en consideración la estructura de temperatura vertical de la atmósfera y la estructura horizontal de lluvia los cuales se toman mediante la recogida de datos de la estadística de intensidad puntual de lluvia. Emplea un conjunto de mapas que sirven para asignar un modelo de lluvia para cada región climática del mundo.

2.5.4.7 Modelo Crane de dos componentes

El modelo de Crane de dos componentes [20] realiza un análisis matemático complejo, estando su uso muy extendido en el proceso de planificación de sistemas. Distingue entre contribuciones de lluvia abundante a las que denomina “*cells*”, y contribuciones de lluvia más escasas a las que denomina “*debris*”. Las tormentas están compuestas usualmente de ambos tipos de contribuciones. El modelo puede fijar que el trayecto esté formado únicamente por una “*cell*”, por “*debris*” o por una combinación de ambas.

El modelo está diseñado para el cálculo de la probabilidad de que se exceda cierta atenuación. Se calcula la probabilidad de cada componente según el método anterior, y se suman independientemente. Para dicho cálculo es necesario emplear los mapas de regiones climáticas que se expusieron en el modelo anterior.

2.5.4.8 Modelo Excell

El modelo EXCELL [21], a pesar de su complejidad presenta la ventaja de ser muy próximo a la realidad para intensidades de lluvia reducidas y frecuencias por encima de los 20 GHz. Es un modelo físico que describe el proceso de la precipitación mediante una población de células de lluvia. Se ha elaborado mediante el análisis de imágenes de radares meteorológicos en Italia. Parte de la descripción del entorno de la precipitación por medio de celdas sintéticas aisladas, que se caracterizan por un perfil exponencial de lluvia en su interior y simetría de rotación, derivadas del estudio de los mapas de precipitaciones.

La densidad de lluvia en la celda se define en función de su tamaño y el pico de intensidad de lluvia que se produce en su interior. Posteriormente, se definen la distribución espacial de celdas, es decir, el número de celdas por kilómetro cuadrado, teniendo en cuenta la densidad de lluvia calculada anteriormente y el radio medio de las celdas. El movimiento de las celdas de lluvia a lo largo de la localización de la estación terrena se describe como un proceso aleatorio, además de suponer que cada celda puede ocupar cualquier posición en el plano. Como consecuencia se puede estudiar todas las posiciones dentro de la localización de la estación terrena referida a la celda para la cual se excede el parámetro considerado.

Tomando en consideración lo anterior, se calcula la intensidad de lluvia equivalente en función de la longitud del trayecto Tierra-Espacio y de la función de distribución de lluvia puntual. La atenuación dentro de la celda se calcula de manera similar que en el resto de modelos.

Se le debe añadir un término adicional de atenuación debido a la lluvia estratificada en las proximidades de la celda, que se describe en función de la tasa de lluvia uniforme R_p que se obtiene de los mapas de precipitación.

En este caso el modelo puede usarse, aunque no con un gran nivel de detalle, pues haría falta un estudio detallado de cada evento de lluvia citando parámetros como la posición del pico de intensidad de lluvia dentro de cada celda.

2.5.4.9 Modelo de García López

El modelo de García-López [22] de atenuación por lluvia para trayecto inclinado es una extensión del propuesto por el mismo autor para enlaces terrestres, siendo la configuración de la geometría del trayecto similar a la del modelo de la UIT. Emplea una distribución completa de intensidades de lluvia para el año medio y se emplean unos coeficientes que son dependientes del área climática, y se calculan con técnicas de regresión basadas en la atenuación por lluvia y la intensidad por lluvia simultáneamente. Calcula la altura efectiva promedio de lluvia dependiendo de la latitud de la estación terrena y la distancia equivalente del trayecto teniendo en cuenta el ángulo de elevación del enlace.

En su desarrollo y justificación estuvo implicado el catedrático de la ETSIT José María Hernando Rábanos. El modelo García, también llamado *Spain*, busca cubrir los siguientes objetivos:

Simplicidad.

Precisión similar para las diferentes regiones del planeta.

Uso para cada probabilidad de su intensidad de lluvia.

Alta precisión sobre todo para bajas probabilidades de lluvia, es decir, alta atenuación (superior a 10dB).

Comportamiento homogéneo en su error medio para cada probabilidad.

2.5.4.10 Modelo de Karasawa

También denominado en muchos artículos como modelo Japón, al igual que el modelo Brazil optimiza el modelo de la UIT-R para bajas disponibilidades [24].

Calcula la altura efectiva de lluvia en función de la latitud de la estación terrena y emplea un factor de reducción vertical como la mayoría de los modelos. Calcula las atenuaciones para el 0,01 y 0,1% del tiempo, y en función de estas calcula las atenuaciones para los distintos valores de probabilidad.

2.5.4.11 Modelo de Leitao-Watson

Su margen de validez se limita a ángulos de elevación inferiores a 10° , puesto que la proyección horizontal del trayecto no puede superar los 12 km [25].

Tiene en consideración los datos que sobre estructura de las tormentas proporcionan los datos de radar de polarización dual y su interpretación mediante la teoría de dispersión, además de la altura de congelación durante el período de lluvia. Considera también las variantes geográficas y climáticas en cuanto a intensidad de lluvia. Emplea un factor de conversión punto a trayecto deducido de las mediciones de radar.

2.5.4.12 Modelo Matricciani

El modelo Matricciani [26] utiliza dos capas de tasa de precipitación vertical constante. La primera capa se sitúa sobre la tierra (capa A), contiene gotas de agua a una temperatura de 20°C . La segunda capa (capa B) es una capa compuesta por hidrometeoros a 0°C .

La relación entre la lluvia en la capa A y la precipitación aparente en la capa B se obtiene teóricamente. Suponiendo una distribución de probabilidad log-normal para la tasa de lluvia en la capa A, la tasa aparente de lluvia en la capa B es también log-normal con la misma desviación estándar, pero con valor de media distinto.

El proceso estadístico de la tasa de lluvia en el espacio se modela con una log-normal con una función de correlación determinada a partir de medidas radiométricas. Asumiendo que la atenuación del trayecto es también log-normal, obtendremos la media y la desviación estándar.

2.5.4.13 Modelo de Misme Waldteufel

Se trata de una extensión de un modelo para enlace terreno que emplea una celda circular con distribución uniforme. Asume una distribución log-normal de intensidad de lluvia y obtiene un diámetro de célula de lluvia en función de la intensidad de lluvia. Realiza un promediado de la velocidad de caída de la lluvia a distintas alturas.

El modelo Misme-Waldteufel [27] fue modificado por Fiser [31] con el objetivo de simplificar el gasto computacional que este tenía.

2.5.4.14 Modelo SAM

Este modelo denominado *Modelo Simple de Atenuación* [28] se basa en una descripción de la tasa de lluvia exponencial.

Es un modelo optimizado para cálculo sencillo. Emplea su distribución de intensidad de lluvia a lo largo del trayecto, distinguiéndose dos segmentos dentro del trayecto total dependiendo de si el valor de R_0 es mayor o menor que 10 mm/h. Dependiendo de esto, se proporcionan dos expresiones de atenuación, siendo la inferior uniforme y la superior exponencial.

2.5.4.15 Modelo de Svjatogor

Su principal característica es que la altura efectiva de lluvia se considera función de la intensidad de lluvia. Define un factor de reducción del trayecto que depende de la intensidad de lluvia, el ángulo de elevación del enlace y la altura efectiva promedio de la lluvia [29].

2.6 Despolarización por hidrometeoros

Muchos sistemas de comunicaciones por satélite utilizan canales de polarización ortogonal para aumentar la capacidad sin incrementar los requisitos de ancho de banda. Sin embargo, la interferencia de polarización cruzada entre los canales, debido a la despolarización de la onda en el trayecto de propagación, puede limitar la calidad de funcionamiento del sistema. La despolarización altera las propiedades de polarización de la onda incidente: las polarizaciones lineal y circular se transforman en una polarización elíptica y el propio eje de polarización puede experimentar una rotación.

La despolarización se produce cuando la señal de radio se propaga a través de medios que son anisótropos respecto a la polarización incidente. Se genera tanto en la ionósfera (rotación de Faraday) como en la tropósfera (despolarización por precipitación).

La rotación de Faraday de un plano de polarización lineal se produce porque la ionósfera es birrefringente en presencia del campo magnético terrestre. Su efecto es significativo hasta los 10 GHz, aunque puede evitarse por el empleo de polarización circular.

La despolarización por precipitación se debe a los desplazamientos diferenciales de fase y atenuación inducidos entre las componentes ortogonales de la onda incidente. Las ondas de polarización ortogonal que se propagan en un medio que induce fases diferenciales están despolarizadas pero mantienen el carácter ortogonal; pero, si el medio provoca también la atenuación diferencial, la ortogonalidad queda destruida.

Las secciones transversales de extinción de muchos hidrometeoros (gotas de lluvia, copos de nieve, granizo) varían con la polarización, lo que conduce a la despolarización. Los hidrometeoros tienden a caer con sus ejes mayores alineados con la horizontal local. La asimetría no aleatoria neta resultante puede provocar una polarización cruzada significativa.

Existe también una despolarización debido a cristales de hielo, situados habitualmente por encima de la región de lluvia en las tormentas y, a veces en nubes de hielo sin precipitación.

La importancia de la despolarización en los sistemas de telecomunicaciones depende de varios factores:

Frecuencia del enlace.

Geometría del trayecto: ángulo de elevación, ángulo de inclinación de la polarización.

Factores climáticos locales.

Sensibilidad del sistema a la interferencia por polarización cruzada.

2.7 Centelleo troposférico

El centelleo troposférico es el fenómeno de fluctuaciones rápidas de la señal debido a variaciones a pequeña escala del índice de refracción en la atmósfera. Estas variaciones del índice de refracción son el resultado de irregularidades en la temperatura, humedad y presión, llamadas turbulencias atmosféricas. En las regiones ópticas, la influencia de la temperatura es dominante mientras que en frecuencias de microondas, las fluctuaciones de la humedad son más importantes, resultando en variaciones aleatorias de la amplitud y fase de la señal recibida en un enlace por satélite.

Los desvanecimientos por centelleo pueden suponer un importante perjuicio para sistemas de comunicaciones de pequeño margen con bajo ángulo de elevación, en los cuales la disponibilidad depende sobre todo de los efectos de la atmósfera en ausencia de precipitación. Además, las rápidas fluctuaciones del nivel de potencia de la señal recibida pueden generar problemas en los sistemas de seguimiento de antena, en el control de potencia ascendente y en la implementación de técnicas para mitigación de desvanecimientos (FMT), y no debe descartarse un efecto perjudicial de las variaciones de amplitud y fase sobre determinadas modulaciones, especialmente las empleadas en comunicaciones digitales por satélite [32].

Se ha comprobado experimentalmente que la intensidad del centelleo aumenta con la frecuencia y al disminuir el ángulo de elevación o el diámetro de la antena. Asimismo, el centelleo posee una elevada dependencia climatológica, por su estrecha relación con la probabilidad de formación de fenómenos turbulentos en la atmósfera. Esto se traduce, además, en una elevada variabilidad estacional y diurna. En climas templados, las intensidades más elevadas son más frecuentes en verano alrededor de mediodía, debido a la mayor probabilidad de fenómenos convectivos.

Aunque los fenómenos turbulentos que originan el centelleo se producen en altura (típicamente en alturas superiores a los 1000 m), la medición de las variables meteorológicas en esa zona es compleja. Por ello, el centelleo suele relacionarse con parámetros meteorológicos en superficie, más sencillos de medir aunque con una menor correlación con el comportamiento en las capas altas de la tropósfera. Entre ellos, los más utilizados son la temperatura, la humedad absoluta o relativa, la dirección y velocidad del viento y el índice de refracción húmedo. También se ha demostrado la influencia de las nubes presentes en el trayecto de propagación, por ser potenciales generadoras de turbulencias.

El centelleo puede caracterizarse mediante diversos parámetros, aunque los más utilizados son los siguientes:

- χ_- , desviación de amplitud negativa (atenuación) con respecto al valor medio.
- χ_+ , desviación de amplitud positiva (ganancia) con respecto al valor medio.
- σ , σ^2 . Desviación típica y varianza de la amplitud de centelleo.

Calculada en periodos de 1 minuto.

2.8 Atenuación total debida a múltiples fuentes de atenuación atmosférica que actúan simultáneamente

En el caso de sistemas que funcionan a frecuencias por encima de unos 18 GHz, y sobre todo los que funcionan con bajos ángulos y/o márgenes de elevación, se ha de considerar el efecto de múltiples fuentes de atenuación atmosférica actuando simultáneamente [23].

La atenuación total (dB) representa el efecto combinado de lluvia, gas, nubes y centelleo y requiere al menos uno de los siguientes parámetros de entrada:

$A_R(p)$: atenuación debido a la lluvia (dB) con una probabilidad fija, dada por el valor de A_p de la ecuación (2.17).

$A_C(p)$: atenuación debido a las nubes (dB) con una probabilidad fija, calculada según se indica en la Recomendación UIT-R P.840.

$A_G(p)$: atenuación debido al vapor de agua y al oxígeno con una probabilidad fija (dB), calculada según se indica en la Recomendación UIT-R P.676.

$A_S(p)$: atenuación debido al centelleo troposférico (dB) con una probabilidad fija, calculada mediante la ecuación (33) de la UIT-R P.618.

donde p es la probabilidad del 50% al 0,001% de que se produzca un exceso de atenuación.

La atenuación producida por los gases en función del porcentaje de tiempo puede calcularse utilizando el § 2.2 del Anexo 2 de la Recomendación UIT-R P.676 si se dispone de datos meteorológicos locales en el porcentaje de tiempo requerido. Ante la falta de datos locales en el porcentaje de tiempo requerido, debería calcularse la atenuación media producida por los gases y utilizarse en la ecuación (52) de la UIT-R P.618.

La fórmula general para el cálculo de la atenuación total con una probabilidad dada, $A_T(p)$, es como sigue:

$$A_T(p) = A_G(p) + \sqrt{A_R(p)^2 + A_C(p)^2} + A_S^2(p) \quad (2.18)$$

donde:

$$A_C(p) = A_C(1\%) \quad \text{para } p < 1,0\%$$

$$A_G(p) = A_G(1\%) \quad \text{para } p < 1,0\%$$

Estas dos últimas ecuaciones tienen en cuenta el hecho de que una gran parte de la atenuación debida a las nubes y de la atenuación producida por los gases ya está incluida en la predicción de la atenuación debido a la lluvia para porcentajes de tiempo inferiores al 1%.

Cuando el método de predicción completo, indicado más arriba, se probó utilizando el procedimiento expuesto en el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R P.311, los resultados concordaron en buena medida con los datos de medición disponibles para todas las latitudes en la gama de probabilidades del 0,001% al 1%, con un error cuadrático medio del 35% aproximadamente, aplicando los mapas de contornos hidrometeorológicos de la Recomendación UIT-R P.837. Cuando el método se probó utilizando datos Tierra-espacio multianuales, el error cuadrático medio total encontrado fue del 25%. Dada la predominancia de efectos diferentes con probabilidades diferentes así como la diversa disponibilidad de datos de prueba con distintos niveles de probabilidad, se produce una cierta variación del error cuadrático medio a lo largo de la distribución de probabilidades

CAPÍTULO 3 : DINÁMICA DE DESVANECIMIENTOS EN ENLACES SATELITALES

3.1 Aspectos de la dinámica de desvanecimientos

Se denomina desvanecimiento a toda disminución de la potencia de la señal recibida con relación a su valor nominal. La diferencia entre este nivel nominal y el nivel recibido en condiciones de desvanecimiento se llama profundidad de desvanecimiento y se expresa en dB.

En la figura 3.1 se describen gráficamente tres parámetros relacionados con los desvanecimientos [33]:

La duración del desvanecimiento es el intervalo de tiempo transcurrido entre dos rebasamientos por encima de un mismo umbral.

La duración del intervalo entre desvanecimiento es el intervalo de tiempo transcurrido por debajo de un mismo umbral de atenuación.

La pendiente de desvanecimiento se define como la velocidad de variación de la atenuación con el tiempo.

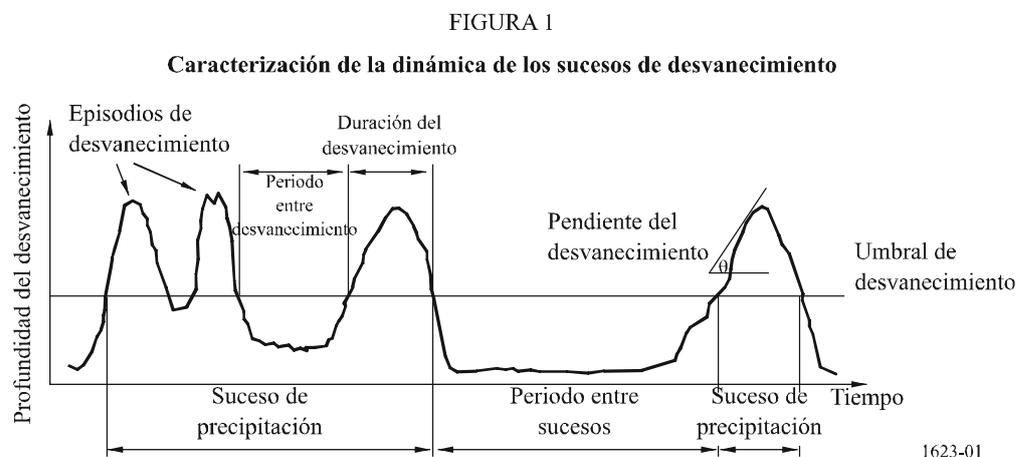


Figura 3.1 Representación de enlace modelo UIT

En un desvanecimiento, además de los descritos, habrá otros parámetros de tipo estadístico que deberán ser descritos.

Correlación temporal

Caracterización espectral

Atenuación dependiente de la frecuencia

3.1.1 Duración de los desvanecimientos

La duración de los desvanecimientos es un parámetro importante que se ha de tener en cuenta en el diseño de sistemas por varias razones:

- Interrupción e indisponibilidad del sistema: las estadísticas de duración de los desvanecimientos proporcionan información sobre el número y duración de las interrupciones y la indisponibilidad del sistema debido a la propagación por un determinado enlace o servicio;
- Compartición de los recursos del sistema: desde el punto de vista del operador es importante tener una idea de la duración estadística de un suceso para asignar los recursos a otros usuarios;
- FMT: la duración de los desvanecimientos es importante a fin de definir la duración estadística para que el sistema permanezca en una configuración de compensación antes de volver a su modo nominal;
- Codificación y modulación del sistema: la duración de los desvanecimientos es un elemento fundamental para seleccionar los códigos de corrección de errores en recepción sin canal de retorno y los mejores esquemas de modulación; en el canal de propagación de los sistemas de comunicación por satélite no se producen errores independientes sino bloques de errores.

La duración del desvanecimiento repercute directamente en la selección del esquema de codificación (tamaño y palabra de codificación en códigos de bloque, entrelazado en códigos concatenados, etc.).

3.1.2 Periodo entre desvanecimientos.

Además de las estadísticas de duración de los desvanecimientos, también es útil caracterizar el tiempo transcurrido entre dos desvanecimientos. Una vez que el nivel de la señal recibida ha caído por debajo del umbral después de un suceso de interrupción, es esencial para el operador conocer estadísticamente el tiempo que transcurre antes de que se produzca otro suceso de interrupción.

Los resultados experimentales indican que las estadísticas de los intervalos entre desvanecimientos pueden tener una distribución log-normal. Sin embargo, se prevé que los intervalos entre desvanecimientos de corta duración causados por el centelleo troposférico sigan una ley exponencial, al igual que las estadísticas de duración de desvanecimiento de corta duración.

3.1.3 Pendiente de los desvanecimientos

Cuantificar la pendiente de los desvanecimientos que operan en banda Ka y superiores es muy importante para la implementación de técnicas de mitigación de desvanecimientos (FMT). La obtención de la pendiente de desvanecimiento de señal recibida es útil en el diseño de un lazo de control que pueda seguir las variaciones de señal, pero también permite una mejor predicción de las condiciones de propagación. Para ambas aplicaciones, la información relevante de la pendiente es la componente de variación lenta de la señal (atenuación por lluvia). Se ha demostrado que las fluctuaciones rápidas de la señal, debida principalmente al centelleo troposférico, son impredecibles en una escala de varios segundos. La función de auto correlación decrece muy rápidamente con el tiempo, por la que la componente de centelleo está completamente incorrelada después de 2 segundos.

A diferencia de los aspectos estáticos del comportamiento del canal de propagación (distribución de la atenuación con respecto al porcentaje de tiempo), solo unos pocos resultados se han divulgado sobre estadísticas de pendiente de desvanecimiento.

Para calcular la pendiente de la componente de atenuación a partir de las series temporales, es necesario eliminar las componentes rápidas de la señal, las cuales contiene las fluctuaciones rápidas tanto de atenuación por lluvia como de atenuación por centelleo, dependiendo de la calidad del filtrado de la componente rápida, la atenuación de las pendientes pueden ser diferente. Para obtener los valores no ruidosos antes,

durante y después de un evento de lluvia, se aplica a una ventana media deslizante, la longitud de la cual se puede variar desde 30 segundos a 2 minutos. Se pueden utilizar otras técnicas más complejas como el uso de filtros Butterworth.

Una vez que se ha eliminado la componente rápida, se fijan los umbrales de atenuación y se calcula la pendiente desvanecimiento para cada umbral de atenuación.

La distribución de probabilidad de las pendientes de los desvanecimientos depende de varios parámetros climáticos, tales como la distribución del tamaño de las gotas de lluvia y el tipo de lluvia (estratiforme, convectivo). La velocidad del viento transversal al trayecto es otro parámetro a tener en cuenta ya que, determina la velocidad a la cual la célula de lluvia atraviesa el trayecto de propagación.

También es importante la longitud del trayecto de propagación. Al aumentar la longitud disminuye la pendiente de desvanecimiento debido al efecto suavizado que produce la suma de las diferentes contribuciones de la lluvia y aumenta con el ángulo de elevación en los trayectos Tierra-espacio.

Se han publicado muy pocos resultados sobre pendiente de desvanecimiento en trayecto inclinado, la mayoría en frecuencias inferiores a 30 GHz. Igualmente, los modelos de predicción son muy escasos y de naturaleza empírica (a menudo, simples ajustes a distribuciones experimentales obtenidas en unos pocos observatorios). Entre ellos el más completo es el modelo de predicción de la UIT, que se explicará más adelante.

3.2 Modelos de predicción de las duraciones de los desvanecimientos

La UIT ha definido dos funciones de distribución acumulativa F y P , que son en las que se basan la mayoría de los modelos de predicción de duraciones de desvanecimientos, la diferencia consiste en que cada modelo define a estas funciones de manera diferente y por lo tanto las hace comparables; al final se explica un modelo estocástico que no utiliza estas dos funciones de la UIT, pero puede servir de referencia para considerar modelos que no tengan una dependencia, por las establecidas por la UIT.

A continuación se explican algunos modelos de predicción de duración de los desvanecimientos.

3.2.1 Modelo del proyecto COST 205

En 1985 y en ámbito del proyecto COST 205 [34] realizaron medidas de la dinámica de desvanecimientos de los satélites OTS y SIRIO en 10 localizaciones, Albertslund (Dinamarca), Dublin (Irlanda), Fucino (Italia), Leeheim (Alemania), Lusbuhei (Austria), Milo (Italia), Noordwijk (Holanda), Spino d'Adda (Italia), Estocolmo (Suecia) y Villafranca (España), los ángulos de elevación de estos enlaces varían entre 22 y 42° y las frecuencias son próximas a 11,8 GHz.

Dado que los resultados que se obtuvieron eran muy similares en las diferentes localizaciones, se llegó a la conclusión de que la distribución de las duraciones de los desvanecimientos es independiente del clima y del ángulo de elevación. El modelo del proyecto COST205 describe el número de sucesos de duración corta debido a centelleo troposférico, por debajo de 32 s, mediante una distribución exponencial, y el número de sucesos de duración larga ocasionados por la lluvia mediante una distribución lognormal. La distribución acumulada del tiempo de los desvanecimientos tiene un comportamiento similar, con una distribución exponencial para desvanecimientos de duración corta y una distribución lognormal para desvanecimientos de duración larga.

El modelo del COST205 no propone una función para calcular la probabilidad de aparición de desvanecimientos de duración d mayor que D para un umbral de atenuación A , pero sí proporciona un método empírico para calcular el número de desvanecimientos de duración mayor que D segundos, $N(d > D)$, por lo que se puede calcular $P(d > D/a > A)$ para desvanecimientos de duración mínima, D_{\min} , que afecte al sistema en estudio. Un posible criterio es el adoptado por la UIT, que define $P(d > D/a > A)$ para desvanecimientos de duración mayor a 1 s. En este modelo es destacable que $P(d > D/a > A)$ resulte independiente de la atenuación. Si N_{32}^A es el número de desvanecimientos de umbral A dB y duración mayor que 32 segundos y D_{\min} es la mínima duración de un desvanecimiento:

Si $D < 32$ s

$$N_{d > D} = 4,92 N_{32}^A D^{-0,46} \quad (3.1)$$

$$P d > D/a > A = \frac{4,92N_{32}D^{-0,46}}{4,92N_{32}D^{-0,46}|_{D=Dmin}} = \frac{D^{-0,46}}{D^{-0,46}|_{Dmin}} \quad (3.2)$$

Si $32 \leq D < 1200$ s

$$N d > D = 2N_{32}Q \frac{\ln D - 3,466}{1,75} \quad (3.3)$$

$$P d > D/a > A = \frac{Q \frac{\ln D - 3,466}{1,75}}{Q \frac{\ln D_{min} - 3,466}{1,75}} \quad (3.4)$$

Donde Q (z) responde a la expresión:

$$Q z = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (3.5)$$

Si $D < 32$ s

$$F d > D/a > A = 1 - \frac{0,014}{1,05+C} D^{0,54} \quad (3.6)$$

Si $32 \text{ s} \leq D < D_{max}$

$$F d > D/a > A = \frac{1}{1,05+C} Q \frac{\ln D - 6,53}{1,75} + C \quad (3.7)$$

D_{\max} y C dependen del nivel de atenuación, A.

A(dB)	2	4	6	8	10
C	-0,10	-0,04	0,01	-0,04	-0,09
D_{\max}	4000	500	400	400	1000

Tabla 3.1 Coeficientes del modelo en función de la atenuación

3.2.2 Modelo de vilar, Burgueño, Puigcerver y Austin

En 1988, Vilar, Burgueño, Puigcerver y Austin [35] modelaron las duraciones de los desvanecimientos a partir de 49 años de medidas de la intensidad de lluvia en Barcelona. Las medidas de intensidad de lluvia están comprendidas en un rango de 0-474 mm/h con pasos de 6 mm/h y el periodo entre diferentes medidas es de 20 s. su modelo describe la distribución acumulativa temporal de las duraciones de los desvanecimientos. El modelo calcula la función F y P a partir del umbral de intensidad de lluvia, R_{th} (mm/h), de modo que será necesario relacionar el umbral de la intensidad de lluvia con la atenuación, A (dB). Una opción posible es utilizar la ITU-R, Rec. P.618 [23].

El modelo es válido para duraciones superiores a 20 s, para las que propone una distribución log-normal.

$$P(d > D/r > R_{th}) = Q \frac{\ln D/D_{av} + 0,4086}{0,9404} \quad (3.8)$$

$$F(d > D/r > R_{th}) = Q \frac{\ln D/D_{av} + 0,4462}{0,8639} \quad (3.9)$$

Donde Q(z) corresponde a (2.5) y D_{av} es la duración media de un evento de lluvia

$$D_{av} = 12,23R_{th}^{-0,469} \times 60 \text{ s} \quad (3.10)$$

El número medio N_{av} y la desviación típica σ_D de desvanecimientos de duración mayor que D vienen dados por las expresiones

$$N_{av} = 10^{-0,008966R_{th}+2,012} \quad (3.11)$$

$$\sigma_D = 21,92R_{th}^{-0,588} \times 60 \text{ s} \quad (3.12)$$

Una de las aportaciones importantes de este modelo fue definir por primera vez el concepto de evento de lluvia como un acopio de lluvia continuo en el sistema de medida, así como la definición de duración de desvanecimiento de duración D y de umbral R_{th} de manera similar a la adoptada por la UIT [23] en la actualidad.

3.2.3 Modelo de Moupfouma, Martin, Spanjaard y Hughes

En 1990, Moupfouma, Martin, Spanjaard y Hughes [36], presentaron un método para calcular el número de desvanecimientos de duración d mayor que D (s) si el umbral de la intensidad de lluvia es R_{th} . Este método proviene del estudio estadístico de la intensidad de lluvia de cinco meses durante la estación de lluvias en Douala, Camerún, con un tiempo de integración de 1 minuto. Combinado con el método de atenuación del ITU-R [23], se puede calcular la probabilidad acumulada de ocurrencia de desvanecimiento de duración mayor que D (s) para un umbral A (dB) como el cociente del número de desvanecimientos de duración mayor que D entre el número de desvanecimientos de duración mínima. Para comparar este método con otros debería adoptarse una duración mínima de 1s, aunque el modelo se elaboró para duraciones por encima de un minuto. El modelo es válido para intensidades de lluvia superiores a 48 mm/h.

$$b = 2,5 \cdot 10^{-4} e^{0,053R_{th}} \quad (3.13)$$

$$Q = 3,8 \cdot 10^9 R_{th}^{-3,96} \quad (3.14)$$

$$N_{d > D/r > R_{th}} = Q e^{-bD/60} \quad (3.15)$$

Puede deducirse la probabilidad de ocurrencia como

$$P(d > D/r > R_{th}) = e^{b/60(1-D)} \quad (3.16)$$

3.2.4 Modelo de Goldhirsh

En 1995, Goldhirsh [37] presentó un modelo de predicción de las duraciones de eventos de lluvia obtenido a partir de datos en 10 puntos de la costa Atlántica de EE.UU., durante cinco años. Los diez puntos tienen una separación Norte-Sur y Este-Oeste de 70 km y 47 km respectivamente. La variabilidad espacial de la intensidad de lluvia resultó ser mucho menor que la variabilidad temporal, y a medida que aumentan los umbrales de lluvia la duración de los desvanecimientos disminuye, como era de esperar. En conjunción con el modelo de atenuación de la UIT-R [23] se puede obtener la probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos de duración superior a D(s) para un umbral de atenuación A(dB). El método de cálculo propuesto por Goldhirsh ajusta la duración de los desvanecimientos a los resultados experimentales mediante una función exponencial de la intensidad de lluvia R(mm/h), el método es válido para intensidades de lluvia comprendidas entre 5 y 50 mm/h.

$$D = aR_{th}^{-b} \times 60 \text{ s} \quad (3.17)$$

$$a = (3,283 \cdot 10^{-3} + c)^{-1} \quad (3.18)$$

$$b = 0,9314 + 0,01163 \cdot e^{100P(d > D/r > R_{th})/23,15} \quad (3.19)$$

$$c = 9,171 \cdot 10^{-4} \ln(100 P(d > D/r > R_{th})) \frac{1}{100 P(d > D/r > R_{th})} \quad (3.20)$$

Si los valores de $P(d > D/r > R_{th})$ están comprendidos entre 0 y 1, entonces los límites de las duraciones de los desvanecimientos a los que está sujeto el modelo son:

$$1,31819 \cdot 10^{-3} R_{th}^{-1,80554} \leq D \leq 1,827597 \cdot 10^{-4} R_{th}^{-0,94303} \quad (3.21)$$

Goldhirsh también presentó expresiones empíricas para relacionar la atenuación con la intensidad de lluvia en un trayecto cenital para frecuencias de 20 y 30 GHz, pero esta relación no tiene en cuenta las células de lluvia en trayectos inclinados.

Si $f=30$ GHz y $3 \text{ mm/h} < R < 115 \text{ mm/h}$

$$A = a + be^{R/c} \quad dB \quad (3.22)$$

$$a = -1,229 \cdot 10^2$$

$$b = 1,214 \cdot 10^2$$

$$c = 1,513 \cdot 10^2$$

Si $f=20$ GHz y $3 \text{ mm/h} < R < 115 \text{ mm/h}$

$$A = a + bR^c \quad dB$$

$$a = 4,022 \cdot 10^{-1}$$

$$b = 1,106 \cdot 10^{-1}$$

$$c = 1,332$$

3.2.5 Modelo de Lekkla, McCormick y Rogers

En 1998, Lekkla, McCormick y Rogers [38] presentaron las estadísticas de las duraciones de desvanecimientos obtenidas de medidas de radiómetro en Bangkok (Tailandia), Si Racha (Tailandia), Bukit Timah (Singapur) y Bandung (Indonesia). En cada una de las localizaciones obtuvieron estadísticas mensuales de duraciones de desvanecimientos para umbrales de atenuación de 2, 4, 6, 8 y 10 dB a una frecuencia de 12 GHz en un periodo de tres años.

La tabla 3.2 muestra las características de las diferentes localizaciones del experimento, donde se observa que la lluvia acumulada durante un año tiene valores muy altos.

Enclave	Longitud	Latitud	Altitud	Ángulo de	Azimut	Cantidad
---------	----------	---------	---------	-----------	--------	----------

			(m)	elevación (°)	(°)	de lluvia anual
Bangkok	100,5°E	13,7°N	30	7,4	90,4	1460
Si Racha	100,8°E	13,1°N	54	7,9	93,9	1350
Singapur	103,9°E	1,3°N	20	39,4	268,3	2285
Bandung	107,6°E	6,9°N	870	15,0	87,0	2164

Tabla 3.2 Características de las diferentes localizaciones del experimento

A partir de las medidas obtuvieron un modelo exponencial válido para duraciones superiores a 2 s.

$$P(d > D/a > A) = ae^{-(D-2)/D_1} + (1-a)e^{-(D-2)/D_2} \quad (3.23)$$

$$D_1 = 181 - 6,5A \quad (3.24)$$

Para Bangkok y Si Racha

$$D_2 = 2364 - 113A \quad (3.25)$$

Para Singapur y Bandung

$$D_2 = 1261 - 77,7A \quad (3.26)$$

El valor de a es igual a 0,5 para las medias presentadas, pero los autores del modelo plantean que su valor sea el del ratio de tormentas, β , del modelo de lluvia de Rice-HolmBerg [39].

3.2.6 Modelo de Timothy, Mondal y Sarkar

En 1998, Timothy, Mondal y Sarkar [40] presentaron los resultados de las medidas de intensidad de lluvia realizadas en Guwahati (India). En sus resultados observaron una distribución potencial en la probabilidad de duración de los desvanecimientos. Para intensidades de lluvia comprendidas entre 0 y 120 mm/h y probabilidades comprendidas entre 0,05 y 0,95 el modelo describe la duración de los desvanecimientos para umbrales de intensidad de lluvia R_{th} (mm/h). Si se combina con la recomendación de la UIT-R de cálculo de atenuaciones [23] puede obtenerse en función del umbral de atenuación A(dB).

$$D = aR_{th}^{-b} \times 60 \text{ s} \quad (3.27)$$

$$a = 259,2 - 57,6 \ln(100 P \text{ } d > D/r > R_{th}) \quad (3.28)$$

$$b = 0,79e^{0,004(100P \text{ } d > D/r > R_{th})} \quad (3.29)$$

También presentaron un modelo de duración de los desvanecimientos en función del umbral de atenuación, A(dB) , para frecuencias entre 11 y 30 GHz, que calcularon utilizando el modelo de la longitud efectiva del trayecto del UIT-R [23] y teniendo en cuenta la dispersión de Mie y las distribuciones del tamaño de las gotas de lluvia.

$$D = aA^{-b} \times 60 \text{ s} \quad (3.30)$$

$$a = 26,6434(100P \text{ } d > D/a > A)^{-0,8237} \quad (3.31)$$

$$b = -0,03755(100P \text{ } d > D/a > A)^{0,0509} \quad (3.32)$$

3.2.7 Modelo de Gibbins, Paulson, Kormanyos y Pedersen

En el año 2000 Gibbins, Paulson, Kormanyos y Pedersen [41][42] presentaron un modelo para calcular el número de desvanecimientos en función de la duración y de un

umbral de intensidad de lluvia, R_{th} (mm/h) derivado de las medidas de intensidad de lluvia del laboratorio Rutherford Appleton (RAL) durante un periodo de tres años en tres pluviómetros separados 200 m entre sí en Chibolton (Inglaterra). Las medidas tienen un periodo de muestreo de 10 s y el modelo es válido para umbrales de intensidad de lluvia entre 5 y 50 mm/h y duraciones de desvanecimientos de mayores de 30 s. el número de desvanecimientos responde a la expresión:

$$N_{d > D/r > R_{th}} = 1,7 \cdot 10^4 R_{th}^{-1,76} \exp - \frac{(\ln D - 2)^2}{3,86 - 0,0409 R_{th}} \quad (3.33)$$

La probabilidad de aparición de desvanecimientos se puede calcular a partir de este modelo dividiendo en número de desvanecimientos de duración D entre el número de desvanecimientos de duración mínima (1s).

$$P_{d > D/r > R_{th}} = e^{-\frac{(\ln D - 2)^2 - 4}{3,86 - 0,0409 R_{th}}} \quad (3.34)$$

Por lo que el modelo es lógico matemáticamente para intensidades de lluvia inferiores a 94,37 mm/h y con duraciones superiores a 5,46 s.

Los autores extendieron el modelo para calcular el número de desvanecimientos en función del umbral de atenuación a una frecuencia de 38 GHz basándose en el modelo de atenuación por lluvia de la UIT-R P.618 [23] y en los coeficientes de la recomendación UIT-R P.838 [14] pero con el factor de reducción de la longitud del trayecto r, derivado del modelo RAL [15].

$$A = k R_{th}^{\alpha} \cdot d \cdot r(R_{th}) \quad (\text{dB}) \quad (3.35)$$

Donde d es la longitud del trayecto en kilómetros y r es el mínimo de:

$$r = 1,35 + s(d) \log R_{th} \quad \text{o } r=1 \quad (3.36)$$

$$s d = 2d^{-0,053} - 2,25 \quad (3.37)$$

$$N d > D/r > R_{th} = 1,7 \cdot 10^4 R_{th}^{-1,76} e^{-a} \quad (3.38)$$

$$a = \frac{\ln 273R_{th}^{0,39} + 0,166 + 0,0194R_{th} D^{-2}}{3,86 - 0,0409R_{th}} \quad (3.39)$$

Puede calcularse la probabilidad de aparición de desvanecimientos como el número de desvanecimientos definidos en (3.38) entre el número de desvanecimientos de duración mínima, que para poder comparar con otros modelos fijaremos en 1s.

$$P d > D/r > R_{th} = \frac{N d > D/r > R_{th}}{N d > 1/r > R_{th}} = e^{-(a-b)} \quad (3.40)$$

$$b = \frac{\ln 273R_{th}^{0,39} + 0,0194R_{th}^{-1,834}}{3,86 - 0,0409R_{th}} \quad (3.41)$$

El proceso para calcular la distribución acumulada del número de desvanecimientos a 50 GHz es similar al realizado por los autores del modelo, pero modificando los coeficientes α y k del modelo de la UIT.

3.2.8 Modelo de Bráten, Amaya y Rogers

En el año 2001 Bráten, Amaya y Rogers presentaron este modelo [43], que divide los desvanecimientos en tres categorías, desvanecimientos rápidos de muy corta duración debidos al centelleo, desvanecimientos cortos debido a variaciones en lluvia conectiva y desvanecimientos largos debidos a variaciones en lluvia estratiforme. El modelo proviene del análisis de medidas de duraciones de desvanecimientos obtenidas de las balizas del satélite ACTS a 20 y 27 GHz muestreadas a 1 Hz en cinco ubicaciones diferentes en América del Norte; en la tabla se detallan las características de los cinco enclaves. Mediante una regresión lineal de las diferencias entre los cinco enclaves y sus características climáticas incorpora diferentes parámetros climáticos. El modelo calcula la probabilidad de aparición de desvanecimientos de duración d mayor que D segundos en función del umbral de la intensidad de lluvia, R_{th} (mm/h), la cantidad anual de

lluvia, M (mm), del modelo de lluvia Rice-Holmberg, el umbral de atenuación escalado, L_s (dB) a una frecuencia de 27 GHz utilizando el modelo UIT-R de escalado en frecuencia de la atenuación [23] y la intensidad de lluvia excedida el 0,01% del tiempo $R_{0,01}$ (mm/h). Podemos asociar R_{th} con el umbral de atenuación, A , mediante el modelo de atenuación de lluvia de la UIT-R [23].

$$P(d > D/a > A) = \alpha_1 e^{-D/\beta_1} + \alpha_2 e^{-D/\beta_2} + \alpha_3 e^{-D/\beta_3} \quad (3.42)$$

$$\alpha_1 = 9,44 \cdot 10^{-1} - 8,64 \cdot 10^{-3} R_{th} + 1,38 \cdot 10^{-11} M^3 \quad (3.43)$$

$$\alpha_2 = 1,39 \cdot 10^{-1} - 1,12 \cdot 10^{-1} 10^{-\frac{L_s}{20}} - 7,84 \cdot 10^{-12} M^3 \quad (3.44)$$

$$\alpha_3 = 1 - \alpha_1 - \alpha_2 \quad (3.45)$$

$$\beta_1 = 3,52 - 2,08 \cdot 10^{-2} L_s - 7^2 \quad (3.46)$$

$$\beta_2 = 2,99 \cdot 10^{-2} - 8,46 \cdot 10 \cdot \ln 1/\beta \quad (3.47)$$

$$\beta_3 = -2,52 \cdot 10 + 1,53 \cdot 10^3 \cdot 10^{\frac{L_s}{20}} + 2,85 \cdot 10^3 e^{-\frac{1}{\beta}} - 1,53 \cdot 10^8 e^{-R_{0,01}} \quad (3.48)$$

Este modelo no es válido cuando los parámetros $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \alpha_3$ o β_3 , son negativos. Los diferentes casos en los que esto ocurre son:

α_1 es negativo cuando

$$R_{th} \leq 1,65 \cdot 10^{-15} M^3 - 1,13 \cdot 10^{-4} \quad (3.49)$$

α_2 es negativo cuando M es mayor que 2608 mm o cuando

$$L_s \geq -\log 7,00 \cdot 10^{-11} M^3 - 1,24 \quad (3.50)$$

α_3 es negativo si $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$

β_1 es negativo si $L_s > 20 \text{ dB}$

β_2 es negativo si $\beta < 0,029$

β_3 determina el valor mínimo de $R_{0,01}$ en función de L_s y β . Si tomamos $L_s = 0$ y $\beta = 1$, entonces $R_{0,01}$ debe ser superior a 8,37 mm/h.

Localización	Vancouv er	Ottawa	Norman	Reston	Tampa
Latitud	49,3°N	45,6°N	35,2°N	39,0°N	28,1°N
Longitud	123,2°O	75,6°O	97,4°O	77,3°O	82,4°O
Ángulo de elevación	29,3°	32,2°	49,1°	39,2°	52°
Altitud (m)	110	70	420	80	50
Intensidad de lluvia 0,01%	13 mm/h	37 mm/h	71 mm/h	59 mm/h	83 mm/h
Lluvia caída anual M(mm)	1181	800	831	916	1277
Ratio de tormentas β	0,09	0,15	0,35	0,28	0,73

Tabla 3.3 Características de los enclaves del experimento

3.2.9 Modelo de Cheffena-Amaya

En 2008 se publicó el modelo de Cheffena y Amaya que permite calcular la probabilidad de ocurrencia de un desvanecimiento de duración d mayor que D segundos, siendo la atenuación mayor que un valor dado A (dB), es decir $P(d > D | a > A)$. [52].

Sólo se emplearon los datos de la señal de baliza sin filtrar para el desarrollo y pruebas del nuevo modelo. En la siguiente tabla se muestra la base de datos. Puede observarse que cubre las bandas Ku, Ka y Q/V, ángulos de elevación comprendidos entre 14° y 89° y distintas condiciones climáticas. Sólo aquellas sedes con distribuciones más estables (aquellas de las que se disponía de un período de medición mayor, así como de un mayor número de desvanecimientos) se emplearon en el desarrollo del nuevo modelo. Sin embargo, se emplearon los datos de todas las sedes en la fase de pruebas y comparación de los distintos modelos.

La duración de los desvanecimientos se expresa mediante:

$$P(d > D | a > A) = \alpha \frac{Q\left(\frac{\ln D}{\sigma_s} \frac{m_s}{\sigma_s}\right)}{Q\left(\frac{\ln 1}{\sigma_s} \frac{m_s}{\sigma_s}\right)} + (1 - \alpha) \frac{Q\left(\frac{\ln D}{\sigma_r} \frac{m_r}{\sigma_r}\right)}{Q\left(\frac{\ln 1}{\sigma_r} \frac{m_r}{\sigma_r}\right)} \quad (3.51)$$

Siendo D mayor o igual que 1 segundo, y Q la función de distribución acumulada de una variable que sigue una distribución normal, definida como:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^\infty \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) dx \quad (3.52)$$

Los parámetros m_s y σ_s corresponden, respectivamente, a la media y la desviación típica de la primera función lognormal que describe la duración de los desvanecimientos debidos al centelleo, mientras que, análogamente, m_r y σ_r , corresponden a la media y la desviación típica de la segunda función lognormal que describe la fracción de desvanecimientos asociados a cada función lognormal.

La expresión para el parámetro α es:

$$\alpha = 0.8881 - 0.3168\beta^3 + 0.1636\exp\left(-\frac{A}{2.61}\right) \quad (3.53)$$

Siendo A el umbral de atenuación en dB y β el parámetro de lluvia conectiva. Para obtener el valor de β se empleó la Recomendación 837 del UIT-R.

Las expresiones de la media y la desviación típica de la primera función lognormal (m_s y σ_s , respectivamente) son:

$$m_s = 0.3636 - 2.0411 \cdot 10^{-6} f^3 + 11117 \exp(-\varepsilon) \quad (3.54)$$

$$\sigma_s = 1.6462 + 29.8038 \exp\left(-\frac{f}{3.5}\right) - 1.3671 \cdot 10^{-6} A^3 \quad (3.55)$$

Siendo f la frecuencia, comprendida entre 10 y 50 GHz, y ε el ángulo de elevación (Entre 5° y 90°).

De forma similar, las expresiones para la media y desviación típica de la segunda función lognormal (m_r y σ_r , respectivamente), son las siguientes:

$$m_r = 686.59 - 173.51 \log(f) \quad (3.56)$$

$$\sigma_r = 0.6210 + 4.3516 \cdot 10^{-3} f^{1.5} + 3.3637 A^{-2} \quad (3.57)$$

Asimismo, se obtuvo una expresión que permite calcular el número medio de desvanecimientos anual:

$$N = 17.92 + 22.02 f^{2.2} \exp\left(-\frac{A}{2.61}\right) \quad (3.58)$$

3.2.10 Modelo estocástico dinámico de la atenuación por lluvia de Masseng y Bakken

En el año de 1981 Masseng y Bakken presentaron un modelo dinámico estocástico de atenuación por lluvia [44], mediante el cual, transformando la atenuación por lluvia en

un proceso de Markov estacionario de tipo Ornstein-Uhlenbeck [45], es posible determinar la autocorrelación de la atenuación, las estadísticas de las duraciones de los desvanecimientos o la densidad de probabilidad de las transiciones entre niveles de atenuación únicamente con tres parámetros. El modelo fue comparado con resultados experimentales y parámetros conocidos de lluvia para demostrar la viabilidad del modelo con un resultado satisfactorio.

Fundamento teórico del modelo

Las propiedades dinámicas de la lluvia sugieren un modelado basado en un proceso de Markov de primer orden. Este modelo no tiene en cuenta la transición entre periodos de lluvia y de cielo claro, por lo que los límites se consideran reflexivos. La ecuación de una fluctuación estacionaria es [46]:

$$d\alpha(t) = K_{1\alpha} \alpha dt + dW_\alpha(\alpha) \quad (3.59)$$

Donde $W_\alpha(\alpha)$ es un proceso de incremento independiente tal que:

$$E dW_\alpha | \alpha = 0 \quad (3.60)$$

$$E dW_\alpha^2 | \alpha = K_{2\alpha} \alpha dt \quad (3.61)$$

Donde $K_{1\alpha}$ y $K_{2\alpha}$ son funciones determinísticas que corresponden a los dos primeros momentos condicionales de α .

$$K_{n\alpha} \alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} E [\alpha(t + \Delta t) - \alpha(t)]^n | \alpha(t) \quad (3.62)$$

La función densidad de probabilidad $p(\alpha, t)$ está relacionada con estos momentos por la ecuación de Fokker-Planck [46]:

$$\frac{\partial p(\alpha, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} K_{2\alpha} \alpha p(\alpha, t) - \frac{\partial}{\partial \alpha} K_{1\alpha} \alpha p(\alpha, t) \quad (3.63)$$

Como la distribución de probabilidades estacionaria de la atenuación α (dB) es lognormal únicamente es necesario conocer unos de los dos momentos. No se ha encontrado solución para todas las clases de ecuaciones dinámicas de Fokker-Planck, por eso Messeng y Bakken optaron por el momento de orden dos. La variación de la atenuación en el tiempo, es proporcional al valor de la atenuación, por lo que se puede concluir que:

$$K_{2\alpha} \alpha = 2\beta\alpha^2\sigma_\alpha^2 \quad (3.64)$$

Donde α es la atenuación en dB, σ_α es la desviación típica del logaritmo de la atenuación y β es un parámetro que describe la tasa de variación de la atenuación.

El valor de $K_{2\alpha} \alpha$ expuesto en (3.64) implica que:

$$K_{1\alpha} \alpha = \alpha\beta \sigma_\alpha^2 - \ln \frac{\alpha}{\alpha_m} \quad (3.65)$$

Donde σ_m es la atenuación media.

La elección del valor del momento de orden dos permite realizar una transformación de la ecuación (3.59) en una ecuación del tipo Ornstein-Uhlenbeck.

Si

$$x = \frac{\ln \frac{\alpha(t)}{\alpha_m}}{\sigma_\alpha} \quad (3.66)$$

Entonces

$$dx = -\beta x dt + dW_x(x) \quad (3.67)$$

$$E dW_x | x = 0 \quad (3.68)$$

$$E dW_x |^2 | x = 2\beta dt \quad (3.69)$$

La solución dinámica completa de (3.67) es conocida y resulta ser un proceso de Markov de primer orden estacionario y normal. Si se sustituye (3.64) en un proceso de Ornstein-Uhlenbeck, la función densidad de probabilidad condicionada resulta ser:

$$P(\alpha(t + \Delta t) < \alpha(t) | \alpha(t) = \alpha_0) = \Delta(p_1(\alpha_0), p_2(\alpha_0); \alpha_0) \quad (3.70)$$

$$p_1(\alpha_0) = \alpha_m^{(1 - \exp(-\beta \Delta t))} \alpha_0^{\exp(-\beta \Delta t)} \quad (3.71)$$

$$p_2(\alpha_0) = \alpha_0^2 (1 - \exp(-2\beta \Delta t)) \quad (3.72)$$

3.3 Modelos de predicción de la pendiente de desvanecimientos

A continuación se describirán modelos de predicción de pendiente de desvanecimientos, que siguen las pautas establecidas por la UIT, es decir que emplean la función de densidad de probabilidad y función de probabilidad acumulada.

Algunos de estos son:

3.3.1 Modelo de Nelson y Stutzman

En 1996, Nelson y Stutzman [46] presentaron los resultados de medidas de un periodo de dos años de las balizas del satélite OLYMPUS a 12,5; 19,77 y 29,66 GHz con un ángulo de elevación de 14° en Blacksburg, Virginia (EE.UU.). Cada baliza, muestreada a 10Hz, disponía de un receptor individual con un radiómetro asociado a cada frecuencia. Mostraron medidas de pendientes de desvanecimientos en forma de

histograma, con celdas de 0,05 dB/s desde -0,2 a 0,2 para niveles de atenuación de 1, 3, 5, 10, 15 y 20 dB, pero su experimento midió en un intervalo de pendientes de desvanecimientos entre -1,25 y 1,25 dB/s y entre -8 dB y 39 dB de atenuación con pasos de 1 dB. Obtuvieron el siguiente modelo de la p.d.f. de la pendiente de los desvanecimientos, válido para umbrales de atenuación superiores a 3 dB y frecuencias entre 12 y 30 GHz. Si f es la frecuencia en GHz y A es la atenuación en dB

$$p_{CELDA} \xi/A = ae^{-b \xi} \quad \% \quad (3.73)$$

Si $12 \leq f \leq 20$ GHz

$$a = \frac{a_{20}-a_{12}}{20-12} f - 12 + a_{12} \quad (3.74)$$

$$b = \frac{b_{20}-b_{12}}{20-12} f - 12 + b_{12} \quad (3.75)$$

Si $20 \leq f \leq 30$ GHz

$$a = \frac{a_{30}-a_{20}}{30-20} f - 20 + a_{20} \quad (3.76)$$

$$b = \frac{b_{30}-b_{20}}{30-20} f - 20 + b_{20} \quad (3.77)$$

Donde

$$a_{12} = 52,93 \exp -1,45A + 0,07A^2 - 0,0013A^3 \quad (3.78)$$

$$a_{20} = 717,71 \exp -1,07A + 0,038A^2 - 0,00056A^3 \quad (3.79)$$

$$a_{30} = 404,22 \exp -1,05A + 0,063A^2 - 0,0018A^3 \quad (3.80)$$

$$b_{12} = -0,0315A^3 + 1,168A^2 - 14,94A + 72,72 \quad (3.81)$$

$$b_{20} = -0,0202A^3 - 0,3149A^2 - 3,105A + 61,62 \quad (3.82)$$

$$b_{30} = 0,0134A^3 - 0,2647A^2 - 1,178A + 47,82 \quad (3.83)$$

Si $p_{CELDA} \xi/A$ es el porcentaje de tiempo con atenuación A en la que la pendiente de desvanecimiento está centrada en ξ dB/s

$$p \xi/A = \frac{p_{CELDA} \xi/A}{100\% \times 0,05 \text{ dB/s}} = \frac{ae^{-b\xi}}{5} \quad (\text{dB/s})^{-1} \quad (3.84)$$

$$P \xi/A = \int_{\xi}^{\infty} \frac{ae^{-b\xi}}{5} dx \quad (3.85)$$

Si $\xi \leq 0 \text{ dB/s}$

$$P \xi/A = \int_{\xi}^{\infty} \frac{ae^{bx}}{5} dx = \frac{a}{5b} (2 - e^{b\xi}) \quad (3.86)$$

Si $\xi > 0 \text{ dB/s}$

$$P \xi/A = \int_{\xi}^{\infty} \frac{ae^{bx}}{5} dx + \int_0^{\xi} \frac{ae^{-bx}}{5} dx = \frac{a}{5b} e^{-b\xi} \quad (3.87)$$

Como debe cumplirse que

$$\lim_{\xi \rightarrow \infty} P \xi/A = 1 \quad (3.88)$$

Entonces

$$\frac{a}{b} = \frac{5}{2} \quad (3.89)$$

Con lo que se puede considerar un modelo derivado del propuesto por Nelson y Stutzman.

Si $\xi \leq 0$ dB/s

$$P \xi/A = \int_{\xi}^{\infty} \frac{ae^{bx}}{5} dx = 1 - \frac{e^{b\xi}}{2} \quad (3.90)$$

Si $\xi > 0$ dB/s

$$P \xi/A = \int_{\xi}^{\infty} \frac{ae^{bx}}{5} dx + \int_0^{\xi} \frac{ae^{-bx}}{5} dx = \frac{e^{-b\xi}}{2} \quad (3.91)$$

3.3.2 Modelo de Timothy, Ong y Choo

En el año 2000, Timothy, Ong y Choo [47] presentaron la función de probabilidad acumulada de la pendiente de los desvanecimientos a partir de medidas en Singapur de la baliza de 11,198 GHz de INTELSAT con un ángulo de elevación de 42,8°. La baliza fue procesada con pasos de 0,01 dB/s con una tasa de muestreo de 0,5 Hz y mostraron los resultados para umbrales de atenuación de 1, 5, 10, 15 y 20 dB. Presentaron un modelo ajustado a estas medidas, válido para pendientes de valor absoluto menor que 1 dB/s.

$$Si P' = P \quad \xi / A \quad (3.92)$$

$$\xi = a \ln 100P' + b \Leftrightarrow P' = \frac{e^{\frac{\xi-b}{a}}}{100} \quad (3.93)$$

$$Si 1 < A < 5,5 \text{ dB}$$

$$a = -0,0277, b = 0,0871$$

$$Si 5,5 < A < 10,5 \text{ dB}$$

$$a = -0,0424, b = 0,1784$$

$$Si 10,5 < A < 15,5 \text{ dB}$$

$$a = -0,0835, b = 0,2684$$

$$Si 15,5 < A < 20,5 \text{ dB}$$

$$a = -0,0726, b = 0,2806$$

$$Si A > 20,5 \text{ dB}$$

$$a = -0,1208, b = 0,5087$$

Este modelo describe las pendientes de los desvanecimientos mediante la probabilidad acumulada de que el valor absoluto de la pendiente supere ξ dB. Si expresamos este método mediante las funciones propuestas por la UIT debemos tener en cuenta que P'

es decreciente y que su dominio está comprendido entre 0 y ∞ dB/s. suponiendo que $p_{\xi/A}$ es continua y simétrica respecto a 0 dB/s, y que:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_{\xi/A} d\xi = 1 \quad (3.94)$$

$$P_{\xi/A} = \int_{-\infty}^{-\xi} p_{x/A} dx + \int_{\xi}^{\infty} p_{x/A} dx = 2 \int_{\xi}^{\infty} p_{x/A} dx = 2 \int_{-\infty}^{-\xi} p_{x/A} dx$$

$$p_{\xi/A} = -\frac{1}{200a} e^{\frac{\xi-b}{a}} \quad dB/s^{-1} \quad (3.95)$$

Si $\xi \leq 0$

$$P_{\xi/A} = \frac{e^{-\frac{b}{a}}}{200} (2 - e^{-\frac{\xi}{a}}) \quad (3.96)$$

Si $\xi > 0$

$$P_{\xi/A} = \frac{e^{\frac{\xi-b}{a}}}{200} \quad (3.97)$$

Como en el modelo anterior, debe cumplirse (3.88), de modo que:

$$-\frac{b}{a} = \ln 100$$

Si $\xi \leq 0$

$$P_{\xi}/A = 1 - \frac{e^{-\frac{\xi}{a}}}{2} \quad (3.98)$$

Si $\xi > 0$

$$P_{\xi}/A = \frac{e^{\frac{\xi}{a}}}{2} \quad (3.99)$$

3.3.3 Modelo de Kastamonitis, Gremont y Filip

En el año 2002 Kastamonitis, Gremont y Filip [48], compararon una versión del modelo de Van Kamp, anterior a la presentada en el año 2003 de medidas del satélite Intalsat a 19, 40 y 50 GHz en Spino d' Adda con una simulación basada en el modelo de la dinámica de la intensidad de lluvia de Maseng-Bakeng, y ajustaron el parámetro σ_{ξ} la desviación estándar de las pendientes. Este modelo dio resultados óptimos para frecuencias entre 20 y 50 GHz.

Si t_a es el tiempo de la ventana deslizante utilizada para filtrar el centelleo, f la frecuencia en GHz, y A es el nivel de atenuación en dB, entonces

$$\sigma_{\xi} = mA + b \quad (3.100)$$

$$m = m_1 f^2 + m_2 f + m_3 \quad (3.101)$$

$$b = b_1 f^2 + b_2 f + b_3 \quad (3.102)$$

$$m_1 = 4,0815 \cdot 10^{-9} t_a^2 - 6,1895 \cdot 10^{-7} t_a + 3,6185 \cdot 10^{-5} \quad (3.103)$$

$$m_2 = -2,8031 \cdot 10^{-7} t_a^2 - 4,1419 \cdot 10^{-5} t_a - 2,3493 \cdot 10^{-3} \quad (3.104)$$

$$m_3 = 5,2019 \cdot 10^{-6} t_a^2 - 7,4244 \cdot 10^{-4} t_a + 4,1965 \cdot 10^{-2} \quad (3.105)$$

$$b_1 = 2,7705 \cdot 10^{-8} t_a^2 - 2,9514 \cdot 10^{-6} t_a + 6,2089 \cdot 10^{-5} \quad (3.106)$$

$$b_2 = -1,6120 \cdot 10^{-6} t_a^2 + 1,6992 \cdot 10^{-4} t_a - 3,3220 \cdot 10^{-3} \quad (3.107)$$

$$b_3 = 0,3456 \cdot 10^{-5} t_a^2 - 2,4858 \cdot 10^{-3} t_a + 4,7571 \cdot 10^{-2} \quad (3.108)$$

3.3.4 Modelo de Sweeney y Bostian

En 1992 Dennis G. Sweeney y Charles W. Bostian, modelaron las pendientes de los desvanecimientos evaluando teóricamente el ratio de ocupación por lluvia de la primera zona de Fresnel [49]. El modelo demuestra que la pendiente de los desvanecimientos no depende únicamente de la intensidad de lluvia, y por tanto de la atenuación, sino que otros factores como la velocidad de las gotas de lluvia influyen ostensiblemente. La cantidad de agua que ocupa la primera zona de Fresnel determina la atenuación por lluvia, mientras que el ratio de ocupación determina la pendiente. De hecho, la pendiente máxima se alcanza cuando la razón de ocupación es del 50%, mientras que la atenuación máxima se alcanza cuando la primera zona de Fresnel está completamente llena de lluvia.

En un enlace entre dos antenas de alta ganancia la mayoría de la energía atraviesa la primera zona de Fresnel, que es el volumen formado por la revolución de un elipsoide. Si un volumen está ocupado por gotas de agua esféricas de diámetro d con una distribución uniforme N_d , entonces la tasa de ocupación del volumen es:

$$p_d = \frac{\pi}{6} N_d d^3 \quad (3.109)$$

La intensidad de lluvia R_d puede expresarse en función de p_d y de la velocidad de las gotas de lluvia v_d , tanto la velocidad de lluvia como la intensidad pueden estudiarse de manera vectorial para añadir su dirección

$$R_d = p_d v_d \quad mm/h \quad (3.110)$$

$$R_d = p_d v_d \quad mm/h \quad (3.111)$$

La atenuación A del trayecto es proporcional a la densidad de la lluvia. Para tener en cuenta las variaciones temporales y espaciales de la densidad de lluvia se integra la relación en todo el volumen.

$$A = k \lambda, d L p_d \quad dB \quad (3.112)$$

$$A = k \lambda, d \int_V p_d(x, y, z, t) dV \quad dB \quad (3.113)$$

Donde k depende de la longitud de onda, del diámetro de las gotas y de la constante dieléctrica del agua y L es la longitud del trayecto.

Si en la región de estudio no hay ninguna fuente o sumidero de lluvia entonces toda la lluvia que entra en el volumen sale de este, lo que se expresa mediante una ecuación de continuidad.

$$\nabla \cdot p_d v_d + \frac{\partial p_d}{\partial t} = 0 \quad (3.114)$$

Si se sustituye la ecuación (3.114) en (3.113) y posteriormente se aplica el teorema de la divergencia teniendo en cuenta la ecuación (3.111) se obtiene la siguiente expresión que describe la pendiente de la atenuación.

$$\frac{dA_d(t)}{dt} = k \lambda, d \frac{L}{V} \int_V -\nabla \cdot p_d v_d dV \quad dB/s \quad (3.115)$$

$$\frac{dA_d(t)}{dt} = k \lambda, d \frac{L}{V} \int_S -R \cdot N dA \quad dB/s \quad (3.116)$$

Donde S es la superficie de la primera zona de Fresnel, N es el vector normal a la superficie y A es el área de la proyección de la primera zona de Fresnel.

Simplificando la dirección de la lluvia de manera que sea perpendicular a la proyección de la primera zona de Fresnel se llega a la siguiente expresión de la pendiente de la atenuación

$$\frac{dA_d(t)}{dt} = k \lambda, d \frac{L}{V} R_s dA \quad dB/s \quad (3.117)$$

$$\frac{dA_d(t)}{dt} = 1,5k \lambda, d R \frac{b}{a} \left(1 - \frac{a-tv_d}{a} \right) \quad dB/s \quad (3.118)$$

Donde $a = \lambda L^{1/2}$ es el radio de la primera zona de fresnel, $b = L/2$ es la mitad de la longitud del trayecto, t el tiempo y v_d la velocidad de las gotas.

Dado que $k \lambda, d p_d$ es la atenuación específica, puede sustituirse la ecuación (26) en (3.118) para obtener

$$\frac{dA_d(t)}{dt} = 1,5 \cdot 10^{-3} (kR^\alpha) v_d \frac{b}{a} \left(1 - \frac{a-tv_d}{a} \right) \quad dB/s \quad (3.119)$$

Este modelo demuestra que la pendiente de los desvanecimientos tiene mayor dependencia de la velocidad que de la intensidad de la lluvia, pues los parámetros de α son cercanos a 1. Las gotas de lluvia de tamaño entre 0,05-0,7 cm tiene una velocidad de 2-9 m/s.

3.3.5 Modelo de Max Van de Kamp

Este modelo [53] [54] se basa en un experimento de propagación llevado a cabo en Eindhoven, Holanda, con el satélite Olympus, en las frecuencias de 12,5, 20 y 30 GHz. Se procedieron a analizar todos los eventos de atenuación registrados entre enero de 1991 y junio de 1992. Se produjeron 104 eventos de atenuación. La atenuación A existente durante los eventos (designada en ocasiones como ‘CPA’ en la bibliografía) fueron muestreadas a una frecuencia de 3 Hz, y promediadas durante 1 segundo.

Este modelo sirvió de base para elaborar el modelo de la UIT-R P.1623-1, es por esta razón para no reiterarlas se mostrarán en dicho modelo completo que se describe a continuación.

3.3.6 Método completo de predicción de la dinámica de los desvanecimientos Recomendación UIT-R P.1623-1

Este modelo [48] está basado en el de Van de Kamp que se comenta en el punto anterior.

3.3.6.1 Método de predicción de la duración del desvanecimiento

La duración de los desvanecimientos se puede describir mediante dos funciones de distribución acumulativa diferentes [50]:

1 $P(d > D|a > A)$, la probabilidad de aparición de desvanecimientos de duración d mayor que D (s) suponiendo que la atenuación a sea mayor que A (dB). Esta probabilidad puede calcularse a partir de la relación entre el número de desvanecimientos de duración mayor que D y el número total de desvanecimientos observados, suponiendo que se ha superado el umbral A .

2 $F(d > D|a > A)$, la probabilidad acumulativa de rebasamiento o, lo que es lo mismo, la fracción total (entre 0 y 1) del tiempo de desvanecimiento correspondiente a desvanecimientos de duración d mayor que D (s), suponiendo que la atenuación a sea mayor

que A (dB). Esta probabilidad puede calcularse a partir de la relación entre el tiempo de desvanecimiento total debido a desvanecimientos de duración mayor que D cuando se rebasa el umbral A y el tiempo total de rebasamiento del umbral.

Dado un periodo de referencia, el número de desvanecimientos de duración mayor que D se calcula multiplicando la probabilidad de aparición $P(d > D|a > A)$ por el número total de desvanecimientos que rebasan el umbral, $N_{tot}(A)$. De igual manera, el tiempo total de rebasamiento debido a fenómenos de desvanecimiento de duración mayor que D se calcula multiplicando la fracción de tiempo $F(d > D|a > A)$ por el tiempo total de rebasamiento del umbral, $T_{tot}(A)$.

El modelo de dos segmentos que aquí se describe está formado por una función de distribución lognormal para desvanecimientos de larga duración y una función potencial para desvanecimientos de corta duración. El límite entre desvanecimientos de corta y larga duración viene dado por la duración umbral D_t calculada en el modelo. El modelo potencial es aplicable a desvanecimientos de duración mayor que 1 s. Los de menor duración no contribuyen significativamente al tiempo de interrupción total.

A continuación se presenta el cálculo de los parámetros necesarios para el modelo y por último se define el modelo de dos segmentos para las dos funciones de distribución, a saber, la probabilidad de aparición P y la probabilidad de rebasamiento (o de fracción de tiempo) F .

Se prevé que el modelo servirá para duraciones mayores que 1 s.

Los parámetros necesarios para el modelo son los siguientes:

f : frecuencia (GHz): 10-50 GHz

φ : ángulo de elevación (grados): 5°-60°

A : umbral de atenuación (dB)

Los pasos para calcular la distribución de la duración de los desvanecimientos son los siguientes:

Paso 1: Calcular la duración media D_0 de la distribución lognormal de la fracción del tiempo de desvanecimiento debido a desvanecimientos de larga duración, suponiendo que la atenuación es mayor que A :

$$D_0 = 80 \varphi^{-0,4} f^{1,4} A^{-0,39} \quad \text{s} \quad (3.120)$$

Paso 2: Calcular la desviación típica σ de la distribución lognormal de la fracción de tiempo de desvanecimiento debido a desvanecimientos de larga duración:

$$\sigma = 1,85 f^{-0,05} A^{-0,027} \quad (3.121)$$

Paso 3: Calcular el exponente γ de la distribución potencial de la fracción del tiempo de desvanecimiento debido a desvanecimientos de corta duración:

$$\gamma = 0,055 f^{0,65} A^{-0,003} \quad (3.122)$$

Paso 4: Calcular el límite entre las duraciones de desvanecimiento cortas y largas, D_t :

$$D_t = D_0 e^{p_1 \sigma^2 + p_2 \sigma - 0,39} \quad \text{s} \quad (3.123)$$

donde:

$$p_1 = 0,885\gamma - 0,814 \quad (3.124)$$

$$p_2 = -1,05\gamma^2 + 2,23\gamma - 1,61 \quad (3.125)$$

Paso 5: Calcular la duración media D_2 de la distribución lognormal de la probabilidad de aparición de fenómenos de desvanecimiento de larga duración:

$$D_2 = D_0 \cdot e^{-\sigma^2} \quad \text{s} \quad (3.126)$$

Paso 6: Calcular la fracción de tiempo k debido a desvanecimientos de duración inferior a D_t :

$$k = \left[1 + \frac{\sqrt{D_0 D_2} (1 - \gamma) Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}{D_t^\gamma Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)} \right]^{-1} \quad (3.127)$$

donde:

Q : función de distribución acumulativa típica para una variable con distribución normal:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^\infty e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (3.128)$$

Paso 7: Calcular la probabilidad de aparición de fenómenos de desvanecimiento de duración d mayor que D , suponiendo que la atenuación a sea mayor que A :

$$\text{Para } 1 \leq D \leq D_t \quad P(d > D | a > A) = D^{-\gamma} \quad (3.129)$$

$$\text{Para } D > D_t \quad P(d > D | a > A) = D_t^{-\gamma} \cdot \frac{Q\left(\frac{\ln(D) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)}{Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_2)}{\sigma}\right)} \quad (3.130)$$

Paso 8: Calcular la probabilidad de rebasamiento acumulativa; es decir, la fracción total del tiempo de desvanecimiento debido a desvanecimientos de duración d mayor que D :

$$\text{Para } 1 \leq D \leq D_t \quad F(d > D | a > A) = \left[1 - k \left(\frac{D}{D_t} \right)^{1-\gamma} \right] \quad (3.131)$$

$$\text{Para } D > D_t \quad F(d > D|a > A) = (1 - k) \cdot \frac{Q\left(\frac{\ln(D) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)}{Q\left(\frac{\ln(D_t) - \ln(D_0)}{\sigma}\right)} \quad (3.132)$$

Paso 9: Cuando sea necesario, se puede calcular el número total de desvanecimientos de duración d mayor que D para un determinado umbral A , mediante la expresión:

$$N(D,A) = P(d > D|a > A) \times N_{tot}(A) \quad (3.133)$$

De igual manera, el tiempo de desvanecimiento total debido a desvanecimientos de duración d mayor que D correspondiente al umbral A es:

$$T(d > D|a > A) = F(d > D|a > A) \times T_{tot}(A) \quad \text{s} \quad (3.134)$$

Para el periodo de referencia de interés, donde $T_{tot}(A)$ es el tiempo total durante el cual se rebasa el umbral A y $N_{tot}(A)$ es el número total de desvanecimientos de duración mayor que la mínima, de 1 s. Estos parámetros pueden obtenerse del modo siguiente:

$T_{tot}(A)$ se determina a partir de los datos locales. Si no se dispone de estadísticas de larga duración, se puede hacer una estimación como se describe en la Recomendación UIT-R P.618. El procedimiento consiste en calcular la función de distribución acumulativa de la atenuación total, determinando el porcentaje de tiempo durante el cual se supera el umbral de atenuación A en cuestión y seguidamente el tiempo de rebasamiento total $T_{tot}(A)$ para el periodo de referencia considerado.

Una vez obtenido $T_{tot}(A)$, puede calcularse $N_{tot}(A)$ mediante la expresión:

$$N_{tot}(A) = T_{tot}(A) \cdot \frac{k}{\gamma} \cdot \frac{1-\gamma}{D_t^{1-\gamma}} \quad (3.135)$$

El método anterior se aplicó a la base de datos de duración del desvanecimiento de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones, para frecuencias entre 11 y 50 GHz y para ángulos de elevación entre 6° y 60°. La media aritmética del error logarítmico (relación entre la duración del desvanecimiento calculada y medida para un mismo nivel de probabilidad) se estimó en el 30% para desvanecimientos de duración inferior a 10 s y entre el -25% y el -80% para los de duración mayor que 10 s. En lo que respecta a la desviación típica, se estimó una variación entre el 80% y el 150%, lo que demuestra el carácter altamente variable de este parámetro.

3.3.6.2 Método de predicción de la pendiente de los desvanecimientos

La distribución de la pendiente del desvanecimiento calculada es función del nivel de atenuación $A(t)$ y de la duración del intervalo Δt . Además, la distribución depende de la frecuencia de corte a 3 dB del filtro de paso bajo que se utiliza para eliminar de la señal el centelleo troposférico y las variaciones rápidas de la atenuación debida a la lluvia [50]. Los resultados experimentales demuestran que una frecuencia de corte a 3 dB de 0,02 Hz es suficiente para filtrar adecuadamente el centelleo y las variaciones rápidas de la atenuación debida a la lluvia. Si no se filtran, la señal presentará mayores fluctuaciones y el modelo sólo servirá para predecir los desvanecimientos correspondientes a la atenuación debido a la lluvia. En este caso, la frecuencia de corte necesaria es igual a la frecuencia de muestreo.

En el modelo, la pendiente del desvanecimiento ζ en un determinado instante se define a partir de los datos filtrados:

$$\zeta(t) = \frac{A\left(t + \frac{1}{2} \Delta t\right) - A\left(t - \frac{1}{2} \Delta t\right)}{\Delta t} \quad \text{dB/s} \quad (3.136)$$

El modelo es válido para las siguientes gamas de parámetros:

- frecuencias entre 10 y 30 GHz.
- ángulos de elevación entre 10° y 50°.

Los parámetros necesarios para el modelo son los siguientes:

A : nivel de atenuación (dB): 0-20 dB.

f_B : frecuencia de corte a 3 dB del filtro paso bajo (Hz): 0,001-1 Hz.

Δt : duración del intervalo de tiempo sobre el que se calcula la pendiente del desvanecimiento: 2-200 s.

Los pasos para calcular la distribución de la pendiente de los desvanecimientos son los siguientes:

Paso 1: Se calcula la función F que define la dependencia con la duración del intervalo de tiempo Δt y con la frecuencia de corte a 3 dB del filtro de paso bajo f_B :

$$F(f_B, \Delta t) = \sqrt{\frac{2\pi^2}{\left(1/f_B^b + (2\Delta t)^b\right)^{1/b}}} \quad (3.137)$$

con $b = 2,3$.

Paso 2: Se calcula la desviación típica σ_ζ de la pendiente del desvanecimiento condicional para un determinado nivel de atenuación:

$$\sigma_\zeta = s F(f_B, \Delta t) A \quad \text{dB/s} \quad (3.138)$$

siendo s un parámetro que depende del clima y del ángulo de elevación; el valor medio general en Europa y Estados Unidos de América, para ángulos de elevación entre 10° y 50°, es $s = 0,01$.

Paso 3a: Se calcula la probabilidad condicional $p(\zeta|A)$ (función densidad de probabilidad) de que la pendiente del desvanecimiento sea igual a ζ para un determinado valor de la atenuación, A :

$$p(\zeta/A) = \frac{2}{\pi \sigma_\zeta (1 + (\zeta/\sigma_\zeta)^2)^2} \quad (3.139)$$

Paso 3b: Cuando sea necesario, se calcula la probabilidad condicional $P(\zeta|A)$ (Función distribución acumulativa complementaria) de sobrepasar la pendiente del desvanecimiento para un determinado valor de la atenuación, A :

$$P(\zeta|A) = \frac{1}{2} - \frac{(\zeta/\sigma_\zeta)}{\pi(1 + (\zeta/\sigma_\zeta)^2)} - \frac{\text{arctg}(\zeta/\sigma_\zeta)}{\pi} \quad (3.140)$$

o se calcula la probabilidad condicional $P(|\zeta|/A)$ de sobrepasar el valor absoluto de la pendiente del desvanecimiento ζ para un determinado valor de la atenuación, A :

$$P(|\zeta|/A) = \int_{-\infty}^{-\zeta} p(x/A) dx + \int_{\zeta}^{\infty} p(x/A) dx = 1 - \frac{2 \arctg(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi(1 + (|\zeta|/\sigma_\zeta)^2)} - \frac{2 \arctg(|\zeta|/\sigma_\zeta)}{\pi} \quad (3.141)$$

El modelo de la ecuación (3.141) se comprobó con datos entre 12,5 GHz y 50 GHz. Los resultados muestran un buen ajuste con la curva de la distribución acumulativa de la pendiente de los desvanecimientos y con su variación con el umbral de atenuación A , la duración del intervalo Δt y la frecuencia de corte a 3 dB del filtro paso bajo, f_B .

CAPÍTULO 4 : PROPAGACIÓN EN ENLACES TERRENALES

4.1 Introducción

Si bien es cierto, los fenómenos que se producen en la atmósfera y que contribuyen a la atenuación en un enlace satelital, varían para el caso de un enlace terrenal, es el caso más claro de las nubes y la lluvia, para el caso de la primera, es difícil o no es usual en condiciones normales encontrarse con nubes en el trayecto de un enlace terrenal a no ser que dicho enlace se produzca en zonas que se encuentren a una altitud importante; y para el caso de la lluvia se utiliza el modelo de la UIT y otros compatibles con este último, modelos que se comentarán más adelante [55] [56] .

Para el caso de la atenuación de segundo orden por lluvia, se encontraron pocas publicaciones al respecto, pero en este capítulo se reseñara una comparándolo con datos experimentales.

4.2 Atenuación por gases

Para frecuencias superiores a unos 10 GHz siempre está presente una cierta atenuación debido a la absorción del oxígeno y del vapor de agua, por lo que debe incluirse en el cálculo de la pérdida total de propagación. La atenuación a lo largo de un trayecto de longitud d (km) viene dada por:

$$A_a = \gamma_a d \quad \text{dB} \quad (4.1)$$

La atenuación específica γ_a (dB/km) se obtiene de la Recomendación UIT-R P.676.

En el caso de trayectos largos para frecuencias superiores a unos 20 GHz, puede ser conveniente tener en cuenta las estadísticas conocidas sobre la densidad del vapor de agua y la temperatura en las proximidades del trayecto. En la Recomendación UIT-R P.836 [6] aparece información sobre la densidad del vapor de agua.

Una mayor descripción se encuentra en el apartado 2.2 del presente trabajo.

4.3 Modelos de atenuación por lluvia

A continuación se presentan seis modelos de atenuación de lluvia de primer orden específicamente para enlaces terrenales, todos ellos compatibles con las recomendaciones de la UIT.

4.3.1 Modelo de Crane

Para poder utilizar el modelo de Crane [57], se debe empezar determinando el modelo climático correspondiente a las zonas geográficas objeto de análisis así como la distribución de la intensidad de lluvia adecuada, esto se observa en la siguiente tabla, que describe la intensidad de lluvia por regiones o zonas.

Percent of Year	Rain Climate Region									
	A	B	C	D ₁	D ₂	D ₃	E	F	G	H
0.001	28	54	80	90	102	127	164	66	129	251
0.002	24	40	62	72	86	107	144	51	109	220
0.005	19	26	41	50	64	81	117	34	85	178
0.01	15	19	28	37	49	63	98	23	67	147
0.02	12	14	18	27	35	48	77	14	51	115
0.05	8.0	9.5	11	16	22	31	52	8.0	33	77
0.1	5.5	6.8	7.2	11	15	22	35	5.5	22	51
0.2	4.0	4.8	4.8	7.5	9.5	14	21	3.2	14	31
0.5	2.5	2.7	2.8	4.0	5.2	7.0	8.5	1.2	7.0	13
1.0	1.7	1.8	1.9	2.2	3.0	4.0	4.0	0.8	3.7	6.4
2.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.8	2.5	2.0	0.4	1.6	2.8
Number of Station Years of Data	0	25	44	15	99	18	12	20	2	11

Tabla 4.1 Distribución de lluvia por regiones [57]

El siguiente paso es el cálculo de la longitud del trayecto horizontal, L.

Si $L > 22.5 \text{ Km}$ y un nuevo valor de intensidad de lluvia R'_p , corresponde al porcentaje de tiempo modificado según la siguiente expresión:

$$p' = p \frac{L_0}{L} \quad (4.2)$$

A continuación debemos obtener valores de α_0 y β_0 para las frecuencias de interés. Estos valores se obtienen de la tabla 4.2:

PARAMETERS FOR COMPUTING SPECIFIC ATTENUATION
 $a = \alpha R_p^\beta$ (dB/km)

Frequency F - GHz	Multiplier α (F)	Exponent β (F)
1	0.00015	0.95
4	0.00080	1.17
5	0.00138	1.24
6	0.00250	1.28
7.5	0.00482	1.25
10	0.0125	1.18
12.5	0.0228	1.145
15	0.0357	1.12
17.5	0.0524	1.105
20	0.0699	1.10
25	0.113	1.09
30	0.170	1.075
35	0.242	1.04
40	0.325	0.99
50	0.485	0.90
60	0.650	0.84
70	0.780	0.79
80	0.875	0.753
90	0.935	0.730
100	0.965	0.715

Tabla 4.2 Valores de α y β para una determinada frecuencia. [57]

Con estos datos se procede a calcular la atenuación A, con la siguiente expresión:

$$\alpha \cdot R_p^\beta \cdot \left[\frac{e^{u \cdot \beta \cdot d} - 1}{u \cdot \beta} - \frac{b^\beta \cdot e^{c \cdot \beta \cdot d}}{c \cdot \beta} + \frac{b^\beta \cdot e^{c \cdot \beta \cdot D}}{c \cdot \beta} \right] \quad d \leq D \leq D_0$$

$$A(R_p, D) =$$

$$\alpha \cdot R_p^\beta \cdot \left[\frac{e^{u \cdot \beta \cdot D} - 1}{u \cdot \beta} \right] \quad 0 < D \leq d \quad (4.3)$$

Donde:

$$u = \frac{\ln[b \cdot e^{c \cdot d}]}{d} \quad (4.4)$$

$$b = 2,3 \cdot R_p^{-0,17} \quad (4.5)$$

$$c = 0,026 - 0,03 \cdot \ln R_p \quad (4.6)$$

$$d = 3,8 - 0,6 \cdot \ln R_p \quad (4.7)$$

4.3.2 Modelo de Pérez García y Silva Mello

Se trata de un método elaborado a partir de medidas experimentales realizadas en regiones tropicales unidas y ampliadas a una amplia base de datos referentes a zonas de clima templado [58].

Este modelo se basa en mejorar las predicciones de atenuación propuestas por la UIT para zonas tropicales-templadas.

Para esto se procede a calcular la atenuación específica, tal como en el caso de la UIT-R P530 [62], pero utilizando directamente el valor de precipitación correspondiente al porcentaje de tiempo de interés:

$$\gamma(p) = K \cdot R_p^\alpha$$

La atenuación total se obtiene multiplicando la atenuación específica por la longitud efectiva del trayecto, la ejecución de estos pasos implica la siguiente formulación:

$$r(p) = 3,44 \cdot d^{-0,164} \cdot R_p^{(-0,369+0,115/d)} \quad (4.8)$$

Este factor de distancia varia con la intensidad de lluvia y con la distancia del trayecto real, concretamente el factor de distancia decrece conforme aumentan estos parámetros.

Una vez despejado el factor de distancia, se calcula la distancia efectiva y la atenuación asociada a la misma:

$$d_{eff}(p) = r(p) \cdot d \quad (4.9)$$

$$A_p = \gamma(p) \cdot d_{eff}(p) \quad (4.10)$$

4.3.3 Modelo Crane de dos Componentes

Este modelo desarrollado por Crane [59], describe dos zonas que se comportan de manera diferente para el caso de la intensidad de lluvia, de manera de modelar de forma más ajustada a la realidad.

Este modelo trata de forma independiente la zona que presenta una intensidad de lluvia superior y denominada celda, y la zona circundante a esta y con una intensidad de lluvia inferior llamada “debris” y correspondiente a una zona circundante a la celda y caracterizada por lluvia de tipo estratiforme.

Este modelo asume que el trayecto del enlace solo atraviesa una celda, una debris o ambas, a pesar de que en una tormenta se suele disponer de varias de estas zonas.

El modelo trabaja con los volúmenes de las celdas y las debris, además supone que cada tormenta contiene volumen de celda y de debris.

El modelo está diseñado para calcular la probabilidad de que un valor de atenuación sea excedido. Se calcula la probabilidad asociada a cada una de las componentes y se suman de manera independiente para obtener la probabilidad estimada. Una de las dos componentes del proceso de lluvia, celda o debris, condicionará el valor de atenuación.

Para determinar la distribución de la intensidad de lluvia, se deben realizar dos suposiciones:

En el trayecto sólo se atraviesa una única celda.

La celda tiene simetría circular en la dirección horizontal y una variación gaussiana de la intensidad de lluvia cuyo valor máximo se encuentra en el centro de la celda.

El modelo establece que la función de la distribución de lluvia es función de la probabilidad con que se rebasa una determinada intensidad de lluvia (R). Esta probabilidad se calcula como la suma de las probabilidades asociadas al volumen de la celda y al volumen de la debris:

$$P(r \geq R) = P_c(r \geq R) + P_D(r \geq R) \quad (4.11)$$

$P_c(r \geq R)$ es la función de distribución de probabilidad para el volumen de la celda, definida como la probabilidad de que la intensidad de lluvia r supere la intensidad de lluvia R en la celda y que puede estimarse como:

$$P_c(r \geq R) = P_c \cdot e^{-R/R_c} \quad (4.12)$$

P_c es la probabilidad de una celda.

R_c es la media de la intensidad de lluvia de la celda.

$P_D(r \geq R)$ es la función de distribución de probabilidad para el volumen en la zona circundante de la celda, calculada como la probabilidad de rebasar la intensidad de lluvia R .

$$P_D(r \geq R) = P_D \cdot \eta \cdot \left(\frac{\ln R - \ln R_D}{\sigma_D} \right) \quad (4.13)$$

Donde:

P_D es la probabilidad de los *debris* y η es la función de distribución normal.

R_D es la media de la intensidad de lluvia de los *debris* y σ_D representa la desviación estándar del logaritmo de la intensidad de lluvia.

Al igual que el caso del modelo general de Crane, divide por zonas o regiones y a cada una de ellas le estima unos valores de intensidad de lluvia, que se muestran en la tabla 4.3:

El modelo propone el valor de los parámetros P_C , R_C , P_D , R_D , y σ_D correspondiente a cada región:

Rain Zone	Cell Parameters		Debris Parameters			R for $P(r \geq R) = 0.01\%$ (mm/h)
	P_c (%)	R_c (mm/h)	P_D (%)	R_D (mm/h)	σ_D	
A	0.009	11.3	3.0	0.20	1.34	10
B ₁	0.016	15.2	9.0	0.24	1.26	15
B	0.018	19.6	7.0	0.32	1.23	18
B ₂	0.019	23.9	7.0	0.40	1.19	22
C	0.023	24.8	9.0	0.43	1.15	26
D ₁	0.030	25.7	5.0	0.83	1.14	36
D ₂	0.037	27.8	5.0	1.08	1.19	49
D ₃	0.100	15.0	5.0	1.38	1.30	62
E	0.120	29.1	7.0	1.24	1.41	100
F	0.016	20.8	3.0	0.35	1.41	10
G	0.070	39.1	9.0	1.80	1.19	95
H	0.060	42.1	9.0	1.51	1.60	245

Tabla 4.3 Tabla de parámetros de entrada para las dos zonas del modelo de Crane de dos componentes[59]

Se calcula la intensidad de lluvia por medio de la siguiente expresión:

$$i = \int_0^D r(l) \cdot dl \quad (4.14)$$

$r(l)$ es el perfil de la intensidad de lluvia del enlace.

D es la longitud del enlace.

La intensidad de lluvia que tiene lugar en una celda se define de manera aproximada como:

$$I = \frac{R \cdot W_c}{C} \quad (4.15)$$

R es la máxima intensidad de lluvia en la celda.

W_c indica la dimensión media del volumen de la celda que tiene un área S_c . Puede expresarse como:

$$W_c = S_c^{1/2} \quad (4.16)$$

C es un factor de ajuste que surge de la propia definición del volumen de la celda.

$$C = \frac{1 + 0,7 \cdot (D - W_c)}{1 + (D - W_c)} \quad (D - W_c) > 0$$

$$C = 1 \quad (D - W_c) \leq 0 \quad (4.17)$$

La atenuación, en dB, en el enlace es:

$$a = \int_0^D k \cdot r(l)^{\alpha} \cdot dl \quad (4.18)$$

k y α son los coeficientes de la relación $\gamma = k \cdot R^{\alpha}$, donde γ es la atenuación específica.

Se pueden estimar por la Recomendación UIT-R P.838.

$r(l)$ es el perfil de la intensidad de lluvia del enlace.

D es la longitud del enlace.

Se puede aproximar la atenuación en el volumen de una celda como:

$$A \approx \frac{\gamma \cdot W_c}{C_a} = \frac{k}{C_a} \cdot R^{\alpha} \cdot W_c \quad (4.19)$$

En la que: $C_a = C$, y representa el factor de ajuste que representa la atenuación adicional presente fuera del volumen de la celda.

4.3.4 Modelo de García para enlaces terrenales

El modelo de Juan Antonio García [60], se utiliza con buenos resultados, de forma parecida salvo con unas variantes al modelo de la UIT.

A la hora de aplicar la longitud del vano a la atenuación específica, se aplica el siguiente coeficiente para tener en cuenta la extensión de las celdas de lluvia:

$$K_r = \frac{1}{a + [L \cdot (b \cdot R + c \cdot L + d)]e} \quad (4.20)$$

De forma que la atenuación final queda como:

$$A_R p = k \cdot R(p)^\alpha \cdot \frac{L}{a + L \cdot (b \cdot R + c \cdot L + d)/e} \quad (4.21)$$

Donde:

L es la longitud del enlace (Km).

P es el porcentaje de tiempo objeto de estudio.

a, b, c, d y e son coeficientes que varían según la región o zona climatológica y del tiempo de integración utilizado. Si se utiliza un tiempo de integración inferior a 1 minuto estos coeficientes dependerán únicamente de la zona climatológica.

Los parámetros descritos anteriormente se pueden obtener, de forma experimental, aplicando técnicas de regresión a valores obtenidos, para distintos vanos, de medidas simultáneas de atenuación e intensidad de lluvia. Por lo tanto, a medida que en una misma zona se incrementen el número de medidas experimentales de este tipo se podrá ir mejorando la precisión del modelo obteniendo coeficientes más fiables.

Los coeficientes específicos para Europa se muestran a continuación:

a= 0,82

b= 8,9

c= -10,3

d= 602

e= 10000

En [60] también se incluyen los coeficientes adecuados para el cálculo de atenuación en EE.UU. y Japón.

Cabe precisar que los valores de estos coeficientes datan de 1986. Como se ha dicho al aumentar el número de vanos utilizados para el cálculo de estos coeficientes se consigue mejorar la precisión del modelo, visto esto es de esperar que con los datos actuales se pudieran obtener unos coeficientes más precisos para un método que ya en su momento presento unos resultados bastante óptimos.

4.3.5 Modelo de Moupfouma

Debido al interés suscitado por las comunicaciones de radio SHF (de 3 a 30 GHz) y EHF (de 30 a 300 GHz), el modelo propuesto por Moupfouma [61], pretende caracterizar la atenuación debida a la lluvia para estas bandas de frecuencia en radioenlaces terrenales.

La mayoría de los modelos son empíricos o semiempíricos y su precisión se basa en la precisión de la distribución acumulada de intensidad de lluvia medida.

El nuevo enfoque propuesto en este modelo para la predicción de la atenuación por lluvia, se basa en el uso de la intensidad de lluvia excedida durante el 0,01% del tiempo ($R_{0,01}$) para un tiempo de integración de un minuto y para la localización bajo estudio. La $R_{0,01}$ para cualquier localización del mundo se puede obtener de la base de datos de la UIT. Por tanto, este modelo permite predecir el porcentaje de tiempo asociado a cualquier atenuación de lluvia dada y la atenuación relativa al 0,01% del tiempo.

Estimación de la atenuación de lluvia instantánea

La probabilidad de que se exceda una determinada atenuación de a (dB) originada por un evento de lluvia viene dada por:

$$P(A \geq a) = P(R \geq r) \quad (4.22)$$

R y r , en mm/h, son intensidades de lluvia excedidas durante el enlace.

A y a , en dB, son las atenuaciones debidas a las intensidades de lluvia R y r .

Así, se puede escribir el modelo de predicción de la atenuación por lluvia en un enlace terrenal SHF y EHF, como:

$$P_{A_p \geq a} = \frac{A_p + 1}{a + 1} \phi(a) \cdot \exp \left[\Lambda a \cdot A_p - a + \log_e P_{A_p} \right] \quad (4.23)$$

Donde:

P_{A_p} representa la fracción de tiempo del año medio en el que se excede la atenuación por lluvia $a = A_p$.

$$\phi(a) = \left(\frac{a - A_p}{A_p} \right) \cdot \ln \left(1 + \frac{a}{A_p} \right), \quad (4.24)$$

$$\text{Donde, } \lim_{a \rightarrow 0} \phi(a) = 0 \quad (4.25)$$

Para que este modelo de predicción sea consistente es necesario que los límites de probabilidad cumplan dos condiciones:

$$\lim_{a \rightarrow 0} P_{A_p \geq a} = 1$$

$$\lim_{a \rightarrow \infty} P_{A_p \geq a} = 0 \quad (4.26)$$

Asumiendo que se cumplen estas dos condiciones, y considerando, además, las ecuaciones (4.23) y (4.24), se tiene que:

$$\lim_{a \rightarrow 0} P_{A_p \geq a} = \exp \left[\Lambda 0 \cdot A_p + \log_e P_{A_p} \right] = 1 \quad (4.27)$$

Lo que supone:

$$\Lambda 0 \cdot A_p + \log_e P_{A_p} = 0 \quad (4.28)$$

$$\lim_{a \rightarrow 0} \Lambda a = \Lambda 0 = - \frac{\log_e P_{A_p}}{A_p} \quad (4.29)$$

Donde:

$\Lambda(a)$ representa la magnitud que describe la forma de la pendiente de la atenuación por lluvia, y puede ser definida para aplicaciones generales como:

$$\Lambda a = -\frac{\log_e P A_p}{A_p} \cdot \eta a \quad (4.30)$$

Donde $\eta(a)$ se define como:

$$\eta a = \frac{1}{1 + \tau \left(\frac{a}{A_p} \right)^v} \quad (4.31)$$

Y debe cumplir las siguientes ecuaciones:

$$\lim_{a \rightarrow 0} \eta a = 1$$

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \eta a = 1 \quad (4.32)$$

De este modo, a partir de las ecuaciones (4.25), (4.29) y (4.32), se obtiene que:

$$\lim_{a \rightarrow 0} P A \geq a = \exp \Lambda 0 \cdot A_p + \log_e P A_p = \exp 0 = 1 \quad (4.33)$$

$$\lim_{a \rightarrow \infty} P A_p \geq a = 0 \quad (4.34)$$

Por tanto, se cumplen las condiciones que se enunciaron para que el modelo de predicción se comportara de manera correcta.

Una vez comprobado esto, se puede definir la función de distribución de probabilidad acumulada, que se expresa de la siguiente manera:

$$F a = 1 - P A_p \geq a$$

$$F a = 0 \text{ para } a \leq 0 \quad (4.35)$$

De nuevo se debe cumplir que:

$$\lim_{a \rightarrow 0} F a = 1$$

$$\lim_{a \rightarrow \infty} F a = 0 \quad (4.36)$$

Aplicación del modelo para una intensidad de lluvia de $R_{0,01}$

Este nuevo modelo propuesto, determina la atenuación por lluvia a partir de una intensidad de lluvia de $R_{0,01}$ en mm/h. Para ello se define $A_{0,01}$, en dB, como la atenuación por lluvia ocasionada por una intensidad de lluvia excedida durante el 0,01% del tiempo, $R_{0,01}$.

Así, empleando las ecuaciones, (4.25) a la (4.32), se obtienen las siguientes relaciones:

$$P(A_{0,01} \geq a) = 100 \cdot \left(\frac{A_{0,01} + 1}{a + 1} \right)^{\phi(a)} \cdot \exp \left(- \log_e \left(0.4 \cdot \frac{\log_e(0.4)}{A_{0,01}} \cdot \eta(a) \cdot A_{0,01}^{-a} \right) \right) \quad (4.37)$$

O:

$$P(A_{0,01} \geq a) = 0,01 \cdot \left(\frac{A_{0,01} + 1}{a + 1} \right)^{\phi(a)} \cdot \exp \left(9,21 \cdot \left(1 - \frac{a}{A_{0,01}} \right) \cdot \eta(a) \right) \quad (4.38)$$

Donde:

$$\phi(a) = \left(\frac{a}{A_{0,01}} - 1 \right) \cdot \ln \left(1 + \frac{a}{A_{0,01}} \right) \quad (4.39)$$

$$\eta(a) = \frac{1}{1 + 2,75 \cdot \left(\frac{a}{A_{0,01}} \right)^{0,8}} \quad (4.40)$$

Se obtiene mediante la base de datos de la UIT-R.

Parametrización del modelo

A partir de la intensidad de lluvia excedida el 0,01% del tiempo, $R_{0,01}$, se puede estimar la atenuación específica por lluvia mediante la ecuación :

$$\gamma_{R_{0,01}} = k \cdot R_{0,01}^\alpha$$

Donde, k y α son parámetros que dependen de la frecuencia de trabajo del radioenlace.

La longitud real del enlace, L (Km) es la distancia entre antenas.

Se define una longitud equivalente del enlace, L_{eq} , que depende de la longitud real del enlace, y en donde se asume que, a lo largo de esta longitud, la estructura de la lluvia es uniforme.

De este modo se puede expresar la longitud equivalente del enlace como:

$$L_{eq} = L \cdot \delta \tag{4.41}$$

Donde δ es un factor que depende de la intensidad de lluvia $R_{0,01}$:

$$\delta_{R_{0,01}, L} = \exp\left(\frac{-R_{0,01}}{1 + \zeta_{R_{0,01}} R_{0,01}}\right) \tag{4.42}$$

Agrupando estas dos expresiones, se obtiene que:

$$L_{eq, R_{0,01}, L} = L \cdot \exp\left(\frac{-R_{0,01}}{1 + \zeta_{R_{0,01}} R_{0,01}}\right) \tag{4.43}$$

En un análisis de los resultados se ha comprobado que:

Cuando $R_{0,01} \rightarrow 0$: $L_{eq, R_{0,01}, L} \approx L$, para cualquier $\zeta_{R_{0,01}}$.

Cuando $R_{0,01} \rightarrow \infty$: $L_{eq, R_{0,01}, L} = L \cdot \exp\left(\frac{1}{\zeta}\right)$

Donde para lluvias de mucha intensidad (lluvias convectivas), se obtiene dos posibles resultados:

Si está lloviendo a lo largo de todo el trayecto, $\zeta(L) > 0 \rightarrow L_{eq} \leq L$.

Si la lluvia no se produce a lo largo de todo el enlace, $\zeta(L) < 0 \rightarrow L_{eq} > L$.

El artículo presenta una tabla en la que se proporciona el valor de $\zeta(L)$ para enlaces terrenales para diferentes zonas geográficas, longitudes reales del enlace, intensidades de lluvias $R_{0,01}$ y frecuencias. Se extraen las siguientes conclusiones:

Si $L \leq 7km$, $\zeta(L)$ es constante y no depende de la frecuencia, ni de la intensidad de lluvia $R_{0,01}$ ni de la longitud real del enlace.

$$\zeta(L) = -100$$

Si $L > 7km$, sí existe dependencia con L .

$$\zeta(L) = \frac{44,2}{L}^{0,78} \quad (4.44)$$

Por lo tanto, a partir de esta información, podemos definir la longitud equivalente del enlace como:

$$L_{eq}(R_{0,01}, L) = L \cdot \exp\left(\frac{-R_{0,01}}{1 + \zeta(L) \cdot R_{0,01}}\right), \text{ para } L \leq 7Km \text{ y } \zeta(L) = -100$$

$$L_{eq}(R_{0,01}, L) = L \cdot \exp\left(\frac{-R_{0,01}}{1 + \zeta(L) \cdot R_{0,01}}\right), \text{ para } L > 7Km \text{ y } \zeta(L) = \left(\frac{44,2}{L}\right)^{0,48}$$

(4.45)

A partir de la longitud equivalente del enlace (L_{eq}) y de la atenuación específica calculada en el primer paso (γ), se puede obtener la atenuación por lluvia excedida durante el 0,01% del tiempo en dB, mediante la siguiente ecuación:

$$A_{0,01} = \gamma_{R_{0,01}} \cdot L_{eq}$$

La atenuación para cualquier porcentaje de tiempo se calcula mediante las ecuaciones (4.37) a (4.40), a partir de la atenuación de lluvia para el 0,01% del tiempo, $A_{0,01}$.

4.3.6 Modelo de la UIT-R P.530-14

Para estimar las estadísticas de la atenuación debida a la lluvia a largo plazo puede utilizarse la siguiente técnica sencilla [62]:

Paso 1: Se obtiene la intensidad de precipitación $R_{0,01}$ superada durante el 0,01% del tiempo (con un tiempo de integración de 1 min). Si no se dispone de esta información a partir de las fuentes locales de medidas a largo plazo puede obtenerse una estimación utilizando la información que aparece en la Recomendación UIT-R P.837.

Paso 2: Se calcula la atenuación específica, γ_R (dB/km), para la frecuencia, polarización e intensidad de precipitación de interés, utilizando la Recomendación UIT-R P.838.

Paso 3: Se calcula la longitud efectiva del trayecto, d_{eff} , del enlace multiplicando la longitud del trayecto real, d , por un factor de distancia, r . Una estimación de este factor viene dada por:

$$r = \frac{1}{0.477 d^{0.633} R_{0.01}^{0.073 \cdot \alpha} f^{0.123} - 10.579(1 - \exp(-0.024d))} \quad (4.46)$$

Donde f (GHz) es la frecuencia y α es el exponente en el modelo de atenuación específica del paso 2. El máximo valor recomendado de r es 2.5 de tal manera que la ecuación (4.46) no es usada para valores pequeños del denominador dando valores mayores.

Paso 4: Una estimación de la atenuación del trayecto excedida durante el 0,01% del tiempo viene dada por:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = \gamma_R dr \quad \text{dB} \quad (4.47)$$

Paso 5: La atenuación excedida durante otros porcentajes de tiempo p en el rango de 0,001% a 1% puede deducirse de la siguiente ley potencial:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = C_1 p^{-C_2 + C_3 \log_{10} p} \quad (4.48)$$

$$\text{Con:} \quad C_1 = 0.07^{C_0} \cdot 12^{-C_0} \quad (4.49a)$$

$$C_2 = 0.855C_0 + 0.546(-C_0) \quad (4.49b)$$

$$C_3 = 0.139C_0 + 0.043(-C_0) \quad (4.49c)$$

Donde:

$$C_0 = \begin{cases} 0.12 + 0.4 \log_{10} (f/10)^{0.8} & f \geq 10 \text{ GHz} \\ 0.12 & f < 10 \text{ GHz} \end{cases} \quad (4.50)$$

Paso 6: Si se desean obtener las estadísticas relativas al mes más desfavorable, se calculan los porcentajes de tiempo anual, p , correspondientes a los porcentajes de tiempo del mes más desfavorable, p_w , mediante la información relativa al clima especificada en la Recomendación UIT-R P.841. Los valores de A rebasados durante los porcentajes de tiempo p anuales, serán superados para los correspondientes porcentajes de tiempo p_w de los meses más desfavorables.

El procedimiento de predicción indicado anteriormente se considera válido en todo el mundo, al menos para frecuencias de hasta 100 GHz y longitudes de trayecto de hasta 60 km.

4.4 Dinámica de desvanecimiento

Llegado a este punto, como se comentó al inicio de este capítulo, no se encuentra un modelo propiamente dicho, pero sí pruebas, mediciones e intento de caracterizar la dinámica de desvanecimientos, a continuación se presenta una publicación.

4.4.1 Estadística de la duración de los desvanecimientos (Cheffena)

El documento presenta varios años de medidas estadísticas de la duración de los desvanecimientos de cuatro enlaces terrestres con línea de vista, enlaces a 42,1 y 83,5 GHz en la región de Oslo, Noruega. Las medidas de las duraciones son comparadas con otros modelos. Se consigue caracterizar con las expresiones planteadas por su autor, dando buenos resultados para lluvia de larga duración, considerando también las de corta duración, un modelo basado en una distribución logarítmica normal doble, con este modelo se pudo dar un buen ajuste a los datos de duración de los desvanecimientos, lo que indica que la combinación de efectos, tales como la atenuación lluvia y el centelleo, debe tenerse en cuenta. Además, los resultados estadísticos del número de desvanecimientos de larga duración de 10 s se muestran en la figura 4.1 [63].

Localización	Distancia de enlace	Frecuencia (GHz)	Polarización
Ahus	5,6	42,1	Vertical
Raelingen(Rael)	4,9	42,2	Vertical
Lillestrom (Lil)	2,4	42,3	Vertical
Fornebu	3,45	83,5	Vertical

Tabla 4.4 Distancia y frecuencia de los 4 emplazamientos [63]

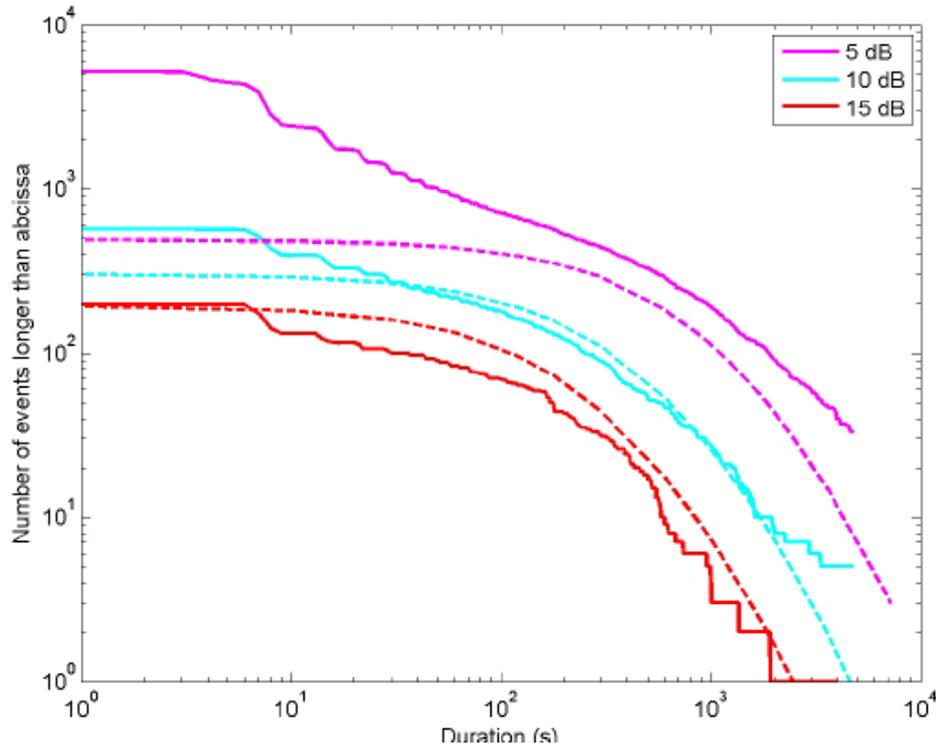


Figura 4.1 Comparación entre las medidas de la duración de desvanecimiento de la estación de Fornebu, las líneas continuas son las medidas y las punteadas las predicciones. [63]

Otro modelo, utilizado con éxito para enlaces por satélite es descrito por dos distribuciones logarítmicas normales, la probabilidad de duración T de desvanecimiento mayor que T_s , dado que la atenuación a es mayor que A dB es:

$$P(t \geq T | a > A) = \alpha \cdot \frac{Q\left(\frac{\ln(T/m_s)}{\sigma_s}\right)}{Q\left(\frac{\ln(T_{\min}/m_s)}{\sigma_s}\right)} + (1-\alpha) \cdot \frac{Q\left(\frac{\ln(T/m_r)}{\sigma_r}\right)}{Q\left(\frac{\ln(T_{\min}/m_r)}{\sigma_r}\right)} \quad (4.51)$$

Donde Q es la función de distribución acumulativa, para una distribución variable, se define:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) dx \quad (4.52)$$

En conclusión para estas pruebas se obtiene predicciones para desvanecimientos de larga duración bastante fiables y también para corta duración con atenuaciones por encima de 10 y 15 dB; subestimando los resultados para valores por debajo de 5 dB.

CAPÍTULO 5 : RESULTADOS DE LA DINÁMICA DE DESVANECIMIENTOS

5.1 Procesado previo

5.1.1 Descripción y ubicación del enlace

El Radioenlace digital terrenal de 38 GHz está constituido por un equipo transmisor y otro equipo receptor, separados una distancia de 840 m.

El transmisor se ubica en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (ETSICCP) de la Universidad Politécnica de Madrid. Se trata de una unidad íntegramente exterior y está formada por un número reducido de componentes.

La estación receptora se localiza en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT) de la Universidad Politécnica de Madrid. Presenta mayor complejidad ya que está compuesta por un mayor número de elementos y se estructura en dos partes: una unidad exterior (que es el cabezal de radiofrecuencia) y otra interior (conformada por los bloques de frecuencia intermedia y por el receptor)

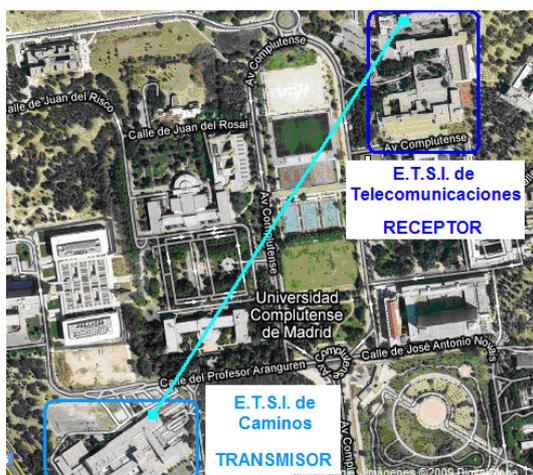


Figura 5.1 Vista aérea del radioenlace



Figura 5.2 Antena en la ETSICCP



Figura 5.3 Antena en la ETSIT

La caracterización del radioenlace de 38 GHz puede verse de una manera abreviada por la siguiente tabla.

Parámetro	Valor
Frecuencia de trabajo	38 GHz
Distancia entre transmisor y receptor	840 m
Potencia transmitida	10 dBm
Ganancia de las antenas	40 dB
Pérdidas en los terminales	1 dB
Tamaño de la antena	30 cm

Tabla 5.1 Parámetros del Radioenlace a 38 GHz

Para realizar el cálculo de las diversas funciones en los modelos de predicción, se utilizó un valor exacto de frecuencia que es de 37,06 GHz y un valor de ángulo de elevación de 2°, esto para no tener inconvenientes al emplear algunas fórmulas propuestas por dichos modelos.

5.1.2 Tratamiento de la información recopilada

A continuación se comentará sobre algunos pasos previos realizados para la obtención de los cuadros y gráficos que se presentarán, primero se trabajó y procesó la serie de tiempo de datos filtrados de las atenuaciones medidas durante un año, se hizo lo mismo con una segunda información de datos no filtrados que se tuvo que referenciar puesto que, se tenían los valores de medida de atenuación en dBm, los cuales fueron puestos a un nivel relativo de referencia de 0 (es decir cuando no hay atenuación debido a la lluvia), esta información es obtenida con la ayuda de un pluviómetro.

En la figura 5.4 se presenta los datos filtrados y no filtrados de un evento de lluvia de aproximadamente 1 hora, donde se notan algunas diferencias, como los cambios bruscos debido al centelleo.

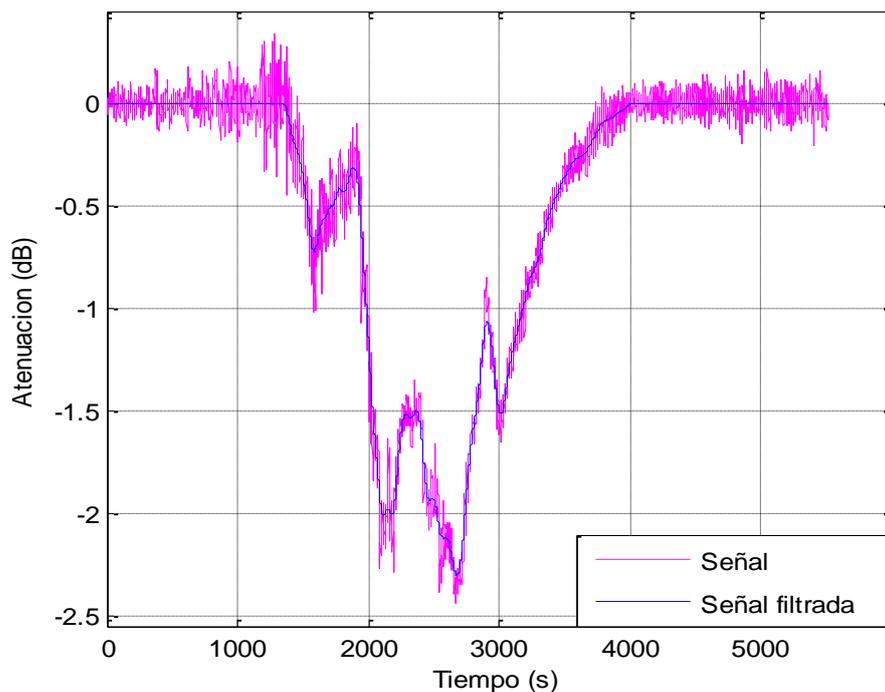


Figura 5.4 Evento de lluvia, datos filtrados y sin filtrar

5.2 Duración de los desvanecimientos

A continuación se presentarán, resultados y comparaciones de las duraciones de los desvanecimientos, teniendo en cuenta las funciones establecidas por la UIT, que son las siguientes:

$N(d>D|a>A)$: Número de desvanecimientos de duración d mayor que D (s) suponiendo que la atenuación a sea mayor que A (dB).

$P(d>D|a>A)$: Probabilidad de aparición de desvanecimientos de duración d mayor que D (s) suponiendo que la atenuación a sea mayor que A (dB).

$T(d>D|a>A)$: Tiempo total de los desvanecimientos de duración d mayor que D (s) suponiendo que la atenuación a sea mayor que A (dB).

$F(d>D|a>A)$: la probabilidad acumulativa de rebasamiento o, lo que es lo mismo, la fracción total (entre 0 y 1) del tiempo de desvanecimiento correspondiente a desvanecimientos de duración d mayor que D (s), suponiendo que la atenuación a sea mayor que A (dB).

Se observó que para el caso de los datos filtrados, no existían desvanecimientos cuya duración sea de un segundo, en este caso se aplicó la recomendaciones de la UIT, que establece funciones para duraciones mayores a un segundo.

Para el caso de los datos sin filtrar, se encontró un número importante de duraciones de un segundo, es por esta razón y para aprovechar la información que se encontraba en este proceso, se creyó conveniente considerarlos, de aquí en adelante todas las gráficas experimentales que se muestran para el caso de datos no filtrado, que es lo que recomienda utilizar la UIT, para estudiar las duraciones de los desvanecimientos estarán consideradas las duraciones de un segundo.

A continuación se muestran las respectivas estadísticas y gráficas de las funciones UIT para los datos experimentales y modelos de predicción para enlaces satelitales, de manera de tratar de explicar su comportamiento en un enlace terrenal y posteriormente sacar algunas conclusiones.

5.2.1 Número de desvanecimientos (datos filtrados)

	Duraciones (s)							
Atenuación(dB)	1	10	30	60	120	180	300	600
3	129	128	123	105	71	58	34	12

5	46	45	42	34	25	16	11	3
10	5	5	5	5	3	3	1	0
15	3	3	3	1	0	0	0	0

Tabla 5.2 $N(d > D | a > A)$ con datos experimentales filtrados

En la Tabla 5.2 se encuentran las estadísticas del número de desvanecimientos, por ejemplo para $d=30$ s y $A=5$ dB, existen 42 eventos de lluvia que superan los 30 s con atenuaciones mayores a 5 dB.

En la figura 5.5 se observa que el número de duraciones de los desvanecimientos se mantiene casi constante hasta los 30 s, efecto producido por el filtrado de datos; luego las curvas caen de forma abrupta para todos los casos, además como es obvio se observa que a medida que la atenuación aumenta son menores las duraciones que se obtienen para esos casos.

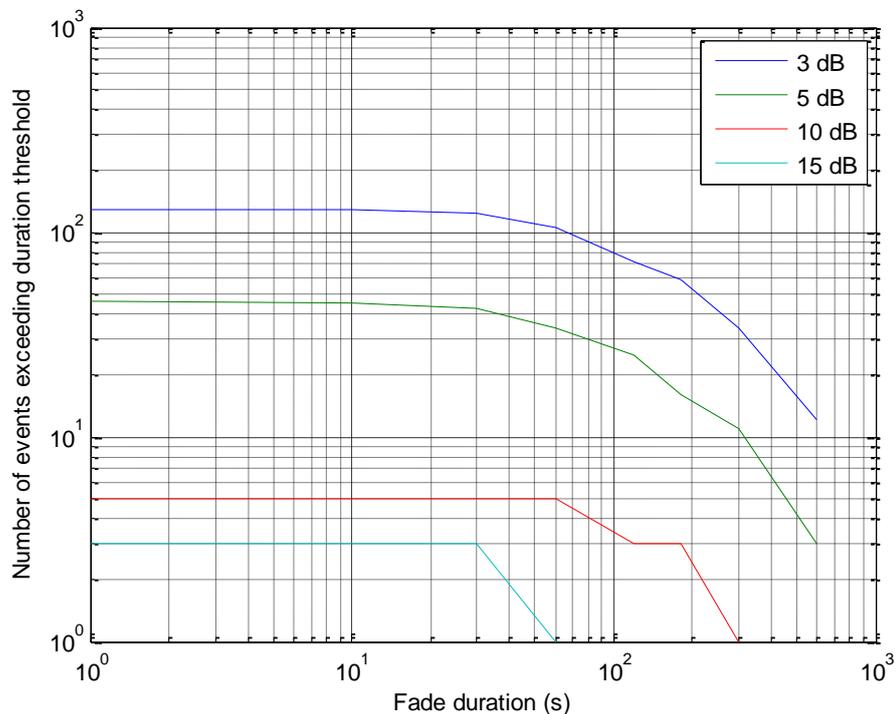


Figura 5.5 Gráfica de $N(d > D | a > A)$ con datos experimentales filtrados

5.2.2 Probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos (datos filtrados)

Atenuación(dB)	Duraciones (s)							
	1	10	30	60	120	180	300	600
3	100,00	99,22	95,35	81,40	55,04	44,96	26,36	9,30
5	100,00	97,83	91,30	73,91	54,35	34,78	23,91	6,52
10	100,00	100,00	100,00	100,00	60,00	60,00	20,00	0,00
15	100,00	100,00	100,00	33,33	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 5.3 $P(d>D|a>A)$ con datos experimentales filtrados

En la Tabla 5.3 se encuentran las estadísticas de la probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos (%), por ejemplo para $d=30$ s y $A=3$ dB; esto quiere decir que de los desvanecimientos mayores a 3 dB, el 95,35% tienen duraciones mayores a 30 s.

En la figura 5.6 se observa que la probabilidad de ocurrencia se mantiene casi constante para un mismo nivel de atenuación y duraciones menores a 30 s, además observamos que la curva de 15 dB a partir de 30 s cae de forma abrupta, demostrando que es poco probable encontrar duraciones mayores a esta.

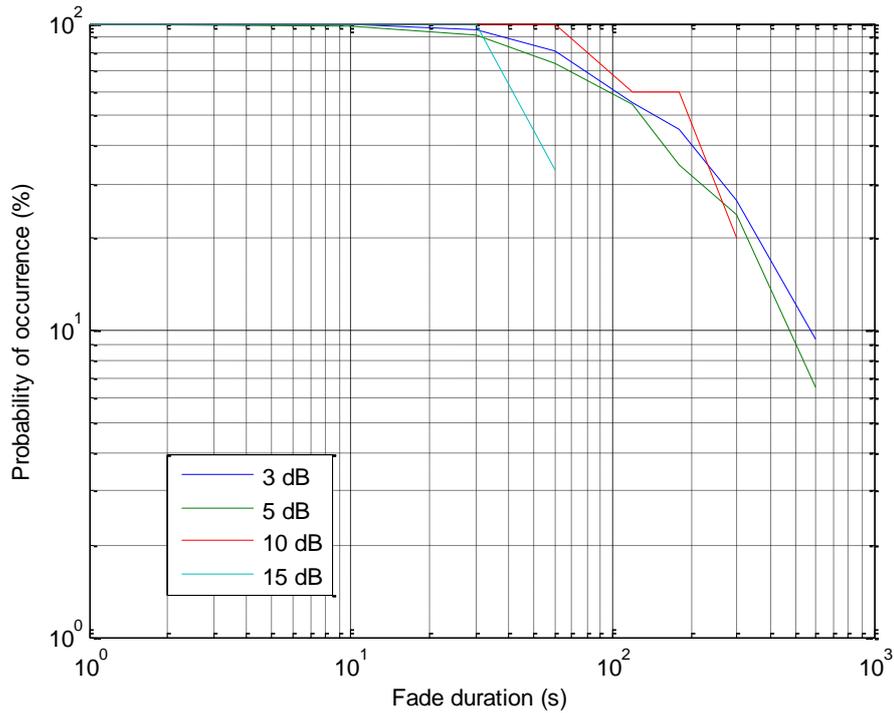


Figura 5.6 Gráfica de $P(d>D|a>A)$ con datos experimentales filtrados

5.2.3 Tiempo total de desvanecimientos (datos filtrados)

Atenuación(dB)	Duraciones (s)							
	1	10	30	60	120	180	300	600
3	35778	35773	35696	34832	31685	29785	24488	15527
5	10014	10004	9937	9591	8808	7506	6440	3299
10	1037	1037	1037	1037	864	864	448	0
15	186	186	186	68	0	0	0	0

Tabla 5.4 $T(d>D|a>A)$ con datos experimentales filtrados

En la Tabla 5.4 se encuentra el tiempo de rebasamiento, por ejemplo para $d=120$ s y $A=10$ dB, esto quiere decir que el tiempo total de las duraciones mayores a 120 s, que superan atenuaciones de 10 dB es 864 s.

En la figura 5.7, se observa que el tiempo de rebasamiento se mantiene constante hasta unos 200 s aproximadamente para atenuaciones de 3, 5 y 10 dB, mientras que para una

atenuación de 15 dB, solo es constante hasta unos 30 s; como se verá posteriormente este efecto no se debe al filtrado, sino que aparece también con los datos sin filtrar.

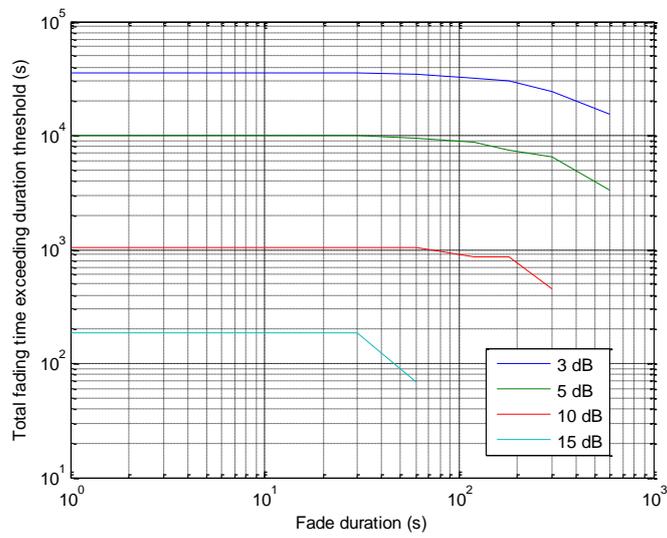


Figura 5.7 Gráfica de $T(d > D | a > A)$ con datos experimentales filtrados

5.2.4 Fracción de tiempo total de desvanecimientos (datos filtrados)

Atenuación(dB)	Duraciones (s)							
	1	10	30	60	120	180	300	600
3	100,00	99,99	99,77	97,36	88,56	83,25	68,44	43,40
5	100,00	99,90	99,23	95,78	87,96	74,96	64,31	32,94
10	100,00	100,00	100,00	100,00	83,32	83,32	43,20	0,00
15	100,00	100,00	100,00	36,56	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 5.5 $F(d>D|a>A)$ con datos experimentales filtrados

En la Tabla 5.5 se encuentran las estadísticas de la fracción de tiempo total del número de desvanecimientos (%), por ejemplo para $d=300$ s y $A=10$ dB, esto quiere decir que el tiempo total de las duraciones mayores a 300 s que superan un umbral de atenuación de 10 dB, representa el 43,20% del tiempo de todas las duraciones que superan el umbral de 10 dB.

En la figura 5.8 se observa que las fracciones de tiempo totales de 3, 5 y 10 dB se mantienen casi constantes hasta una duración de 200 s, mientras que la de 15 dB cae abruptamente en 30 s.

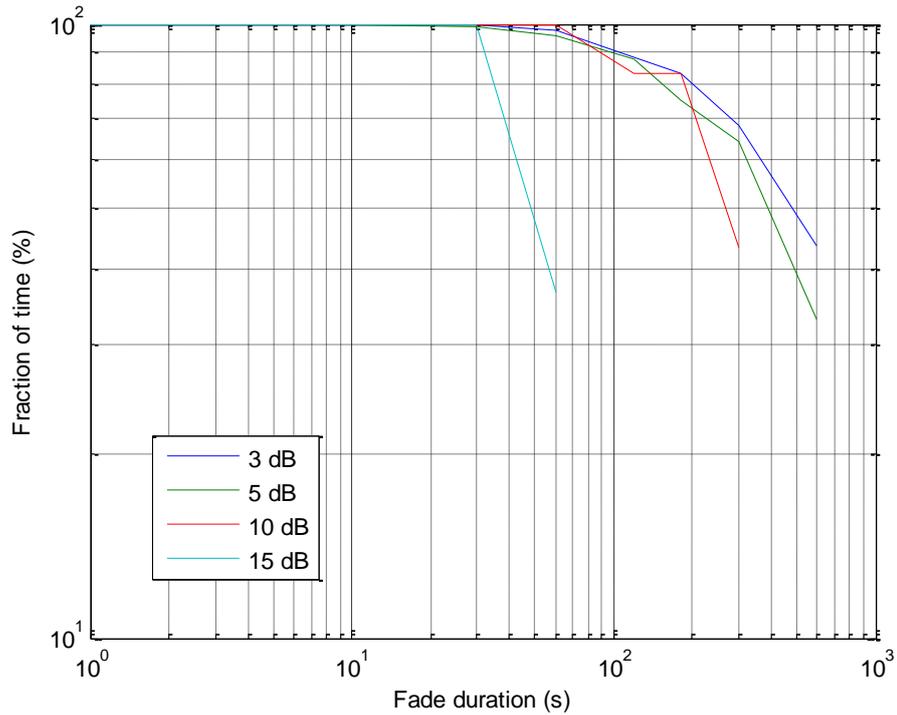


Figura 5.8 Gráfica de $F(d>D\|a>A)$ con datos experimentales filtrados

5.2.5 Número de desvanecimientos (datos sin filtrar)

	Duraciones (s)							
Atenuación(dB)	1	10	30	60	120	180	300	600
3	965	241	162	120	66	49	26	10
5	200	70	52	38	25	16	10	3
10	22	9	7	4	4	3	1	0
15	18	4	3	1	0	0	0	0

Tabla 5.6 $N(d>D\|a>A)$ con datos experimentales sin filtrar

En la Tabla 5.6 se encuentran las estadísticas del número de desvanecimientos, por ejemplo para $d=30$ s y $A=5$ dB, existen 52 eventos de lluvia que superan los 30 s con atenuaciones mayores a 5 dB.

En la figura 5.9 se observa que el número de duraciones de los desvanecimientos cae de forma proporcional casi con una misma pendiente, hasta una duración de 60 s y para el caso de 15 dB cae con una pendiente de casi el doble con respecto a las demás.

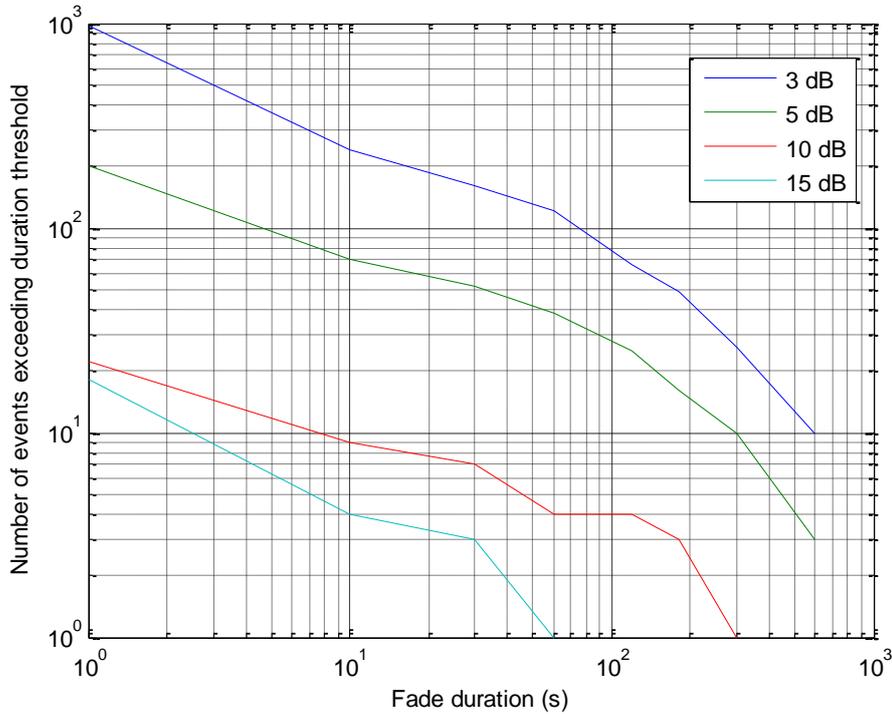


Figura 5.9 Gráfica de $N(d>D|a>A)$ con datos experimentales sin filtrar

5.2.6 Probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos (datos sin filtrar)

	Duraciones (s)							
Atenuación(dB)	1	10	30	60	120	180	300	600
3	100,00	24,97	16,79	12,44	6,84	5,08	2,69	1,04
5	100,00	35,00	26,00	19,00	12,50	8,00	5,00	1,50
10	100,00	40,91	31,82	18,18	18,18	13,64	4,55	0,00
15	100,00	22,22	16,67	5,56	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 5.7 $P(d>D|a>A)$ con datos experimentales sin filtrar

En la Tabla 5.7 se encuentran las estadísticas de la probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos (%), por ejemplo para $d=30$ s y $A=3$ dB, esto quiere decir que de los desvanecimientos mayores a 3 dB, el 16,79% tienen duraciones mayores a 30 s.

En la figura 5.10 se observa que la probabilidad de ocurrencia para 5 y 7 dB tienen bastante proximidad, pero las curvas de 3 y 15 dB caen con mucha rapidez, la primera debido a la consideración de los valores de 1 s, mayores a 3 dB.

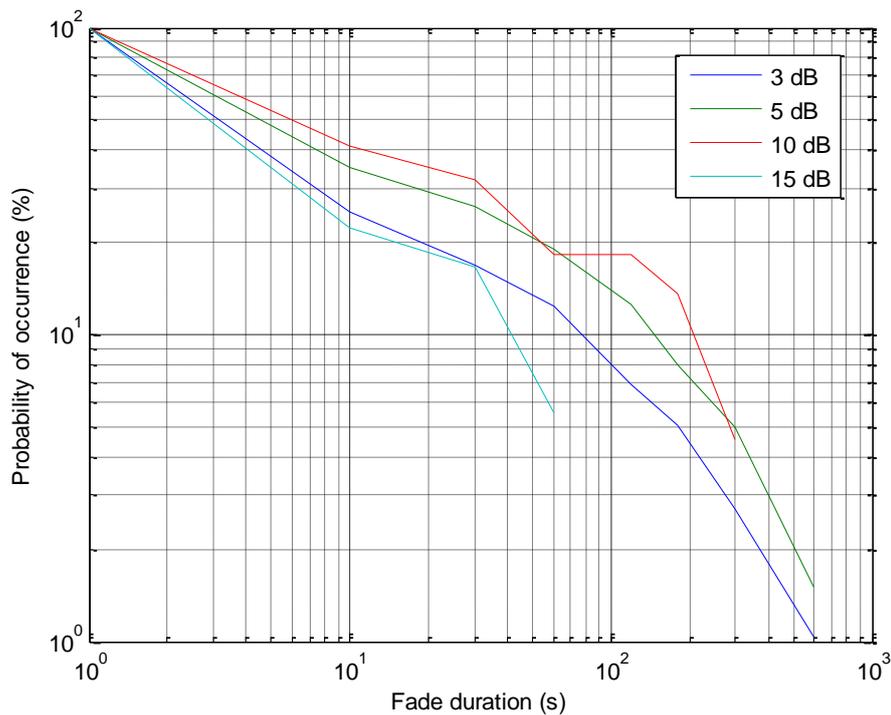


Figura 5.10 Gráfica de $P(d>D|a>A)$ con datos experimentales sin filtrar

5.2.7 Tiempo total de desvanecimientos (datos sin filtrar)

Atenuación(dB)	Duraciones (s)							
	1	10	30	60	120	180	300	600
3	35821	33991	32532	30626	26053	23634	18419	11868
5	10487	10188	9889	9314	8265	7017	5793	3143
10	1081	1059	1019	878	878	757	385	0

15	205	176	157	63	0	0	0	0
----	-----	-----	-----	----	---	---	---	---

Tabla 5.8 $T(d>D|a>A)$ con datos experimentales sin filtrar

En la Tabla 5.8 se encuentra el tiempo de rebasamiento, por ejemplo para $d=120$ s y $A=10$ dB, esto quiere decir que el tiempo total de las duraciones mayores a 120 s, que superan atenuaciones de 10 dB es 878 s.

En la figura 5.11, se observa que el tiempo de rebasamiento se mantiene constante hasta unos 60 s aproximadamente para atenuaciones de 3, 5 y 10 dB, mientras que para una atenuación de 15 dB, solo es constante hasta unos 10 s.

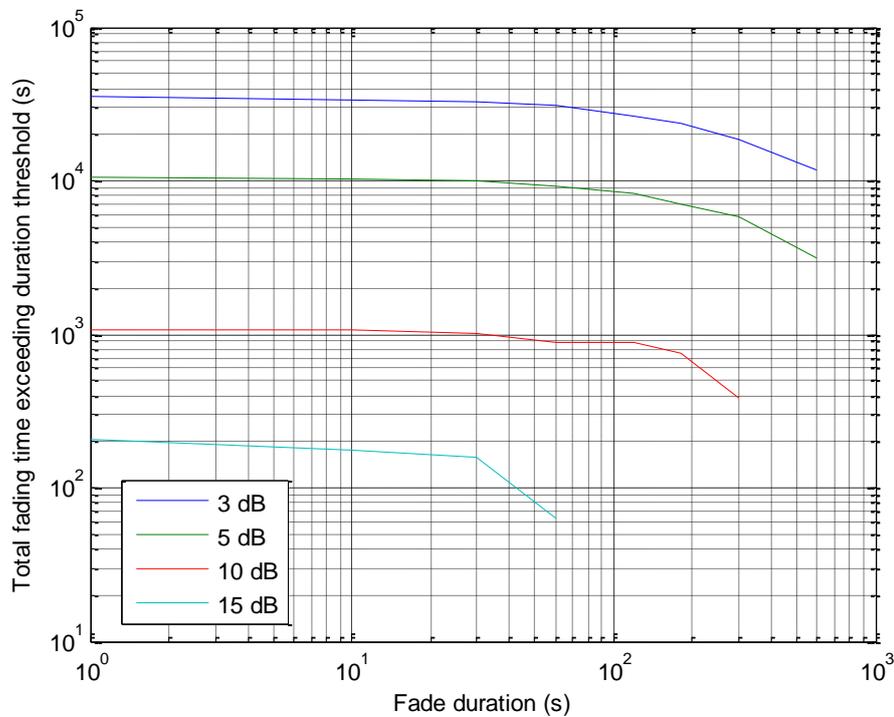


Figura 5.11 Gráfica de $T(d>D|a>A)$ con datos experimentales sin filtrar

5.2.8 Fracción de tiempo total de desvanecimientos (datos sin filtrar)

Atenuación(dB)	Duraciones (s)							
	1	10	30	60	120	180	300	600
3	100,00	94,89	90,82	85,50	72,73	65,98	51,42	33,13

5	100,00	97,15	94,30	88,81	78,81	66,91	55,24	29,97
10	100,00	97,96	94,26	81,22	81,22	70,03	35,62	0,00
15	100,00	85,85	76,59	30,73	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 5.9 $F(d>D\ a<A)$ con datos experimentales sin filtrar

En la Tabla 5.9 se encuentran las estadísticas de la fracción de tiempo total del número de desvanecimientos (%), por ejemplo para $d=300$ s y $A=10$ dB, esto quiere decir que el tiempo total de las duraciones mayores a 300 s que superan un umbral de atenuación de 10 dB, representa el 35.62% del tiempo de todas las duraciones que superan el umbral de 10 dB.

En la figura 5.12 se observa que las fracciones de tiempo totales de 3, 5 y 10 dB se mantienen casi constantes hasta una duración de 30 s, mientras que la de 15 dB cae abruptamente en 30 s.

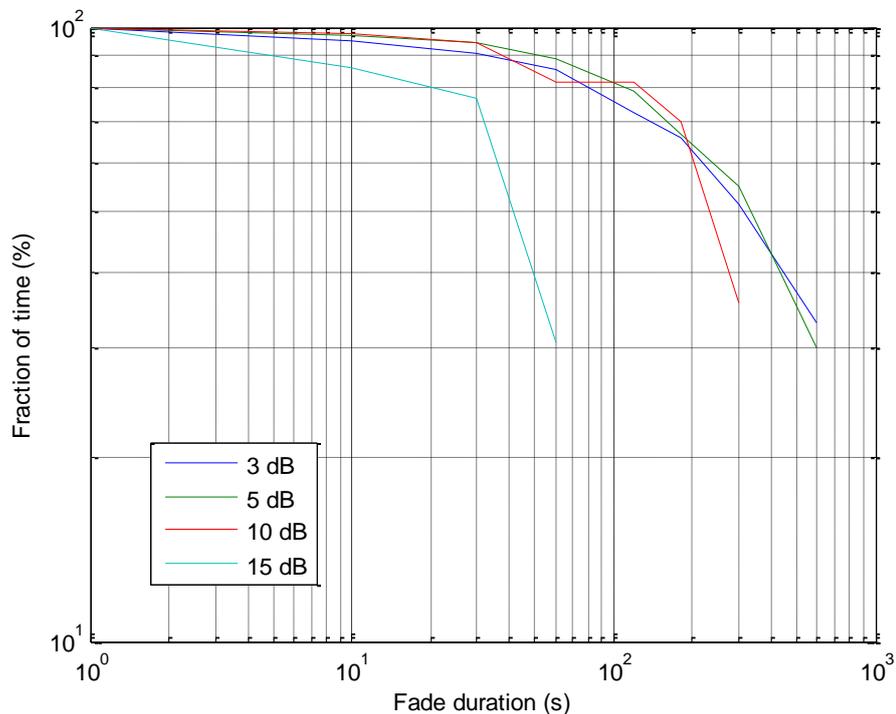


Figura 5.12 Gráfica de $F(d>D\ a>A)$ con datos experimentales sin filtrar

5.3 Comparación entre datos filtrados y datos sin filtrar

5.3.1 Número de desvanecimientos

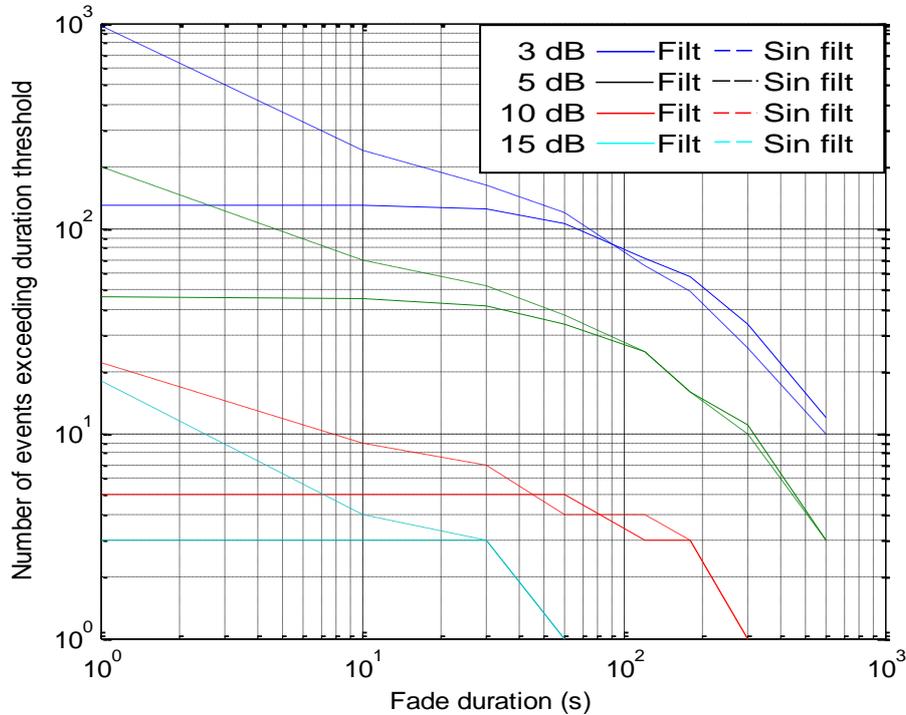


Figura 5.13 Gráfica de $N(d>D|a>A)$, datos filtrados y sin filtrar

En la figura 5.13 se comparan las gráficas del número de desvanecimientos para datos filtrados y no filtrados, para el caso de 3 dB y un segundo, se aprecia una amplia diferencia de 120 a casi 1000 desvanecimientos, esto se debe en primer lugar al suavizado con el filtrado y en segundo lugar al hecho de considerar duraciones de un segundo.

Para el caso de la curva de 5 dB, la diferencia entre los datos filtrados y no filtrados es 45 y 200 desvanecimientos aproximadamente, y a medida que subimos en atenuación la diferencia se va estrechando, esto ocurre porque los desvanecimientos rápidos son considerados en duraciones cortas y este valor va decreciendo a medida que crece la atenuación, es a estos desvanecimientos cortos a los que afecta principalmente el filtrado.

5.3.2 Probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos

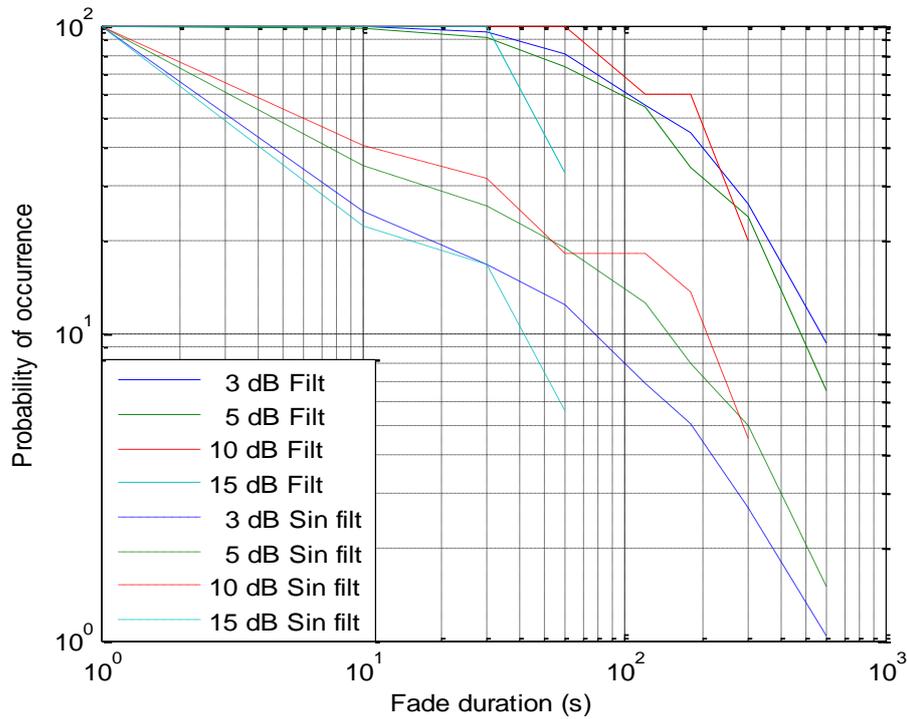


Figura 5.14 Gráfica de $P(d>D|a>A)$, datos filtrados y sin filtrar

En la figura 5.14 se comparan las gráficas de probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos para datos filtrados y no filtrados, para el caso de 3 y 15 dB los valores decrecen con la misma rapidez, esto para los datos sin filtrar; mientras que para los datos filtrados los valores se mantienen máximos y constantes hasta aproximadamente 30 s, a partir de 30 s ambas gráficas caen aproximadamente con la misma rapidez.

Observamos además que para una atenuación de 15 dB, la señal decrece con la misma rapidez en ambos casos.

5.3.3 Tiempo total de desvanecimientos

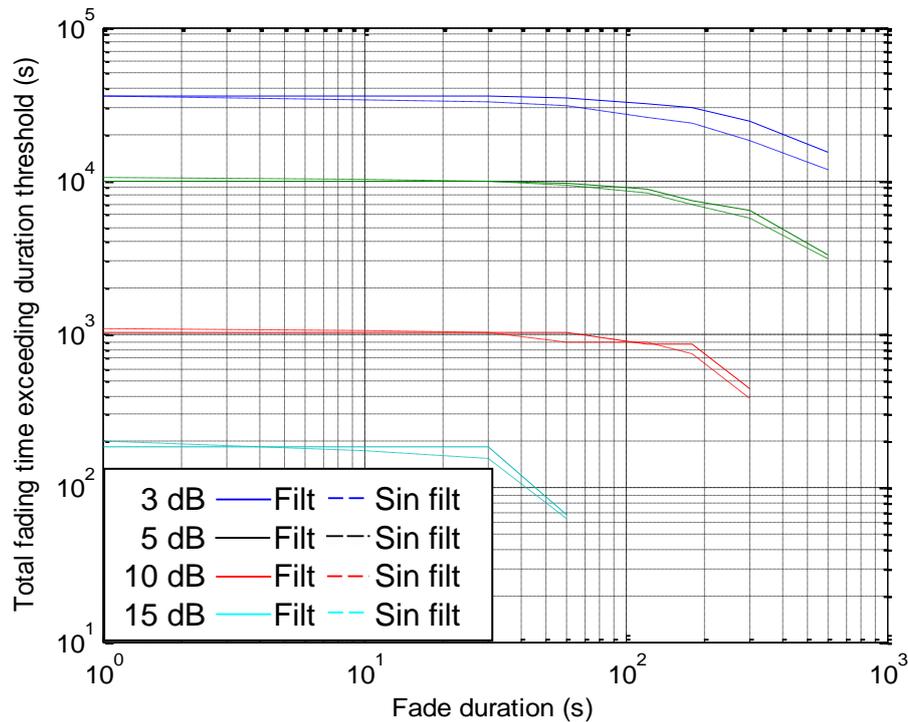


Figura 5.15 Gráfica de $T(d>D\|a>A)$, datos filtrados y sin filtrar

En la figura 5.15 se comparan las gráficas del tiempo total de desvanecimientos para datos filtrados y no filtrados, para los casos de 5, 10 y 15 dB las curvas son aproximadamente iguales.

Para el caso de la atenuación de 3 dB existe una pequeña diferencia pero se podría decir que el tiempo es similar, esto se debe a que el filtrado hace variar el número de desvanecimientos, pero no el periodo en que este ocurre con su respectivo nivel de atenuación.

Los desvanecimientos cortos tienen una contribución pequeña en el tiempo total de desvanecimiento.

5.3.4 Fracción de tiempo total de desvanecimientos

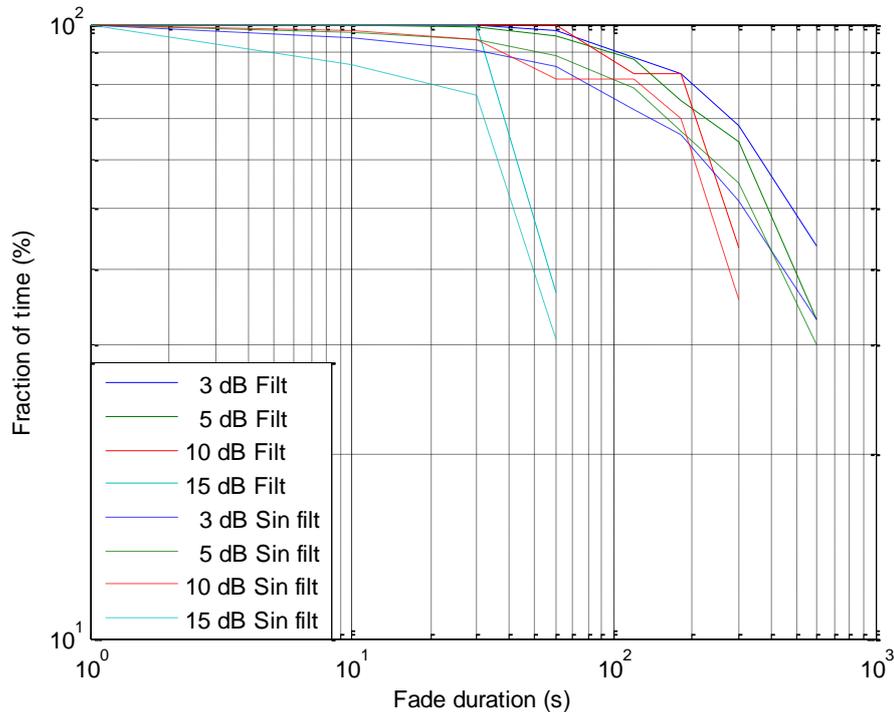


Figura 5.16 Gráfica de $F(d>D|a>A)$, datos filtrados y sin filtrar

En la figura 5.16 se comparan las gráficas de la fracción del tiempo total de los desvanecimientos para datos filtrados y no filtrados para las curvas de 3, 5 y 10 dB, los datos filtrados caen suavemente hasta 60 s, mientras que para las mismas atenuaciones en el caso de los datos no filtrados se mantiene constante, a partir de 60 s en adelante ambas curvas caen con la misma rapidez aproximadamente.

Para el caso de 15 dB, la curva de datos filtrados cae hasta un 74% del tiempo aproximadamente para un valor de 30 s, mientras que para el mismo valor de duración, en la curva de datos no filtrados se mantiene constante desde el inicio con casi el 100%; después de 30 s, ambas curvas caen con la misma rapidez.

5.4 Comparación de las funciones establecidas por la UIT con otros modelos

5.4.1 Probabilidad de ocurrencia de desvanecimientos

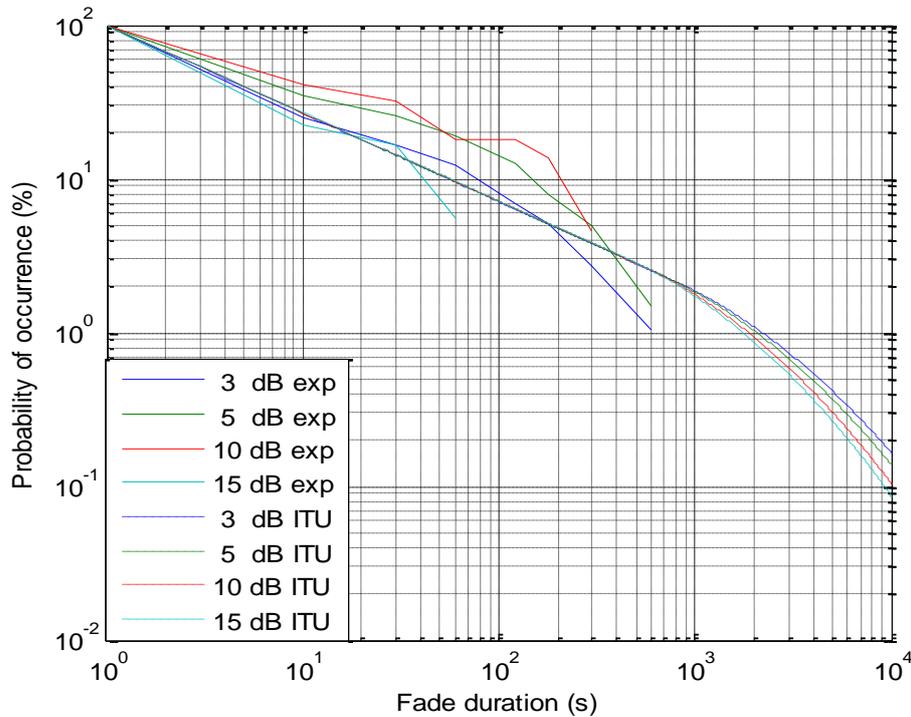


Figura 5.17 Gráfica de $P(d > D | a > A)$, datos experimentales y modelo UIT

En la figura 5.17 se comparan la probabilidad de ocurrencia de los desvanecimientos con datos experimentales y del modelo UIT, para este último caso se observa que plantea una probabilidad de ocurrencia casi constante independiente de la atenuación hasta casi 1000 s, a partir de este valor se empieza a notar una diferencia, cayendo más rápido, las de mayor atenuación; esto nos indica que a mayor atenuación la probabilidad de encontrar desvanecimientos es menor para atenuaciones altas.

Para el caso de 3 dB la predicción se ajusta bastante hasta un valor de duración de 200 s, la curva de 15 dB coinciden hasta unos 40 s luego la curva experimental decrece rápidamente, esto es debido principalmente a los pocos valores de desvanecimientos que se obtienen a esas atenuaciones, siendo el enlace tan corto.

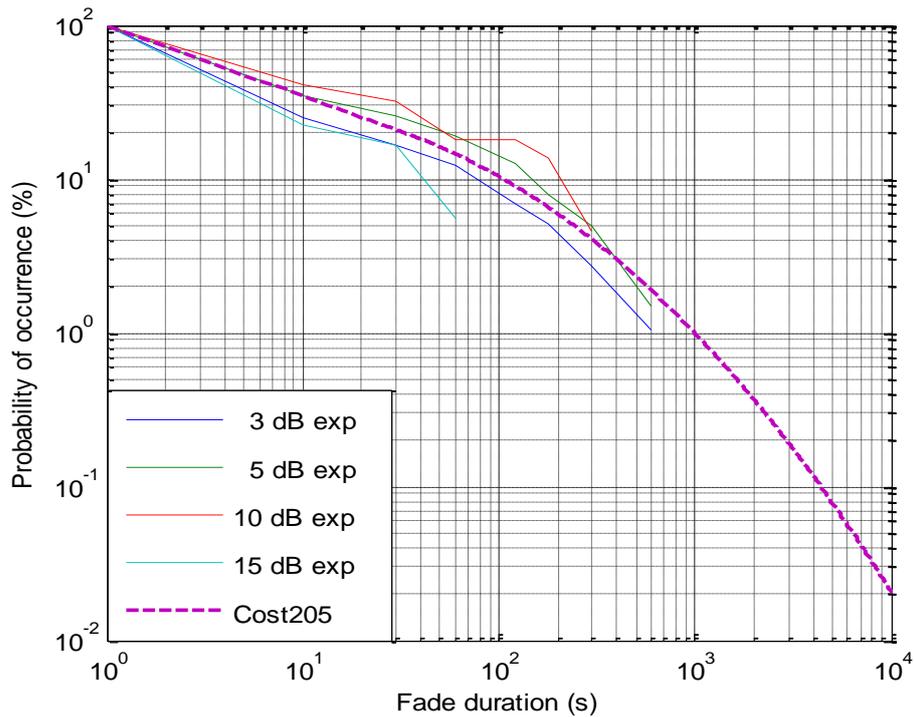


Figura 5.18 Gráfica de $P(d>D|a>A)$, datos experimentales y Cost205

En la figura 5.18 se comparan la probabilidad de ocurrencia de los desvanecimientos con datos experimentales y del modelo Cost205, para este último caso se observa que plantea una probabilidad de ocurrencia totalmente independiente de la atenuación.

Para el caso de 3 y 15 dB los valores son sobrestimados ligeramente y subestimados para las curvas de 5 y 10 dB, con la curva de 5 dB es casi la misma que el modelo hasta un valor de duración de 10 s.

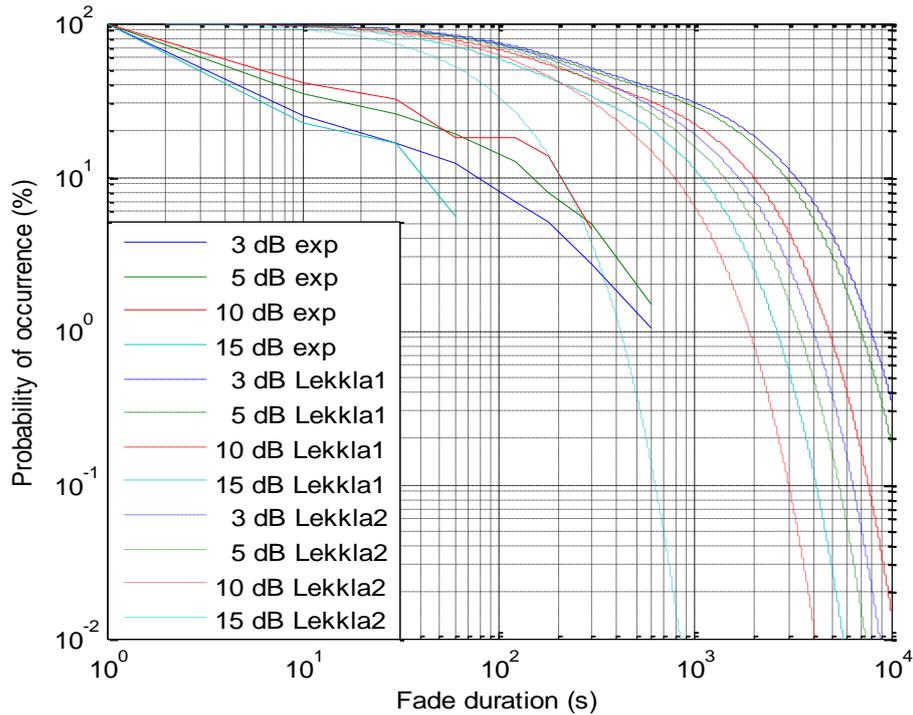


Figura 5.19 Gráfica de $P(d>D|a>A)$, datos experimentales y modelo Lekkla

En la figura 5.19 se comparan la probabilidad de ocurrencia de los desvanecimientos con datos experimentales y del modelo Lekkla, para este último caso se observa que plantea una probabilidad de ocurrencia mayor y menor, denominados Lekkla 1 y Lekkla 2, debido que se define para dos emplazamientos distintos, todas estas curvas tienen casi el mismo valor hasta una duración de 20 s, luego se separan suavemente.

Para el caso de 3 y 15 dB en la curva experimental para duraciones de 20 s, tenemos una probabilidad de ocurrencia de 15% mientras que el modelo para la misma duración propone casi un 90%; en conclusión, hay una gran diferencia entre la probabilidad del experimento con el modelo Lekkla, esto se debe al tipo de clima en las zonas de prueba (zonas más lluviosas), como se comenta en el capítulo 3 del presente trabajo.

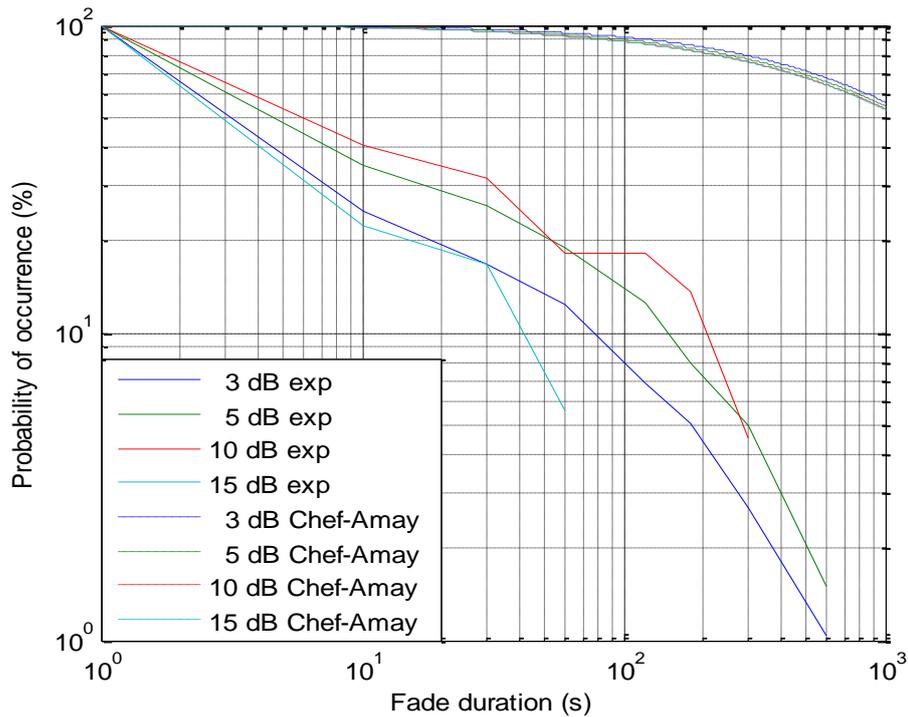


Figura 5.20 Gráfica de $P(d>D|a>A)$, datos experimentales y modelo Cheffena-Amaya

En la figura 5.20 se comparan la probabilidad de ocurrencia de los desvanecimientos con datos experimentales y del modelo Cheffena-Amaya, para este último caso se observa que plantea una probabilidad de ocurrencia casi constante para valores hasta 20 s, de 20 s a 100 s todas alcanzan casi un 90% de probabilidad de ocurrencia y para duraciones poco más de 1000 s alcanza el 50% de probabilidad.

Para el caso de las curvas experimentales, alcanzan en el mejor de los casos probabilidades entorno al 40% para una atenuación de 5 dB, para el caso de duraciones mayores a 100 s se obtiene una probabilidad de 18% aproximadamente.

Los resultados experimentales se separan mucho de este modelo, debido a que no se consideran desvanecimientos de 1s, ni muchos desvanecimientos cortos, puesto que en el rango de 1 a 10 s se obtienen probabilidades de 100 a 97,12% respectivamente y en los resultados experimentales los desvanecimientos de 1 s representan alrededor de un 30%; otra de las razones es el ajuste del parámetro α , que se comenta en el apartado (3.2.9), los valores obtenidos son de alrededor de 0,8; si cambiamos este valor a 0,1 por ejemplo la curva del modelo mejora; estas son algunas observaciones sobre este modelo, debiendo comprobarse con otros enlaces terrenales.

5.4.2 Número de desvanecimientos

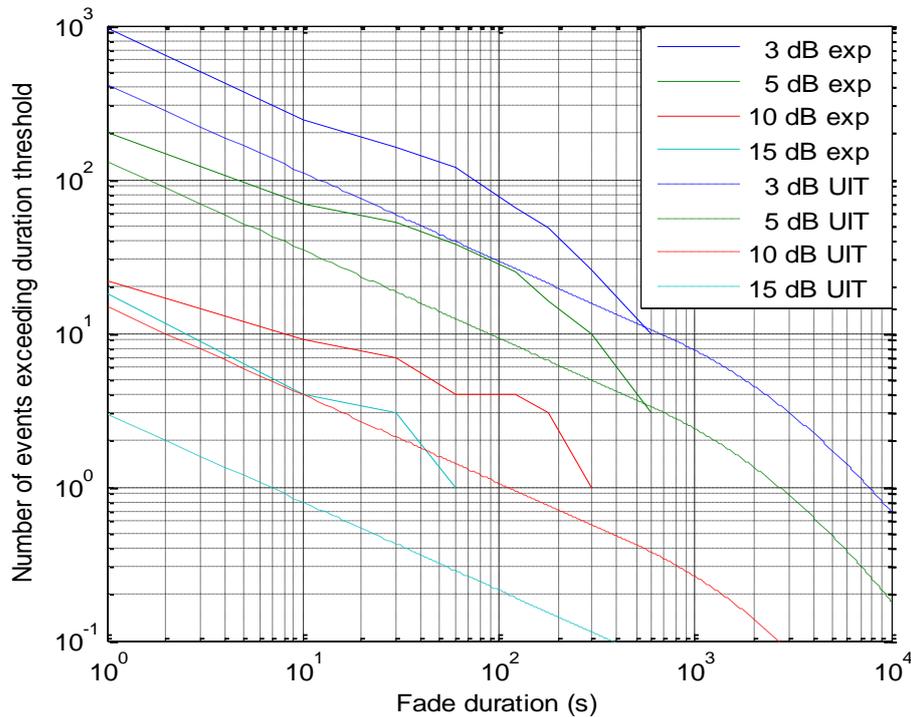


Figura 5.21 Gráfica de $N(d>D|a>A)$, datos experimentales y modelo UIT

En la figura 5.21 se comparan el número de desvanecimientos con datos experimentales y el modelo UIT, para este último caso se obtuvo los datos partiendo del tiempo total de los desvanecimientos (dato experimental) y de (3.133), todos los valores son subestimados.

La curva de 3 dB mantiene una diferencia de casi 500 desvanecimientos hasta duraciones por debajo de 100 s, para la curva de 5 dB la diferencia inicial de desvanecimientos crece hasta un valor pico en aproximadamente 50 s, luego para valores de 600 s el número de desvanecimientos en ambos casos es prácticamente el mismo.

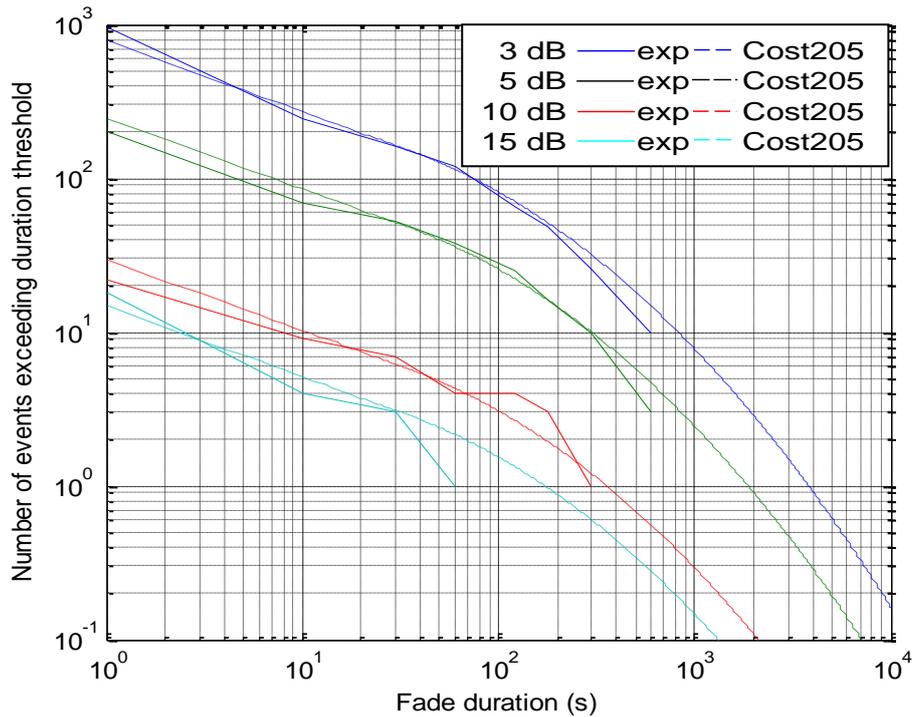


Figura 5.22 Gráfica de $N(d>D|a>A)$, datos experimentales y modelo Cost205

En la figura 5.22 se comparan el número de desvanecimientos para cada nivel de atenuación, con datos experimentales y del modelo Cost205, para este último caso se empleó información estadística del experimento para determinar el parámetro N_{32} , que se explica en el apartado 3.2.1; las curvas son muy parecidas. Para el caso de 3 dB, hay una diferencia de partida de casi 100 desvanecimientos, pero entre 3s y 100s, las curvas son casi las mismas, luego de 100 s en adelante los valores del número de duraciones son sobrestimados.

Para el caso de 5 dB existe una diferencia de 20 desvanecimientos, luego las curvas se juntan en 30 hasta 60 s, separándose nuevamente.

La curva de 10 dB guarda bastante similitud con el modelo hasta 60s y la de 15 dB hasta unos 30 s aproximadamente.

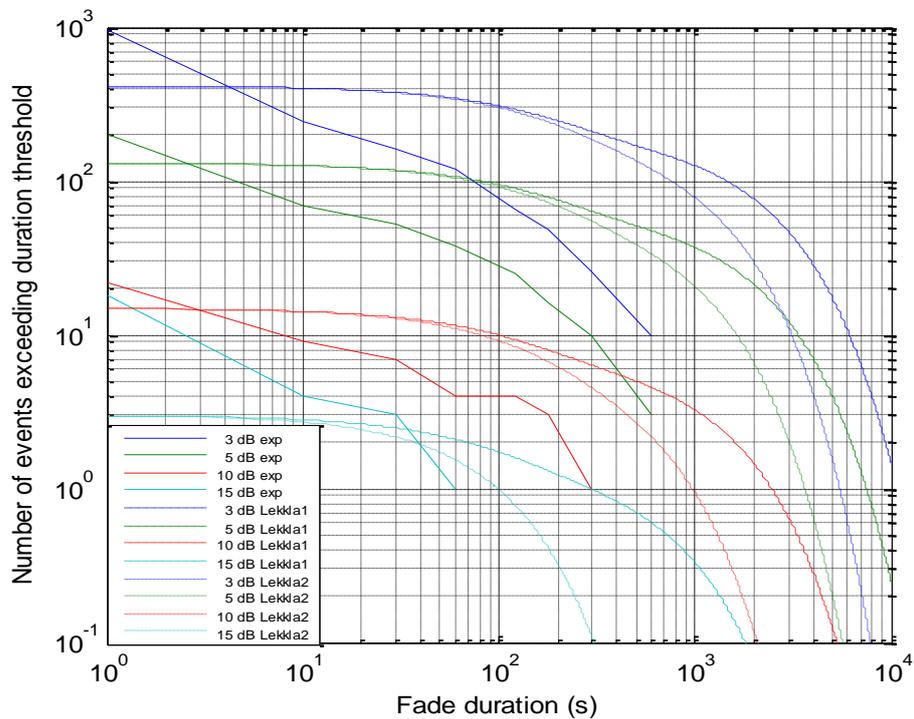


Figura 5.23 Gráfica de $N(d > D | a > A)$, datos experimentales y modelo Lekkla

En la figura 5.23 se comparan el número de desvanecimientos con datos experimentales y del modelo Lekkla en sus dos variantes, llamados Lekkla 1 y Lekkla 2, para estas dos últimas con los mismos niveles de atenuación las curvas tienen el mismo comportamiento inicial, la de 3 y 5 dB hasta 100 s, la de 10 dB hasta 50 s y la de 15 dB hasta 10 s aproximadamente.

En todos los valores de partida de las distintas atenuaciones son subestimados, para valores entre 3 y 5 s, el número de duraciones alcanzan valores parecidos para todos los casos, de allí en adelante los valores son sobrestimados en la mayoría de los casos.

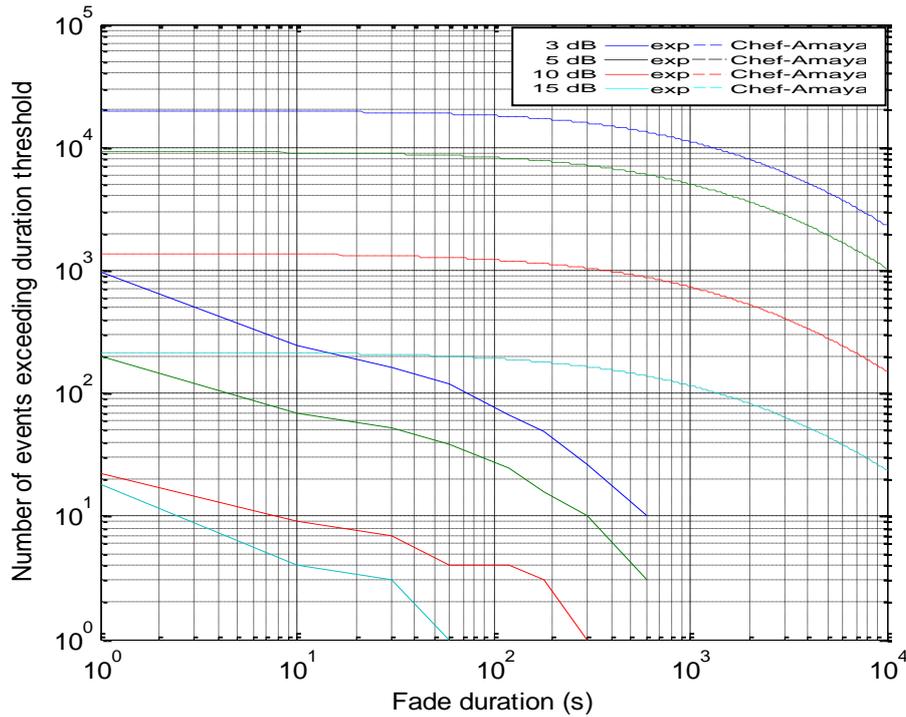


Figura 5.24 Gráfica de $N(d>D|a>A)$, datos experimentales y modelo Chefena-Amaya

En la figura 5.24 se comparan el número de desvanecimientos para cada nivel de atenuación, con datos experimentales y del modelo Cheffena-Amaya, para este último caso se observa una sobrestimación en todos los niveles de atenuación, manteniendo valores constantes hasta duraciones de 30 s, esto quiere decir que según este modelo, estima que las duraciones de 1 a 30 s son pocas y además estima que la mayoría de los desvanecimientos tienen duraciones entre 300 y 1000 s.

No tienen ningún punto en común las curvas teóricas y las experimentales, debido principalmente, a que este es el único modelo que define de forma clara una expresión para el número de desvanecimientos (para enlaces satelitales) que está dado por la siguiente expresión:

$$N = 17.92 + 22.02 \cdot f^{2.2} \cdot \exp\left(-\frac{A}{2.61}\right)$$

5.4.3 Fracción de tiempo total de desvanecimientos

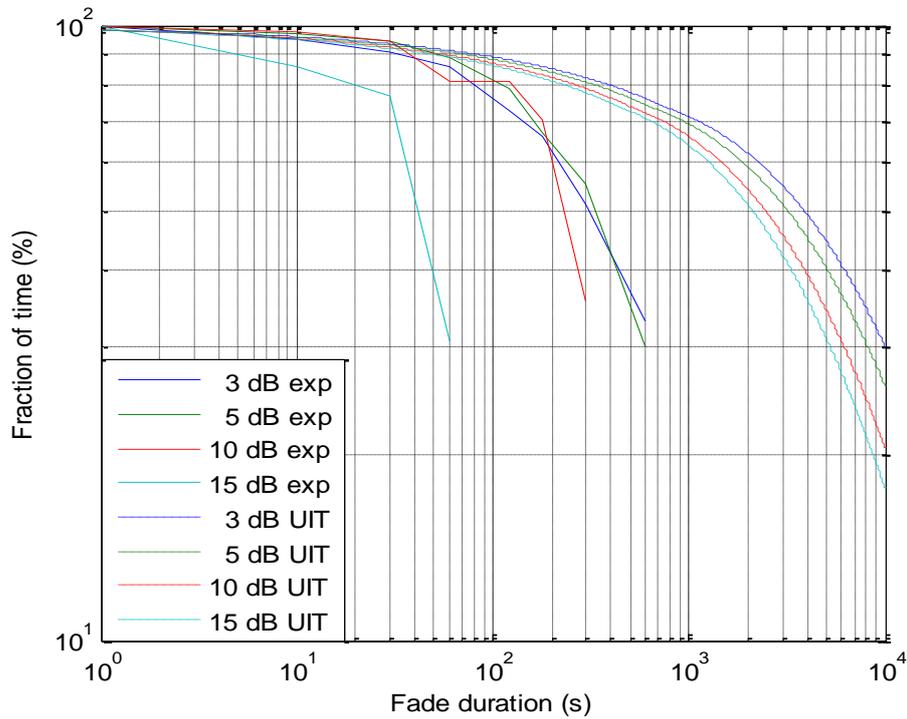


Figura 5.25 Gráfica de $F(d>D|a>A)$, datos experimentales y modelo UIT

En la figura 5.25 se compara la fracción de tiempo total de los desvanecimientos (%), con datos experimentales y el modelo UIT, para este último caso se observa que las curvas de 3, 5, 10 y 15 dB toman casi los mismos valores desde duraciones de 1 y 100 s, con valores de 100 y 87% aproximadamente.

Las curvas experimentales de 3 y 5 dB se ajustan bien en el rango de duraciones de 1 a 60 s, para el caso de 10 dB coincide hasta 30 s y, por último la de 15 dB no guarda mucha relación.

5.4.4 Tiempo total de desvanecimientos

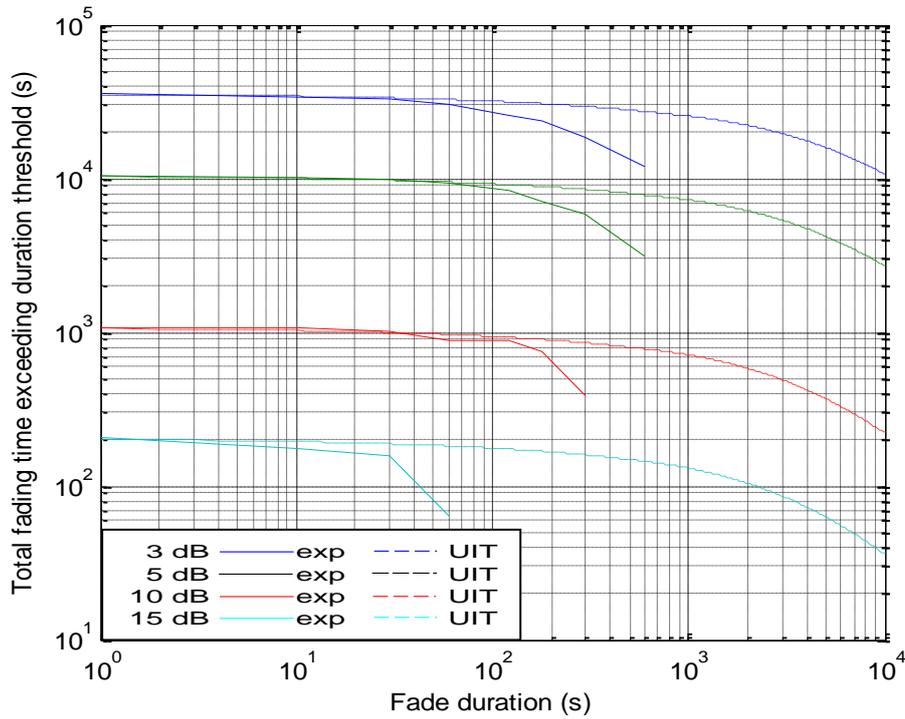


Figura 5.26 Gráfica de $T(d > D \setminus a > A)$, datos experimentales y modelo UIT

En la figura 5.26 se comparan el tiempo total de los desvanecimientos, medido en segundos, con datos experimentales y el modelo UIT, para este último se tomaron los valores de partida de las estadísticas del experimento, por eso la coincidencia, para el caso de 3 dB las curvas coinciden para duraciones de 1 a 30 s, para el caso de 5 dB las curvas coinciden de 1 a 80 s.

Para la atenuación de 10 dB, las curvas coinciden para duraciones de 1 a 120 s, mientras que para el caso de 15 dB coinciden en el rango de 1 a 3 s aproximadamente, luego cae suavemente hasta 30 s, pasado este valor cae abruptamente.

CAPÍTULO 6 : RESULTADOS DE LA PENDIENTE DE LOS DESVANECIMIENTOS

6.1 Introducción

Para realizar el estudio estadístico de las pendientes de los desvanecimientos, se creó con ayuda de matlab una función llamada, **ped(p,A, Δt)**, donde;

p , es el vector con la serie de tiempo referenciado anual y filtrado.

A , nivel de atenuación de referencia.

Δt =tiempo de cálculo de la pendiente

Cabe precisar que el resultado de emplear esta función son valores de pendientes con un Δt previamente establecido y que proceden de atenuaciones de $A \pm 0.5 \text{ dB}$.

En el siguiente apartado, se muestran histogramas para atenuaciones de 3, 5, 10 y 15 dB; combinadas con intervalos de tiempo $\Delta t = 2, 10, 30, 60, 120$ y 200 s, los histogramas están hechos con pasos de 0.002 dB/s.

6.2 Estadísticas de las pendientes

6.2.1 Estadísticas de pendientes a 3 dB

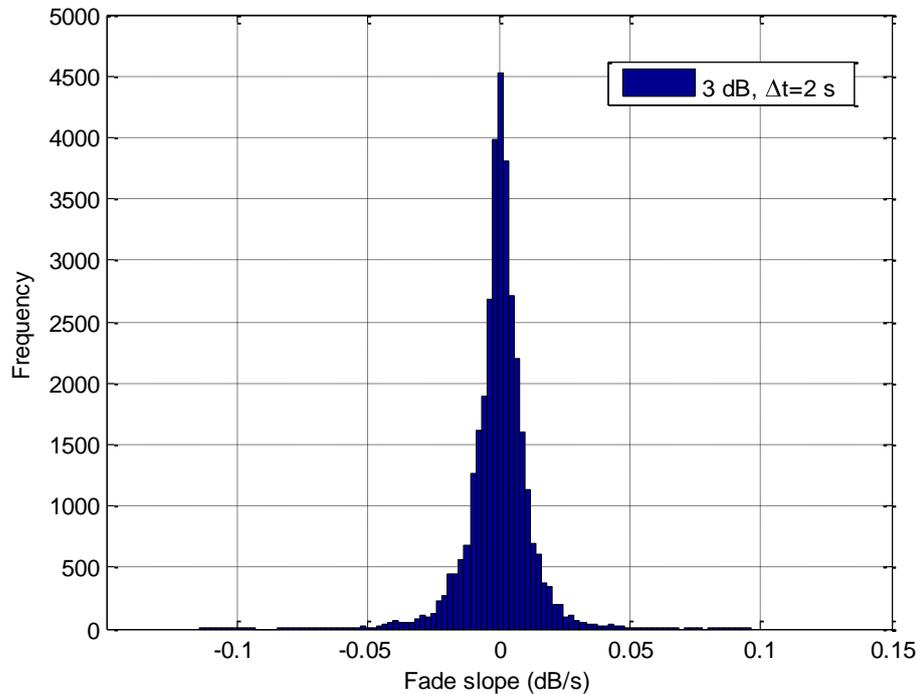


Figura 6.1 Histograma de las pendientes a 3 dB, $\Delta t=2$ s

En la figura 6.1, el histograma representa las 33 976 pendientes que se encuentran en el rango de 2,5 a 3,5 dB con un $\Delta t=2$ s, tiene las siguientes características:

Valor mínimo = -0,1143

Valor máximo = 0,0964

Media = 1,4452e-006

Mediana = 3,6497e-004

Desviación típica = 0,0116

Estos valores nos indican que tiene una media y mediana de casi 0 y casi el 80% de los valores que toman las pendientes se encuentran entre $\pm 0,0116$ dB/s.

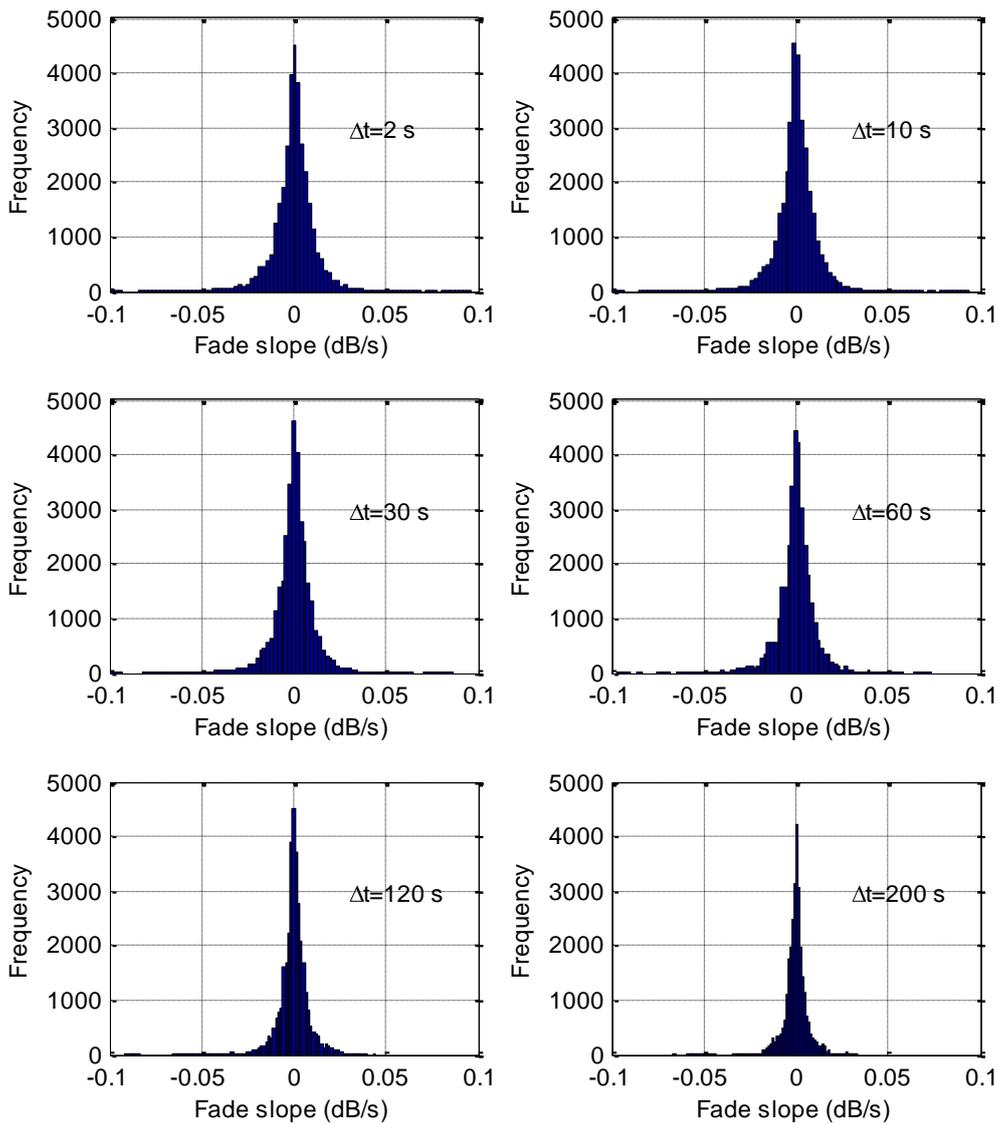


Figura 6.2 Histograma de pendientes $A=3$ dB y $\Delta t=2, 10, 30, 60, 120$ y 200 s

De la figura 6.2 y la tabla 6.1, se obtienen conclusiones similares, los valores se agrupan en la parte central a medida que aumenta Δt .

	2 s	10 s	30 s	60 s	120 s	200 s
valor max	-0,1143	-0,1140	-0,1125	-0,1082	-0,0917	-0,0668

valor min	0,0964	0,0939	0,0867	0,0732	0,0442	0,0337
media	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001
mediana	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003	0,0002	0,0002
desv. Estándar	0,0116	0,0116	0,0113	0,0104	0,0085	0,0068

Tabla 6.1 Datos estadísticos de las pendientes a 3 dB y $\Delta t = 2 - 200$ s

6.2.2 Estadísticas de pendientes a 5 dB

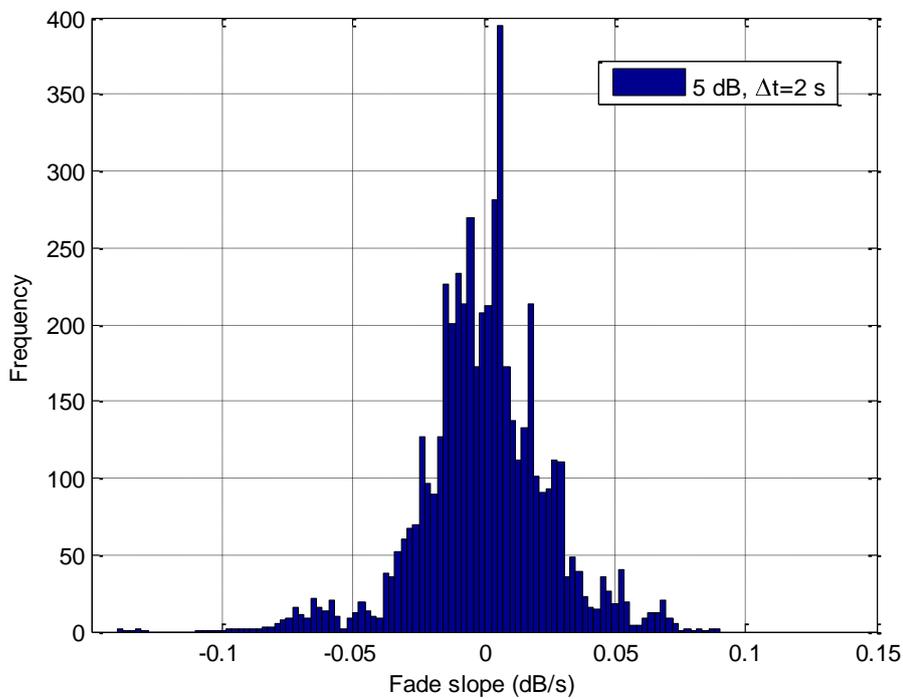


Figura 6.3 Histograma de las pendientes a 5 dB, $\Delta t=2$ s

En la figura 6.3, el histograma representa las 5 098 pendientes que se encuentran en el rango de 4,5 a 5,5 dB con un $\Delta t=2$ s, tiene las siguientes características:

Valor mínimo = -0,1399

Valor máximo = 0,0904

Media = -3,2421e-006

Mediana = 7,2484e-004

Desviación típica = 0,0250

Estos valores nos indican que tiene una media y mediana de aproximadamente 0 y casi el 76% de los valores que toman las pendientes se encuentran entre $\pm 0,0250$ dB/s.

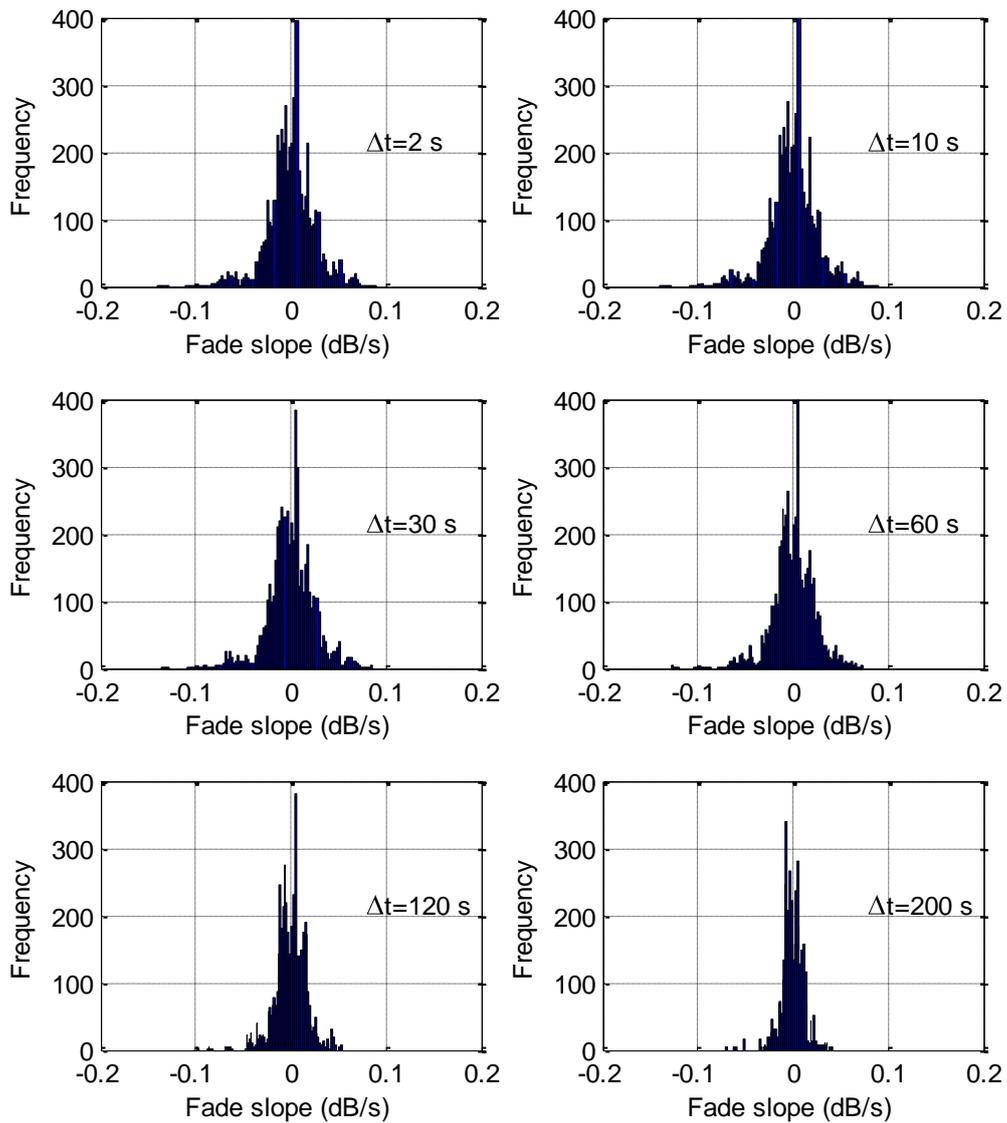


Figura 6.4 Histograma de pendientes $A=5$ dB y $\Delta t=2, 10, 30, 60, 120$ y 200 s

De la figura 6.4 y la tabla 6.2, se obtienen conclusiones similares, los valores se agrupan en la parte central a medida que aumenta Δt .

	2 s	10 s	30 s	60 s	120 s	200 s
valor max	-0,1399	-0,1394	-0,1370	-0,1280	-0,0990	-0,0708
valor min	0,0904	0,0899	0,0863	0,0729	0,0541	0,0419
Media	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0002
mediana	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006	0,0011	-0,0006
desv. Estándar	0,0250	0,0249	0,0241	0,0220	0,0167	0,0117

Tabla 6.2 Datos estadísticos de las pendientes a 5 dB y $\Delta t = 2 - 200$ s

6.2.3 Estadísticas de pendientes a 10 dB

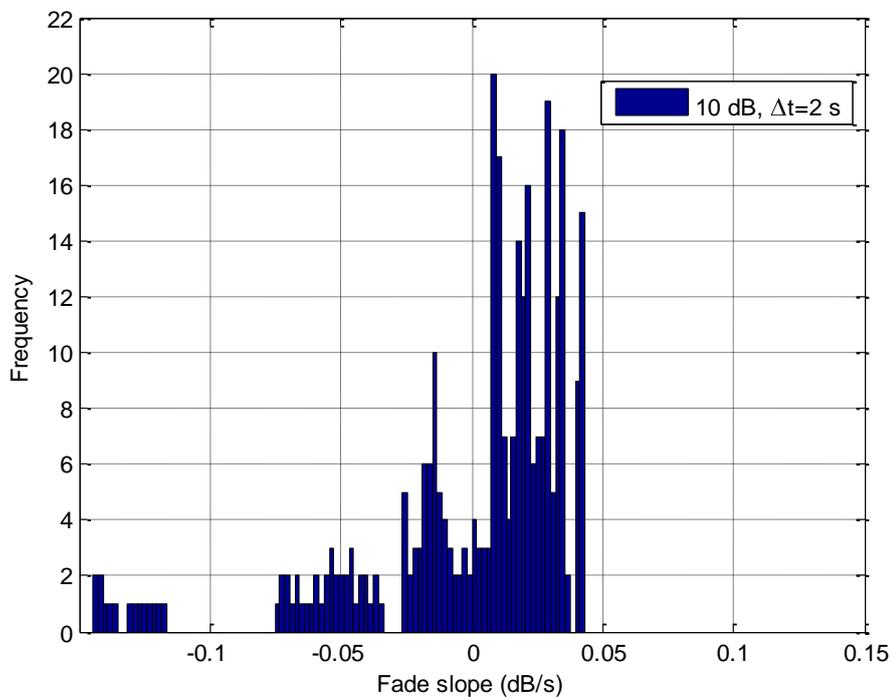


Figura 6.5 Histograma de las pendientes a 10 dB, $\Delta t=2$ s

En la figura 6.5, el histograma representa las 318 pendientes que se encuentran en el rango de 9,5 a 10,5 dB con un $\Delta t=2$ s, tiene las siguientes características:

Valor mínimo = -0,1447

Valor máximo = 0,0432

Media = 6,6145e-005

Mediana = 0,0116

Desviación típica = 0,0407

Estos valores nos indican que tiene una media de casi 0 y una mediana, que se aleja del 0, esto debido a las pocas muestras para el caso de 10 dB, en este experimento, nos indica que el 80% de los valores que toman las pendientes se encuentran entre $\pm 0,0407$ dB/s.

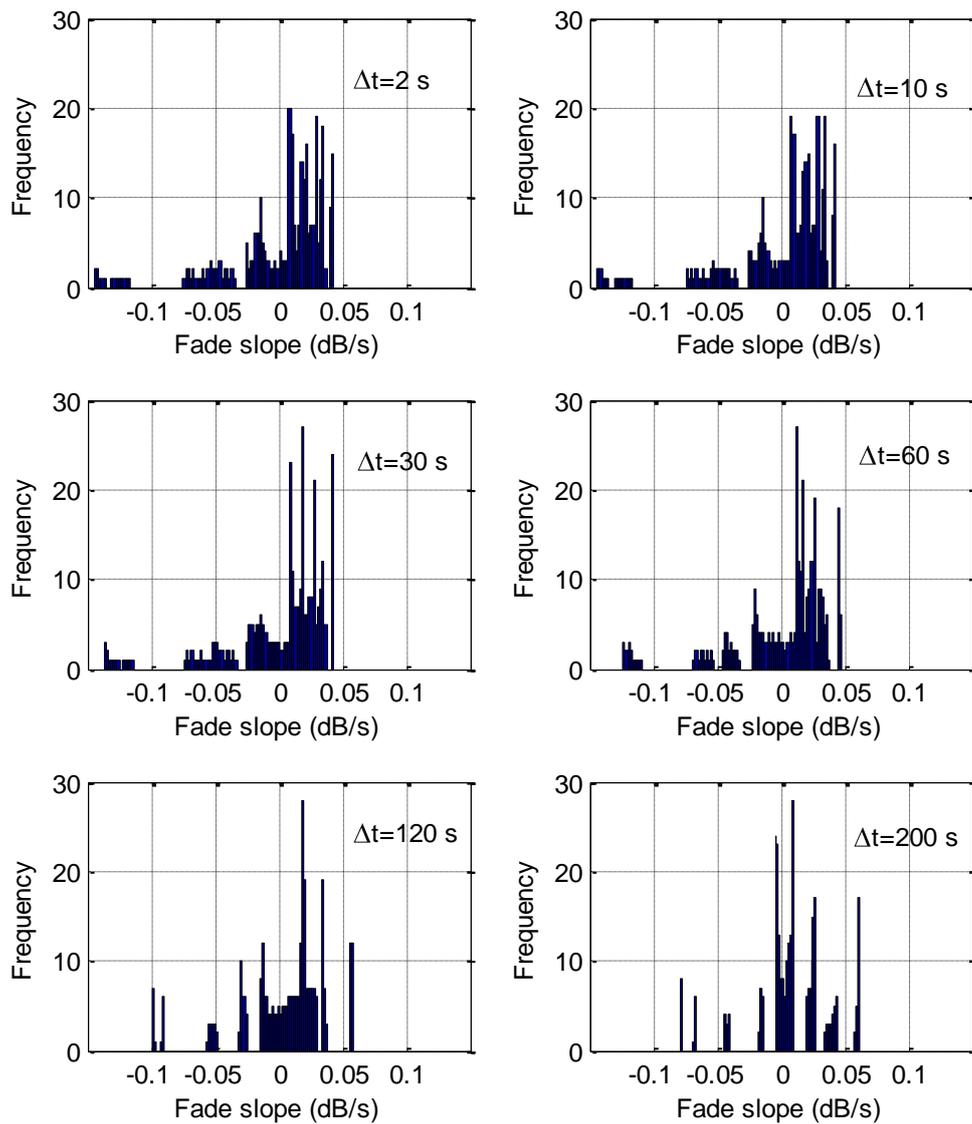


Figura 6.6 Histograma de pendientes $A=10$ dB y $\Delta t=2, 10, 30, 60, 120$ y 200 s

De la figura 6.6 y la tabla 6.3, se obtienen conclusiones similares, los valores se agrupan en la parte central a medida que aumenta Δt .y la media se aleja de 0.

	2 s	10 s	30 s	60 s	120 s	200 s
valor max	-0,1447	-0,1441	-0,1375	-0,1237	-0,0987	-0,0788
valor min	0,0432	0,0430	0,0430	0,0473	0,0582	0,0613

Media	0,0001	0,0001	0,0004	0,0016	0,0051	0,0077
mediana	0,0116	0,0118	0,0127	0,0134	0,0142	0,0070
desv. Estándar	0,0407	0,0406	0,0397	0,0376	0,0333	0,0292

Tabla 6.3 Datos estadísticos de las pendientes a 10 dB y $\Delta t = 2 - 200$ s

6.2.4 Estadísticas de pendientes a 15 dB

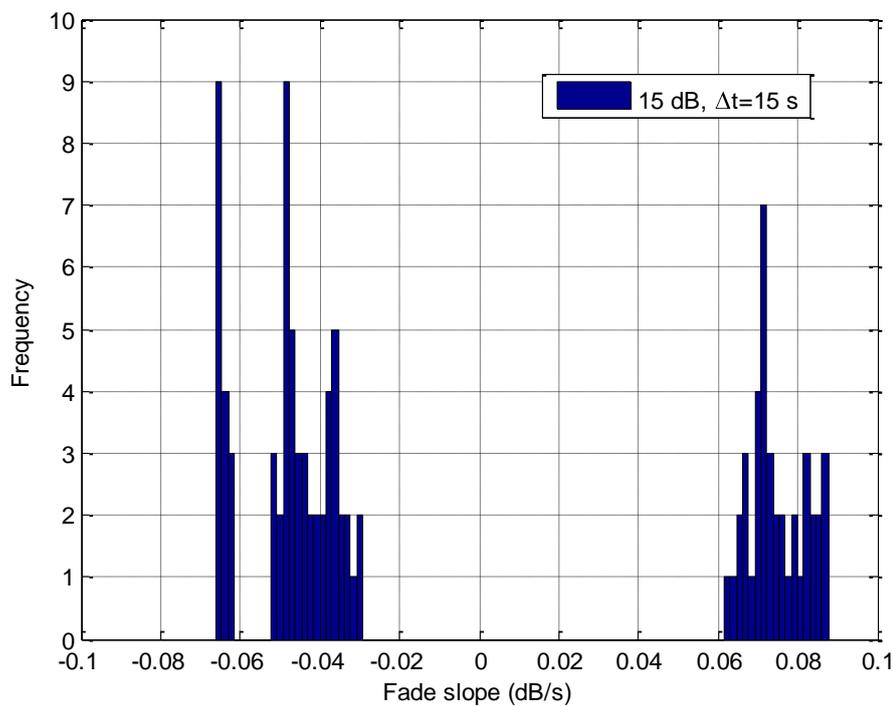


Figura 6.7 Histograma de las pendientes a 15 dB, $\Delta t=2$ s

En la figura 6.7, el histograma representa las 103 pendientes que se encuentran en el rango de 14,5 a 15,5 dB con un $\Delta t=2$ s, tiene las siguientes características:

Valor mínimo = -0,0661

Valor máximo = 0,0876

Media = -3,5607e-004

Mediana = -0,0368

Desviación típica = 0,0609

Estos valores nos indican que tiene una media de casi 0 y una mediana, que se aleja del 0, esto debido a las pocas muestras para el caso de 15 dB, en este experimento, nos indica que el 46% de los valores que toman las pendientes se encuentran entre $\pm 0,0609$ dB/s.

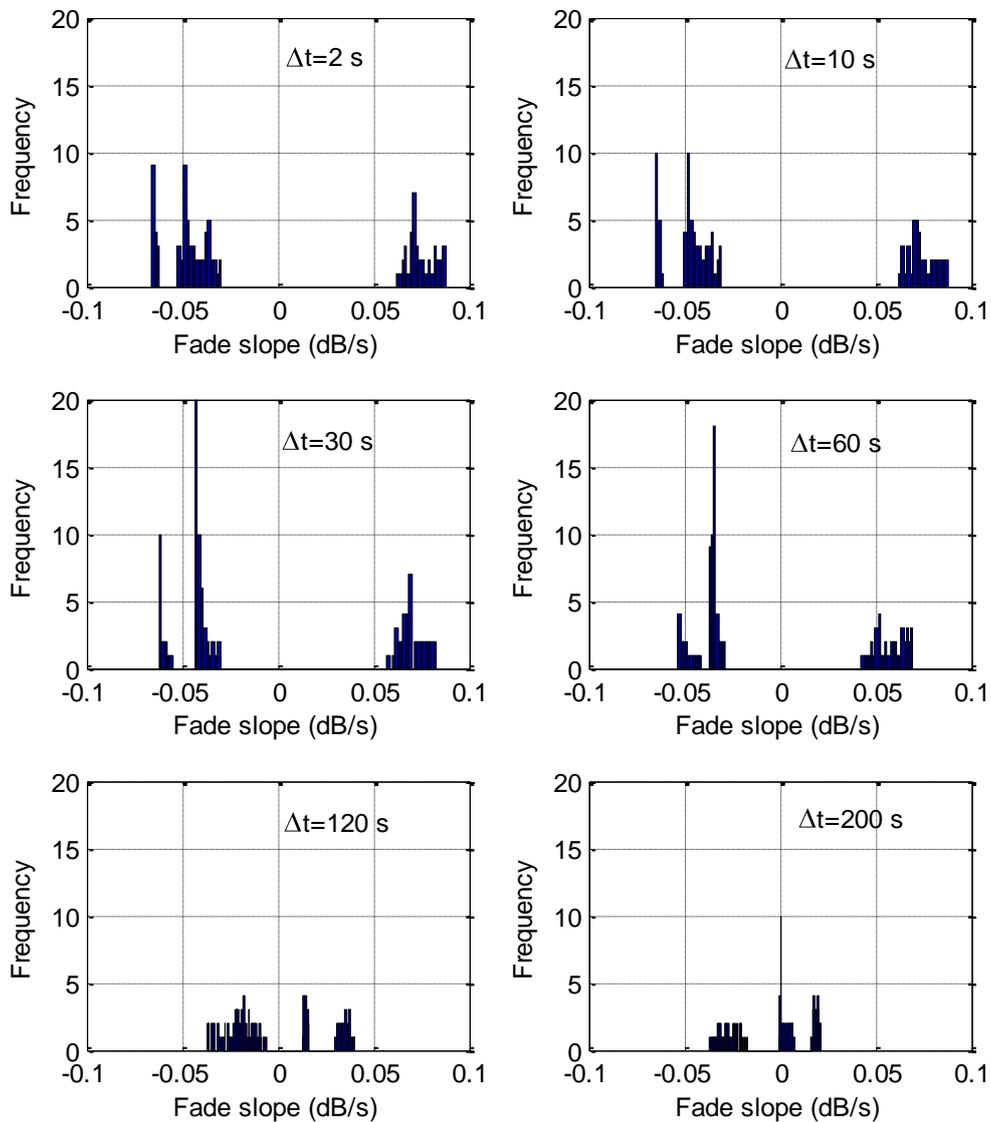


Figura 6.8 Histograma de pendientes $A=15$ dB y $\Delta t=2, 10, 30, 60, 120$ y 200 s

De la figura 6.8 y la tabla 6.4, se obtienen conclusiones similares que la figura 6.7, la media toma valores bajos y la mediana valores mayores.

	2 s	10 s	30 s	60 s	120 s	200 s
valor max	-0,0661	-0,0655	-0,0621	-0,0532	-0,0372	-0,0366
valor min	0,0876	0,0877	0,0830	0,0696	0,0406	0,0218
Media	-0,0004	-0,0003	-0,0004	-0,0008	-0,0020	-0,0048
mediana	-0,0368	-0,0372	-0,0389	-0,0339	-0,0134	0,0006
desv. Estándar	0,0609	0,0605	0,0572	0,0473	0,0256	0,0194

Tabla 6.4 Datos estadísticos de las pendientes a 10 dB y $\Delta t = 2 - 200$ s

6.2.5 Pendientes positivas y negativas

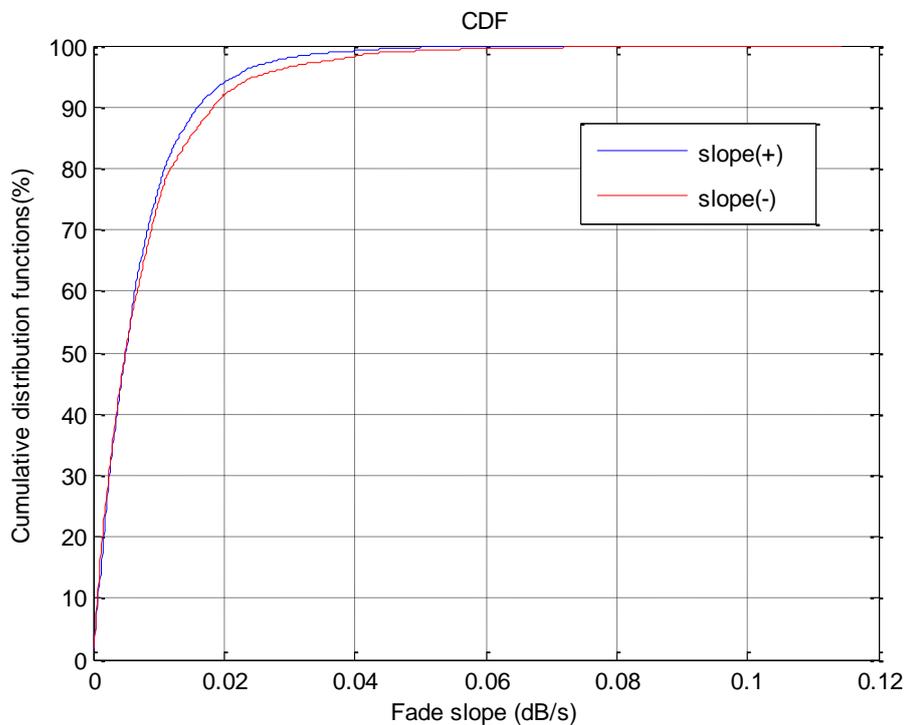


Figura 6.9 Función de distribución acumulada de pendientes por signo con $A=3$ dB y $\Delta t=2$ s

En la figura 6.9 se representa la función de distribución acumulada para las pendientes positivas y negativas con $A=3$ dB y $\Delta t=2$ s; de un total de 33 976 pendientes 17 877 son positivas y 16 099 negativas, que representan el 52,6 y el 47,4% del total, en este caso al tener una buena cantidad de muestras los valores se ajustan a las características de las pendientes, como es el caso de enlaces satelitales.

	3 dB		5 dB		7 dB		10 dB		15 dB	
	Cant.	%								
total	33976	100,0	5098	100,0	1648	100,0	318	100,0	103	100,0
pendientes (+)	17877	52,6	2635	51,7	879	53,3	210	66,0	40	38,8
pendientes (-)	16099	47,4	2463	48,3	769	46,7	108	34,0	63	61,2

Tabla 6.5 Estadística de pendientes (+) y (-), para $A=3, 5, 7, 10, 15$ dB y $\Delta t = 2$ s

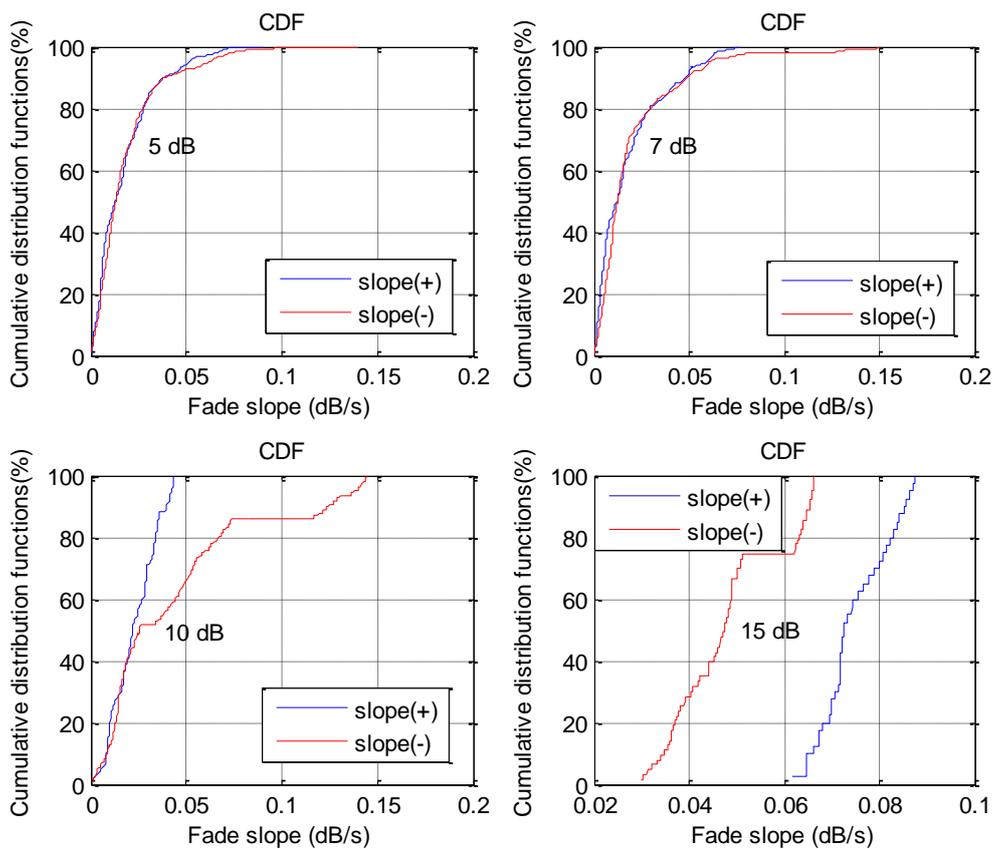


Figura 6.10 Función de distribución acumulada de pendientes por signo para, $A=5, 7, 10, 15$ dB y $\Delta t=2$ s

En la figura 6.10 y la tabla 6.5, se resumen las estadísticas de las pendientes por signo, se observa además que para 3, 5 y 7 dB la relación entre el número de pendientes positivas y negativas en casi la misma, siempre con una ligera tendencia en el número de positivas respecto a las negativas, también se observa que las funciones de distribución acumulada (CDF) son similares.

Para el caso de 10 y 15 dB tenemos que la CDF, no guardan relación, esto se comprueba en el caso de 10 dB los porcentajes entre pendientes positivas y negativas es de 66 y 34% respectivamente; el caso 15 dB donde la relación es de 38,8 y 61,2% tampoco guarda relación, esto se puede explicar por el tipo de enlace corto y la poca probabilidad de encontrar atenuaciones a esos valores, por consiguiente a la poca información estadística recopilada para dichos valores, como se determinó en el apartado anterior que rondan los 300 y 100 valores de pendientes, no siendo estos suficiente para realizar un buen análisis.

6.2.6 Función de distribución acumulada de las pendientes

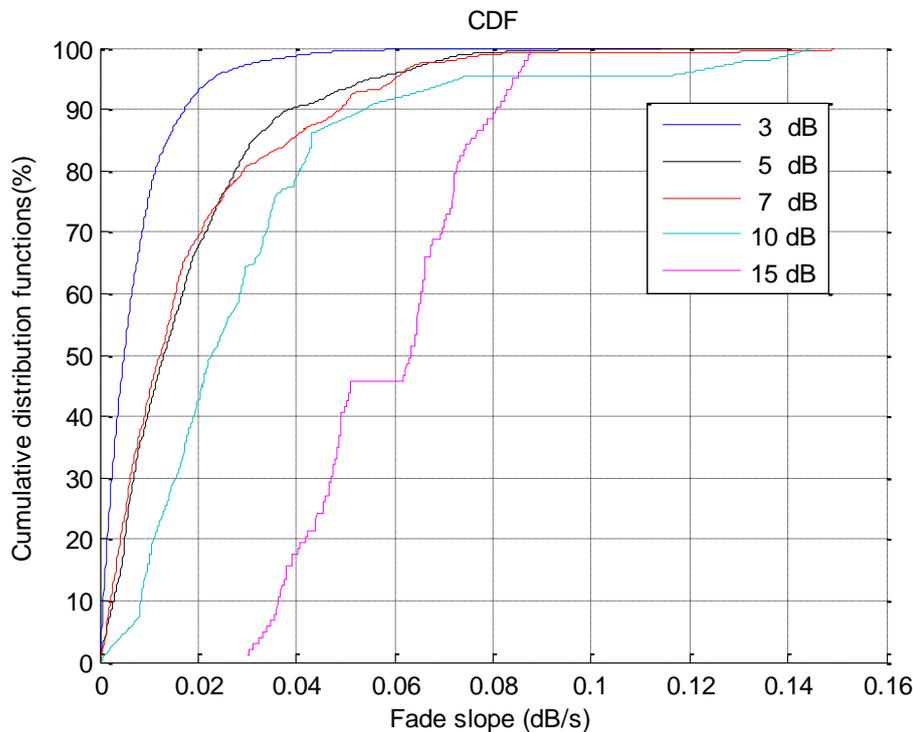


Figura 6.11 Función de distribución acumulada de las pendientes para A=3, 5, 7, 10 y 15 dB, $\Delta t=2$ s

En la figura 6.11 se aprecia la función de distribución acumulada de los valores absolutos de las pendientes para atenuaciones de 3, 5, 7, 10 y 15 dB, para un $\Delta t = 2$ s; las curvas de 3, 5 y 7 dB, guardan bastante relación con el comportamiento de las pendientes, como por ejemplo la de los enlaces satelitales, a diferencia de las curvas de 10 y 15 dB, que no guardan ninguna relación y el comportamiento no se ajusta a otros experimentos; a continuación se desprenden algunos datos.

Para el caso de 3 dB, el 98% de las pendientes son menores a 0,04 dB/s.

Para el caso de 5 dB, el 90% de las pendientes son menores a 0,04 dB/s.

Para el caso de 7 dB, el 86% de las pendientes son menores a 0,04 dB/s.

Para el caso de 10 dB, el 80% de las pendientes son menores a 0,04 dB/s y para 15 dB, el 18% de las pendientes son menores a 0,04 dB/s.

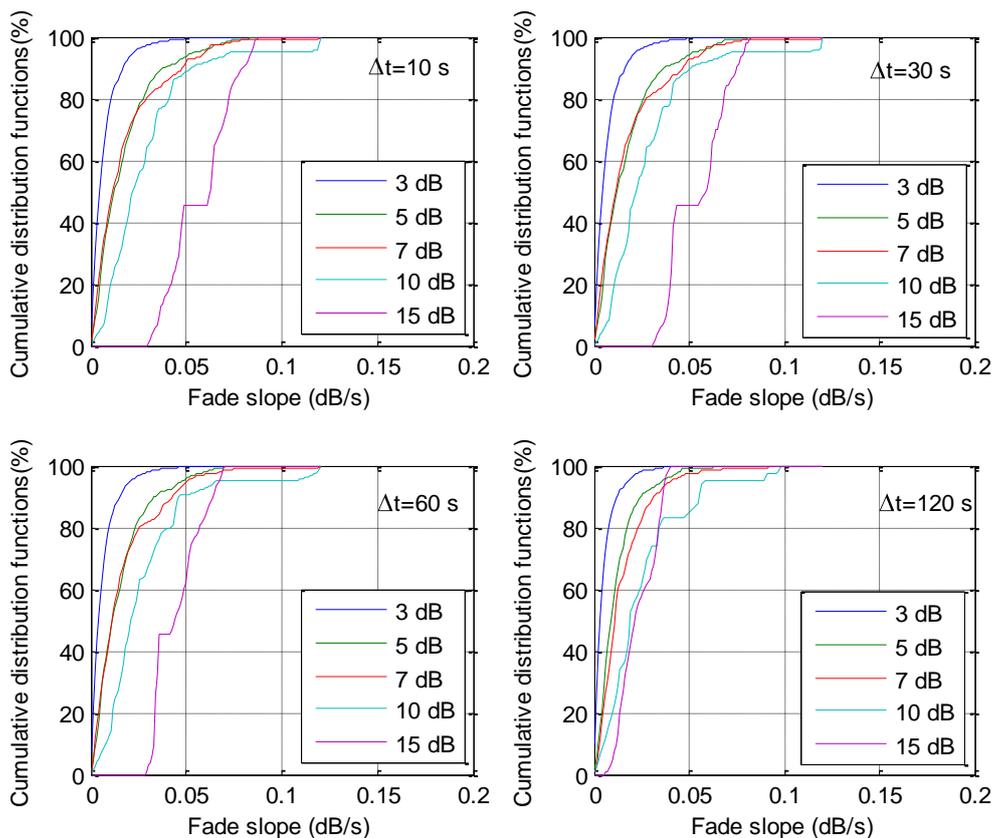


Figura 6.12 Función de distribución acumulada de las pendientes para $A=3, 5, 7, 10, 15$ dB y $\Delta t=10, 30, 60, 120$ s

En la figura 6.12 se grafican la CDF para atenuaciones de 3, 5, 7, 10, 15 dB y $\Delta t=10, 30, 60, 120$ s, para valores de 3 dB tiene valores similares para todos los intervalos de tiempo; para 5 dB las curvas son similares para 10, 30 y 60 s, mientras que para 120 s, toma valores más rápidos; para 7 dB se manejan comportamientos similares.

Para el caso de 10 dB el 90% de los valores absolutos de las pendientes superan el 0,05 dB/s para $\Delta t=10, 30, 60$ s y 83% para $\Delta t=120$ s.

Para la atenuación de 15 dB debido a la poca información estadística, las curvas no guardan relación con lo estudiado, por esta razón no se hacen mayores comentarios.

6.3 Función de distribución acumulada complementaria de las pendientes de desvanecimiento

6.3.1 Función de distribución acumulada complementaria con $\Delta t=2$ s

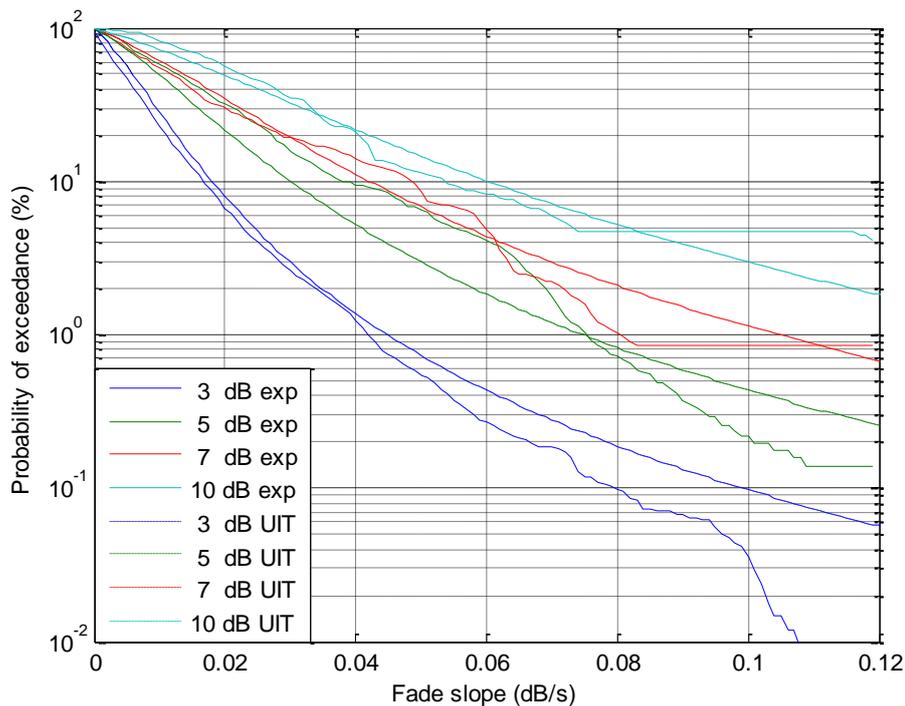


Figura 6.13 Función de distribución acumulada complementaria con datos experimentales y modelo UIT, para $A=3, 5, 7, 10$ dB y $\Delta t=2$ s

En la figura 6.13 se muestra la función de distribución acumulada complementaria para valores de atenuación de 3, 5, 7, 10 dB y $\Delta t=2$ s, el parámetro “s” tuvo que ser ajustado,

ya que el modelo UIT establece algunos rangos de validez, el primero de ellos es el ángulo de elevación comprendido entre 10° y 50°; y el segundo que la frecuencia de trabajo este entre 10 y 30 GHz.

El modelo de predicción de la UIT, condiciona el parámetro “s” con el clima y el ángulo de elevación, en nuestro caso al ser un enlace horizontal, dicho parámetro tiene que ser diferente y el que más se ajusta es $s=0,005$.

6.3.2 Función de distribución acumulada complementaria con $\Delta t=10, 30, 60$ y 120 s

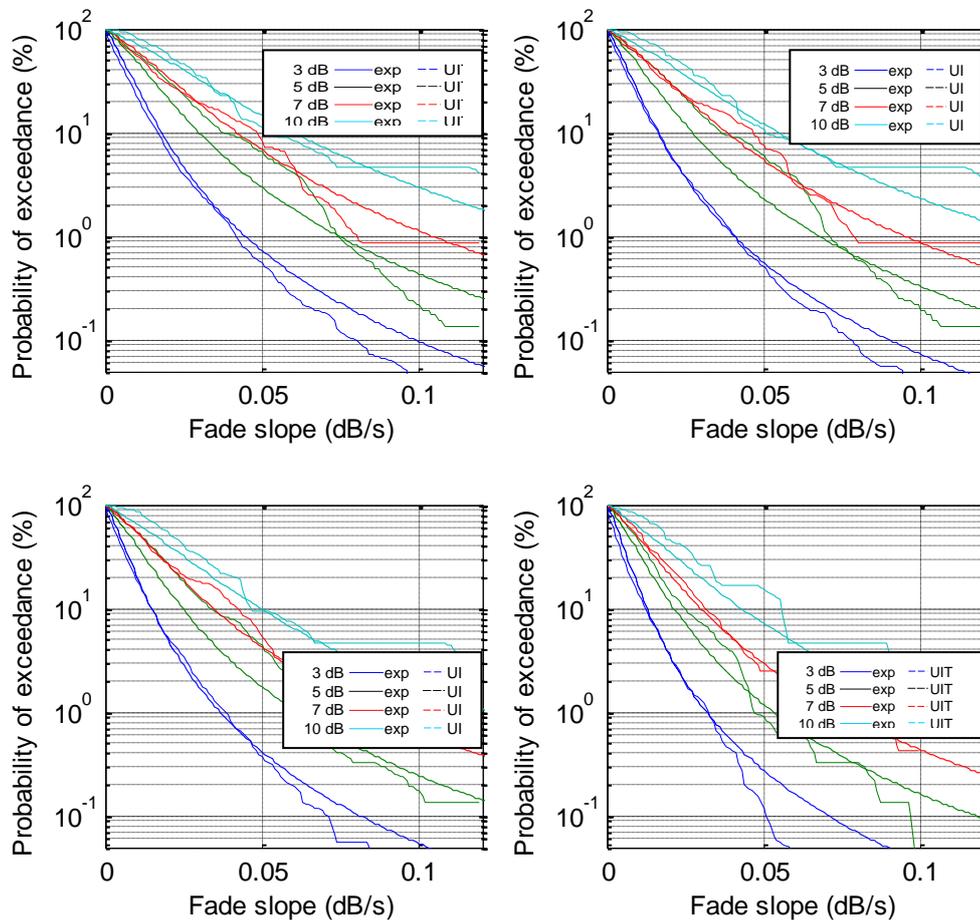


Figura 6.14 Función de distribución acumulada complementaria con datos experimentales y modelo UIT, para $A=3, 5, 7, 10$ dB y $\Delta t=10, 30, 60, 120$ s

En la figura 6.14 se muestra la función de distribución acumulada complementaria para valores de atenuación de 3, 5, 7, 10 dB y $\Delta t=10, 30, 60, 120$ s, al igual que en el caso anterior y al encontrarnos en un enlace horizontal, el parámetro “s” que se recomienda

no ofrece buenos resultados, por esta razón, en la tabla 6.6 se muestran los valores ajustados de “s” para los distintos valores de Δt .

Δt (s)	s
10	0,0055
30	0,0072
60	0,0090
120	0,0110

Tabla 6.6 Valores de s para Δt

6.4 Desviación estándar (σ)

6.4.1 Comparación entre los valores experimentales y teóricos de la UIT

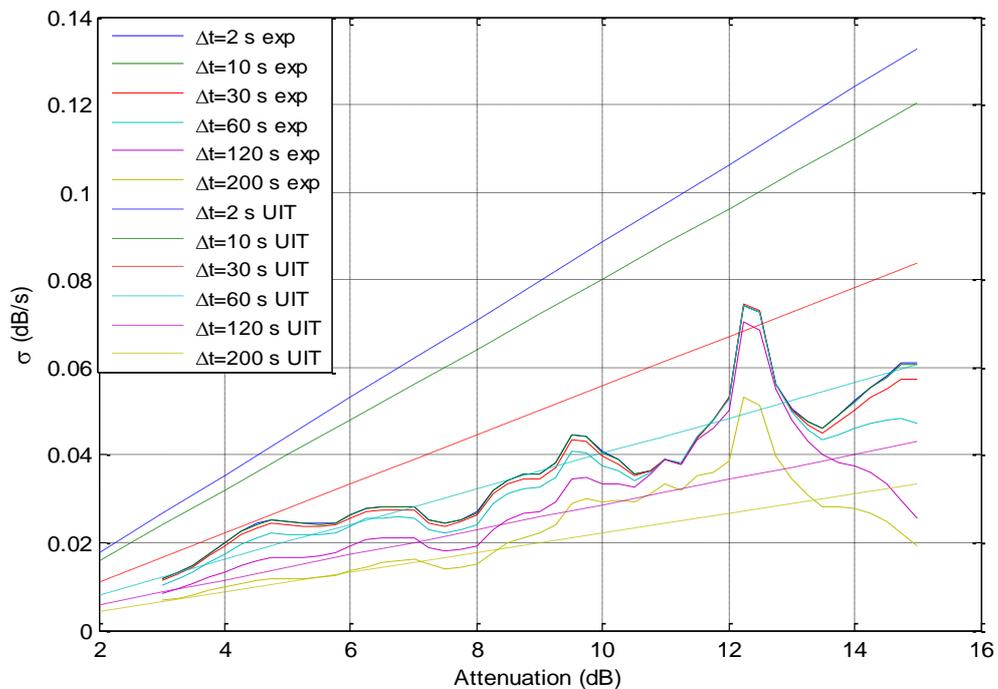


Figura 6.15 Gráfica σ experimental y modelo UIT, en función de la atenuación para $\Delta t=2, 10, 30, 60, 120, \text{ y } 200 \text{ s}$

En la figura 6.15 se muestran los valores experimentales de σ , muestreados con pasos de 0,5 dB de atenuación para varios Δt y los valores teóricos propuestos por la UIT, notamos que los valores de sigma para una determinada atenuación e intervalo de tiempo, están alejados, donde existe más similitud, es en valores de Δt de 120 y 200 s, en un rango de atenuaciones de 2 a 8 dB.

También se encuentra similitud para un valor de $\Delta t=60 \text{ s}$ y atenuaciones de 2 a 7 dB.

Los peores valores para σ se muestran para $\Delta t=2 \text{ s}$, en todo el rango de atenuación.

6.4.2 Comparación entre los valores experimentales y teóricos de la UIT con $s=0,005$

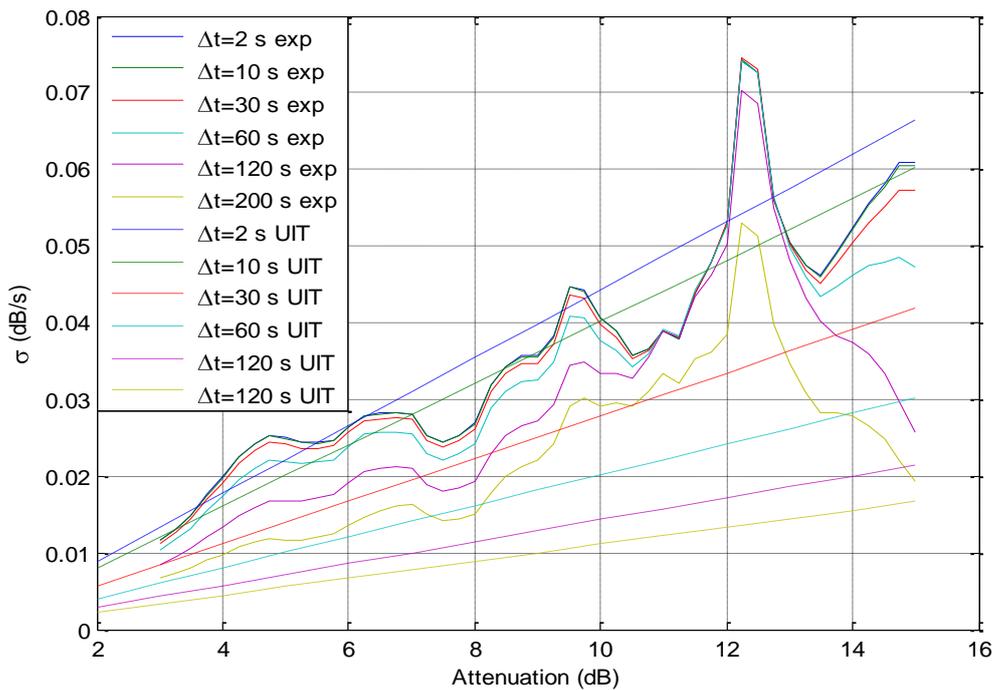


Figura 6.16 Gráfica σ experimental y modelo UIT, en función de la atenuación para $\Delta t=2, 10, 30, 60, 120, \text{ y } 200 \text{ s}$ ($S=0,005$)

En la figura 6.16 se muestran los valores experimentales de σ , similar al caso de la figura 6.15, con la diferencia que se realizó un ajuste del parámetro $s=0,005$, este

cambio ocasiona que la desviación típica de la función de distribución de probabilidad (PDF), se reduzca y las curvas tengan mayor grado de coincidencia.

De la gráfica se desprende, el punto de mayor coincidencia sería para $\Delta t=2$ s y $A= 12$ dB, con un valor de $\sigma=0,053$.

Para este caso las curvas que mejor se comportan son las de $\Delta t=2$ y 10 s, en un rango de 3 a 7 dB, y luego coincidencias puntuales para atenuaciones de 10 y 13 dB para la curva de 10 s; y 12 dB para el caso de 2 s de Δt .

6.4.3 Ajuste del parámetro “s” para cada valor de Δt

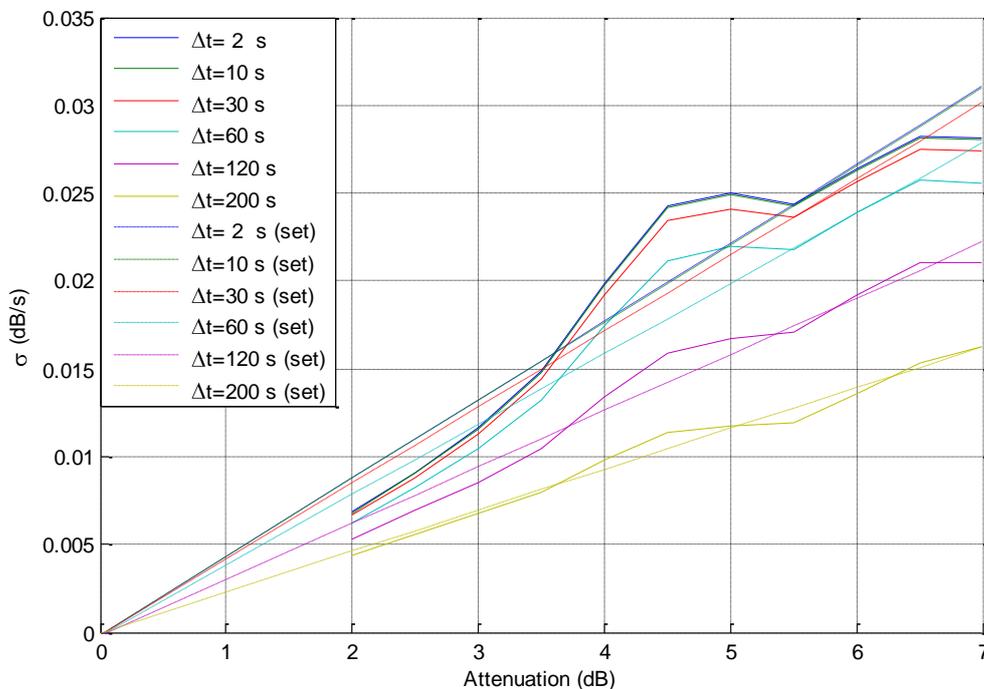


Figura 6.17 Gráfica σ experimental y modelo UIT, con parámetro s ajustado para cada valor de $\Delta t=2, 10, 30, 60, 120,$ y 200 s

En la figura 6.17 se muestran los valores experimentales de σ , y los valores del modelo UIT, con el “s” ajustado para Δt (ver tabla 6.7); el rango de valores considerados fue de 2 a 7 dB, esto debido a la mayor abundancia de datos en este rango de trabajo; recordemos que para 10 dB se obtuvo 318 muestras, siendo poco representativo para ser considerado en la PDF de las pendientes.

Δt (s)	s
2	0,0050
10	0,0055
30	0,0078
60	0,0099
120	0,0112
200	0,0105

Tabla 6.7 Valores de s para Δt

6.5 Función de distribución de probabilidades de las pendientes (PDF)

6.5.1 Comparación de la PDF experimental y el modelo UIT

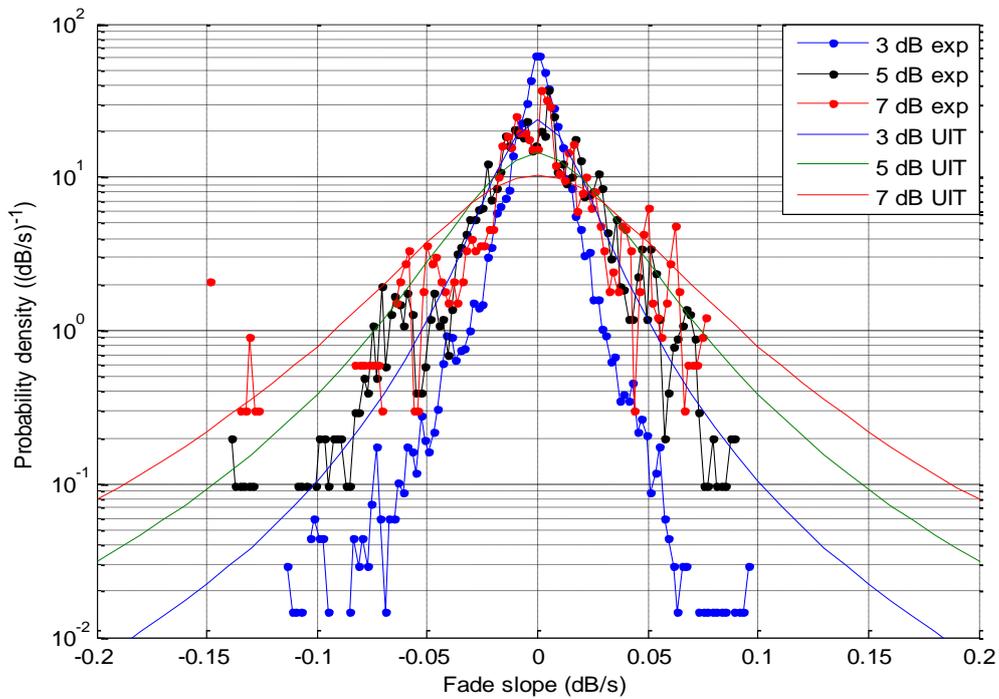


Figura 6.18 Gráfica PDF experimental y modelo UIT, para A=3, 5, 7 dB y $\Delta t=2$ s

En la figura 6.18 se observan las gráficas de la función de distribución de probabilidad (PDF), para atenuaciones de 3, 5, 7 dB, con $\Delta t=2$ s, tanto experimentales y teóricas, en este caso se usó un valor de $s=0,01$; como se explicó anteriormente este valor depende si el ángulo del enlace estaba en un rango de 10° a 50° , en todos los casos las curvas teóricas están más dispersas, es decir que tienen un mayor valor de σ .

Para la obtención de la gráfica experimental se partió del histograma con pequeños intervalos de 0,002 dB/s, no se consideró los valores de 10 y 15 dB en la figura puesto que, el número de muestras no es representativa y no se obtienen resultados claros.

6.5.2 Comparación de la PDF experimental y el modelo UIT ajustado

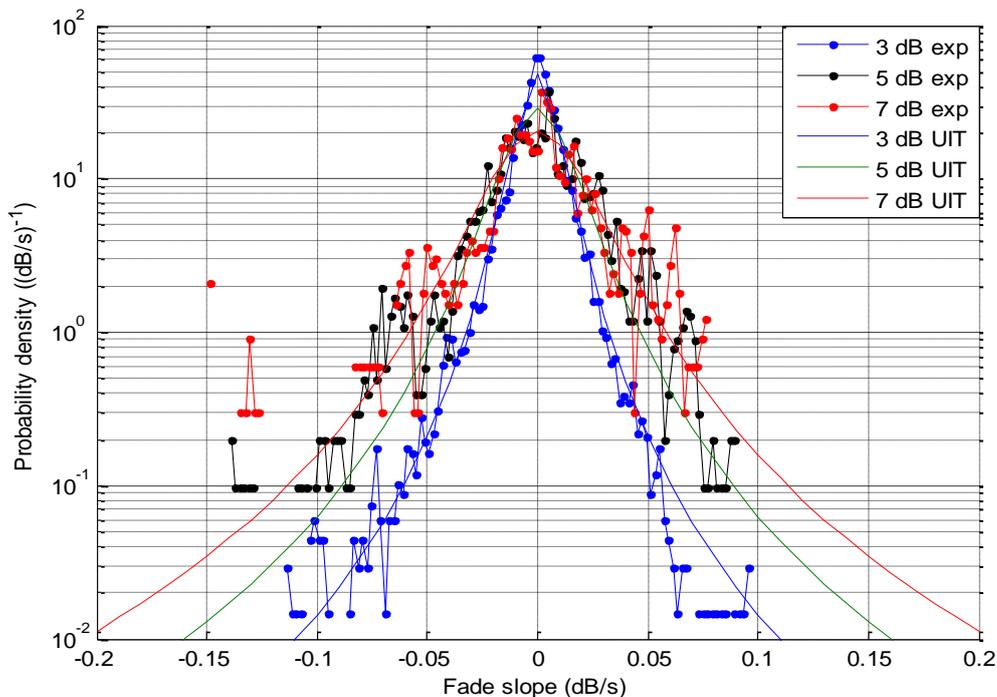


Figura 6.19 Gráfica PDF experimental y modelo UIT, para A=3, 5, 7 dB y $\Delta t=2$ s ($S=0,005$)

En la figura 6.19 se observan las gráficas de la función de distribución de probabilidad (PDF), para atenuaciones de 3, 5, 7 dB, con $\Delta t=2$ s, tanto experimentales y teóricas, en este caso se realizó un ajuste de $s=0,005$, a diferencia de la figura 6.18 las curvas de 3 y 5 dB guardan bastante similitud, mientras que la de 7 dB coincide en menor grado.

Es decir; al cambiar el valor del parámetro s , el modelo se ajusta más a los datos experimentales, de hecho se necesitan más pruebas para poder establecer el comportamiento de las pendientes en enlaces terrenales.

6.5.3 Comparación de la PDF experimental y el modelo UIT, con $\Delta t=120$ s

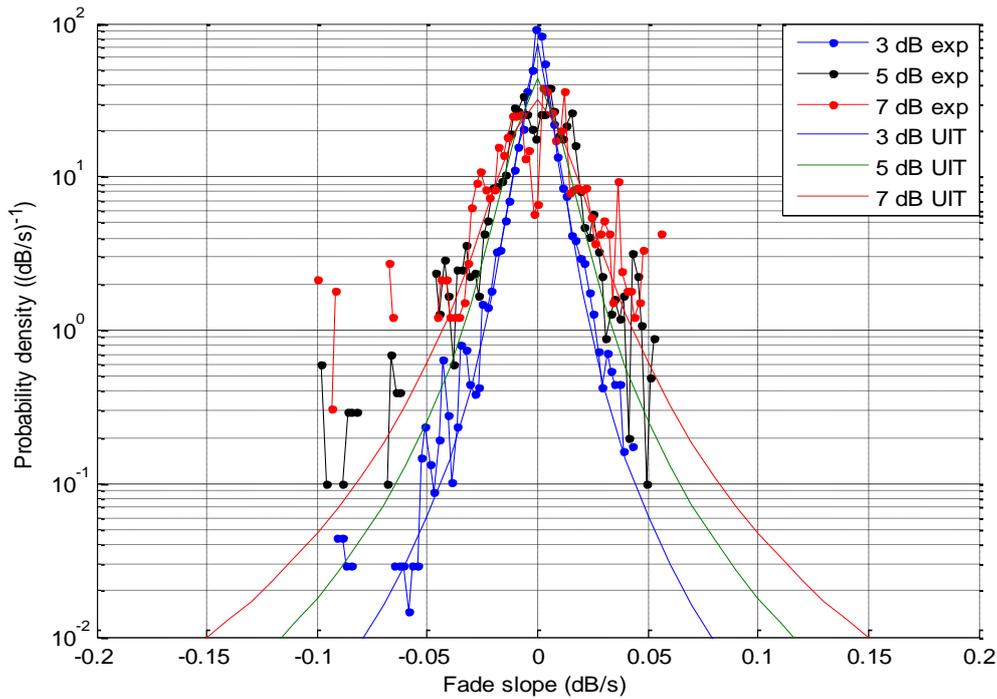


Figura 6.20 Gráfica PDF experimental y modelo UIT, para $A=3, 5, 7$ dB y $\Delta t=120$ s

En la figura 6.20 se observan las gráficas de la función de distribución de probabilidad (PDF), para atenuaciones de 3, 5, 7 dB, con $\Delta t=120$ s y $s=0,01$, en este caso sin realizar ningún ajuste las curvas guardan bastante relación, tienen la misma distribución, esto se desprende de la figura 6.15, donde se ve que los valores que toma σ , para $\Delta t=120$ s, en un rango de 3 a 9 dB son casi los mismos.

Podríamos realizar exactamente lo mismo y coincidiría de la misma manera para un valor de $\Delta t=200$ s.

CAPÍTULO 7 : CONCLUSIONES

Algunas conclusiones:

Para la elaboración del presente trabajo, se realizó una búsqueda bibliográfica, sobre atenuación y dinámica de desvanecimiento, encontrándose dicha información para enlaces satelitales, mas no así para enlaces terrenales, si bien es cierto se encontraron modelos de atenuación, pero ningún modelo de dinámica de desvanecimiento, solo algunas medidas reportadas.

Por lo expuesto anteriormente se compararon las medidas experimentales, con los principales modelos de duraciones propuestos para enlaces satelitales, como son: modelo UIT, Cost205, Lekkla McCormick y Rogers; y Cheffena-Amaya.

Para el caso de las pendientes de los desvanecimientos se realizaron comparaciones, y ajustes de los parámetros con el modelo UIT, siendo este el más completo y fiable de los mencionados para enlaces satelitales, realizando distintas pruebas para los distintos valores de atenuación, Δt y el parámetro s . Todo esto se encuentra en el capítulo 6 del presente trabajo.

Se ha realizado un procesado de las series de tiempo, tanto de los datos filtrados, como no filtrados para ver sus principales diferencias, para los datos filtrados el número de desvanecimientos entre 1-10 s es uno, mientras que para los datos sin filtrar el número de desvanecimientos es casi 300, siendo esta una diferencia importante a tomar en cuenta.

Las gráficas y los valores del tiempo total son casi las mismas, demostrándose de esta manera que, para los datos no filtrados las duraciones cortas no contribuyen significativamente en dicho parámetro.

Se realizaron comparaciones con los modelos de duraciones antes mencionados y se puede decir que, para el caso de la función de probabilidad, los modelos que tienen un mejor comportamiento son el modelo Cost205, donde habría que decir que para la elaboración de su gráfica, se realizó un cálculo con los datos de las medidas para hallar

el parámetro N_{32} , que es el número de duraciones que superan un umbral y tienen duraciones mayores a 32 s, este valor le permite ajustar bien su predicción. El que le sigue es el modelo UIT, que utiliza valores de frecuencia y ángulos de elevación, para este caso se empleó 37,06GHz y 2° , se puso este valor cercano a 0° para no desestimar las fórmulas que proporcionan la probabilidad de desvanecimiento.

Los modelos que peor se adaptan son el de Lekkla, esto se puede atribuir a las zonas más lluviosas donde se realizaron dichas pruebas, como son Tailandia e Indonesia, caso distinto a Madrid al tener un clima mucho más seco; se podría mejorar el modelo ajustando el parámetro D_2 que utiliza el autor para cada emplazamiento; y por último el modelo Cheffena-Amaya, es el peor de los cuatro, aquí se realizó algunas pruebas tratando de ver algunos parámetros como es el caso de α , que para el enlace se obtiene un valor de 0,8 aproximadamente, mientras que con un valor de 0,1 la curva se ajusta mucho más, de hecho este modelo no se ajusta nada bien, además de contar con la característica de tener un enlace corto de 1 km.

En la comparación del número de desvanecimientos, se llegó a conclusiones similares, los modelos que mejor se adaptan son, el modelo Cost205 y luego el modelo UIT; mientras que el modelo Lekkla y Cheffena son los que peor se adaptan. Las razones son las mismas explicadas para el caso de probabilidad de desvanecimientos, con un agravante en el caso de Cheffena, que parte de una expresión que determina el número de desvanecimientos en enlaces satelitales.

En el tiempo total y fracción de tiempo, la comparación con el modelo UIT, es bastante fiable hasta un valor de duración de 60 s, a partir de un valor de duración de 100 s las curvas caen con mayor rapidez.

Se ha realizado un estudio estadístico de las pendientes, para determinar su comportamiento en un enlace terrenal, se observó que guardan relación la distribución de valores de pendientes, tanto positivas como negativas, y la función de distribución acumulada, realizándose este análisis para varias atenuaciones y varios Δt , llegando a la conclusión que tienen similitud con las pendientes de los enlaces satelitales.

Se determinó que para este experimento, el único parámetro del modelo de predicción de pendientes, que depende del clima es s , así que se procedió a realizar ajustes de dicho parámetro para optimizarlo, obteniendo mejores resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] García del Pino, P. “Caracterización experimental de la propagación a 50 GHz en trayecto inclinado. Tesis Doctoral” ETSIT – UPM , 2003
- [2] Velasco Oria de Rueda, Jorge; “Estudio estadístico de la dinámica de desvanecimientos en un enlace por satélite a 50 GHz”, Proyecto Fin de Carrera, ETSIT – UPM , 2005
- [3] Allnut, J., “Satellite to Ground Radiowave Propagation”, 2nd edition, The IET, 2011.
- [4] Hernando Rábanos, J.M., Transmisión por Radio, Editorial universitaria Ramón Areces, 6ª edición, Madrid 2008
- [5] Salonen E., Karhu, S. and Hyvonen, R.,”Study of improved propagation predictions”, ESA/ESTEC Contract 9455/91/NL/LC(SC), Final Report, 1994
- [6] ITU-R, Recommendation P.676-8, ”Attenuation by atmospheric gases”, Geneva, Switzerland 2009
- [7] UIT-R, Recomendación P.840-5, “Attenuation due to clouds and fog”, Ginebra, Suiza 2012
- [8] Tervonen J. and Salonen E, “Test of recent cloud attenuation prediction models”, Proceedings of AP2000, Davos, Switzerland, April 2000.
- [9] Salonen, E., Uppala S., “New prediction method of cloud attenuation”, Electr. Lett., vol. 27, pp.1106-1108, 1991.
- [10] Hernando Rábanos, J.M., Transmisión por Radio, Editorial universitaria Ramón Areces, 6ª edición, Madrid 2008
- [11] Dissanayake A., J. Allnutt, and Haidara F., “A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along earth-satellite paths”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 45, no.10, pp. 1546-1558, 1997.
- [12] Rocha A., “Analysis of a New Rain Rate Data Base”, ESA Workshop on Radiowave Propagation Models, Tools and Data for Space Systems, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, December 2008.

- [13] UIT-R, Recomendación P.839-3 “Modelo de estimación de la altura de lluvia para utilizar en los métodos de predicción”, Ginebra, Suiza, 2001
- [14] UIT-R, Recomendación P.838-3, “Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción”, Ginebra, Suiza, 2003
- [15] Assis, M.S., Einloft, C.M., “A Simple Method for Estimating Rain Attenuation Distributions.” Proc. URSI, La Baule, France, 1977 p.301,1977
- [16] Flavin R.K., “Satellite link rain attenuation in Brisbane and a proposed new model for Australia”, Telstra Research Laboratories, Report no. 8375, 1996
- [17] CCIR Document 5C/52 (Brazil), “Slant-path Attenuation Prediction Method Based on the Complete Point Rainfall Rate Distribution”, Geneva, Switzerland, ITU, December 1992.
- [18] Bryant G.F., Adimula I., Riva C., and Brussaard G., “Rain Attenuation Statistics from Rain Cell Diameters and Heights”, International Journal of Satellite Communications and Networking, 19, 3, May-June 2001, pp. 263-283.
- [19] Crane R.K. “Prediction of attenuation by rain”, IEEE Transaction on Communications, COM-28, 9, September 1980, pp. 1717-1733
- [20] Crane R.K., “A two-component rain model for the prediction of attenuation statistics”, Radio Science, Vol. 17, No. 6, November- December 1982, pp. 1371-1387
- [21] Capsoni C., F. Fedi, C. Magistrone, Pawlina A. and Paraboni A., “Data and theory for a new model of the horizontal structure of rain cells for propagation applications”, Radio Science, Vol. 22, No. 3, March- April 1987, pp. 395-404
- [22] García-López J.A., Hernando J.M. and Selga J.M., “Simple rain attenuation prediction method for satellite radio links”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-36, No. 3, March 1998, pp.444-448
- [23] ITU-R Recommendation P.618-10, “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems”, Geneva, Switzerland, ITU, 2009
- [24] Yamada M., Karasawa Y., and Yasunaga M., “An improved prediction method for rain attenuation in satellite communications operating at 10-20 GHz”, Radio Science, 22, 6, November-December 1987, pp. 1053-1062.
- [25] Leitao M.J. and Prof. Watson P.A., “Method for prediction of atenuation on earth-space links based on radar measurements of the physical structure of

rainfall”, IEEE Proceedings on Communications, Radar and Signal Processing, 133, 4, part F, July 1986, pp. 429-440.

- [26] Matricciani E., “Rain attenuation predicted with two-layer rain model”, European Transactions on Telecommunication, Vol. 2, No. 6, November-December 1991, pp. 715-727
- [27] Misme P. and Waldteufel P., “A model for attenuation by precipitation on a microwave earth-space link.” Ra. Sci., Vol.15, p.655, 1980.
- [28] Stutzman W.L., Dishman W.K., “A simple model for the estimation of rain-induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths”, Radio Science, Vol. 19, 3, May-June 1984, p. 946 (Corrections and reference to the original paper of 1982)
- [29] Svjatogor L., “Prostranstvennaia korelacia vypadenjija dozdnej vdol zemnoj poverchnostji” (in Russian), Symposium ekspertov stran uchastnic programmy INTERKOSMOS (Interkosmos symposium, theme 5 of the established telecommunication working group, Dresden, GDR, 1985
- [30] COST Action 255. Radiowave Propagation Modelling for SatCom Service at Ku-Band Above, Noordwijk, The Netherlands, ESA Publications Division, 2002
- [31] Fiser O., “An algorithm for computing the distribution of rain attenuation”, Slaboproudny obzor, Vol. 45, No 2, pp. 84-88, 1984
- [32] M.S. Alouini y P.G. Steffes, “Impact of tropospheric scintillation on direct-sequence spread-spectrum satellite communication networks”, URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics, ISSSE '95, pp. 67-60, octubre 1995
- [33] ITU-R, Recommendation P.1623-1, ”Prediction method of fade dynamics on Earth-space paths”, Geneva, Switzerland, 2005
- [34] COST Project 205, “Influence of the atmosphere on radio propagation on satellite-Earth paths at frequencies above 10 GHz,” Rep. EUR. EN, 1985, ISBN: 92-825-5412-0.
- [35] Vilar, E., A. Burgueño, M. Puigserver y J Austin, “Analisis of joint rainfall rate and duration statistics: Microwave System Design Implication”, IEEE Trans. Commun., COM-36(6), 650-661. 1988.

- [36] Moupfouma, F., L. Martin, N. Spanjaard y K. Huhges “Rainfall rate characteristics for microwave systems in tropical and equatorial areas ”, Int. J. Sat. Com., 8, 151-161. 1990.
- [37] Goldhirsh, J. “Rain-Rate Duration Statistics over a Five-Year Period: A Tool for Assessing Slant Path Fade Durations” , IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 43, No.12 ,diciembre 1995.
- [38] Lekkla, R., K. S. Mc Cormick and D. V. Rogers, “12 GHZ fade duration statistics on earth-space paths in South-East Asia”, Proceedings of URSI Commission F Open Symposium on Climatic Parameters in Radiowave Propagation Prediction (CLIMPARA '98), Ottawa, Ontario, Canada, 167-170, 1998.
- [39] Rice, P. L. and N. R. Holmberg: “Cumulative Time Statistics of Surface-Point Rainfall Rates”, IEEE Trans. Commun., COM-21(10), 1131-1136, 1973.
- [40] Timothy, K., N. C. Mondal y S. K. Sarkar, “Dynamical properties of rainfall for performance assessment of earth/space communication links at Ku and Ka bands”. Int. J. Sat. Com., 16, 53-57, 1998.
- [41] Gibbins, C. J. y K. S. Paulson, “Durations of rain events and rain attenuations at millimetric wavelengths”, Millennium conference on Antennas & Propagation (AP 2000) , Davos, Suiza, SP-444, paper 115, 2000.
- [42] Paulson, K.,Zs. Kormányos y L. Pedersen, “A Climate-Variable Model For Rain Fade Duration Statistics”, Proceedings of URSI commission F Meeting on Climatic Parameters in Radiowave Propagation Prediction (CLIMPARA '2001), Budapest, Hungria, WPP-184, 107-111, 2001.
- [43] Bråten, L.E., C. Amaya y D. V. Rogers, “Fade Durations on Earth-Space Links: Dependence on Path and Climatics Parameters”, Proceedings of URSI commission F Meeting on Climatic Parameters in Radiowave Propagation Prediction (CLIMPARA '2001).
- [44] Masseng, T., P. M. Bakken, “A stochastic dynamic model of rain attenuation”. IEE Trans. Commun. COM-29(5), 660-669 , 1981.
- [45] L. S. Ornstein and G. E. Uhlenbeck, “On the theory of Brownian motion,” Phys. Rev., vol. 36, pp. 823-841, 1930.

- [46] Nelson, B., W. L. Stutzman, “Fade slope on 10 to 30 GHz earth-space communication links-measurements and modelling”, *IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.*, 143(4), 353-357, 1996.
- [47] Timothy, K.I., Ong J.K and Choo E.B.L. (2000). “Descriptive fade slope statistics on INTELSAT Ku-band communication link”, *Electronic Letters*, 36(16), 1422-1424
- [48] K. Kastamonitis, B. Grémont y M. Filip, “A Study of Rain Fade Slope”, COST 280 4th MC Meeting, Praga, República Checa, noviembre 2002.
- [49] Dennis G. Sweeney, J. T. Bostian, “The dynamics of rain-induced fades”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 40, No. 3, marzo 1992.
- [50] ITU-R, Recomendacion P.1623-1, ” Método de predicción de la dinámica de los desvanecimientos en los trayectos Tierra-espacio”, Geneva, Switzerland, 2005.
- [51] Salces Sillero, Ángel. “Estudio experimental de la propagación para un enlace por satélite en banda Ka” ETSIT – UPM , 2010.
- [52] Amaya C., “Analysis of fade duration along Earth-space paths in the tropics,” in 2nd Europ. Conf. Antennas Propag., Edinburgh, Scotland, Nov. 11-16, 2007.
- [53] Van de Kamp, M.M.J.L. (1999): Climatic radiowave propagation models for the design of satellite communication systems, Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, the Netherlands, ISBN 90-386-1700, section 4.
- [54] Van de Kamp, M.M.J.L. and G. Brussaard (2000): “Statistical análisis of fain fade slope”, Millennium conference on antenas & propagation (AP 2000), Davos, Switzerland, SP-444, paper 0970.
- [55] Manso Cristóbal, Pablo; “Estudio de los efectos de la atenuación por niebla y lluvia en radioenlaces digitales”. ETSIT – UPM , 2007.
- [56] Murillo Fariñas, Jorge; “Estudio de los efectos de la atenuación por lluvia en radioenlaces digitales hasta 85 GHz”. ETSIT – UPM , 2011.
- [57] Crane, Robert K. “Prediction of Attenuation by Rain”. *IEEE Transactions on communications*. 1980, vol. 28, nº 9, pp. 1717 – 1733.

- [58] Perez García, N.A.; Da Silva Mello, L.A.R. “Improved method for predication of rain attenuation in terrestrial links”. *Electronics Letters*. 2004, vol. 40, nº 11.
- [59] Crane, Robert K. “A two – component rain model for the prediction of attenuation statistics”. *Radio Science*. 1982, vol. 17, nº 6, pp. 1371 – 1387.
- [60] García López, J.A.; Peiró, J. “Simple rain – attenuation – prediction technique for terrestrial radio links”. *Electronics Letters*. 1983, vol. 19, nº 21, pp. 879 – 880.
- [61] Moupfouma, Fidèle. “Electromagnetic Waves Attenuation due to Rain: A Prediction Model for Terrestrial or L.O.S SHF and EHF Radio Communication Links”. *Springer New York*, 2009, vol. 30, nº 6.
- [62] UIT-R. *Diseño de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa*. UIT-R P.530. 14ªed. 2012.
- [63] Michael Cheffena. “Fade Duration Statistics of Millimetre Wavelength Terrestrial Line-of-Sight Links”, Proc. 4th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), Barcelona, Spain, 2010.