

Análisis de modelos de atenuación por lluvia en enlaces terrestres aplicados a enlaces espaciales

Nerea Espinosa Giralt

Máster Universitario en
Ingeniería de
Telecomunicación
Sistemas de
Telecomunicación

Tutor/a de TF

Víctor Monzón Baeza

Profesor/a responsable de la asignatura

Carlos Monzo Sánchez

Fecha Entrega

9 de enero de 2023



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-
NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

Ficha del Trabajo Final

Título del trabajo:	Análisis de modelos de atenuación por lluvia en enlaces terrestres aplicados a enlaces espaciales
Nombre del autor/a:	Nerea Espinosa Giralt
Nombre del Tutor/a de TF:	Víctor Monzón Baeza
Nombre del/de la PRA:	Carlos Monzo Sánchez
Fecha de entrega:	9 de enero de 2023
Titulación o programa:	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Área del Trabajo Final:	Sistemas de Telecomunicación
Idioma del trabajo:	Castellano
Palabras clave	Efectos de la lluvia, satélites, atenuación por lluvia, modelos de atenuación, precipitaciones.
Resumen del Trabajo	
<p>En la actualidad, ha aumentado la demanda del uso del satélite para comunicaciones. Esto es debido a que el satélite es capaz de cubrir zonas geográficas extensas y llegar a lugares donde otros sistemas de comunicación tradicionales no pueden llegar.</p> <p>Las comunicaciones por satélite suelen hacerse a través de los denominados satélites de órbita geoestacionaria (GSO o <<Geo-Stationary Orbit Satellites>> por sus siglas en inglés) pero el aumento en la demanda antedicho está cambiando el sector y está haciendo que satélites de órbita no geoestacionaria (NGSO o <<Non-Geo-Stationary Orbit Satellites>> por sus siglas en inglés) ubicados en órbitas inferiores que se han utilizado habitualmente para el posicionamiento global y la exploración científica, así como para la captura de imágenes de alta resolución de la superficie de la Tierra, estén transformando sus usos y se estén empezando a utilizar para fines comunicativos.</p> <p>El propósito de este trabajo es realizar un análisis comparativo de los diferentes modelos de estimación de la atenuación por lluvia para satélites a distintas frecuencias y elevaciones para su comparación con el modelo estandarizado de la ITU-R. Esto es fundamental a la hora de enfrentar los cambios en el sector puesto</p>	

que, como bien los profesionales de la telecomunicación, el fenómeno más perjudicial para a las comunicaciones por satélite es la atenuación por lluvia. Este fenómeno es más dañino a medida que la longitud de onda se aproxima al tamaño de la gota de agua, es decir, cuanto mayor es la frecuencia de onda emitida.

Abstract

Nowadays, there is an increasing demand for the use of satellites for communications. This is because satellites are able to cover large geographical areas and reach places where other traditional communication systems cannot reach.

Satellite communications are usually done through the so-called geostationary orbit satellites (GNSO or “Geo-Stationary Orbit Satellites”) however the increased demand mentioned above is changing the sector and is causing non-geostationary orbit satellites (NGSO or “Non-Geo-Stationary Orbit Satellites”) located in lower orbits and that have been commonly used for global positioning and scientific exploration, as well as for capturing high-resolution images of the Earth's surface, are transforming their uses and are beginning to be used for communication purposes.

The purpose of this work is to perform a comparative analysis of the different rain attenuation estimation models for satellites at different frequencies and elevations to be afterwards compared with the standardized ITU-R model. This is essential when facing changes in the industry since, as telecommunication professionals know, the most damaging phenomenon for satellite communications is rain attenuation. This phenomenon is more damaging as the wavelength approaches the size of a drop of water, i.e. the higher the frequency of the emitted wave.

Agradecimientos

En primero lugar quiero dar las gracias a mis padres y mi hermano por estar siempre dándome fuerzas para cumplir las metas que uno se propone y animándome a continuar siempre, cueste lo que cueste.

Segundo, quiero darle las gracias a mi tutor Víctor por orientarme y ayudarme a conseguir realizar este trabajo.

Quiero agradecer también y no menos importante a la familia que uno elige (ellos saben quiénes son) por estar de forma incondicional y ser uno de los motores de motivación y ayuda.

Por último, el mayor agradecimiento te lo debo a ti Roberto, GRACIAS por ser mi pilar y la persona con la que día a día construyo mi vida. Sabes que sin ti nada de esto sería posible. Como solo tú y yo sabemos... ETERNO.

Y como siempre, a vosotros, mis abuelos. Mi mayor suerte.

Índice

Ficha del Trabajo Final	i
Resumen del trabajo / Abstract	i/ii
Agradecimientos	iii
Índice	iv
Análisis de modelos de atenuación por lluvia en enlaces terrestres aplicados a enlaces espaciales.	
1. Introducción	1
1.1. Contexto del Trabajo	1
1.2. Objetivos del Trabajo	3
1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad	4
1.4. Enfoque y método seguido	4
1.5. Planificación del trabajo	5
1.6. Breve sumario de productos obtenidos	6
1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria	7
2. Estado del arte	9
2.1. Sistemas de Comunicaciones por satélite	9
2.1.1. Elementos de un sistema de comunicaciones por satélite	9
2.1.2. Satélites NGSO y GSO	12
2.1.3. Bandas de frecuencias en satélites NGSO y GEO	16
2.2. Balance de enlace Satcom	19
2.3. Efecto de la atenuación por lluvia	24
2.3.1. Identificación de modelos de atenuación por lluvia	24
2.3.2. Diferencia entre los modelos de atenuación por lluvia terrestres y espaciales	27
2.4. Machine learning para predecir la atenuación por lluvia	28
2.4.1. Avances en inteligencia artificial para la lluvia	28
2.4.2. Métodos para compensar la atenuación por lluvia	29
3. Análisis de modelos de atenuación por lluvia	31
3.1. Criterios de análisis	31
3.2. Criterio de análisis 1: tierra-espacio	33

3.3. Criterio de análisis 2: parámetros de enlace	36
3.4. Criterio de análisis 3: parámetros de disponibilidad	39
3.5. Criterio de análisis 4: regiones de utilización	40
3.6. Criterio de análisis 5: <i>machine learning</i>	42
3.7. Conclusión del análisis	45
4. Descripción de los modelos seleccionados	46
4.1. Modelo ITU-R	47
4.2. Modelo Crane Global	49
4.3. Modelo García-López	51
4.4. Modelo Xidian University	53
5. Resultados obtenidos	55
5.1. Escenario 1	55
5.2. Escenario 2	60
5.3. Escenario 3	66
5.4. Escenario 4	70
6. Conclusiones y trabajos futuros	75
7. Glosario	77
8. Lista de Figuras	80
9. Lista de Tablas	82
10. Bibliografía	83

1. Introducció

1.1. Contexto del Trabajo

Los datos apuntan a que, a medida que la sociedad va evolucionando, los ciudadanos demandan más conexiones de alta velocidad y el satélite es cada vez más útil a estas necesidades. Entre las maravillas de la tecnología del enlace satelital se encuentran funcionalidades tales como el posicionamiento global, la telefonía, la transmisión de señales de radio y de televisión, la ayuda a la navegación y la conectividad por datos, entre otros, y lo mejor es que los satélites son capaces de proporcionar cobertura instantánea en zonas geográficas extensas y en lugares a donde no se llega con ninguna otra tecnología terrestre.

El enlace satelital tiene dos componentes principales: i) uno es el segmento terrestre y ii) el otro es el segmento espacial. Hay literatura académica que habla también del segmento usuario como tercer componente principal, pero, a los efectos de este Trabajo, vamos a centrarnos en los dos primeros. El segmento terrestre está formado por una antena y unos equipos de transmisión y recepción y el segmento espacial, que es fundamental, es el propio satélite.

La operatividad de un enlace satelital obliga a tener en cuenta la órbita en la que está el satélite y la banda de frecuencia del mismo. La órbita, es decir, a la altitud a la que se encuentra el segmento espacial, se clasifica en tres tipos principales: i) la órbita terrestre baja (LEO o '*Low Earth Orbit*' por sus siglas en inglés) que es aquella en la que el satélite se encuentra a entre 160 y 1.600 kilómetros de altitud, ii) la órbita terrestre media (MEO o '*Medium Earth Orbit*' por sus siglas en inglés) que es aquella en la que el satélite se encuentra a entre 5.000 y 20.000 kilómetros de altitud y iii) la órbita geoestacionaria (GEO o '*Geosynchronous Equatorial Orbit*' por sus siglas en inglés) que es aquella en la que el satélite se encuentra a 35.786 kilómetros de altitud. La banda de frecuencia, es decir, el espectro electromagnético de radio en el que se transmiten las señales satelitales se clasifica de varias maneras, pero las utilizadas con mayor habitualidad son las denominadas banda L, banda C y otras más altas como la banda Ku, la banda Ka o las bandas Q/V.

Pero esta tecnología, por maravillosa que resulte, no es perfecta. Como es ampliamente conocido entre los profesionales del sector de las telecomunicaciones, las señales electromagnéticas de radio transmitidas hacia y recibidas desde un satélite pueden sufrir atenuaciones por fenómenos meteorológicos como la lluvia, las nubes o los gases atmosféricos, entre otros, que pueden interrumpir o degradar el enlace satelital. Este tipo de atenuación por lluvia se debe a que las gotas de agua absorben y dispersan las ondas electromagnéticas de distintas maneras dependiendo de la frecuencia, el ángulo de elevación, la intensidad de la precipitación, el tamaño y la distribución de las gotas. La banda Ku, la banda Ka o las bandas Q/V, por ejemplo, son más sensibles a la atenuación por fenómenos meteorológicos que otras bandas debido a que su frecuencia de onda es cercana a los 10 GHz.

La lluvia es uno de los factores limitantes en todas las órbitas, pero en el caso de los satélites LEO, hay que prestar más atención en el diseño, debido a que es necesario calcularla para varias regiones, al contrario que en los satélites GEO, que únicamente es necesario para una región. Esto se debe, a que los satélite LEO se encuentran situados en órbitas más bajas, más cercanos a la superficie terrestre, con un movimiento de aproximadamente 16 órbitas diarias (a diferencia de los GEO tradicionales, que una de sus órbitas se corresponde con una rotación de la Tierra), por este motivo se puede dar el caso de que exista una región cubierta por satélite LEO que presente una lluvia intensa provocando una atenuación en el servicio ofrecido sobre otra región con ausencia de lluvia.

Muchos investigadores trabajan para entender cómo afecta esta atenuación por precipitaciones a los enlaces satelitales y buscan perfeccionar los métodos estadísticos con los que predecir y mejorar estos fenómenos meteorológicos que atenúan la calidad de unos servicios cada vez más demandados por la sociedad. En otras palabras, estudiar como poder realizar el cálculo de atenuación por precipitaciones con los diferentes modelos de atenuación que existen para satélites, viendo cual es el más utilizado y aplicarlo en una determinada región podría decirse que es equivalente a mejorar las comunicaciones por satélite actuales.

1.2. Objetivos del Trabajo

Una vez detallado el contexto inicial de este Trabajo, en este apartado se definen los objetivos principales de este estudio:

- Objetivo 1: Explicación del estado actual de los sistemas de comunicaciones por satélite.
 - Explicación sobre los elementos de un sistema de comunicaciones por satélite.
 - Comparativa entre satélites no geostacionarios (NGSO o “*Non-Geostationary Orbit*” por sus siglas en inglés) y satélites geostacionarios (GSO o “*Geostationary Orbit*” por sus siglas en inglés) y sus correspondientes bandas de frecuencia.
 - Explicación de un balance de enlace Satcom con las fórmulas más relevantes.
 - Explicación sobre los efectos de la lluvia.
- Objetivo 2: Análisis y comparación de modelos de atenuación por lluvia en las comunicaciones por satélite.
 - Recopilación de modelos de atenuación por lluvia.
 - Evaluar estos modelos de atenuación por lluvia, es decir, buscar y analizar los modelos propuestos por diferentes estándares.
 - Observar diferencias entre estos modelos para ver de qué depende cada modelo, si son para enlaces terrestres, enlaces espaciales o tierra-espacio.
- Objetivo 3: Implementación en Matlab de diferentes modelos de atenuación por lluvia existentes.
 - Simulación del cálculo de la atenuación por lluvia en función de la probabilidad con diferentes parámetros de entrada tanto para diferentes frecuencias como elevaciones, así como los mapas con los dB de atenuación a diferentes disponibilidades para la región de Madrid.

1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

Como se puede ir observando a lo largo del documento, este Trabajo no cuenta con problemas éticos ni de género. En cuanto a la sostenibilidad, el satélite puede ayudar a cumplir algunos de los objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, permitiendo observar con imágenes todo el espacio y la Tierra. A su vez, el estudio hecho en este Trabajo de los diferentes modelos de atenuación por lluvia puede ayudar a minimizar el impacto que pueda tener el diseño y despliegue de futuros satélites.

1.4. Enfoque y método seguido

El estudio llevado a cabo en el presente Trabajo consiste en un análisis exhaustivo de diferentes modelos de estimación de atenuación por lluvia existentes para los satélites NGSO y GSO.

El enfoque de este Trabajo, por lo tanto, ha consistido en realizar una investigación y posterior análisis y comparación los modelos de atenuación por lluvia. Además, para situarnos en un contexto adecuado y saber a qué nos estamos refiriendo, se habla sobre que es el satélite, a qué nos referimos con satélites NGSO y GSO, las correspondientes particularidades de cada uno de ellos, los componentes principales de los satélites y cuáles son los tipos de frecuencias más utilizadas en las comunicaciones, identificando aquellas que son más susceptibles a la atenuación por precipitaciones, así como la explicación de en qué consiste un balance de enlace y las novedades en cuanto a satélites de órbita LEO.

Tras esto, y una vez analizado todo lo anterior en detalle, se han seleccionado diferentes modelos para el cálculo de la atenuación por lluvia y se han implementado mediante Matlab con el objetivo de obtener resultados mediante toda la formulación y condiciones que sean necesarias de aplicar para poder ver cómo afecta la atenuación por lluvia en una determinada región en frecuencias elevadas.

Por lo tanto, este Trabajo consiste en un documento detallado con el análisis y *tradeoff* de diferentes modelos de atenuación por lluvia, realizando la simulación de algunos de ellos y observando con las gráficas obtenidas como afecta la atenuación por lluvia en función de la disponibilidad que se desee garantizar.

1.5. Planificación del trabajo

La realización del presente Trabajo viene marcada por las diferentes entregas que propone la Universidad para dar por cumplidos los objetivos propuestos.

A continuación, en la **Figura 1** se muestra un diagrama de Gantt con las diferentes tareas y el tiempo estipulado para cada una de ellas según las entregas de la Universidad, incluyendo la fecha de inicio y la fecha de fin.

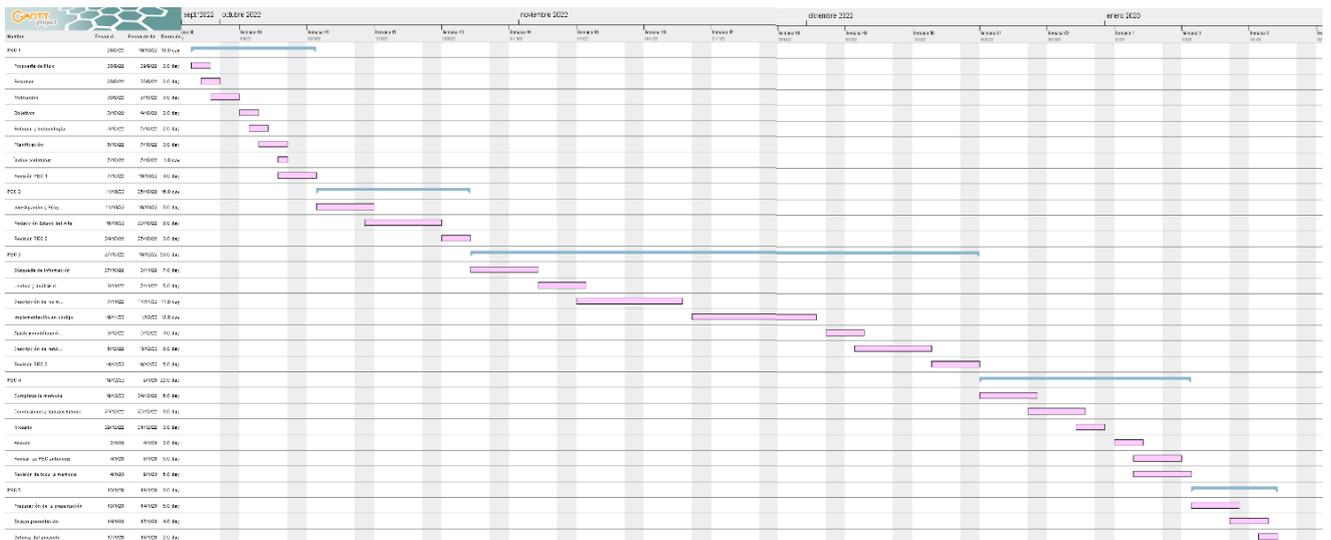


Figura 1. Diagrama de Gantt

En la **PEC 1**, se deben realizar los puntos mostrados en la imagen como son la propuesta de título, un pequeño resumen, la motivación, los objetivos, el enfoque y la metodología y la planificación. Todo ello permitirá empezar a desarrollar el trabajo y proporcionará una visión general del mismo, pudiéndose modificar a medida que este vaya avanzando.

En la **PEC 2**, se realiza una investigación más profunda del ámbito que aborda el trabajo, es decir, se buscará información más detallada para redactar el estado del arte o la visión más vanguardista del sector.

La **PEC 3** es la que más tiempo requiere debido a que es en esta etapa del estudio en la se busca información y se investiga la literatura académica de forma detallada sobre los diferentes modelos de atenuación por lluvia. Una vez realizada esta tarea, se implementan los modelos más referenciados en la herramienta de Matlab en una determinada región y se realizan los ajustes correspondientes en frecuencia y en elevación. Por último, es importante plasmar esta etapa práctica en la memoria y explicar los resultados obtenidos.

Respecto a la **PEC 4**, esta consiste en completar la memoria, es decir, redactar todos los puntos que queden pendientes como son las conclusiones y trabajos futuros y los apartados de glosario y anexos. Este trabajo puede parecer poco importante, pero es esencial puesto que son los frutos del estudio y las bases en las que estos se enraízan. Una vez completa, se realiza una revisión profunda de toda la memoria.

Por último, la **PEC 5** consiste en la preparación de las diapositivas con las que apoyar la presentación del Trabajo, así como la defensa de esta ante el tribunal.

El inicio del trabajo coincide con el mismo día en que se inició el semestre en la Universidad Oberta de Cataluña, es decir, el 28 de septiembre de 2022 y finaliza el día 18 de enero de 2023 en el que tienen que estar realizadas todas las entregas.

1.6. Breve sumario de productos obtenidos

Con la realización de este Trabajo se espera obtener una comparativa a diferentes frecuencias de modelos de atenuación por lluvia útiles en enlaces espaciales. Para ello se emplea el uso del software Matlab para poder realizar la simulación de los diferentes códigos desarrollados.

Inicialmente, en el estado del arte se cuenta en que consiste un sistema de comunicaciones por satélite tanto para GSO como para NGSO como las bandas de frecuencia utilizadas en

cada caso para posteriormente utilizar algunas de ellas en la simulación. Así como el efecto de la atenuación por lluvia y de por qué es tan importante tenerlo en cuenta y los avances que existen en *machine learning* para predecir dicha atenuación y algunos métodos para poder compensarla.

Seguidamente, se expondrán y se realizará un análisis de los modelos de atenuación por lluvia tanto para enlaces terrestres y espaciales en función de diferentes criterios.

Por último, además de realizar una explicación de cada uno de los modelos seleccionados, se han incluido las expresiones necesarias para el posterior desarrollo del código en Matlab. Con estas fórmulas, se ha realizado cada uno de los códigos en un script para poder realizar simulaciones con los parámetros necesarios.

Por lo tanto, la idea del trabajo es obtener la realización de diferentes modelos en Matlab y la posterior comparación con el modelo estándar de la ITU en diferentes frecuencias y en diferentes ángulos de elevación, para saber en la región de Madrid que modelo es el más adecuado proporcionando una menor atenuación en cada frecuencia.

1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria

Este Trabajo está estructurado en diferentes puntos que permitirán investigar y desarrollar cada capítulo en el tiempo adecuado, siendo:

- En el **Capítulo 1** de este Trabajo, se hace una breve introducción al tema de estudio del mismo y se hacen alusiones a puntos esenciales tales como el impacto del Trabajo, el método seguido, los plazos en los que se ha realizado y el contenido genérico de cada parte del Trabajo.
- En el **Capítulo 2** de este Trabajo, se trata del estado del arte o la visión vanguardista de las comunicaciones por satélite. En este capítulo se explican los elementos de un enlace satelital, las diferencias entre los satélites NGSO y GSO, las bandas de frecuencias en las que trabajan, las novedades en los satélites de órbita LEO, así como la identificación de los principales modelos de atenuación por lluvia, entre otros.

- En el **Capítulo 3**, se realiza un análisis comparativo de diferentes modelos de estimación de atenuación por lluvia tanto en enlaces terrestres como en enlaces satelitales y viendo los diferentes parámetros que se utilizan en cada uno de ellos, así como sus características más destacables.
- En el **Capítulo 4** de este documento, se realiza una explicación de los modelos seleccionados con su correspondiente formulación para la posterior implementación del código en la herramienta de Matlab con el que se realiza el cálculo de atenuación por lluvia a diferentes frecuencias y ángulos de elevación.
- En el **Capítulo 5**, se exponen los resultados obtenidos con los modelos de atenuación por lluvia implementados y que permiten entender cómo afecta dicha atenuación en frecuencias elevadas que utilizan los satélites NGSO y GSO.
- En el **Capítulo 6**, se comparten y desarrollan las conclusiones obtenidas partiendo de los resultados y se proponen líneas de trabajo en futuras investigaciones y estudios.
- En el **Capítulo 7**, se listan los acrónimos más relevantes utilizados en el documento.
- En el **Capítulo 8**, se listan las figuras incluidas en el presente Trabajo a modo simplificador.
- En el **Capítulo 9**, se listan las tablas incluidas en el presente Trabajo a modo simplificador.
- En el **Capítulo 10**, se enumeran de las referencias o bibliografía utilizada en el presente Trabajo, gracias a la cual ha sido posible obtener parte de la información para el desarrollo de la memoria.

2. Estado del arte

Este capítulo trata del estado del arte o la visión más vanguardista de los académicos e investigadores de los Sistemas de Comunicaciones por satélite. Incluye una descripción de los Sistemas de Comunicaciones por satélite y se trata el Link Budget, así como la atenuación por la lluvia. Se finaliza analizando cómo la inteligencia artificial mejora los efectos producidos por las precipitaciones.

2.1. Sistemas de Comunicaciones por satélite

En este apartado realizamos una breve descripción de en qué consisten los Sistemas de Comunicaciones por satélite como base del Trabajo.

2.1.1. Elementos de un sistema de comunicaciones por satélite

Un sistema de comunicaciones por satélite como se muestra **Figura 2** en la permite las comunicaciones entre diferentes puntos de la Tierra a través de uno o varios satélites. En este apartado, se detallan los diferentes elementos que lo componen un satélite, ya sea con satélites NGSO como con GSO, siendo estos:

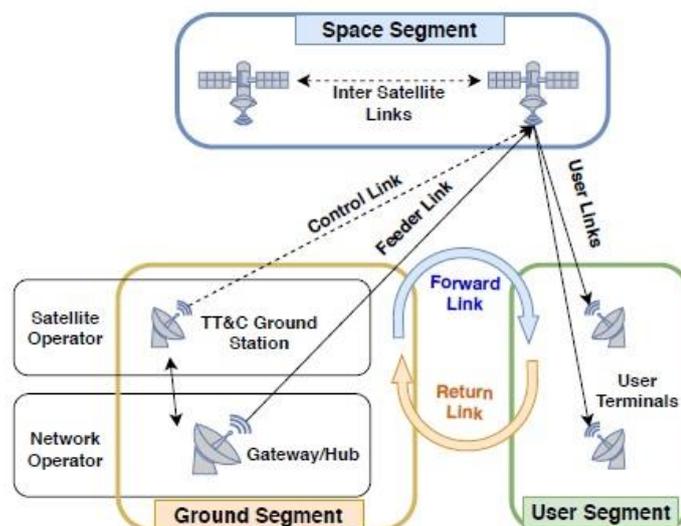


Figura 2. Sistema de Comunicaciones por Satélite [1]

- Segmento espacial: este elemento comprende el propio satélite o la constelación de satélites, ubicados en el espacio y está diseñado para establecer la radiocomunicación. Está compuesto de las siguientes partes:
 - Segmento de vuelo: se trata de la propia estructura del satélite, los propulsores y depósitos, el sistema de termo-regulación, los volantes de inercia, etc.
 - Sistema de energía eléctrica: la energía de los satélites se obtiene a través de células fotovoltaicas y baterías que se usan durante los eclipses. La tensión nominal según el diseño del satélite esta desde 30V a 150V, mientras que en satélites de órbita baja de poca potencia es de menos de 20V.
 - Carga útil: se trata de los equipamientos instalados para las funciones para las que se lanzó el satélite como son entre otros las cámaras de vigilancia y de observación de la Tierra.
 - Carga de comunicación: son las antenas y equipos diseñados para la gestión remota del satélite.

- Estación terrena: consiste en el conjunto de equipamiento ubicado en la superficie terrestre y que se utiliza tanto para la transmisión como para la recepción de señales radio hacia y desde el satélite.
 - La estación terrena encargada de la transmisión ha de contar con suficiente potencia de transmisión y suficiente ganancia. Generalmente puede ser necesaria estaciones con alta potencia y ganancia, sobre todo en comunicaciones GSO. Por este motivo, en comunicaciones GSO se busca que las antenas sean muy directivas, no así tanto para comunicaciones NGSO donde pueden utilizarse tanto antenas poco directivas como antenas directivas con sistemas de *tracking* automático. Existen estaciones terrenas transmisoras diseñadas para transmisiones permanentes, así como estaciones diseñadas para transmisiones ocasionales. Igualmente puede haber estaciones fijas, estaciones portátiles y estaciones diseñadas para trabajar en un entorno de movilidad.
 - La estación terrena receptora estará equipada con una antena y con elementos que realizan las funciones de amplificación, conversión FI, demodulación y seguimiento. Además, cuenta con un sistema receptor de

bajo factor de ruido. Para el caso de las antenas receptoras en GSO, tienen que ser directivas al igual que las antenas transmisoras, mientras que para las NGSO no es necesario que tengan una directividad tan alta.

- Centro de Control del satélite: es el lugar dónde se localiza el equipo de personas y el equipamiento encargados de realizar desde tierra el control del satélite. Desde este se realizan diferentes funciones como es el control orbital de los satélites con capacidad para operar el satélite en configuración nominal y de emergencia. Otras funciones son el envío de telecomandos, envío de tonos para localización (*ranging*), recepción de telemetría, cálculo de órbitas, planificación y ejecución de operaciones y pruebas en órbita, gestión de la capacidad de los satélites y monitorización de señales para poder observar si existe alguna interferencia y resolución de estas [2].
- Gateway/Hub: es la interfaz entre el satélite y las redes terrestres, pudiendo ser vía fibra, coaxial o microondas. Es el punto de anclaje entre satélites y tiene la capacidad de procesar señales.
- Telepuerto: es un lugar apartado de posibles fuentes interferentes, con línea de vista despejada hacia la órbita u órbitas donde se encuentren los satélites, dónde se concentran estaciones terrenas de diferentes tipos: *gateways*, centros de control, etc.
- Enlace satelital: es el conjunto de elementos mediante el cual se establece una comunicación vía satélite, formado por la estación terrena transmisora, el canal radio

tierra-espacio, el satélite y la estación terrena receptora. Es a su vez el resultado de la combinación de dos enlaces: el enlace ascendente y el enlace.

- Enlace ascendente: se trata del enlace mediante el cual se transmiten las señales que van desde estación terrena transmisora hasta el satélite.
- Enlace descendente: se trata del enlace mediante el cual se transmiten las señales que van desde el satélite hasta la estación terrena receptora.
- Enlace forward: enlace satelital mediante el cual se transmite información desde un *gateway* a un conjunto de estaciones remotas distribuidas por la cobertura.
- Enlace de retorno: enlace satelital mediante el cual se transmite información desde una estación remota para que sea recibida en el *gateway*.
- Enlace *feeder*: enlace satelital que se establece entre un *gateway* de comunicaciones NGSO y uno o varios satélites de la constelación. Este enlace permite la posibilidad de solucionar la congestión de la banda Ka utilizando la banda Q/V, explicada más adelante.

2.1.2. Satélites NGSO y GSO

Cuando se dice que los satélites pueden operar en diferentes órbitas con respecto a la Tierra, se quiere decir que, dependiendo de la distancia a la que estos se encuentren, seguirán una órbita u otra debido al efecto de la gravedad. La órbita en la que se encuentra el satélite es un componente fundamental para el funcionamiento adecuado de este.

En el momento del lanzamiento, el satélite se sitúa en una de las órbitas que existen alrededor de la Tierra. Influyen muchos factores a la hora de decidir que órbita es mejor para un satélite como, por ejemplo, el uso para que haya sido diseñado.

Al clasificar los satélites según el tipo de órbita aparecen los siguientes tipos: i) órbita geoestacionaria (GEO o "*Geosynchronous Equatorial Orbit*" por sus siglas en inglés como se ha indicado anteriormente), ii) órbita terrestre media (MEO o "*Medium Earth Orbit*" por sus siglas en inglés como se ha indicado anteriormente), iii) órbita terrestre baja (LEO o "*Low Earth Orbit*" por sus siglas en inglés como se ha indicado anteriormente), iv) órbita polar, v) órbita sincrónica solar (SSO o "*Sun Sincronous Orbit*" por sus siglas en inglés), vi) órbita de

transferencia, vii) órbita de transferencia geoestacionaria (GTO o “*Geostationary Transfer Orbit*” por sus siglas en inglés) y viii) los puntos de Lagrange (puntos L) [3].

Con los tipos de órbitas comentadas anteriormente, los satélites se pueden clasificar en satélites NGSO, es decir, satélites no geoestacionarios que se dividen en los satélites LEO y los satélites MEO y los satélites geoestacionarios (GEO), es decir, los satélites geoestacionarios que están en órbita geoestacionaria. Se muestra una representación de todos ellos a continuación en la **Figura 3. Tipos de órbitas**Figura 3:

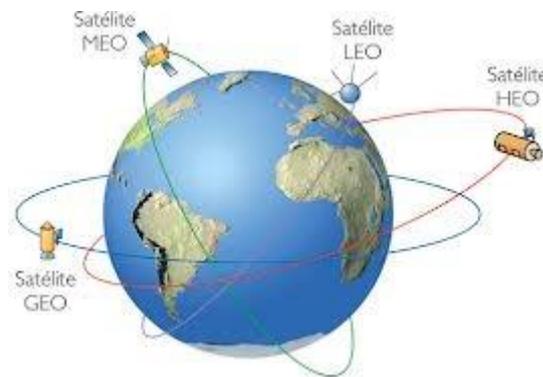


Figura 3. Tipos de órbitas [4]

Los satélites en órbita geoestacionaria (GEO) se encuentran entorno a los 36.000 Km de altitud y está contenida en el plano ecuatorial de la Tierra. A esa altitud la velocidad de traslación de los satélites con la que se mantienen en su órbita coincide con la velocidad de rotación de la Tierra, lo que hace que, desde el punto de vista de la superficie terrestre, los satélites parezcan estacionarios o en una posición fija del cielo. Los servicios diseñados mediante el uso de satélites geoestacionarios, que suelen ser de telecomunicaciones, se benefician de que estos satélites permanecen fijos sobre un determinado punto de la superficie terrestre.

Como ya se ha mencionado, entre los satélites en órbita no geoestacionaria (NGSO) se encuentran los satélites de órbita baja (LEO). Estos son aquellos que más próximos se encuentran a la superficie de la Tierra con una altitud inferior a 1.000 km y que puede llegar a ser tan baja como los 160 km sobre la superficie de la Tierra. A diferencia de los satélites GEO, estos no tienen que seguir una dirección particular alrededor de la Tierra, sino que su

plano puede estar inclinado. Esta órbita, hasta hace pocos años había sido comúnmente utilizada para fines científicos y para la captación de imágenes debido a que permite obtener una gran resolución por a su proximidad a la Tierra. Además, es el tipo de órbita utilizada para la Estación Espacial Internacional (ISS) y para servicios de telefonía móvil por satélite como Iridium. Pero desde hace menos de una década, se ha generalizado su uso para las telecomunicaciones con el lanzamiento de grandes constelaciones de satélites formadas por cientos o incluso miles de satélites que permiten ofrecer cobertura de forma constante sobre la totalidad o la mayoría de la superficie terrestre desde altitudes como las de los satélites LEO [5].

El otro tipo de satélites que forman la órbita no geoestacionaria (NGSO) son los satélites de órbita media (MEO). Estos, disponen de una órbita terrestre comprendida entre cualquier lugar de las órbitas LEO y GEO, es decir, a una altitud de entre 5.000 y 20.000 Km. Son muy similares a los LEO, ya que no siguen una ruta específica. Este tipo de órbita es muy utilizada por los satélites diseñados para navegación, como es el sistema europeo Galileo o el más extendido GPS norteamericano.

Las demás órbitas mencionadas anteriormente (órbita polar, órbita sincrónica solar, órbita de transferencia, órbita de transferencia geoestacionaria y los puntos de Lagrange) tienen características propias, pero se fundamentan en lo explicado sobre las órbitas GEO, MEO y LEO. Tal vez los puntos de Lagrange merecerían unas palabras o una dedicación mayor por ser unos puntos especiales a nivel orbital, pero ello no se va a desarrollar en el presente Trabajo por no ser útil al fin perseguido.

Como se puede observar en lo comentado anteriormente, existen algunas diferencias dependiendo de la altitud a la que se encuentran los satélites. Las diferencias que presenta el uso de órbitas NGSO (satélites LEO y MEO) respecto a las GSO son entre otras el coste de lanzamiento, ya que el viajar a mayores altitudes requiere cohetes más potentes y caros, por lo que los satélites en órbitas más bajas (como son los LEO y MEO) es más económico

su lanzamiento a nivel individual, pero, si se habla en términos generales, el servicio es más caro en LEO porque se tienen que lanzar una mayor cantidad de satélites.

En cuanto al coste del satélite, también son más económicos a nivel individual aquellos que tienen una altitud más baja ya que son más pequeños y tienen menos potencia. La capacidad para ofrecer una amplia cobertura afecta debido a que los satélites de órbitas más bajas requieren un gran número de satélites para proporcionar una cobertura global y ofrecer una conectividad continua, sin embargo, los satélites GEO, permanecen en la misma posición y gracias a su gran altitud cubren un área mayor.

Respecto a la latencia, es decir, el tiempo que tardan las señales en llegar desde tierra y regresar del satélite, esta afecta más a las comunicaciones a través de los satélites que se encuentran en órbitas más alejadas (GEO) ya que, debido a la propagación de las ondas electromagnéticas, éstos tardan más en recibir las señales y en poder retransmitirlas hacia la Tierra. Esto deriva en la principal ventaja de los satélites NGSO en relación con los satélites GSO, ya que se encuentran más cerca de la Tierra y, por lo tanto, las comunicaciones a través de ellos tienen tiempos de latencia inferiores. Las comunicaciones con satélites LEO cuentan con una latencia aproximada de entre 30 y 50 milisegundos, mientras que con satélites GEO llegan a entre 500 y 700 milisegundos.

Por último, en cuanto al deterioro orbital, los satélites que se encuentran en órbita baja pueden sufrir resistencia atmosférica y verse más afectados que los de órbitas más altas.

No se puede dejar de mencionar que en la actualidad se están llevando diferentes proyectos para ofrecer Internet por satélite en la órbita LEO, siendo el proyecto más conocido el desarrollado por la constelación Starlink. Este proyecto consiste en una red satelital desarrollada por la empresa SpaceX fundada por Elon Musk que tiene como objetivo el envío al espacio en órbita terrestre baja de un total de 12.000 satélites para ofrecer internet global a las zonas más remotas de la Tierra. A fecha del presente Trabajo, enero de 2023, se están lanzando y posicionando aproximadamente 2.400 satélites al día.

Otro de estos proyectos de órbita terrestre baja que también merece la pena mencionar es el proyecto Kuiper de Amazon. Este, cuyo primer lanzamiento está programado para los

primeros meses de 2023, planea mantener miles de satélites en órbita LEO para transmitir y recibir datos desde terminales de usuario y estaciones terrestre [6].

Ambos proyectos quieren cambiar el modelo de comunicaciones por satélite, utilizando la órbita LEO gracias a su baja latencia. En cuanto a la órbita GEO, las empresas como Hispasat siguen lanzando satélites de comunicación para ofrecer conectividad.

2.1.3. Bandas de frecuencias en satélites NGSO y GEO

Una banda de frecuencia es un intervalo en el dominio de la frecuencia delimitado por una frecuencia inferior y otra superior. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU o “International Telecommunication Union” por sus siglas en inglés), así como otras organizaciones como la Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), han asignado designaciones a estos intervalos para diferentes aplicaciones debido a la gran variedad de bandas de frecuencia satelital. Debido a que las designaciones más utilizadas son aquellas de la ITU, este Trabajo se ha limitado a utilizar estas designaciones.

Las bandas de frecuencia más altas generalmente brindan accesos a anchos de bandas más amplios, pero son más susceptibles a toda clase de atenuaciones, incluida la atenuación por lluvia.

Tabla 1. Bandas de frecuencia tradicionales

Band	Frequency Range	Priority of Operations
L	1-2 GHz	GSO
S	2-4 GHz	GSO
C	3,625-4,2 GHz (space-to-Earth) 5,950-6,425 GHz (Earth-to-space)	GSO
X	7,25-7,75 GHz (space-to-Earth) 7,9-8,4 GHz (Earth-to-space)	GSO

Tradicionalmente, se utilizan las bandas de frecuencia mostradas en la **Tabla 1** como es la Banda C (con rango de frecuencias de 3,625 a 4,2 GHz para el enlace descendente y de 5,950 a 6,425 GHz para el enlace ascendente) para televisión por satélite, la Banda L (con frecuencias entre 1 y 2 GHz), utilizada fundamentalmente para posicionamiento con satélites

(GPS o Galileo), telefonía móvil por satélite (como es el caso de Iridium) y comunicaciones comerciales con satélites GSO (como la flota Inmarsat), la Banda S (con rango de frecuencias de 2-4 GHz), utilizada para radares meteorológicos, radares de barcos y algunos satélites de la NASA o como la Banda X (con frecuencias entre 7,25 y 7,75 GHz para el *downlink* y entre 7,9 GHz y 8,4 GHz para el *uplink*), utilizada en este caso para comunicaciones militares con satélites GSO. Pero estas bandas no son de utilidad para comunicaciones con satélites NGSO debido a sus características y a que se necesitan mayores anchos de banda.

En el documento referenciado [7], que habla de las diferentes modelos de canal, se muestran las diferentes frecuencias en las que pueden trabajar tanto los satélites GSO como los NGSO. Ambos tipos de satélite comparten algunas bandas de frecuencia pero que cada uno de ellos tienen sus propias peculiaridades.

Tabla 2. Reglamento de la IUT para las bandas de frecuencia compartidas entre los satélites GSO y los NGSO

Band	Frequency Range	Priority of Operations
Ku	10,7-10,95 GHz (space-to-Earth) 11,2-11,45 GHz (space-to-Earth) 12,75-13,25 GHz (Earth-to-space)	GSO has priority over NGSO EPFD limits apply
Ka	17,8-18,6 GHz (space-to-Earth) 19,7-20,2 GHz (space-to-Earth) 27,5-28,6 (Earth-to-space) 29,5-30 GHz (Earth-to-space)	GSO has priority over NGSO EPFD limits apply
Q/V	37,5-42,5 GHz (space-to-Earth) 47,2-50,2 GHz (Earth-to-space) 50,4-51,4 GHz (Earth-to-space)	Maximum degradation of GSO reference links: <ul style="list-style-type: none"> • Single entry (3%) • Aggregate (10%)
W	75-110 GHz	GSO NGSO

Tal y como se observa en la **Tabla 2**, las frecuencias que pueden ser compartidas entre ambos satélites son frecuencias altas. Las bandas de frecuencia Ku y Ka son comúnmente más conocidas, siendo la primera utilizada para servicios de transmisión directa por satélite

y la banda Ka, además de ser utilizada en satélites de comunicaciones, también se utiliza en radares de objetivos de corto alcance y alta resolución de aeronaves militares.

Otra de las bandas de frecuencia utilizada y que está teniendo mayor importancia se trata de la banda Q/V. Estas bandas son utilizadas para satélites de muy alto rendimiento (VHTS) y para redes de banda ancha celular, permitiendo a los operadores de satélites proporcionar un ancho de banda adicional a los usuarios finales para la prestación de servicios de datos, resolviendo el problema de la congestión de la banda Ka [8].

Al tratarse de bandas de frecuencia más altas que las Ka, son un factor clave para anchos de banda más altos y, por lo tanto, requieren los correspondientes convertidores de frecuencia para la generación de este tipo de señales.

Por último, se encuentra la banda de frecuencia W que se encuentra en un rango de frecuencias entre 75 y 110 GHz. Esta, se encuentra por encima de la banda V y se superpone a la banda M asignada a la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN/NATO). Son utilizadas para comunicaciones por satélite, investigación de radares y aplicaciones de localización entre otras.

Con estas nuevas bandas de frecuencias para los satélites como es la Q/V y la W, se tiene una solución para resolver los requisitos de gran cantidad de ancho de banda del enlace ya que esta última se encuentran disponibles anchos de banda de hasta 5 GHz.

Cada banda de frecuencias se subdivide en rangos diferentes para el *uplink* y para el *downlink* fundamentalmente por dos motivos: por diversidad en frecuencia lo que permite que al transmitir en una frecuencia y recibir en otra diferente se eviten interferencias en el propio satélite y en las estaciones terrenas, y por eficiencia energética ya que se transmiten desde tierra en las frecuencias más altas (las que sufren más pérdidas) porque aquí tenemos acceso a energía de mucha mayor potencia que en el satélite, que está limitado por sus paneles solares y baterías.

2.2. Balance de enlace Satcom

El enlace satelital permite la transmisión de información a través de ondas de radio entre dos o más puntos mediante el uso de un satélite. Este está formado por tres partes: i) enlace ascendente (*uplink*) desde la estación terrena que transmite al satélite, ii) el enlace descendente (*downlink*) desde el satélite a la estación terrena receptora y iii) el transpondedor del satélite encargado de amplificar la señal transmitida desde tierra y de reenviarla hacia Tierra con una frecuencia inferior a la recibida tal como se describe en el apartado 2.1.3.

En el enlace ascendente (*uplink*) se modula la señal en banda base que se transmite hasta la estación terrena en una frecuencia intermedia y es la estación terrena la que convierte a la frecuencia de trabajo del satélite (C, Ku o Ka) mediante un convertidor ascendente (*up converter*). Seguidamente, esta señal pasa por un amplificador de potencia (HPA) para que la señal llegue hasta el satélite. Cuando esta señal se encuentra en el satélite, el transpondedor que cuenta con un filtro paso banda (capaz de limpiar el ruido de la señal de subida) también sirve como seleccionador de canal. A continuación, esta señal pasa por un amplificador de bajo ruido (LNA) y un desplazador en frecuencia capaz de convertir la frecuencia alta de subida en banda baja de salida. Por lo tanto, una vez que se tiene la señal en baja frecuencia, esta pasa por un amplificador que permite que la señal regrese a la estación terrena receptora mediante el *downlink*.

Por último, la estación terrena receptora contiene un filtro (BPF) que limita la potencia de entrada que recibe el LNA. Una vez amplificada, la señal pasa de RF a frecuencias IF por medio de un convertidor descendente (*down converter*) y posteriormente la señal es demodulada y entregada en banda base.

El *link budget* o, lo que es lo mismo, el balance de enlace consiste en el cálculo que se realiza para diseñar el conjunto de elementos necesario para que la comunicación se establezca de la manera más eficiente tanto en coste como en cuanto a calidad de servicio. Para ello, se tienen en cuenta las diferentes características del satélite que se va a utilizar, las características de la información que se va a transmitir y las diferentes opciones que se

tienen en cuanto al equipamiento que se desea instalar en las estaciones terrenas y de las señales que se van a utilizar, entre otros.

En el balance de enlace se ponen en juego fundamentalmente todas las ganancias y pérdidas de un sistema de transmisión terreno, del canal ascendente, del propio satélite, del canal descendente, así como de sistema de recepción en tierra.

Para realizar el cálculo del enlace, se tienen en cuenta un elevado conjunto de fórmulas. Las principales y más importantes son detalladas a continuación:

- Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE): cantidad de potencia que tendría que emitir una antena isotrópica teórica (es decir, aquella que distribuye la potencia exactamente igual en todas direcciones) para igualar la potencia emitida por una antena no isotrópica en su dirección de máxima ganancia. En las bandas de

frecuencia empleadas en comunicaciones por satélite se emplea el modelo de espacio libre:

$$PIRE = P_t + G_t$$

$$P_r = PIRE - L$$

$$P_{r_{amp}} = PIRE - L + G_r$$

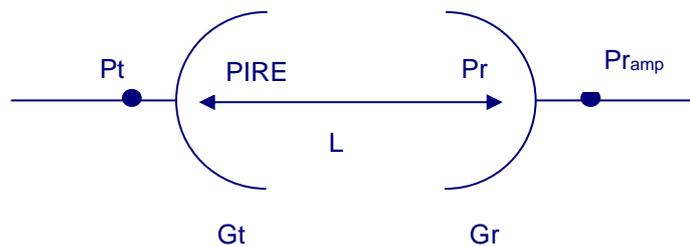


Figura 4. Modelo de espacio libre

Siendo:

P_t : potencia aplicada a la antena transmisora.

P_r : potencia recibida por la antena receptora.

- Ganancia de la antena receptora (G_r): relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena.

$$G = 10 \cdot \log_{10} g$$

$$g = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_{eq} = \frac{4\pi f^2}{c^2} S_{eq}$$

$$S_{eq} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot A_e$$

S_{eq} : superficie equivalente de la antena.

A_e : apertura efectiva.

➤ Pérdidas del enlace (L).

$$L = L_{bf} + L_a$$

- Pérdidas básicas de propagación en espacio libre (L_{bf}): son las pérdidas originadas por la interacción con el medio y la no idealidad del enlace.

$$L_{bf} = 92.45 + 20 \log(f) + 20 \log(d)$$

- Pérdidas adicionales (L_a): pérdida de potencia entre dos antenas isótropas que se encuentran en el espacio libre. Estas incluyen:
 - Pérdidas de absorción atmosféricas (L_{at}): debidas a atenuación de la señal por interacción con los gases atmosféricos (nubes). Por lo que también se llaman pérdidas por gases.
 - Pérdidas por desapuntamiento (L_{punt}): estas pérdidas se tienen cuando se desapunta la antena.
 - Pérdidas de despolarización (L_{pol}). Dos mecanismos de propagación pueden hacer que el ángulo de polarización de la señal radioeléctrica cambie como es la rotación de Faraday y la dispersión producida por hidrometeoros.
 - Pérdidas por lluvia (L_{lluv}): Se produce debido a que la onda electromagnética cede energía al líquido de una gota de lluvia. Esta absorción de energía por parte de la gota provoca su calentamiento.

Se observa que para el enlace ascendente como el descendente se calcula de la misma manera la potencia recibida por la antena:

$$P_{R-UP} = PIRE_{ET} - L = P_T + G_T - L$$

Potencia recibida por el amplificador:

$$P_{R-AMP} = P_{R-UP} + G_R$$

Estas fórmulas son aplicadas en primer lugar para el enlace ascendente, posteriormente para el descendente y seguidamente se combinan los resultados.

- Densidad de Flujo de Potencia (DFP): potencia que fluye a través de una determinada superficie.

$$\phi = \frac{p_t}{s}$$

Para una antena isotrópica la DFP que atravesaría una hipotética esfera de radio d en cuyo centro se encuentre dicha antena es:

$$\phi = \frac{p_t}{4\pi d^2}$$

Cuando se trata con la PIRE de una antena directiva, en ausencia de pérdidas adicionales, esta queda considerada como isotrópica:

$$\phi = \frac{PIRE}{4\pi d^2}$$

$$\phi = PIRE - 10 \cdot \log(4\pi d^2)$$

Además de todo el cómputo de potencias y pérdidas, quizá lo más importante del balance de enlace es que en él incorpora el efecto del ruido en el canal y los amplificadores, así como de las posibles interferencias que puedan existir en el canal y no puedan ser evitadas, concluyendo en valores de C/N , E_s/N_0 o E_b/N_0 que determinarán la calidad del enlace en referencia a los umbrales necesarios establecidos por los fabricantes de la tecnología de banda base empleada, en función de la modulación y la técnica de codificación empleadas.

Con todo, se establecen los márgenes de trabajo adecuados con los que contará el enlace para que la disponibilidad de servicio sea, en general, superior al 99,5% del año medio, en función, fundamentalmente, de la variabilidad de la atenuación por lluvia a lo largo del año.

2.3. Efecto de la atenuación por lluvia

Como se ha comentado en el Capítulo 1 de este Trabajo, la atenuación por lluvia se trata del efecto más perjudicial para las comunicaciones por satélite, sobre todo, en altas frecuencias a partir de los 10 GHz.

Esta atenuación por lluvias depende de la frecuencia, el ángulo de elevación, la intensidad de la lluvia, el tamaño de las gotas y la distribución de estas. Las partículas de agua no son uniformes y la atenuación solo puede determinarse de forma estadística o experimental a partir de la tasa de precipitación.

Es importante para no comprometer la calidad de servicio, considerar en el diseño dicha atenuación por lluvia. En caso de no tenerla en cuenta, puede acarrear consecuencias como la pérdida de intensidad de señal en el receptor, así como la pérdida de señal total, indisponibilidad total del enlace durante un gran periodo de tiempo y el desperdicio de la potencia de transmisión. La atenuación por lluvia da lugar a la mayor cantidad de pérdidas respecto a otros fenómenos climatológicos y supone una degradación del enlace satelital que afecta a la fiabilidad y al rendimiento de los enlaces de comunicación por satélite.

Al tenerlo en cuenta en el diseño del sistema de comunicaciones se intenta garantizar el menor efecto de dicha atenuación por lluvia y de otras pérdidas en la configuración de la comunicación, así como determinar la potencia y la frecuencia de transmisión óptimas para la transmisión en la que esta atenuación afectará menos.

2.3.1. Identificación de modelos de atenuación por lluvia

Algunos de los proyectos de atenuación por lluvia en curso, tanto para los satélites NGSO como para los satélites GEO, incluyen recomendaciones de la ITU, el estudio de la atenuación por lluvia para enlaces de comunicación 5G, las pruebas de los modelos de predicción de la atenuación de la lluvia para los enlaces por satélite mediante datos de larga duración [9] o el cálculo de atenuación por lluvia en satélites de órbitas no geoestacionarias, entre otros.

En los enlaces tierra-espacio existen diferentes modelos para realizar el cálculo de atenuación por lluvia para satélites NGSO y GEO que dependen de la formulación utilizada, pudiendo ser empíricos, físicos, estadísticos, de pendiente de desvanecimiento y basados en la optimización [10].

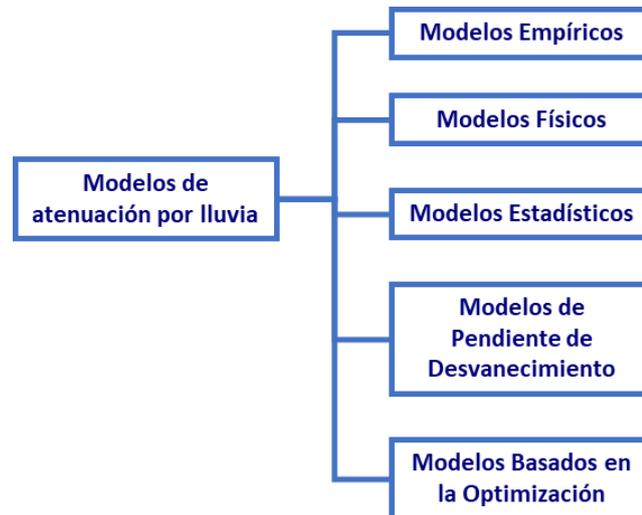


Figura 5. Taxonomía de modelos de atenuación por lluvia

A continuación, se detalla en qué consisten cada uno de estos tipos de modelos de atenuación por lluvia:

- **Modelos empíricos:** se basan en las observaciones de datos experimentales.
- **Modelos físicos:** se basan en la extracción de parámetros de las mediciones del radar meteorológico para describir y modelar la base física del fenómeno.
- **Modelos estadísticos:** se basan en el análisis estadístico de los datos climáticos y de infraestructura.
- **Modelos de pendiente de desvanecimiento:** se basan en la pendiente de atenuación de los datos de atenuación debida a la lluvia en función del tiempo de desarrollo con una configuración experimental particular.
- **Modelos basados en la optimización:** se basan en los parámetros de entrada de algunos de los otros factores que afectan a la atenuación y se desarrollan a través de procesos de optimización.

Una vez explicada la taxonomía de los modelos, se detalla una lista con los modelos existentes más extendidos tanto para enlaces terrestres como para tierra-espacio:

- **Modelo García López** [11]: este modelo cuenta con una versión modificada de la inicial y es el más adecuado para las regiones templadas de Europa. Este, asume que el coeficiente de reducción de la longitud del camino cambia con la longitud del camino y la tasa de lluvia.
- **Modelo Crane Global** [12]: establece la distribución de lluvia desde una perspectiva global y los mapas precisos de distribución de lluvia de EE.UU. A partir de estos mapas, se calcula la distribución de la tasa de lluvia.
- **Modelo Mello** [13]: este modelo se diferencia del modelo de la ITU (que se explicará más adelante) en el factor de corrección que se aplica a la distancia.
- **Modelo Moupfouma** [14]: modelo que utiliza la tasa de lluvia excedida por 0.01% del tiempo y el cálculo de la proporción de tiempo correlacionada con el exceso de cualquier atenuación de interés.
- **Modelo Da Silva** [15]: utiliza la distribución completa de la tasa de lluvia con múltiples regresiones no lineales de la base de datos de atenuación por lluvia.
- **Modelo Crane T-C** [16]: se basa en diferentes técnicas de integración para regiones de precipitaciones intensas y aquella que regiones en las que llueve ligeramente.
- **Modelo Ghiani** [17]: este modelo se diseña investigando el factor de reducción de trayecto (PF) en enlaces terrestres.
- **Modelo Capsoni** [18]: este modelo se basa en el parámetro de la estructura horizontal de la lluvia. Se puede determinar en función de la distribución estadística local de la intensidad puntual de la lluvia.
- **Modelo ITU-R** [19]: se basa principalmente en un factor de distancia que depende de la tasa de lluvia $R_{0,01}$, la frecuencia, la longitud del enlace y los coeficientes de relación de la ley de potencia de la atenuación específica.
- **Modelo Singh** [20]: en este modelo para la técnica de ajuste de la curva utiliza la ecuación polinomial cúbica de MATLAB la cual se aproxima a la atenuación específica. Los resultados de implementación de este modelo se compararon con el modelo de la ITU-R.
- **Modelo NTUA** [21]: este modelo utiliza el factor de reducción y utiliza estadísticas de la tasa de lluvia.
- **Modelo Andrade** [22]: en este modelo se trata de un modelo a corto plazo para radioenlaces terrestres ubicados en áreas tropicales. Se basa en las estadísticas de

pendiente de desvanecimiento que se modelan mediante una generalización de la distribución de Van de Kamp (VDK).

- **Modelo Chebil** [23]: en este modelo al igual que en el anterior, la varianza de la pendiente de desvanecimiento es proporcional a la atenuación, pero viene determinado su cálculo por una expresión diferente.
- **Modelo Develi** [24]: el objetivo principal del método es lograr estimaciones aceptables de la atenuación sufrida en la señal debido a la lluvia. Se basa en la técnica de optimización del enfoque de evolución diferencial (DEA).
- **Modelo Xidian University** [25]: se trata de un modelo reciente para frecuencias especialmente superiores a 10 GHz. Este modelo calcula el factor de ajuste de la tasa de lluvia y la atenuación por lluvia pronosticada excedida por un año promedio.
- **Modelo SAM (Simple Attenuation Model)** [26]: se trata de un modelo simple desde el punto de vista conceptual y computacional y permite obtener fácilmente estimaciones de las interrupciones del enlace causadas por la atenuación debida a la lluvia. Las estimaciones de la atenuación en función de la tasa de lluvia puntual requieren únicamente la frecuencia de funcionamiento, el ángulo de elevación y la latitud y altitud de la estación terrena.

2.3.2. Diferencia entre los modelos de atenuación por lluvia terrestres y espaciales

Las diferencias entre los modelos de atenuación por lluvia terrestres y los modelos tierra-espacio son muy significativas. Como bien indican los investigadores y académicos, en los modelos de tierra-espacio la altitud de lluvia es uno de los parámetros fundamentales a considerar. Esto es debido a que, si se manda una onda de radio hacia un satélite, sólo se va a tener atenuación por lluvia en el tramo de propagación desde la estación terrena transmisora hasta las nubes. Además, si se tiene una estación terrena que transmite a un satélite que esta justo encima, solamente es esa distancia de afectación, por lo tanto, cuanto más baja sea la elevación de la antena, más afectará la lluvia puesto que la distancia que recorre es mayor.

Sin embargo, en una comunicación terrestre entre dos puntos se tiene todo el tramo de comunicación afectado por la lluvia, por lo que, en la comunicación terrestre radio es importante estudiar la lluvia en todo el enlace.

Los modelos de atenuación por lluvia serán mucho más complejos para los enlaces terrestres debido a que hay que considerar la lluvia en diferentes escenarios y geometrías, es decir, mayores obstáculos.

2.4. Maching learning para predecir la atenuación por lluvia

En este apartado, se realiza una breve descripción de los avances en cuanto a inteligencia artificial para predecir las precipitaciones, así como de algunos métodos para mejorar la atenuación de estas.

2.4.1. Avances en inteligencia artificial para la lluvia

La inteligencia artificial (IA) se trata de la combinación de algoritmos planteados con el propósito de crear maquinas que presenten las mismas capacidades que el ser humano.

En la industria satelital, esta inteligencia artificial se ha desarrollado de diferentes maneras para poder predecir las precipitaciones y pronosticar a corto plazo, con alto grado de fiabilidad y con eficiencia los recursos hídricos, así como para evitar catástrofes producidas por tormentas y precipitaciones intensas. Esto, a muy pesar y a diferencia de otros métodos utilizados por los meteorólogos tradicionales, se hace a través del procesamiento de Big Data de millones de imágenes radar de precipitaciones de todo el planeta. El resultado es que, actualmente, hay una serie de empresas capaces de predecir dónde y cuándo va a llover con precisión. Un ejemplo de empresa capaz de ello es Google DeepMind, una compañía especializada en inteligencia artificial que ha lanzado una herramienta denominada DGMR (*Deep Generative Model of Rain*) que predece las precipitaciones con una precisión de 1-2 horas a través de la técnica *nowcasting* [27]. Desde DeepMind comentan que el método no está exento de limitaciones y que seguirán trabajando para mejorar la precisión de sus predicciones.

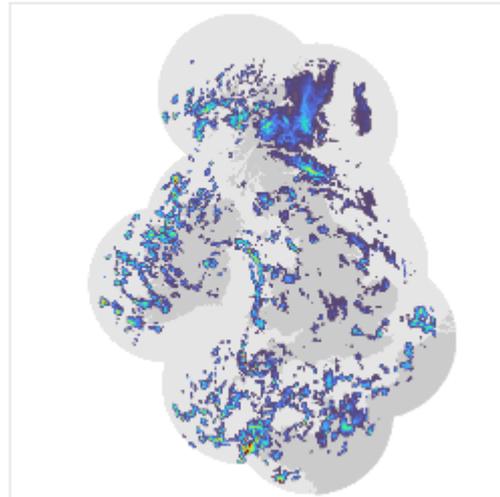


Figura 6. DGRM de DeepMind [28]

Otro ejemplo es Ubotica e Intel junto con la Agencia Espacial Europea, quienes pusieron en órbita el primer satélite con inteligencia artificial denominado PhiSat. Este satélite está dirigido a la observación de las regiones polares de la Tierra para medir el comportamiento del deshielo y la humedad. La información recogida es automáticamente enviada a los servidores de la Tierra y es empleada por los científicos la utilicen para investigar los polos de la Tierra.

2.4.2. Métodos para compensar la atenuación por lluvia

La señal transmitida desde una estación terrena del satélite está expuesta a variaciones no deseadas del nivel de señal. Esto ocurre, principalmente, por condiciones atmosféricas y sobre todo por el desvanecimiento por lluvia que se ha comentado anteriormente.

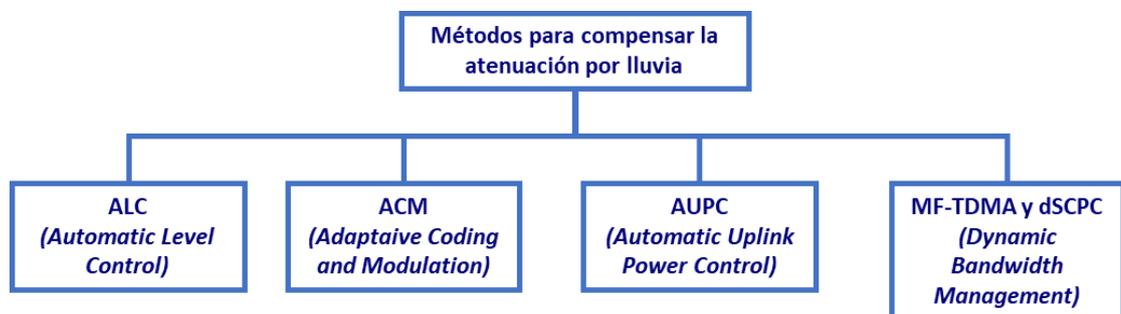


Figura 7. Modelos para compensar la atenuación por lluvia

En este apartado como se muestra en la **Figura 7** de más arriba, se muestran algunos mecanismos para mejorar la predicción de cuanta atenuación por lluvia se va a tener. Siendo estos:

- **ALC (Automatic Level Control):** la ganancia del transpondedor se autorregula para garantizar una PIRE (Potencia Radiada Isotrópica Equivalente) estable en el *downlink*, con independencia del efecto de la lluvia en el *uplink*. La ganancia operativa se ajusta automáticamente en relación con el nivel de potencia predefinido a la salida del transpondedor [29].
- **ACM (Adaptive Coding and Modulation):** se trata de una tecnología que permite cambiar automáticamente la modulación y la codificación de canal de una señal para compensar los cambios en las condiciones del enlace debido a la lluvia. Esta tecnología maximiza el rendimiento del enlace y la disponibilidad de estos [30].
- **AUPC (Automatic Uplink Power Control):** este mecanismo controla la potencia de salida del módem o del amplificador de la estación terrena para compensar la atenuación por lluvia en el enlace ascendente (*uplink*) y mantener un nivel de potencia constante a la entrada del transpondedor del satélite. Este sistema estima las condiciones de desvanecimiento del enlace ascendente (*uplink*) y cambia la potencia de salida de acuerdo con los cambios en la atenuación de dicho enlace [31].
- **MF-TDMA y dSCPC (Dynamic Bandwidth Management):** estas tecnologías, diseñadas en principio para la gestión dinámica de un ancho de banda compartido, pueden ser también utilizadas para mitigar el efecto de la atenuación por lluvia en redes grandes distribuidas en territorios extensos. Permiten asignar dinámicamente recursos de ancho de banda (portadoras) de menor eficiencia y con mayor protección ante errores (modulaciones de orden inferior y codificación de canal más robusta) a aquellos terminales de la red que se estén viendo afectados por mayor atenuación por lluvia.

3. Análisis de modelos de atenuación por lluvia

En este capítulo se presenta un análisis de diferentes modelos encontrados en la literatura para caracterizar la atenuación por lluvia. En primer lugar, se detalla el método que se va a seguir para realizar la comparación y análisis, presentando los distintos criterios. A continuación, se ira realizando un análisis individual de cada uno de ellos para conseguir una clasificación que permita caracterizar la atenuación por lluvia para modelos espaciales a partir de modelos terrestres.

3.1. Criterios de análisis

En esta sección se pueden ver los diferentes criterios, así como los diferentes parámetros de entrada que atenúan la señal de las comunicaciones que se han utilizado para el posterior análisis de este Trabajo.

Tabla 3. Parámetros de entrada que atenúan la señal de comunicaciones.

Fenómenos meteorológicos	Parámetros de entrada										
	Frecuencia	Distancia	Temperatura	Constante dieléctrica	Presión	Polarización	Altura equivalente	Ángulo de elevación	Índice de lluvia	Longitud de onda	Ganancia
Lluvia	√	√	x	x	x	√	x	√	√	√	√
Nubes	√	x	√	√	√	x	√	√	x	x	x
Espacio libre	√	√	x	x	x	x	√	x	x	√	√
Gases atmosféricos	√	x	√	x	x	x	√	√	x	x	x

En la **Tabla 3** anterior se muestran los parámetros de entrada que atenúan la señal de comunicaciones satelitales en relación a diferentes fenómenos meteorológicos. Estos fenómenos meteorológicos son la precipitación o lluvia, las nubes, el espacio libre y los gases atmosféricos, mientras que los parámetros de entrada son la frecuencia, la distancia, la temperatura, la constante dieléctrica, la presión, la polarización, la altura equivalente, el ángulo de elevación, el índice de precipitaciones o lluvia, la longitud de onda y la ganancia.

Como se puede observar, la lluvia es la que más afecta a la parametrización. De los 11 parámetros de entrada, la lluvia afecta en 7 o en un 63,63% de los parámetros, mientras que para las nubes son 6 o un 54,54%, el espacio libre son 5 o un 45,45% y, por último, los gases atmosféricos (que son el aire seco y el vapor de agua) son 4 parámetros o un 36,36%.

En consecuencia, se preveía en capítulos anteriores, que la lluvia es la principal fuente de atenuación en las comunicaciones por satélite, pero esto será desarrollado en el Capítulo 5 de Resultados del Trabajo.

A lo largo de los años, para poder prevenir el efecto de la lluvia en los enlaces satelitales, muchos investigadores, se han dedicado a desarrollar modelos o a modificar los modelos ya existentes para estimar los índices de precipitación en diferentes regiones y frecuencias. En los modelos descritos en el 2.3.1, se realiza un resumen de la revisión sistemática de los trabajos de Pimienta del Valle [32] y de Alozie and *et al.* [33] dependiendo de diferentes criterios detallados posteriormente.

Por lo tanto, para analizar los modelos de atenuación por lluvia se han añadido los siguientes criterios representados en la **Figura 8**.

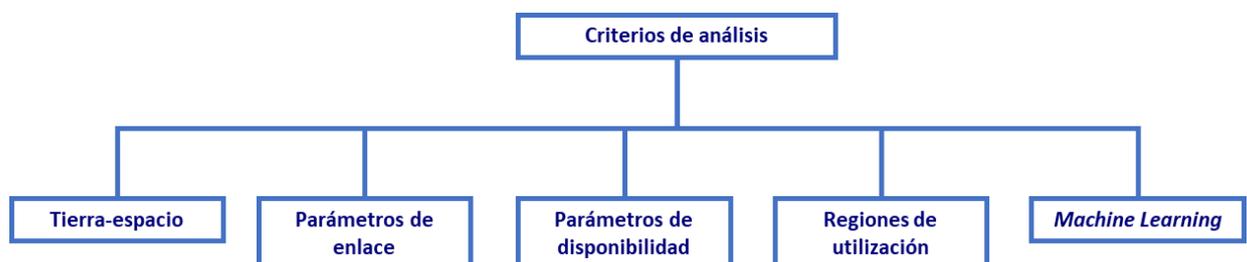


Figura 8. Criterios del análisis

- Criterio de análisis 1: referente a tipo de enlace. En este criterio se va a valorar cuales de los modelos de atenuación por lluvia se pueden utilizar para enlaces terrestres y aquellos que pueden ser utilizados en enlaces tierra-espacio.
- Criterio de análisis 2: referente a un análisis de los modelos de atenuación por lluvia en función de los parámetros de enlace.
- Criterio de análisis 3: se trata en el análisis de los modelos de atenuación por lluvia en base a los parámetros de disponibilidad del servicio.
- Criterio de análisis 4: se basa en el análisis de modelos en cuanto a regiones de utilización en diferentes artículos. En este criterio, se analizan las regiones de diferentes artículos, así como los modelos que se utilizan en ellos.
- Criterio de análisis 5: referente al modelado mediante *machine learning*. Este criterio se basa en el análisis de aquellos modelos de atenuación por lluvia que se han utilizado con inteligencia artificial.

3.2. Criterio de análisis 1: tierra-espacio

En este apartado, se realiza un análisis de los modelos de atenuación por lluvia en función del tipo de enlace que se utiliza con independencia de que sean enlaces terrestres, enlaces espacio o enlaces tierra-espacio de la lista no exhaustiva de todos los modelos mencionados anteriormente. Dependiendo del tipo de enlace se requieren una infraestructura u otra, así como unas características u otras.

Tabla 4. Análisis de modelos para enlaces terrestres o tierra-espacio

Enlace	Modelos															
	García-López	Crane Global	Mello	Moupfouma	Da Silva	Crane T-C	Ghiani	Capsoni	ITU-R	Singh	NTUA	Andrade	Chebil	Develi	Xidian University	SAM
Terrestre	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	x	√	√	√	x	x
Espacio	√	√	√	√	√	√	x	?	√	x	√	?	√	x	√	√

Como se puede observar en la

Tabla 4, algunos modelos sirven para enlaces terrestres como el modelo Ghiani, mientras que otros sirven únicamente para enlaces espacio como el modelo Xidian University y la mayoría pueden aplicarse para ambos enlaces como el modelo García-López.

En cuanto a los modelos que se utilizan para enlaces terrestres, tal y como se explica en el artículo de Ghiani *et al.* [34], resulta que el modelo Ghiani es un modelo de predicción de la atenuación por la lluvia que tiene en cuenta la precipitación a lo largo de los enlaces terrestres y, por lo tanto, no es válido para enlaces tierra-espacio. Lo mismo ocurre en el modelo Singh. A su vez, en el caso del modelo Develi, la literatura académica encontrada indica que se trata de un modelo para enlaces terrestres punto a punto en frecuencias altas por lo que tampoco es válido para enlaces tierra-espacio.

Respecto a los modelos Capsoni y Andrade, al mejor conocimiento del estudiante a la hora de realizar este estudio, no se han encontrado artículos bajo los criterios seguidos en este Trabajo para poder confirmar que sirvan para enlaces tierra-espacio puesto que parece sólo servir a enlaces terrestres.

De los modelos citados que únicamente valen para enlaces satelitales, conforme a la información encontrada para el modelo de NTUA en los artículos de Kourogorgas y Panagopoulos [35] y de Panagopoulos *et al.* [21], se puede apreciar como el modelo es utilizado para enlaces satelitales. Adicionalmente, también es necesario tener en cuenta para el uso en enlaces satelitales el modelo XIDIAN University. Este es uno de los modelos más recientes que existen para el cálculo de atenuación por lluvia para enlaces espacio como se puede observar en el artículo de Lu *et al.* [25]. Por último, para el modelo de atenuación por lluvia SAM, existe diferente documentación en la que se observa que el modelo se utiliza para enlaces satelitales. En el caso del artículo de Maitra y Chakravarty [36], se estima la atenuación de la lluvia sobre la trayectoria tierra-espacio a partir de mediciones puntuales de la tasa de lluvia. Mientras que, en el artículo de Panchal y Joshi [37] se explica la formulación para dicho modelo, su utilización en enlaces de comunicaciones tierra-espacio tratándose también de un modelo aceptado para trayectos oblicuos.

Cabe destacar que existen modelos que pueden utilizarse para enlaces tierra-espacio debido a sus características. En el caso del modelo García-López o modelo de la ITU-R, se observa que además de servir para enlaces terrestres, también sirve para enlaces espaciales como se puede ver en el artículo de Panchal y Joshi [38], que trata sobre un análisis de rendimiento y simulación de modelos de atenuación por lluvia en la banda de 12-40 GHz en un trayecto tierra-espacio en ciudades de la India. Respecto de otros de los modelos como el modelo de Crane, tanto Global como T-C, además del Moupfouma, existen varios artículos de diferentes autores en los que se recoge que son modelos para enlaces tierra-espacio [39].

En cuanto al modelo de Mello, también es utilizado para enlaces tierra-espacio ya que se trata de un modelo semi empírico mejorado para la predicción de atenuación por lluvia [15].

De los dos modelos que faltan por mencionar de la

Tabla 4, tanto el modelo Da Silva como el modelo Chebil, ambos sirven para enlaces tierra-espacio. El primero de estos, el modelo Chebil, se desarrolló principalmente para estimar la atenuación de la lluvia tanto de los enlaces tierra-espacio como de los enlaces terrestres [33]. El modelo Chebil, en cambio, se utiliza para analizar la atenuación por lluvia en las bandas Ku y Ka en los enlaces tierra-espacio [40].

De los 8 modelos que se utilizan para el espacio, las características en cuanto a frecuencia y a las bandas de frecuencia en las que pueden ser utilizadas son presentadas en la **Tabla 5** tratándose de una contribución propia. A partir de las frecuencias que dicen los modelos de atenuación por lluvia, se proponen las siguientes bandas de frecuencia de satélite:

Tabla 5. Bandas de frecuencia para modelos de atenuación por lluvia.

Modelos	Frecuencia (GHz)	Bandas de frecuencia
García-López	12-75	Ku, Ka, Q/V, W
Crane Global	11-100	Ku, Ka, Q/V, W
Moupfouma	12-75	Ku, Ka, Q/V, W
Crane T-C	7-82	Ku, Ka, Q/V, W
ITU-R	75	Ku, Ka, Q/V, W
NTUA	12-50	Ku, Ka, Q/V
Xidian University	>10	Ku, Ka, Q/V, W
SAM	15-35	Ku, Ka, Q/V

Las comunicaciones por satélite están en un periodo de interés por la inversión de muchas empresas privadas. Los satélites GEO pueden utilizar frecuencias tradicionales como son L, S, C, X y a su vez altas frecuencias como son Ku, Ka, Q/V y W, pero en el caso de los satélites LEO, para las comunicaciones por satélite utilizan altas frecuencias a partir de la banda Ku.

Finalmente, de los 16 modelos de la tabla, se puede ver que 3 son para enlaces terrestres, 3 para enlaces espaciales, 2 no se han encontrado artículos bajo los criterios que recoge el trabajo y los 8 sirven para los enlaces tierra-espacio. Por lo tanto, tras este análisis se puede concluir que dependiendo de las frecuencias que se quieran considerar en el balance de enlace y del tipo de enlace que se quiera tener es adecuado un modelo de atenuación por lluvia u otro.

3.3. Criterio de análisis 2: parámetros de enlace

En la **Tabla 6**, se han indicado los parámetros que se han tenido en cuenta en cada modelo para el cálculo de la atenuación por lluvia como son la latitud y/o longitud, la frecuencia, la polarización, el índice de lluvia y la longitud de la trayectoria efectiva.

Tabla 6. Categorización de los modelos de atenuación por lluvia en función de parámetros de entrada de enlace.

Modelos	Parámetros de entrada de enlace				
	Latitud y/o Longitud	Frecuencia	Índice de lluvia	Polarización	Longitud de trayectoria efectiva
García López	√	√	√	√	x
Crane Global	√	√	√	√	x
Mello	√	√	√	√	√
Moupfouma	√	√	√	√	√
Da Silva	√	√	√	√	√
Crane T-C	√	√	√	√	x
Ghiani	√	√	√	√	√
Capsoni	√	√	√	√	x
ITU-R	√	√	√	√	√
Singh	x	√	√	√	x
NTUA	√	√	√	√	x
Andrade	√	√	√	√	x
Chebil	√	√	√	√	x
Develi	x	x	√	x	x
Xidian University	√	√	√	√	x
SAM	√	√	√	√	x

Como se puede observar, de los modelos que aparecen en la **Tabla 6**, la mayoría tienen en cuenta la latitud y longitud del trayecto, la frecuencia y la polarización a excepción del modelo de Develi que únicamente tiene en cuenta el índice de lluvia. De estos 16 modelos, 9 tienen en cuenta los mismos parámetros a la hora de realizar el cálculo de atenuación por lluvia, siendo estos García-López, Crane Global y T-C, Capsoni, NTUA, Andrade, Chebil Xidian University y SAM. Además, otro de los puntos a destacar es que hay 5 modelos en la tabla que utilizan todos los parámetros de entrada propuestos en la tabla, siendo estos Mello, Moupfouma, Da Silva, Ghiani e ITU-R.

Los modelos Singh y Develi, no utilizan la longitud y latitud, por lo que, estos modelos no pueden ser muy exactos ya que no llueve igual en diferentes puntos de la Tierra. En cuanto a la longitud de trayectoria efectiva, solamente 5 modelos de los mencionados la utilizan para el cálculo. Uno de los puntos que cabe destacar al analizar la tabla y es que todos los

modelos que aparecen en ella utilizan el índice de lluvia para el cálculo de atenuación, siendo relevante ya que la cantidad de precipitaciones varía en diferentes regiones como se ha mencionado anteriormente.

A su vez, los modelos que sirven también para enlaces satelitales cuentan con otros parámetros de entrada diferentes como puede ser la altura sobre el nivel del mar de la estación, el radio efectivo de la Tierra o el ángulo de elevación.

A medida que los porcentajes de precipitación aumentan, la atenuación por lluvia también aumenta, mientras que a medida que el porcentaje de tiempo aumenta, los valores de atenuación por lluvia disminuyen como se va a poder apreciar en las simulaciones posteriores. En las recomendaciones de la ITU-R, se dice que el modelo seleccionado es preciso si tiene un valor bajo de desviación estándar y de la raíz cuadrada media (RMS) para la gran mayoría de los porcentajes de tiempo.

En el caso de la atenuación por lluvia, los modelos tienen que someterse a diferentes pruebas de validación para determinar su capacidad de predecir dicha atenuación. Según la ITU-R, existen procedimientos estándar para probar la validez de los modelos desarrollados para predecir la atenuación por lluvia. Para esto, existen cuatro metodologías de validación siendo estas, correlación de entrada-salida o coeficiente de determinación, funciones de error cuadrático medio (RMSE y RMS), función de ajuste y modelos Chi-cuadrado.

Se concluye que, según lo que se puede observar en la **Tabla 6**, ninguno de los modelos de predicción puede considerarse un modelo completo suficiente para satisfacer con exactitud todas las distintas características de las infraestructuras, regiones geográficas o variaciones climáticas. Por ello, es importante considerar un modelo que cubra los requerimientos que se necesitan.

3.4. Criterio de análisis 3: parámetros de disponibilidad

En este criterio se tiene en cuenta aquellos parámetros de entrada que afectan a la disponibilidad, siendo estos la intensidad o tasa de lluvia excedida y la tasa de lluvia efectiva para enlaces terrestres.

Tabla 7. Categorización de los modelos de atenuación por lluvia en función de parámetros de entrada de disponibilidad.

Modelos	Parámetros de entrada de disponibilidad	
	Tasa de lluvia excedida	Tasa de lluvia efectiva
García López	X	X
Crane Global	√	X
Mello	√	√
Moupfouma	√	X
Da Silva	√	√
Crane T-C	X	X
Ghiani	X	X
Capsoni	X	X
ITU-R	√	X
Singh	X	X
NTUA	X	X
Andrade	X	X
Chebil	X	X
Develi	X	X
Xidian University	X	X
SAM	X	X

De los modelos de atenuación por lluvia de la **Tabla 7**, se observa como de los 16 modelos, 5 utilizan la tasa de lluvia excedida para el cálculo de la atenuación por lluvia que se corresponde con un 31,25% siendo estos Crane Global, Mello, Moupfouma, Da Silva e ITU-R y solamente 2 utilizan la tasa de la lluvia efectiva como son Mello y Da Silva para enlaces terrestres, siendo esto un 12,5%.

Bajo mi criterio, dependiendo del tipo de servicio que se quiera ofrecer, se puede ser más o menos restrictivo con la tasa de lluvia que le pueda afectar y, por lo tanto, con la disponibilidad que se quiera tener. Si por ejemplo tuviéramos servicios de comunicaciones, de backhaul celular o servicios de distribución de vídeo, la disponibilidad que se podría ofrecer sería de un 99,80% anual, mientras que si los servicios que se quieren ofrecer son de redes de datos o de IoT la disponibilidad que se puede garantizar es de un 99,5% anual. Dependiendo del modelo a utilizar se podrá ofrecer una disponibilidad u otra dependiendo también de la región.

Por lo tanto, cuanta más disponibilidad, menor tasa de lluvia es la permitida por el servicio, es decir, si se trata de un servicio de llamadas que requiere mejor calidad de la señal y menor latencia para no perder la comunicación, este tiene que permitir una menor tasa de lluvia que un servicio de IoT (“Internet of Things” por sus siglas en inglés). Para la mayoría de estos servicios, se utiliza el modelo estándar de atenuación por lluvia ITU-R.

3.5. Criterio de análisis 4: regiones de utilización

En la **Tabla 8** se han recogido ejemplos de trabajos llevados a cabo para medir la atenuación por lluvia en diferentes regiones.

Tabla 8. Modelos y factores relevantes en diferentes artículos.

Referencia	Región	Modelos involucrados	Frecuencia/Banda
[41]	India	ITU-R, Moupfouma	8 GHz y 12 GHz
[42]	India	ITU-R, Crane-Global y Moupfouma	Banda Ka
[43]	Nigeria	ITU-R, García	30 GHz
[39]	Malasia	ITU-R, Crane-Global, García y Karasawa	Bandas Ku, Ka y V
[44]	India	ITU-R, SAM y García	12-40 GHz
[45]	Suroeste de Nigeria	ITU-R, García-López y Moupfouma revisado	Bandas K-V
[46]	EEUU, Europa, Japón	SAM	10-35 GHz

En la **Tabla 8** se recoge información de 7 artículos diferentes para ver en que regiones y en que bandas de frecuencia son aplicados algunos de los modelos tierra-espacio.

En el artículo de Usha y Karunakar [41], para poder realizar la comparación de los modelos ITU-R y Moupfouma se eligen ciudades con condiciones climatológicas variables y en diferentes frecuencias tanto de 8 GHz como 12 GHz. Con los valores de longitud y latitud para diferentes ciudades se han ido obteniendo resultados para unos índices de lluvia concretos, observándose en algunos casos casi 6 dB de diferencia de atenuación entre ambos métodos.

En cuanto al artículo de Dafda y Maradia [42], este realiza una comparativa de los modelos que más adelante se van a comparar para banda Ka y en la India, comparando modelos anteriores. Con esta comparación, se llega a la conclusión de que el mejor modelo es el de la ITU-R con ciertas modificaciones para la región de la India.

En el artículo de Adeyemo *et al.* [43], se realiza una investigación en Nigeria para ver qué modelo si ITU-R o García-López se puede aplicar en dicha región. Este se basa en una frecuencia de 30 GHz, suficiente para satélites GSO y NGSO. Al seleccionar una elevación y una posición del satélite de estudio se obtiene que la atenuación aumenta con la frecuencia y con un ángulo de elevación decreciente. En esta comparación, el modelo García es más sensible a la elevación que el de la ITU.

Como se muestra en el artículo de Omotosho *et al.* [39], se realiza un análisis para diferentes bandas en regiones como Malasia con grandes precipitaciones anuales. Se observa que se garantiza una mayor disponibilidad en banda Ku que en el resto de bandas de frecuencia.

El artículo de Gaur y Sharma [44] analiza en cinco zonas de la India los modelos ITU-R, SAM y García para frecuencias entre 12-40 GHz. Los parámetros de latitud y de tasa de lluvia son importantes para concretar qué modelo es más adecuado. Concluyéndose que el modelo de la ITU-R es preferible debido a sus resultados más precisos.

Como se puede observar en el artículo de Ojo *et al.* [45] se evalúa el desempeño de modelos RBA seleccionados (ITU, Moupfouma y García -López) en bandas de frecuencia K-V en ubicaciones seleccionadas en el suroeste de Nigeria,

observándose el buen funcionamiento de los modelos García-López e ITU con tasas de lluvia bajas.

Por último, el modelo SAM ha ido mejorando y en el artículo de Stutzman y Yon [46] se comparan las predicciones con otros modelos y con una base de datos de 62 experimentos realizados en EEUU, Europa y Japón.

En estos artículos se analizan algunos de los métodos más usados para la atenuación por lluvia para enlaces tierra-espacio y altas frecuencias. El de la ITU-R con pequeñas modificaciones es capaz de conseguir mejores resultados.

Tras analizar los trabajos previos realizados por investigadores y académicos, este Trabajo ha optado por limitar su objeto de estudio a la región de Madrid, España. El motivo de esta decisión se sustancia en que actualmente existe el telepuerto de Arganda del Rey de la compañía Hispasat, S.A. en esta región y apenas se ha localizado literatura que cubra la atenuación por lluvia con las características de este estudio, es decir, para diferentes modelos de atenuación por lluvia.

3.6. Criterio de análisis 5: *machine learning*

En este criterio se puede observar como algunos modelos de atenuación por lluvia utilizan técnicas basadas en *machine learning*. A continuación, en la **Figura 9** se muestra una taxonomía de las técnicas que permiten este aprendizaje automático.

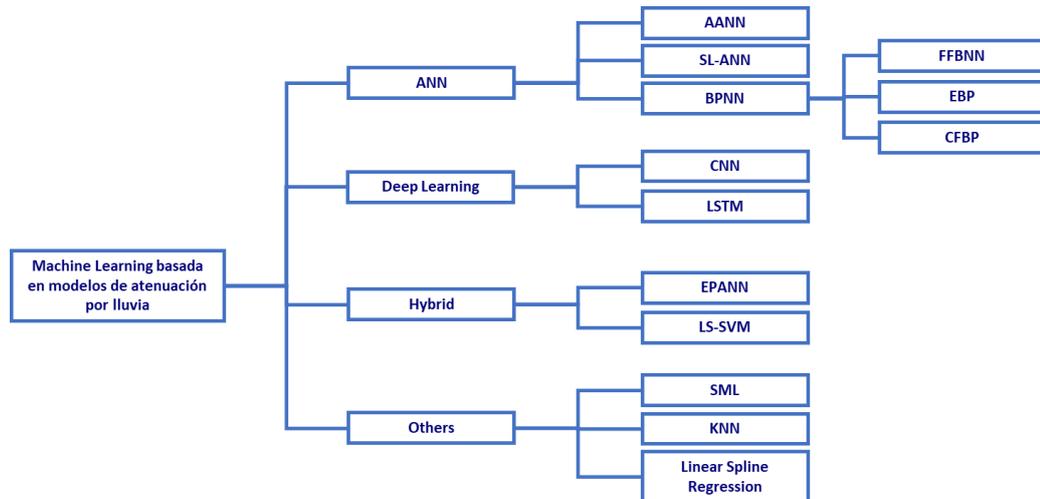


Figura 9. Taxonomía de aprendizaje automático que pueden utilizarse en modelos de atenuación por lluvia [33].

El impacto de la atenuación debida a la lluvia se ve más pronunciado a medida que se tienen mayores frecuencias. El modelo estándar recomendado por la ITU permite obtener esa atenuación que provoca lluvia, pero puede haber diferentes regiones tropicales que no se ajusten correctamente.

De las técnicas para modelar con *machine learning*, se detallan en la **Tabla 9** las más utilizadas y los modelos de atenuación por lluvia utilizados, ya sean enlaces terrestres, espaciales o tierra-espacio. La mayoría de las comparaciones de estas técnicas de aprendizaje automático se hacen con el modelo de la ITU-R como se puede observar.

Tabla 9. Técnicas de *machine learning* empleadas para mejorar la predicción en los modelos de atenuación por lluvia

Técnicas de <i>machine learning</i>	Comparación con modelos de atenuación por lluvia
BPNN	ITU-R, Crane Global
SL-ANN	ITU-R
FFBNN	ITU-R, SAM, Moupfouma
CFBP	ITU-R, SAM
SML	ITU-R
KNN	ITU-R

Se han seleccionado bajo mi criterio, aquellas técnicas más utilizadas en las comparaciones de enlaces de comunicación. Concluyéndose que las redes neuronales artificiales (ANN) son las más utilizadas para la predicción de las tasas de lluvia.

El modelo ANN en la mayoría de los artículos, propone una mejora del rendimiento tanto del error cuadrático medio como del coeficiente de correlación. A su vez, dentro de las ANN, en concreto la red neuronal de retropropagación (BPNN), se entrenan para predecir tasas de lluvia y, por lo tanto, la atenuación que es probable que se experimente en un enlace, algunas con un tiempo de anticipación de 30 segundos.

Por lo tanto, se confirma que se puede utilizar para predecir las tasas de lluvia para la estimación de la atenuación por lluvia en un enlace tierra-espacio. Otra de las técnicas más referenciadas es SML, ofrece valores con alta precisión sin necesidad de expresiones complejas. En cuanto a KNN también se ha utilizado para diferentes comparaciones como de atenuación por lluvia para comunicaciones inalámbricas terrestres y se trata de otra de las más destacadas para obtener el pronóstico de lluvia.

Como se puede observar, existen diferentes opciones de aprendizaje automático basada en modelos de atenuación por lluvia, pero, se concluye que no todos los modelos de atenuación por lluvia se han desarrollado para un aprendizaje automático por lo que se puede seguir investigando sobre ello. Como bien se sabe, para realizar *machine learning* se genera mucho esfuerzo en buscar datos de entrenamiento y es importante saber dónde y cómo obtener esa información.

Por lo tanto, se propone para trabajos futuros la realización de otra de las técnicas menos utilizadas comparada con el modelo de referencia ITU-R para intentar conseguir una mayor precisión y mejores resultados que los que ofrece la BPNN.

3.7. Conclusión del análisis

Como conclusión, tras revisar los modelos de la lista mencionada en el apartado 2.3.1., se puede ver la variabilidad o versatilidad que hay en cuanto a la utilización de los mismos. Se concluye que algunos de los métodos no son válidos para enlaces tierra-espacio ni para altas frecuencias que requieren los satélites NGSO y que para poder realizar la comparación objetivo de este Trabajo es necesario seleccionar aquellos modelos que cumplan con dichos requisitos.

Además, se observa como la mayoría de los modelos son modificaciones del modelo la ITU-R. Este último, es el que se encuentra estandarizado y por ello el más utilizado, aunque depende de la región es mejor un modelo u otro como es el caso de Crane en la región de EE.UU. que obtiene mejores resultados de atenuación por lluvia.

4. Descripción de los modelos seleccionados

A continuación, se explica, conforme a los criterios de análisis desarrollados en el Capítulo 3 de este Trabajo, por qué se ha optado por seleccionar los siguientes cuatro modelos: i) el modelo ITU-R, ii) el modelo Crane Global, iii) el modelo García-López y iv) el modelo Xidian University. Así mismo, en este Capítulo 4, se desarrollan los pasos a seguir para implementar los modelos que han sido seleccionados para el cálculo de atenuación por lluvia en este Trabajo.

No falte decir que, teniendo en cuenta el tiempo disponible para realizar este Trabajo, este estudio se ha centrado en los modelos de atenuación por lluvia antedichos porque estos cuentan con mayor cantidad de referencias y son aquellos que menos parámetros necesitan a la hora de la implementación del código. Otros modelos existentes, si bien, aportan información adicional que puede ser de interés, no han sido seleccionados para el presente Trabajo por no cumplir los requisitos seleccionados en el Capítulo 3 y por selección de aquellos que se han considerado más relevantes.

El método para realizar el cálculo de atenuación por lluvia es el mismo tanto para el enlace ascendente y el enlace descendente, siendo que únicamente cambia la frecuencia que se selecciona. En el caso de este Trabajo, se seleccionarán frecuencias altas y ángulos de elevación diferentes para ver el efecto en bandas de enlaces Satcom y las diferencias entre los modelos ITU-R, Crane Global, García López y Xidian University.

El modelo ITU-R es el que ha sido considerado de referencia, mientras que para el resto de modelos de atenuación por precipitaciones (Crane Global, García López y Xidian University), se han generado en la herramienta de MATLAB los códigos correspondientes para obtener la atenuación por lluvia en función de la probabilidad en una determinada región y en diferentes frecuencias y ángulos de elevación.

4.1. Modelo ITU-R

El modelo ITU-R es un modelo internacional ampliamente aceptado y estandarizado para la estimación de la atenuación debida a la lluvia en un sistema de comunicación por satélite.

Para obtener las estadísticas de atenuación por lluvia en un determinado lugar en este modelo deben seguirse los pasos que se desarrollan a continuación, basándonos en las recomendaciones de la ITU. Con el fin de facilitar una visión clara de los parámetros a utilizar, se incluye la siguiente representación esquemática de un trayecto tierra-espacio:

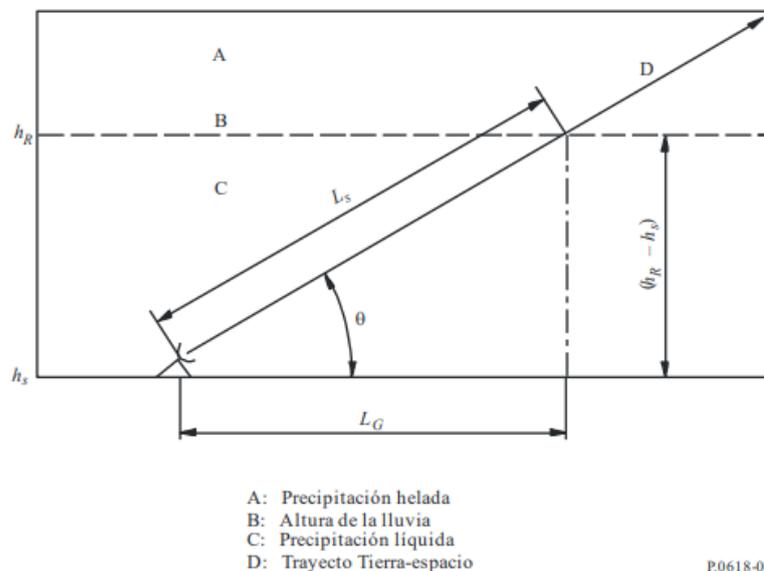


Figura 10. Representación esquemática de un trayecto tierra-espacio con indicación de parámetros [47].

La recomendación UIT-R P.618-13 [47], describe el método para el cálculo de la atenuación por lluvia, obteniéndose los siguientes pasos y expresiones más relevantes:

- **Paso 1:** Determinar la altura de la lluvia h_R que se encuentra en la recomendación UIT-R P.839.

$$h_R = h_0 + 0,36 \text{ km}$$

- **Paso 2:** Se calcula la longitud del trayecto oblicuo, L_s en km en el espacio correspondiente a la altura de la lluvia mediante:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta}; \quad \theta \geq 5^\circ$$

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{\left(\sin^2\theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e}\right)^{1/2} + \sin\theta}; \quad \theta < 5^\circ$$

- Paso 3: Calcular la proyección horizontal de la longitud del trayecto oblicuo en km:

$$L_G = L_S \cos \theta$$

- Paso 4: Obtener la intensidad de la lluvia $R_{0.01}$ a partir de los mapas de lluvia de la recomendación UIT-R P.837.

- Paso 5: Hallar la atenuación específica con los valores de k y α que se obtienen de la recomendación UIT-R P.838.

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^\alpha$$

- Paso 6: Hallar del factor de reducción horizontal para el 0.01% del tiempo.

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})}$$

- Paso 7: Calcular el factor de ajuste vertical para el 0.01% del tiempo con los valores de L_R y χ .

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin\theta} \left(31(1 - e^{-(\theta/1+\chi)}) \sqrt{\frac{L_R \gamma_R}{f^2}} - 0.45 \right)}$$

- Paso 8: Obtener la longitud de trayecto efectiva de la siguiente expresión.

$$L_E = L_R v_{0.01}$$

- Paso 9: La atenuación de rebasamiento estimada para el 0,01% de un año medio se obtiene a partir de la siguiente expresión.

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E$$

- **Paso 10:** Se halla la atenuación de rebasamiento estimada para otros porcentajes de un año medio a partir de la atenuación de rebasamiento para el 0.01% de la siguiente manera:

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655+0.033 \ln(p)-0.045 \ln(A_{0.01})-\beta(1-p)\sin\theta)}$$

4.2. Modelo Crane Global

Este modelo estadístico fue desarrollado para uso en enlaces tierra-espacio o enlaces terrestres y se basa en observaciones de la estructura de la lluvia, la tasa de lluvia y la variación vertical de la temperatura en la atmósfera. Este modelo es utilizado principalmente en América del Norte ya que integra definiciones más zonas de lluvia para EE. UU.

Crane obtuvo este modelo mediante una representación por partes del perfil de la ruta mediante funciones exponenciales. Existen tres modelos de Crane: i) el primero de ellos fue el modelo Global de Crane desarrollado en 1980, dos años después desarrolló ii) el modelo Crane de dos componentes que utilizaba la técnica de integración de trayectorias y, por último, en 1989 perfeccionó iii) el modelo de 2 componentes incluyendo la correlación espacial y las variables estadísticas de la lluvia dentro de una célula. El modelo de Crane es más complejo y consiste en una combinación por partes trayectoria compuestos por funciones exponenciales.

El modelo de Crane utiliza dos funciones exponenciales para cubrir la distancia desde los 0 a los 22,5 km. Una de 0 a d km y la otra de d a 22,5 km, pero puede cubrir mayores distancias que se explicará posteriormente.

A continuación, se detallan los pasos y las expresiones para la aplicación del modelo de atenuación por lluvia [12]:

- **Paso 1:** Determinar la distribución de la tasa de lluvia R_p . Localizar la estación terrestre en el mapa (Figs. 3 o 4) y determinar la región climática de lluvia, A-H, así como obtener la distribución del índice de pluviosidad de la Tabla I del modelo Crane, 1980.

- **Paso 2:** Establecer la longitud D del trayecto proyectado en superficie. Se calcula de la siguiente manera:

$$D = \frac{(H(P) - H_0)}{\tan \theta}; \quad \theta \geq 10^\circ$$

$$D = E\psi; \quad \theta < 10^\circ \quad \psi \text{ en radianes}$$

Donde:

$$\psi = \sin^{-1} \left[\frac{\cos \theta}{(H + E)} \cdot \left(\sqrt{(H_0 + E)^2 \sin^2 \theta + 2E(H - H_0) + H^2 - H_0^2} - (H_0 + E) \sin \theta \right) \right]$$

Siendo E el radio efectivo de la Tierra (8500 km), θ el ángulo de elevación, H_0 la altura de la estación y $H(P)$ la altura de la isoterma 0°C obtenida por la interpolación para el porcentaje de tiempo P de interés.

Según el documento de Crane, utilizando el supuesto de independencia, el valor de la tasa de lluvia integrada en el trayecto (RD) para un trayecto de longitud D2 es igual al valor para un trayecto de longitud D1 cuando la probabilidad de rebasamiento se ajusta por las longitudes relativas de los trayectos. Por lo tanto, para trayectos superiores a una longitud de 22,5 km, el valor de $RD = rRD$ es idéntico al valor $r'R_p'D_0$ para un trayecto $D_0 = 22,5$ km, obteniéndose el valor R_p' que debe utilizarse para el cálculo del trayecto de 22,5 km a partir de la función de distribución del índice de lluvia en la probabilidad de ocurrencia P' , siendo esta $P' = \frac{22.5}{D} \cdot P$ donde P es la probabilidad de interés.

- **Paso 3:** Determinar α y β para el cálculo de la atenuación específica mediante la Tabla III o figuras 18 y 19 del artículo de Crane, 1980 para la frecuencia a utilizar.
- **Paso 4:** Calcular el valor de la atenuación proyectada en la superficie A a partir de R_p y D (o R_p' y D_0). R_p es el índice de lluvia obtenido de la distribución del índice de lluvia para la probabilidad de interés P.

$$A(R_p, D) = \alpha R_p^\beta \left[\frac{e^{u\beta d} - 1}{u\beta} - \frac{b^\beta e^{c\beta d}}{c\beta} + \frac{b^\beta e^{c\beta D}}{c\beta} \right]; \quad d \leq D \leq D_0$$

$$A(R_p, D) = \alpha R_p^\beta \left[\frac{e^{u\beta D} - 1}{u\beta} \right]; \quad D < d$$

$$A(R_p, D) = (H(P) - H_0) \alpha R_p^\beta; \quad D = 0 (\theta = 90^\circ)$$

Siendo la atenuación A en dB, R_p en mm/h y la atenuación específica en αR_p^β en dB/km.

A continuación, se muestran la obtención de los coeficientes de la expresión de la atenuación:

$$u = \frac{\ln[be^{cd}]}{d}$$

$$b = 2.3R_p^{-0.17}$$

$$c = 0.026 - 0.03 \ln R_p$$

$$d = 3.8 - 0.6 \ln R_p$$

- Paso 5: Por último, ajustar la altura a lo largo de una trayectoria inclinada para la obtención de la atenuación A_s .

$$A_s = \frac{LA(R_p, D)}{D}$$

Donde:

$$L = \frac{D}{\cos \theta}; \quad \theta \geq 10^\circ$$

$$L = \sqrt{(E + H_0)^2 + (E + H)^2 - 2(E + H_0)(E + H) \cos \psi}; \quad \theta < 10^\circ$$

4.3. Modelo García-López

García-López (1988) desarrollaron un modelo sencillo de atenuación por lluvia para enlaces por satélite como extensión del propuesto para enlaces terrestres en el que utilizaron medidas sobre enlaces por satélite en Europa, Estados Unidos, Japón y Australia. Para los países tropicales, los valores de los coeficientes que se consideran en el cálculo se obtienen en otro documento.

En este apartado, se detallan las expresiones utilizadas para el cálculo la atenuación del modelo [48]:

- Paso 1: Cálculo de la longitud del trayecto equivalente L_s . Se realiza de la siguiente manera:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad (km) \quad \theta \geq 5^\circ$$

Siendo h_s la altura de la antena desde el nivel del mar en km, θ el ángulo de elevación en grados.

Obteniéndose el parámetro h_R :

$$h_R = 4; \quad 0 < |\varphi| < 36^\circ$$

$$h_R = 4 - 0.075(|\varphi| - 36^\circ); \quad |\varphi| \geq 36^\circ$$

Siendo φ la latitud de la estación terrestre.

- Paso 2: Los coeficientes a, b, c y d son constantes que dependen en general de la zona geográfica y también pueden determinarse mediante técnicas de regresión basadas en la atenuación simultánea de la lluvia y su intensidad. Los coeficientes son como aparecen en la siguiente tabla tomando $e = 10^4$.

Tabla 10. Coeficientes por zona geográfica con $e=10^4$

	a	b	c	d
Europe	0.53	29.7	-44.7	383.75
US	0.4	23	-54.16	974
Japan	0.95	23.5	4.48	-317
Australia	0.72	7.6	-4.75	2408
Tropical Climates	0.72	7.6	-4.75	2408
Worldwide	0.7	18.35	-16.51	500
Temperate Climates	0.7	18.35	-16.51	500

- Paso 3: Calcular la atenuación por lluvia A (dB) en un enlace por satélite se obtiene mediante:

$$A = \frac{kR^\alpha L_s}{\{a + [L_s(bR + cL_s + d)/e]\}}$$

Donde R es la intensidad de lluvia puntual en mm/h, k y α los parámetros en función de la frecuencia, la polarización y el ángulo de elevación.

4.4. Modelo Xidian University

El modelo Xidian University (2018) [25] se trata de uno de los modelos de atenuación por lluvia más modernos que hay actualmente para enlaces tierra-espacio. Este modelo aplica el perfil de celda de lluvia exponencial para adquirir la estructura del modelo. Seguidamente se introduce el factor de ajuste de la tasa de lluvia, cuya fórmula y coeficientes se determinan y optimizan utilizando la información de la base de datos DBSG3.

- Paso 1: Calcular la altura de lluvia h_R mediante la recomendación UIT-R P.839. Esto puede diferir de la altura de la lluvia real.

$$h_R = h_0 + 0,36 \text{ km}$$

- Paso 2: Cálculo de la longitud de la trayectoria oblicua L_s a partir de la recomendación UIT-R P.618.

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta}; \quad \theta \geq 5^\circ$$

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e}\right)^{1/2} + \sin \theta}; \quad \theta < 5^\circ$$

- Paso 3: Obtener el valor de $r(p)$ mediante la siguiente expresión.

$$r(p) = 3.78R(p)^{-0.56+1.51/L_s} \left(1 - \frac{0.85p^{0.065}}{1 + 0.12L_s}\right)$$

- Paso 4: Cálculo de la atenuación por lluvia prevista excedida para p% de un año medio.

$$A(p) = k[r(p)R(p)]^\alpha L_s$$

Donde $R(p)$ es el índice de lluvia superado el $p\%$ de un año medio.

5. Resultados obtenidos

La simulación de distintos modelos de atenuación por lluvia realizada en el presente Trabajo, en particular ITU-R, Crane Global, García-López y Xidian University en la región de Madrid, se ha llevado a cabo utilizando el software de MATLAB de Mathworks. En este *software*, se ha realizado el código correspondiente para la representación gráfica de la atenuación de cada uno de estos modelos en función del porcentaje de tiempo a diferentes frecuencias y ángulos de elevación. Para ello, se proponen diferentes escenarios para ver su funcionamiento, es decir, se exponen los resultados obtenidos en las simulaciones.

5.1. Escenario 1

En la **Tabla 11** se detallan los parámetros utilizados en la simulación de los diferentes modelos en MATLAB en el primer escenario.

Tabla 11. Parámetros de simulación escenario 1

Ciudad	Madrid
Altura sobre el nivel del mar de la estación (km)	0.657
Ángulo de elevación (grados)	25
Latitud (grados)	40.4165
Longitud (grados)	-3.70256
Ángulo de inclinación de la polarización con respecto a al horizontal (grados)	45

Con los parámetros de la tabla anterior, se ha ido modificando el valor de la frecuencia para hacia valores más altos, con el fin de poder concluir que modelo es el más adecuado para la región de Madrid comparándolo con el estándar de la ITU-R.

A continuación, se incluyen los resultados de la comparación de los modelos de atenuación por lluvia para diferentes valores de frecuencia.

En la **Figura 11**, se muestra la comparativa de los modelos de atenuación por lluvia para una frecuencia de 12,5 GHz (banda Ku).

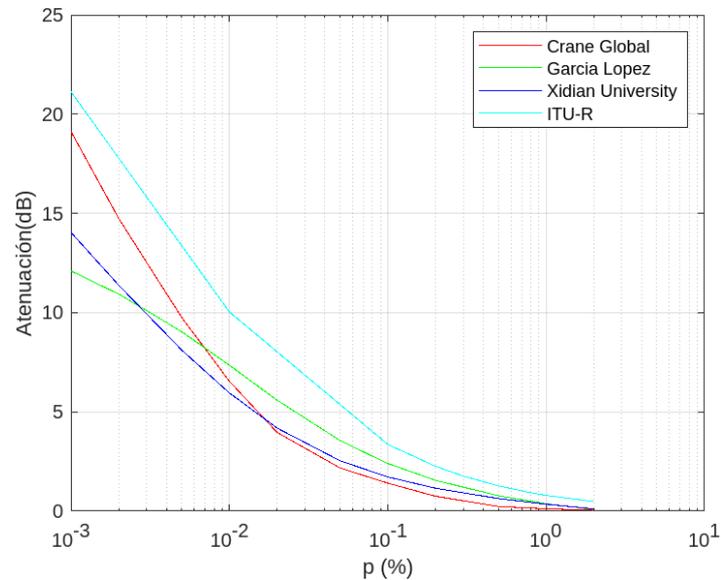


Figura 11. Atenuación en función de la probabilidad para 12,5 GHz (banda Ku) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

Como se puede observar, el modelo de la ITU-R es el que más atenuación en dB produce para cualquier probabilidad. En este caso, el modelo de Crane Global para garantizar una disponibilidad de 99,999%, es el que más se aproxima al modelo estándar de la ITU-R. Sin embargo, este modelo sería el que menos atenuación ofrece para una disponibilidad del 99,5%. En cuanto al resto de disponibilidades, como es para un 99,99% que se corresponde con una probabilidad de 0,01, tal y como se puede analizar, el modelo que mejores resultados ofrece es el de Xidian University.

En la **Figura 12** y para una frecuencia de 25 GHz que se corresponde con la banda Ka, se aprecia como el modelo de Crane es el que peor resultado aporta para ofrecer una disponibilidad muy elevada (99,999%). En el caso de que se quieran unas disponibilidades inferiores para servicios como IoT, tanto el modelo de Crane Global como el de Xidian University son los que menos dB de atenuación por lluvia sería necesarios compensar.

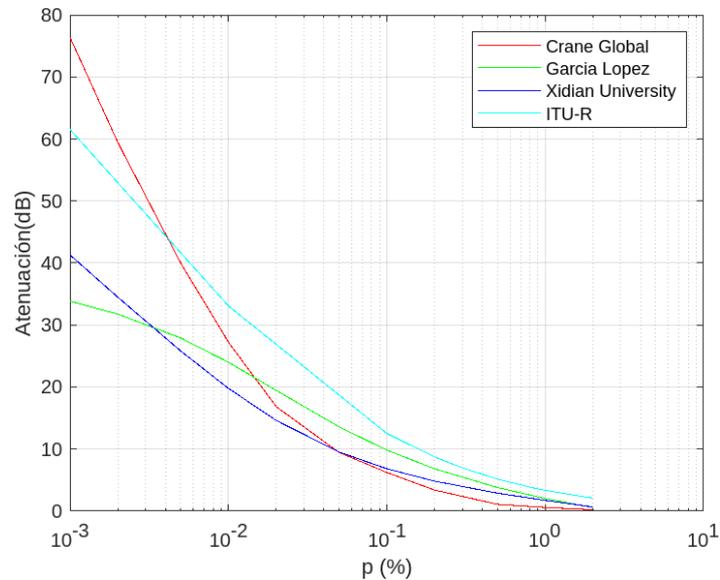


Figura 12. Atenuación en función de la probabilidad para 25 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

Para una frecuencia de 35 GHz (banda Ka), en la **Figura 13** se puede observar las comparaciones entre estos modelos.

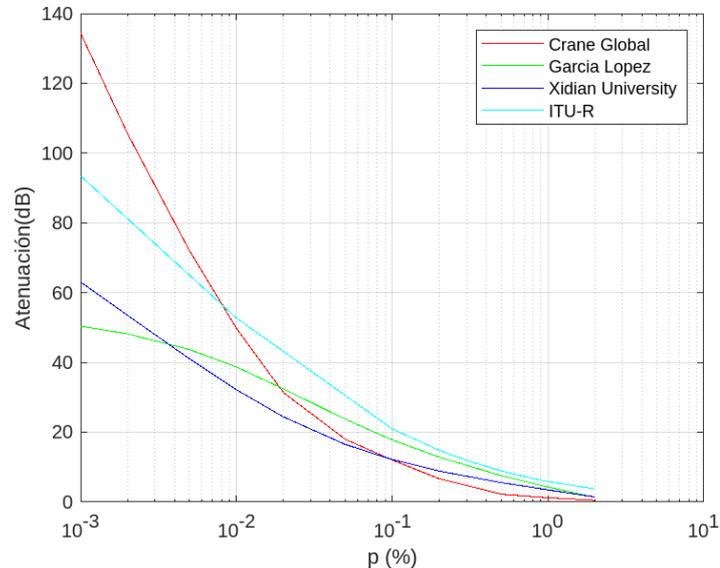


Figura 13. Atenuación en función de la probabilidad para 35 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

En este caso, el modelo que menos dB de atenuación por lluvia son necesarios compensar para un porcentaje de 0,001 es el de García-López, pero no es el que mejores resultados proporciona a medida que se quiere ofrecer disponibilidades inferiores. En el caso de que

se quisiera garantizar una disponibilidad de un 99% cualquiera de los modelos podría servir ya que todos cuentan con aproximadamente los mismos dB de atenuación.

Por último, en la **Figura 14** y **Figura 15** se muestra una comparativa en frecuencias de 50 GHz y 60 GHz que se corresponden con la banda de frecuencia Q/V. Como ya se ha comentado anteriormente, cuanto mayor es la frecuencia, mayor atenuación. En ambos casos, con estas elevadas frecuencias y para un ángulo de elevación de 25°, el modelo de Crane Global proporciona peores resultados a diferencia de lo que se ha obtenido para un ángulo de elevación de 45°.

Cabe destacar que para el resto de disponibilidades se han obtenido unos resultados muy similares en estas dos frecuencias, siendo el modelo de Crane Global y Xidian University los que ofrecen mejores resultados para una disponibilidad de 99,9% o 99,95%.

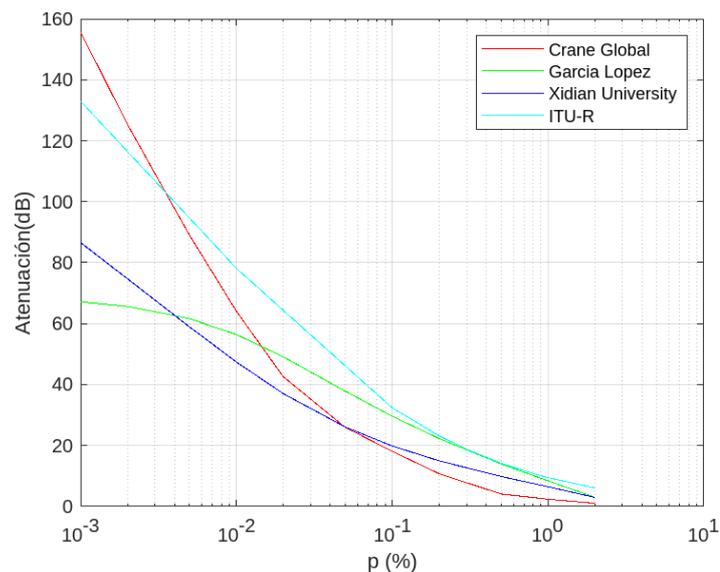


Figura 14. Atenuación en función de la probabilidad para 50 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

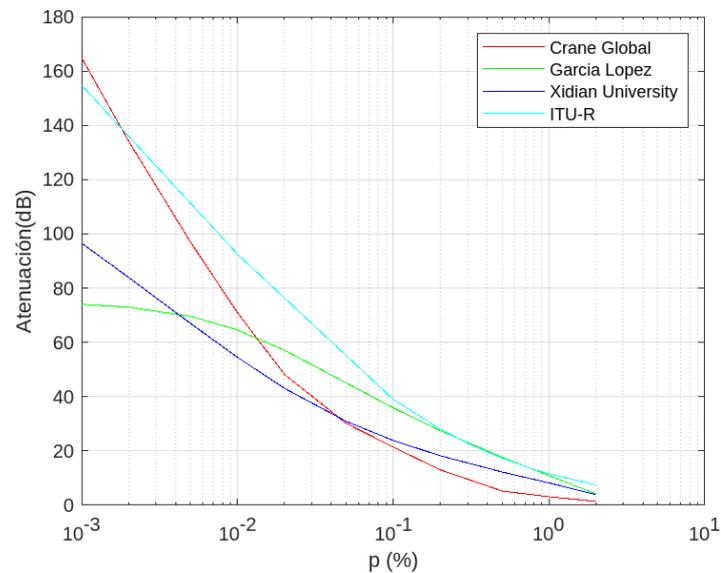


Figura 15. Atenuación en función de la probabilidad para 60 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

De los modelos seleccionados, en la región de Madrid el modelo que cuenta con una menor atenuación garantizando mayores disponibilidades es el modelo de García-López siendo el que más se aleja a los valores de atenuación que ofrece el modelo de referencia de la ITU-R. El método de García-López para la atenuación de la lluvia considera un mayor número de parámetros y coeficientes, lo que da como resultado una buena precisión, mientras que el modelo UIT-R subestima los índices de lluvia más elevados. En este modelo se cogen valores diferentes de los coeficientes dependiendo de la zona geográfica que puede influir en los resultados para unas regiones u otras.

Las diferencias observadas respecto al modelo de la ITU-R son debidas a que cada uno de ellos modela de diferente manera la información proporcionada. Algunos de ellos, como es el caso de Xidian University, tanto a altura de la lluvia como la longitud de la trayectoria oblicua se obtienen de la recomendación de la ITU-R y los parámetros que utilizan son k y α , $R_p(p)$ y $r(p)$ siendo este el factor de ajuste del índice de pluviosidad. Para el caso de Xidian, en diferentes estudios se ha comprobado que este nuevo modelo ofrece mejores resultados de predicción que otros modelos ya existentes tanto en diferentes frecuencias como en porcentajes de tiempo, latitudes, etc. Siendo de gran utilidad para frecuencias superiores a 10 GHz.

Como es el caso de Garcia y el de Xidian University utilizan parte de las recomendaciones de la ITU-R para la obtención de algunos parámetros siendo modificaciones de este y por ello ofrecen mejores resultados para esta región.

Por lo tanto, dependiendo de la disponibilidad que se quiera garantizar, longitud y latitud de la región y del ángulo de elevación entre otros, varía mucho que modelo es mejor respecto al de referencia ya que un modelo puede actuar mejor para unos climas que para otros.

Se concluye que, en todas las frecuencias y con esta elevación, los resultados han ido cambiando y es conveniente utilizar un modelo u otro dependiendo del servicio que se quiera ofrecer y la frecuencia que se considere necesaria. Sin perjuicio de esto, es opinión fundada de este estudiante que, con estos parámetros de entrada, ofrecen mejores resultados los modelos García-López, Crane Global y Xidian University que el modelo ITU-R.

5.2. Escenario 2

En este apartado se detallan los parámetros utilizados en la simulación de los diferentes modelos en MATLAB en este segundo escenario.

Tabla 12. Parámetros de simulación escenario 2

Ciudad	Madrid
Altura sobre el nivel del mar de la estación (km)	0.657
Ángulo de elevación (grados)	45
Latitud (grados)	40.4165
Longitud (grados)	-3.70256
Ángulo de inclinación de la polarización con respecto a al horizontal (grados)	45

Para este escenario se han seleccionado las mismas frecuencias que para el Escenario 1 pero se han realizado las simulaciones para un diferente ángulo de elevación. En las siguientes figuras, se observan los resultados de la comparación.

Puede observarse en la **Figura 16** la respuesta de los modelos en comparación con el de la ITU-R a una frecuencia de 12,5 GHz (banda Ku).

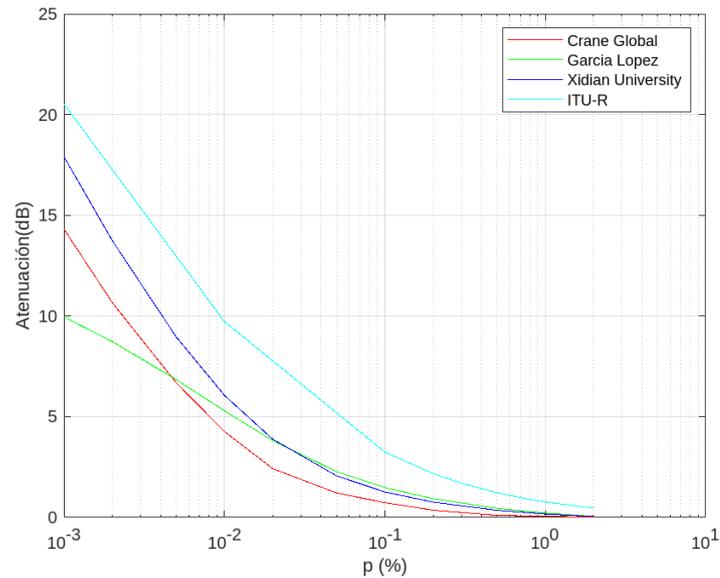


Figura 16. Atenuación en función de la probabilidad para 12,5 GHz (banda Ku) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 45°

En una frecuencia de 12,5 GHz (banda Ku), el modelo que introduce una mayor atenuación en todos los porcentajes de tiempo es el modelo de la ITU-R, al igual que en el Escenario 1.

Dependiendo de la disponibilidad de la que se quiera disponer en el servicio es mejor uno u otro modelo. Como se puede observar en la gráfica, el modelo más adecuado y que ofrece menos atenuación para la región de Madrid es el modelo de Crane Global para una disponibilidad tanto de 99.99% como de 99.90%. Sin embargo, si se quiere garantizar una disponibilidad del 99.999%, el que mejores resultados ofrece es el modelo de García-López.

Para la frecuencia de 25 GHz (banda Ka), se ha obtenido de la simulación el resultado que se muestra en la **Figura 17**.

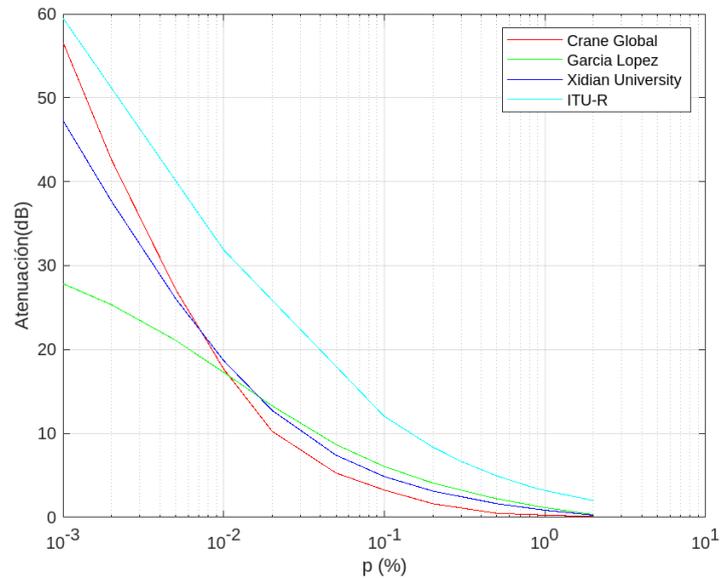


Figura 17. Atenuación en función de la probabilidad para 25 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 45°

5.3. A medida que se va aumentando la frecuencia se van obteniendo resultados diferentes. Para una probabilidad del 99,999%, lo que es lo mismo para un porcentaje de tiempo de 0,001 se ve como los modelos de Crane Global, Xidian University e ITU-R tienen una atenuación más parecida que el modelo de García López. Aun así para una frecuencia de 25 GHz, el modelo de la ITU-R es el que mayor atenuación tiene para todas las probabilidades de comparación. También se observa que para un porcentaje de un 99% las atenuaciones son bastante bajas en inferiores

En la Tabla 11 se detallan los parámetros utilizados en la simulación de los enlaces modelados en MATLAB. ABEM es el primer escenario

a 5 dB. A diferencia del Escenario 1

Tabla 11. Parámetros de simulación escenario 1

Ciudad	Madrid
Altura sobre el nivel del mar de la estación (km)	0.657
Ángulo de elevación (grados)	25
Latitud (grados)	40.4165
Longitud (grados)	-3.70256
Ángulo de inclinación de la polarización con respecto a al horizontal (grados)	45

Con los parámetros de la tabla anterior, se ha ido modificando el valor de la frecuencia para hacia valores más altos, con el fin de poder concluir que modelo es el más adecuado para la región de Madrid comparándolo con el estándar de la ITU-R.

A continuación, se incluyen los resultados de la comparación de los modelos de atenuación por lluvia para diferentes valores de frecuencia.

En la **Figura 11**, se muestra la comparativa de los modelos de atenuación por lluvia para una frecuencia de 12,5 GHz (banda Ku).

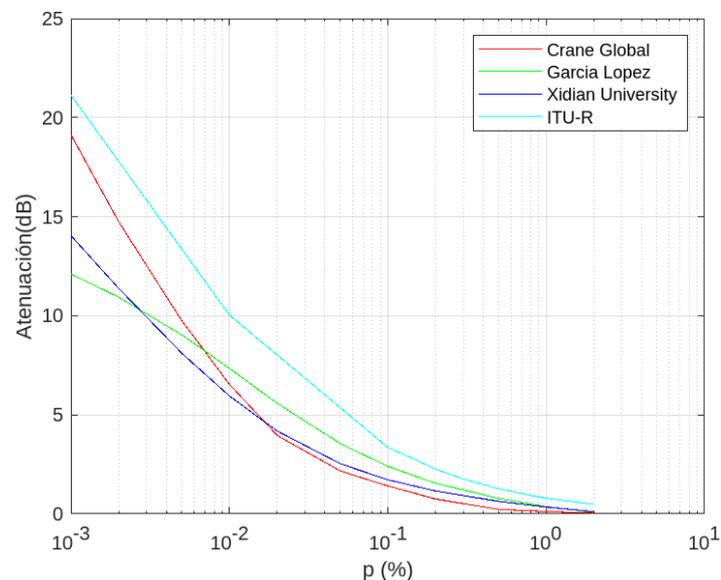


Figura 11. Atenuación en función de la probabilidad para 12,5 GHz (banda Ku) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

Como se puede observar, el modelo de la ITU-R es el que más atenuación en dB produce para cualquier probabilidad. En este caso, el modelo de Crane Global para garantizar una disponibilidad de 99,999%, es el que más se aproxima al modelo estándar de la ITU-R. Sin embargo, este modelo sería el que menos atenuación ofrece para una disponibilidad del 99,5%. En cuanto al resto de disponibilidades, como es para un 99,99% que se corresponde con una probabilidad de 0,01, tal y como se puede analizar, el modelo que mejores resultados ofrece es el de Xidian University.

En la **Figura 12** y para una frecuencia de 25 GHz que se corresponde con la banda Ka, se aprecia como el modelo de Crane es el que peor resultado aporta para ofrecer una disponibilidad muy elevada (99,999%). En el caso de que se quieran unas disponibilidades inferiores para servicios como IoT, tanto el modelo de Crane Global como el de Xidian University son los que menos dB de atenuación por lluvia sería necesarios compensar.

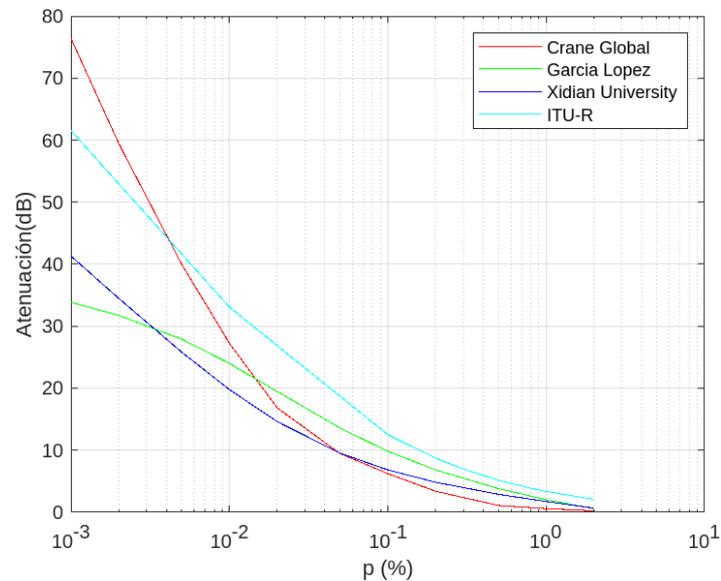


Figura 12. Atenuación en función de la probabilidad para 25 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

Para una frecuencia de 35 GHz (banda Ka), en la **Figura 13** se puede observar las comparaciones entre estos modelos.

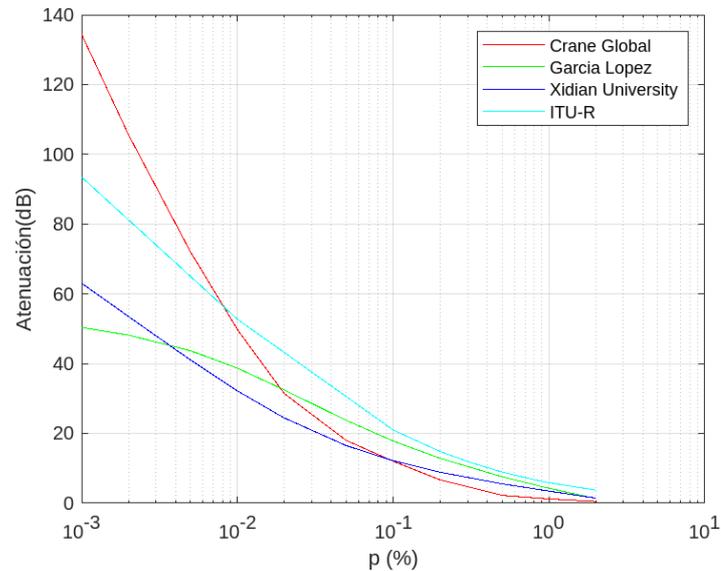


Figura 13. Atenuación en función de la probabilidad para 35 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

En este caso, el modelo que menos dB de atenuación por lluvia son necesarios compensar para un porcentaje de 0,001 es el de García-López, pero no es el que mejores resultados proporciona a medida que se quiere ofrecer disponibilidades inferiores. En el caso de que se quisiera garantizar una disponibilidad de un 99% cualquiera de los modelos podría servir ya que todos cuentan con aproximadamente los mismos dB de atenuación.

Por último, en la **Figura 14** y **Figura 15** se muestra una comparativa en frecuencias de 50 GHz y 60 GHz que se corresponden con la banda de frecuencia Q/V. Como ya se ha comentado anteriormente, cuanto mayor es la frecuencia, mayor atenuación. En ambos casos, con estas elevadas frecuencias y para un ángulo de elevación de 25°, el modelo de Crane Global proporciona peores resultados a diferencia de lo que se ha obtenido para un ángulo de elevación de 45°.

Cabe destacar que para el resto de disponibilidades se han obtenido unos resultados muy similares en estas dos frecuencias, siendo el modelo de Crane Global y Xidian University los que ofrecen mejores resultados para una disponibilidad de 99,9% o 99,95%.

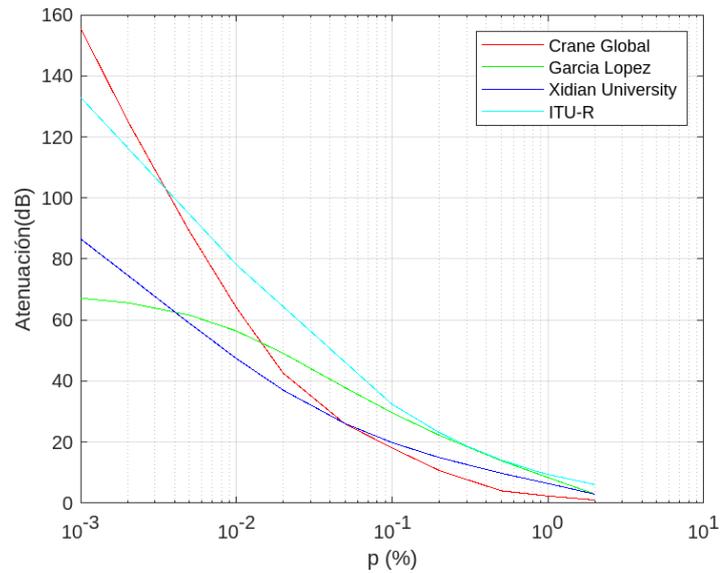


Figura 14. Atenuación en función de la probabilidad para 50 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

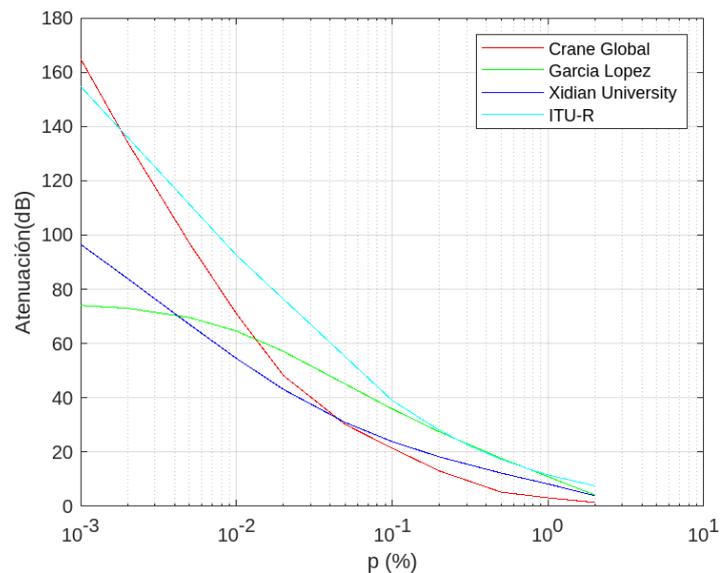


Figura 15. Atenuación en función de la probabilidad para 60 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

De los modelos seleccionados, en la región de Madrid el modelo que cuenta con una menor atenuación garantizando mayores disponibilidades es el modelo de García-López siendo el que más se aleja a los valores de atenuación que ofrece el modelo de referencia de la ITU-R. El método de García-López para la atenuación de la lluvia considera un mayor número de parámetros y coeficientes, lo que da como resultado una buena precisión, mientras que el modelo UIT-R subestima los índices de lluvia más elevados. En este modelo se cogen

valores diferentes de los coeficientes dependiendo de la zona geográfica que puede influir en los resultados para unas regiones u otras.

Las diferencias observadas respecto al modelo de la ITU-R son debidas a que cada uno de ellos modela de diferente manera la información proporcionada. Algunos de ellos, como es el caso de Xidian University, tanto a altura de la lluvia como la longitud de la trayectoria oblicua se obtienen de la recomendación de la ITU-R y los parámetros que utilizan son k y α , $R_p(p)$ y $r(p)$ siendo este el factor de ajuste del índice de pluviosidad. Para el caso de Xidian, en diferentes estudios se ha comprobado que este nuevo modelo ofrece mejores resultados de predicción que otros modelos ya existentes tanto en diferentes frecuencias como en porcentajes de tiempo, latitudes, etc. Siendo de gran utilidad para frecuencias superiores a 10 GHz.

Como es el caso de Garcia y el de Xidian University utilizan parte de las recomendaciones de la ITU-R para la obtención de algunos parámetros siendo modificaciones de este y por ello ofrecen mejores resultados para esta región.

Por lo tanto, dependiendo de la disponibilidad que se quiera garantizar, longitud y latitud de la región y del ángulo de elevación entre otros, varía mucho que modelo es mejor respecto al de referencia ya que un modelo puede actuar mejor para unos climas que para otros.

Se concluye que, en todas las frecuencias y con esta elevación, los resultados han ido cambiando y es conveniente utilizar un modelo u otro dependiendo del servicio que se quiera ofrecer y la frecuencia que se considere necesaria. Sin perjuicio de esto, es opinión fundada de este estudiante que, con estos parámetros de entrada, ofrecen mejores resultados los modelos García-López, Crane Global y Xidian University que el modelo ITU-R.

Escenario , al cambiar el ángulo de elevación, el modelo de referencia de la ITU-R es el que cuenta con mayor atenuación.

Otro de los valores de frecuencia que se ha utilizado para obtener resultados es para un valor de 35 GHz (banda Ka), pudiéndose observar los resultados en la **Figura 18**.

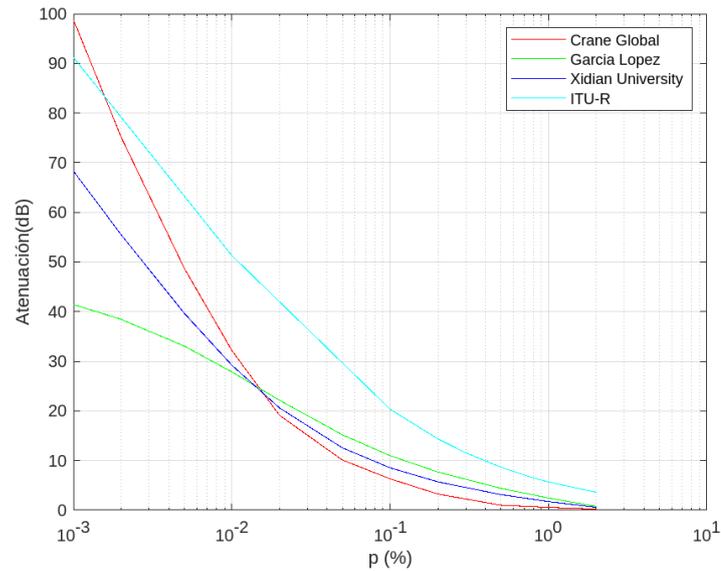


Figura 18. Atenuación en función de la probabilidad para 35 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 45°

Al analizar estos resultados, se observa que para esta frecuencia seleccionada y para una disponibilidad del 99,999%, el modelo de Crane ofrece una mayor atenuación que el resto. Sin embargo, para disponibilidades de 99% todos los modelos se encuentran por debajo de los 10 dB de atenuación y apenas hay una gran diferencia entre ellos.

En la **Figura 19** para una frecuencia de 50 GHz (banda Q/V) se obtiene los siguientes valores para estos modelos.

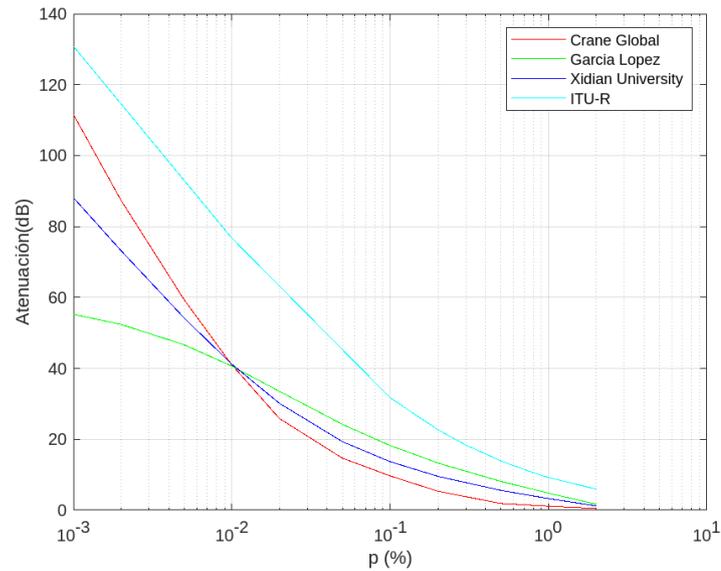


Figura 19. Atenuación en función de la probabilidad para 50 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 45°

En la **Figura 19**, vuelve a ser el modelo de la ITU-R cogido como referencia el que cuenta con una mayor atenuación, siendo del orden de unos 10 dB más para cada uno de los porcentajes de tiempo. En una disponibilidad de 99,99% tanto el modelo de Crane, Xidian University y García-López tienen la misma atenuación de 40 dB. Este tipo de disponibilidades proporcionan grandes atenuaciones por lluvia a compensar en los balances de enlace para unas frecuencias tan elevadas, por lo que, lo ideal sería ofrecer disponibilidades inferiores.

Por último, el valor más alto de frecuencia en el que se han obtenido resultados es para 60 GHz (banda Q/V).

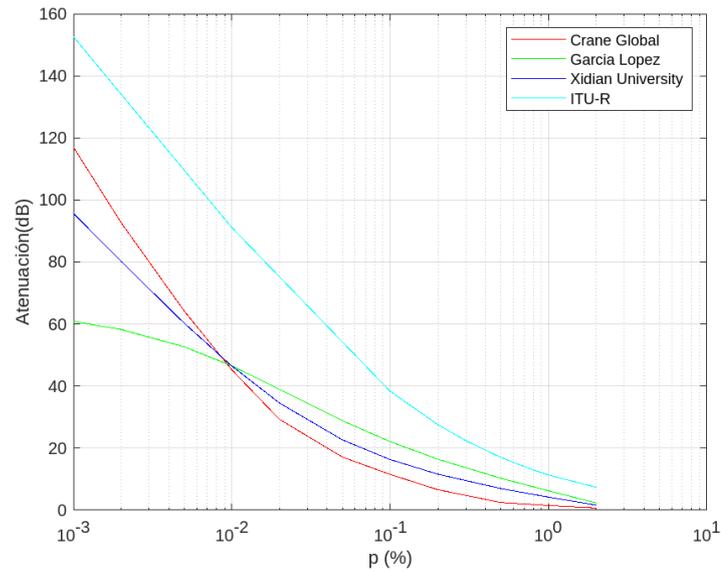


Figura 20. Atenuación en función de la probabilidad para 60 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 45°

Estos valores de atenuación, como se observa en la **Figura 20**, son mucho más elevados que para unas frecuencias más bajas. Con este tipo de frecuencias, como se ha comentado anteriormente es difícil de compensar para altas disponibilidades cercanas al 100%. Al igual que se ha podido observar en las figuras anteriores, para porcentajes de tiempo de un 1%, es decir, garantizando una disponibilidad del 99% la atenuación es bastante inferior, entre los 0 y 15 dB.

En cuanto al modelo de Crane Global, los resultados son los que más se aproximan a los valores del modelo de referencia ITU-R, pero, aun así, se puede observar que ofrece mejores resultados de atenuación para la mayoría de los porcentajes de tiempo. En este modelo, los valores de α y β varían en función de la frecuencia y cuenta con más parámetros y expresiones que el resto de los modelos de atenuación por lluvia que se han comparado.

Por lo tanto, dependiendo de la disponibilidad que se quiera garantizar, longitud y latitud de la región y del ángulo de elevación entre otros, es difícil estimar que modelo es mejor respecto al de referencia ya que un modelo puede actuar mejor para unos climas que para otros. Aunque para este escenario, los modelos que mejores resultados ofrecen para la mayoría de las disponibilidades son Crane Global y Xidian University, excepto para el 99,999% de disponibilidad que sería García-López.

5.4. Escenario 3

Para este escenario, se muestra en la **Tabla 13** los parámetros utilizados en la simulación de los diferentes modelos en MATLAB para llevar a cabo dicho análisis.

Tabla 13. Parámetros de simulación escenario 3

Ciudad	Madrid
Altura sobre el nivel del mar de la estación (km)	0.657
Ángulo de elevación (grados)	60
Latitud (grados)	40.4165
Longitud (grados)	-3.70256
Ángulo de inclinación de la polarización con respecto a al horizontal (grados)	45

Como se puede observar, este escenario también aplica a la región de Madrid, pero con otro ángulo de elevación diferente a los anteriores para observar las diferencias.

Con una frecuencia de 12 GHz y con una elevación de 60°, se puede observar en la **Figura 21** que el modelo de Xidian University es el que proporciona peores resultados para la disponibilidad del 99,999% o, lo que es lo mismo, el 0,001 de probabilidad. Por el contrario, el modelo que ofrece mejores resultados es el modelo de García-López. Además, con esta elevación, para garantizar una disponibilidad del 99% solamente se tendrían que compensar en el balance de enlace entre 1 y 2 dB.

A su vez, cabe destacar que para una probabilidad de 0,01%, los modelos Xidian University y García-López cuentan con prácticamente la misma atenuación.

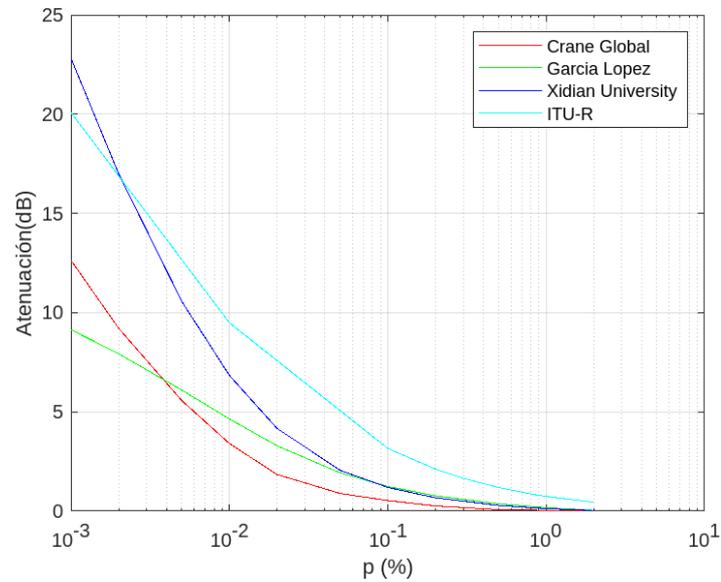


Figura 21. Atenuación en función de la probabilidad para 12,5 GHz (banda Ku) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 60°

En la **Figura 22** puede observarse la respuesta de los modelos en comparación con el de la ITU-R a una frecuencia de 25 GHz (banda Ka).

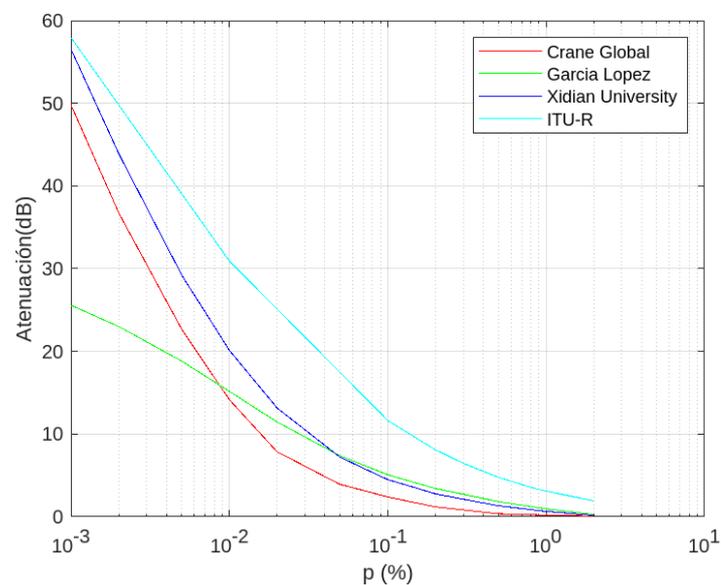


Figura 22. Atenuación en función de la probabilidad para 25 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 60°

Con esta frecuencia, el modelo de referencia de la ITU-R es el que más atenuación ofrece en todas las probabilidades. A medida que se va disminuyendo de disponibilidad, la

atenuación como en casos anteriores va disminuyendo, quedando para una disponibilidad del 99% inferior a 5 dB. Cabe destacar que el modelo de Crane Global es el que mejores resultados ofrece para garantizar disponibilidades que permitan servicios de distribución de video.

Para la frecuencia de 35 GHz (banda Ka), se ha obtenido de la simulación el resultado que se muestra en la **Figura 23**.

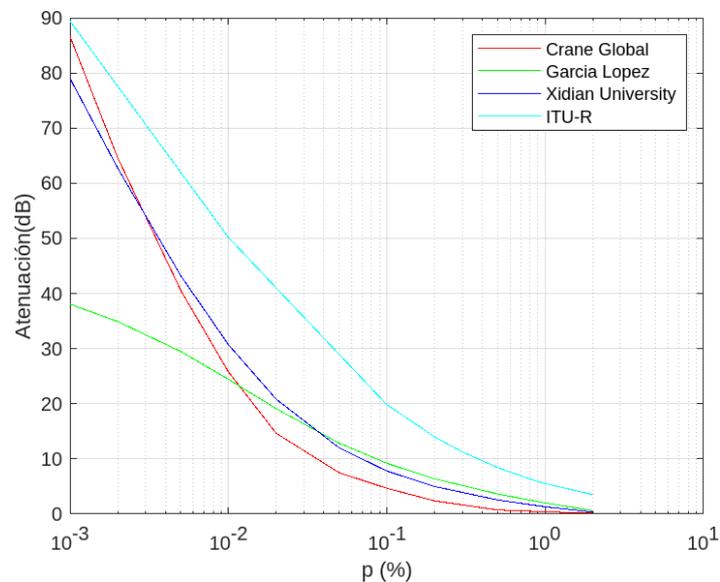


Figura 23. Atenuación en función de la probabilidad para 35 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 60°

5.5. Al igual que para el Escenario , el modelo de Crane Global ha sido en esta frecuencia el que peores resultados ofrece. A medida que se aumenta la elevación tanto para el Escenario 1

En la **Tabla 11** se detallan los parámetros utilizados en la simulación de los diferentes modelos en MATLAB en el primer escenario.

Tabla 11. Parámetros de simulación escenario 1

Ciudad	Madrid
Altura sobre el nivel del mar de la estación (km)	0.657
Ángulo de elevación (grados)	25
Latitud (grados)	40.4165
Longitud (grados)	-3.70256
Ángulo de inclinación de la polarización con respecto a al horizontal (grados)	45

Con los parámetros de la tabla anterior, se ha ido modificando el valor de la frecuencia para hacia valores más altos, con el fin de poder concluir que modelo es el más adecuado para la región de Madrid comparándolo con el estándar de la ITU-R.

A continuación, se incluyen los resultados de la comparación de los modelos de atenuación por lluvia para diferentes valores de frecuencia.

En la **Figura 11**, se muestra la comparativa de los modelos de atenuación por lluvia para una frecuencia de 12,5 GHz (banda Ku).

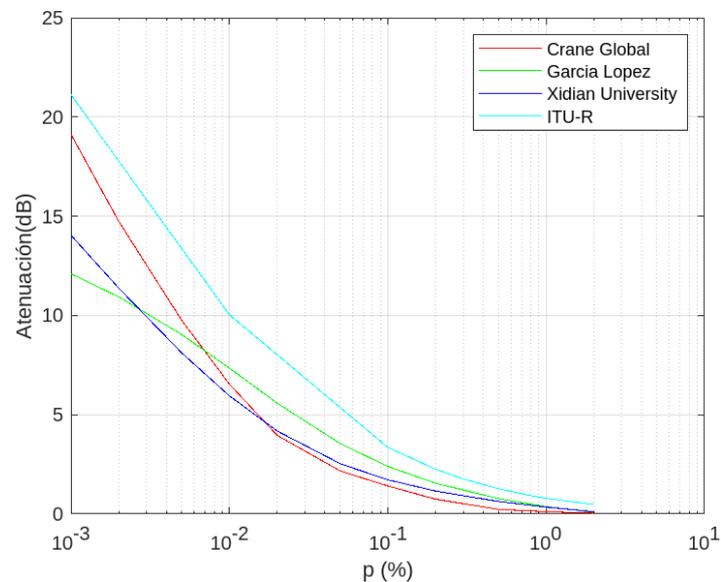


Figura 11. Atenuación en función de la probabilidad para 12,5 GHz (banda Ku) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

Como se puede observar, el modelo de la ITU-R es el que más atenuación en dB produce para cualquier probabilidad. En este caso, el modelo de Crane Global para garantizar una disponibilidad de 99,999%, es el que más se aproxima al modelo estándar de la ITU-R. Sin

embargo, este modelo sería el que menos atenuación ofrece para una disponibilidad del 99,5%. En cuanto al resto de disponibilidades, como es para un 99,99% que se corresponde con una probabilidad de 0,01, tal y como se puede analizar, el modelo que mejores resultados ofrece es el de Xidian University.

En la **Figura 12** y para una frecuencia de 25 GHz que se corresponde con la banda Ka, se aprecia como el modelo de Crane es el que peor resultado aporta para ofrecer una disponibilidad muy elevada (99,999%). En el caso de que se quieran unas disponibilidades inferiores para servicios como IoT, tanto el modelo de Crane Global como el de Xidian University son los que menos dB de atenuación por lluvia sería necesarios compensar.

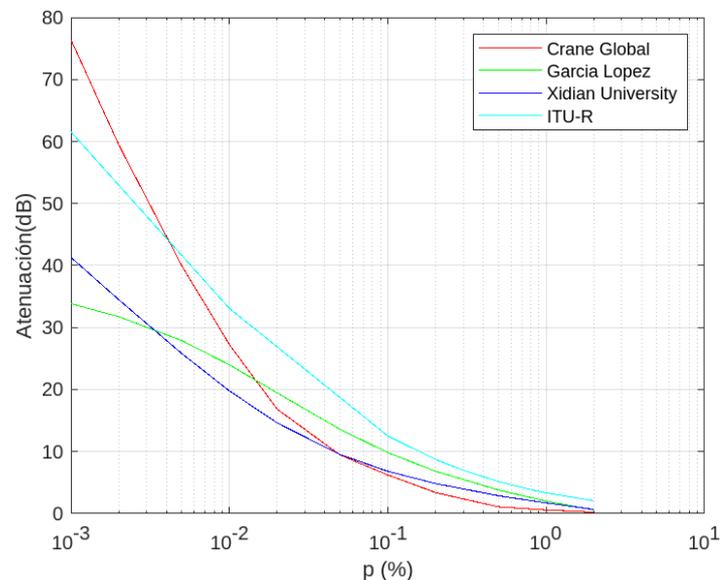


Figura 12. Atenuación en función de la probabilidad para 25 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

Para una frecuencia de 35 GHz (banda Ka), en la **Figura 13** se puede observar las comparaciones entre estos modelos.

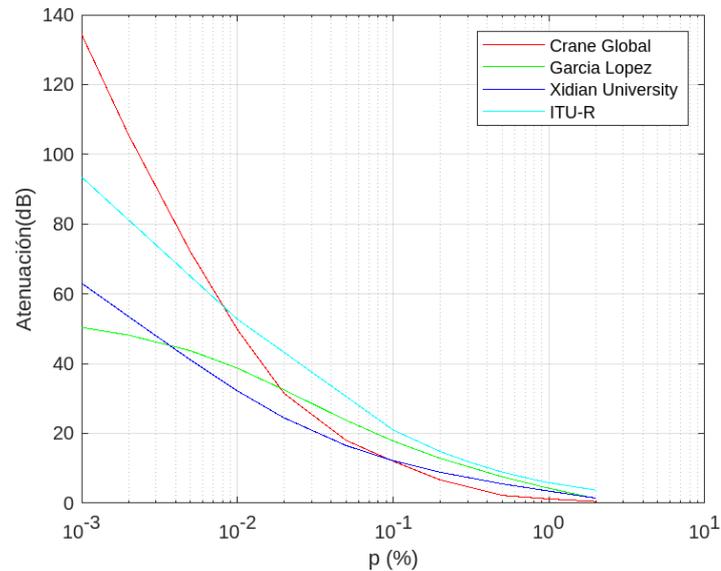


Figura 13. Atenuación en función de la probabilidad para 35 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

En este caso, el modelo que menos dB de atenuación por lluvia son necesarios compensar para un porcentaje de 0,001 es el de García-López, pero no es el que mejores resultados proporciona a medida que se quiere ofrecer disponibilidades inferiores. En el caso de que se quisiera garantizar una disponibilidad de un 99% cualquiera de los modelos podría servir ya que todos cuentan con aproximadamente los mismos dB de atenuación.

Por último, en la **Figura 14** y **Figura 15** se muestra una comparativa en frecuencias de 50 GHz y 60 GHz que se corresponden con la banda de frecuencia Q/V. Como ya se ha comentado anteriormente, cuanto mayor es la frecuencia, mayor atenuación. En ambos casos, con estas elevadas frecuencias y para un ángulo de elevación de 25°, el modelo de Crane Global proporciona peores resultados a diferencia de lo que se ha obtenido para un ángulo de elevación de 45°.

Cabe destacar que para el resto de disponibilidades se han obtenido unos resultados muy similares en estas dos frecuencias, siendo el modelo de Crane Global y Xidian University los que ofrecen mejores resultados para una disponibilidad de 99,9% o 99,95%.

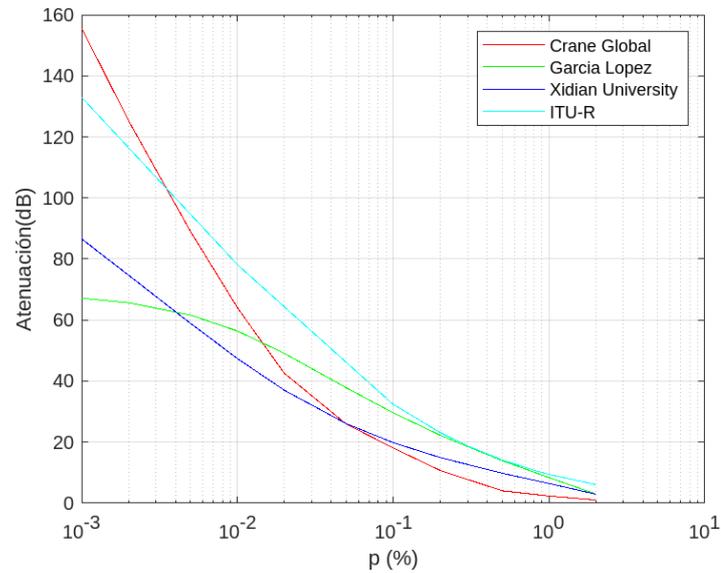


Figura 14. Atenuación en función de la probabilidad para 50 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

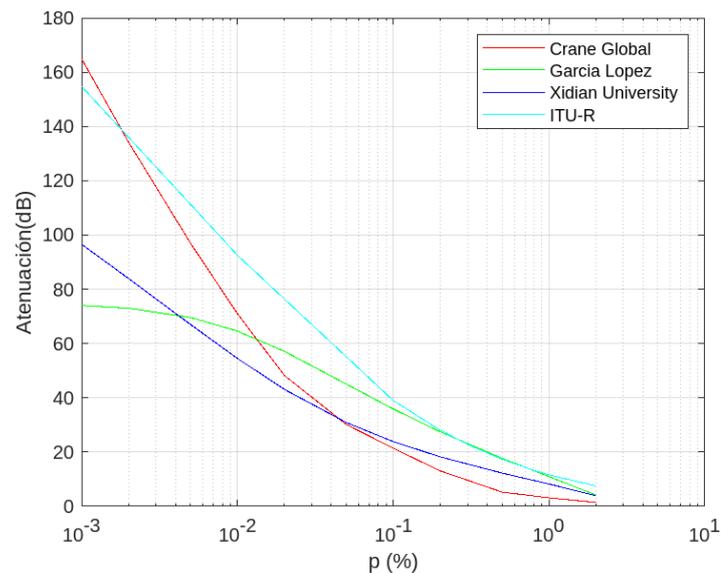


Figura 15. Atenuación en función de la probabilidad para 60 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°

De los modelos seleccionados, en la región de Madrid el modelo que cuenta con una menor atenuación garantizando mayores disponibilidades es el modelo de García-López siendo el que más se aleja a los valores de atenuación que ofrece el modelo de referencia de la ITU-R. El método de García-López para la atenuación de la lluvia considera un mayor número de parámetros y coeficientes, lo que da como resultado una buena precisión, mientras que el modelo UIT-R subestima los índices de lluvia más elevados. En este modelo se cogen

valores diferentes de los coeficientes dependiendo de la zona geográfica que puede influir en los resultados para unas regiones u otras.

Las diferencias observadas respecto al modelo de la ITU-R son debidas a que cada uno de ellos modela de diferente manera la información proporcionada. Algunos de ellos, como es el caso de Xidian University, tanto a altura de la lluvia como la longitud de la trayectoria oblicua se obtienen de la recomendación de la ITU-R y los parámetros que utilizan son k y α , $R_p(p)$ y $r(p)$ siendo este el factor de ajuste del índice de pluviosidad. Para el caso de Xidian, en diferentes estudios se ha comprobado que este nuevo modelo ofrece mejores resultados de predicción que otros modelos ya existentes tanto en diferentes frecuencias como en porcentajes de tiempo, latitudes, etc. Siendo de gran utilidad para frecuencias superiores a 10 GHz.

Como es el caso de Garcia y el de Xidian University utilizan parte de las recomendaciones de la ITU-R para la obtención de algunos parámetros siendo modificaciones de este y por ello ofrecen mejores resultados para esta región.

Por lo tanto, dependiendo de la disponibilidad que se quiera garantizar, longitud y latitud de la región y del ángulo de elevación entre otros, varía mucho que modelo es mejor respecto al de referencia ya que un modelo puede actuar mejor para unos climas que para otros.

Se concluye que, en todas las frecuencias y con esta elevación, los resultados han ido cambiando y es conveniente utilizar un modelo u otro dependiendo del servicio que se quiera ofrecer y la frecuencia que se considere necesaria. Sin perjuicio de esto, es opinión fundada de este estudiante que, con estos parámetros de entrada, ofrecen mejores resultados los modelos García-López, Crane Global y Xidian University que el modelo ITU-R.

Escenario como para el Escenario 3, es el modelo de la ITU-R el que ofrece mayor atenuación por lluvia. Cabe destacar que el modelo García-López tiene una atenuación bastante inferior al resto.

Seguidamente, se muestra en la **Figura 24** la simulación para una frecuencia de 50 GHz (banda Q/V). En esta se observa como el modelo de la ITU-R vuelve a ser el que ofrece peores resultados. En otras palabras, en frecuencias tan altas sería importante revisar otros parámetros para poder conseguir unos resultados adecuados de atenuación por lluvia.

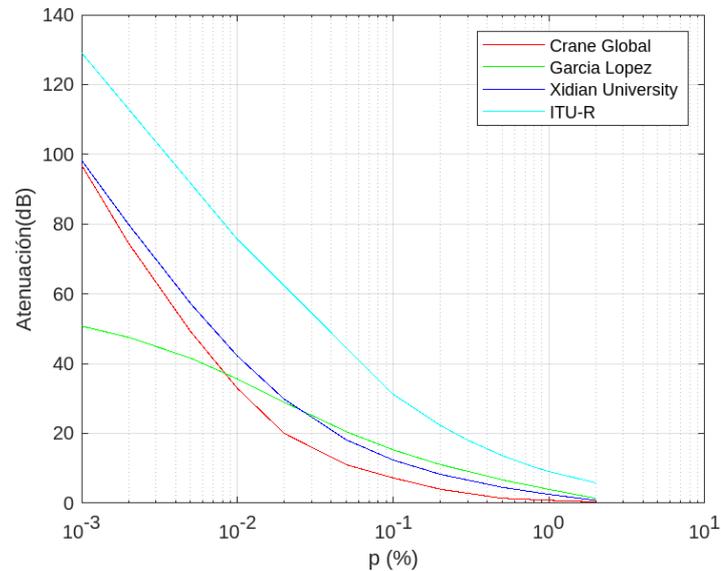


Figura 24. Atenuación en función de la probabilidad para 50 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 60°

Se observa que el modelo de García-López vuelve a ser el mejor para una disponibilidad el 99,999% pero no para el resto de las disponibilidades, ofreciendo mejores resultados el modelo de Crane Global para disponibilidades altas de 99,9% y 99,5%.

Para finalizar con este escenario se analiza la frecuencia de 60 GHz (banda Q/V) como muestra la **Figura 25**. En la misma se han obtenido prácticamente los mismos resultados que para la frecuencia de 50 GHz, pero los valores de atenuación por lluvia a compensar son mayores. Siendo el modelo de la ITU-R de nuevo el que peores resultados de atenuación ofrece para la región de Madrid con una elevación de 60°.

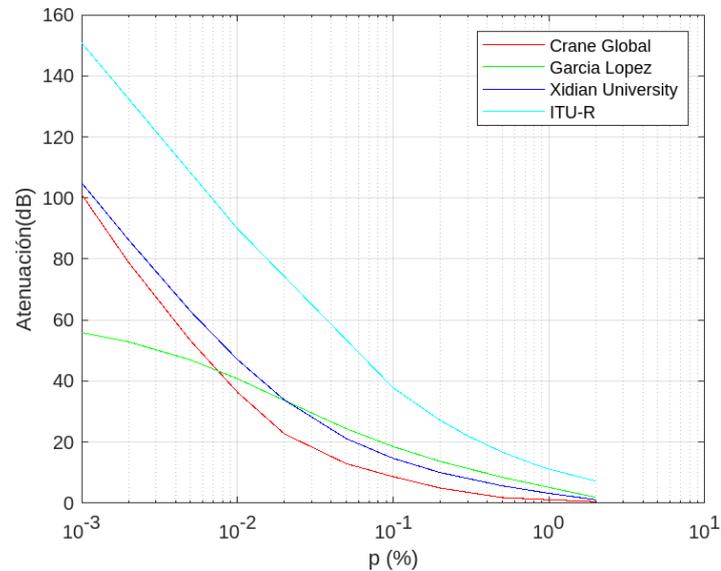


Figura 25. Atenuación en función de la probabilidad para 60 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 60°

Por lo tanto, y como se ha comentado anteriormente, resulta fundamental la región y otros parámetros como es el ángulo de elevación, la altura de la estación terrena, entre otros. Se puede comprobar en estas simulaciones que el modelo de la ITU-R utilizado como referencia, ofrece peores resultados que los otros modelos comparados ya que algunos de los otros son modificaciones de este o están diseñados para aportar mejores resultados en unas zonas que en otras.

5.6. Escenario 4

En este escenario se muestra la representación de mapas en la herramienta MATLAB para la simulación del modelo ITU-R en los que se incluye la región de Madrid. Con estos mapas, se pueden observar los dB de atenuación por lluvia que serían necesarios compensar en el balance de enlace para garantizar diferentes disponibilidades.

A continuación, se realizan las simulaciones con los parámetros de la **Tabla 14**, siendo una frecuencia y un ángulo de elevación constantes.

Tabla 14. Parámetros de simulación escenario 4

Ciudad	Madrid
Frecuencia (GHz)	35
Ángulo de elevación (grados)	45
Latitud (grados)	40.4165
Longitud (grados)	-3.70256
Ángulo de inclinación de la polarización con respecto a al horizontal (grados)	45

Al realizar las simulaciones para una disponibilidad de 99,999%, se obtiene lo mostrado a la **Figura 26**.

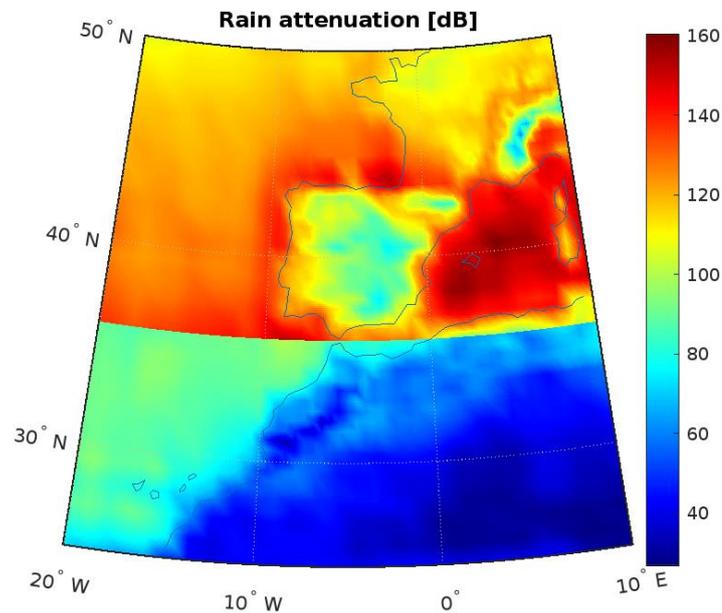


Figura 26. Atenuación por lluvia para una disponibilidad del 99,999%

Como se puede observar, para la región de Madrid se tiene aproximadamente entre unos 80-100 dB de atenuación por lluvia a compensar para garantizar una disponibilidad del 99,999%.

En el caso de la **Figura 27** que se hace para una disponibilidad de 99,99%, se aprecia como disminuye la atenuación por lluvia, siendo esta entre un 45-60 dB.

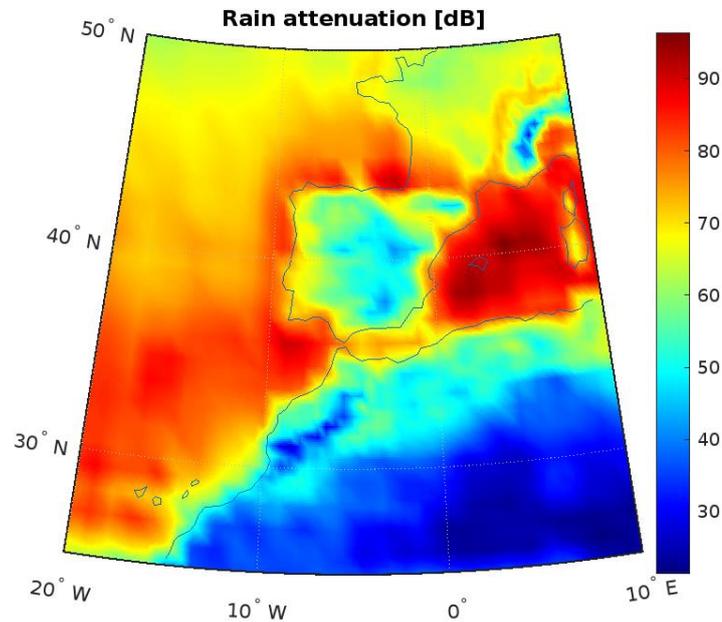


Figura 27. Atenuación por lluvia para una disponibilidad del 99,99%

Otro de los mapas que se ha obtenido en la simulación, es la atenuación por lluvia para una disponibilidad del 99,90% como se observa en la **Figura 28**. Para esta disponibilidad, la atenuación por lluvia en dB a compensar disminuye considerablemente, estando aproximadamente entre 15-25 dB.

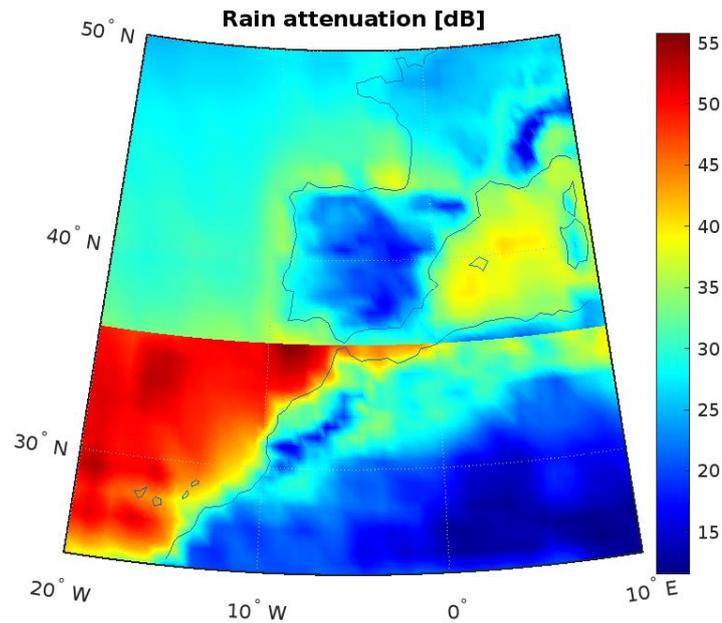


Figura 28. Atenuación por lluvia para una disponibilidad del 99,90%

En el siguiente mapa correspondiente a la **Figura 29**, se muestra para la región de Madrid una disponibilidad del 99,50% que es la que por defecto se dan en las redes de datos o IoT. Esta atenuación resulta ser más fácil de compensar en los balances de enlace por tener un valor aproximado de 8-10 dB.

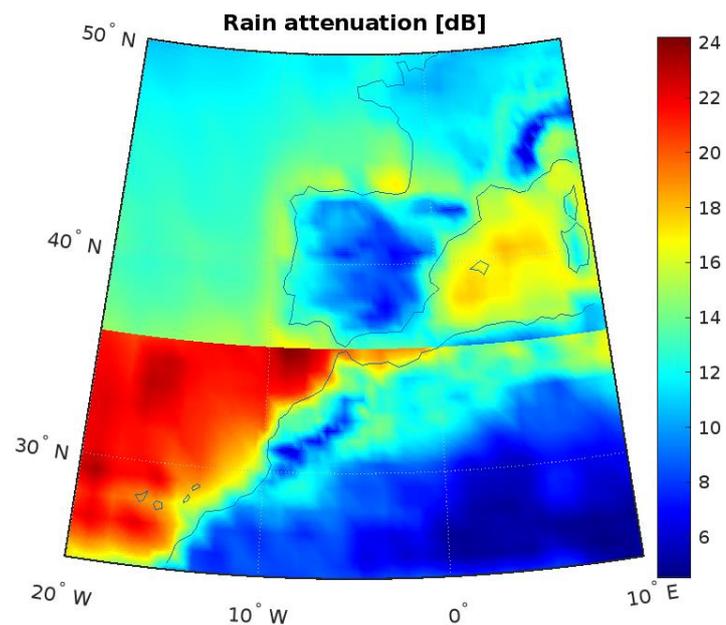


Figura 29. Atenuación por lluvia para una disponibilidad del 99,50%

Por último, se obtiene el mapa para una disponibilidad del 99%. Para esta, los valores son bastante más bajos; de entre 4-6 dB.

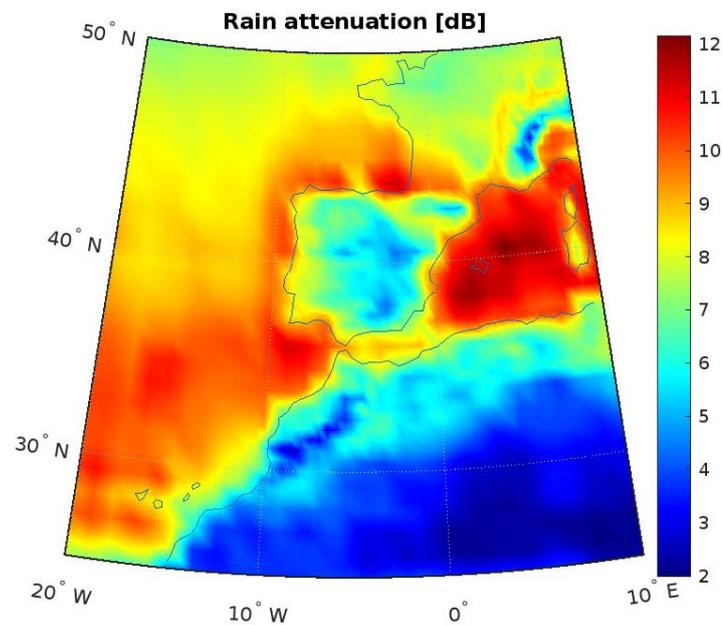


Figura 30. Atenuación por lluvia para una disponibilidad del 99%

Como se ha comentado, dependiendo del servicio que se quiera ofrecer es necesario adaptar los diferentes parámetros de entrada para conseguir una atenuación por lluvia capaz de compensarse en los balances de enlace. A medida que se quiere garantizar una disponibilidad menor, la atenuación es también inferior.

6. Conclusiones y trabajos futuros

En este Trabajo, se ha llevado a cabo un análisis comparativo de diferentes modelos de atenuación por precipitaciones para enlaces terrestres, espaciales y tierra-espacio. Esto es importante dado que como se ha podido analizar, la lluvia es el factor climatológico que más afecta a los enlaces de comunicaciones por satélite. Por ello, es importante considerar la atenuación por lluvia en el diseño para no comprometer la calidad de servicio y poder cumplir con la disponibilidad. Ya que en caso de no tenerla en cuenta puede producir pérdidas completas de señal y largos periodos de indisponibilidad del enlace.

Con base en los resultados del Capítulo 5, se confirma lo defendido por investigadores y académicos en las bases teóricas previas al presente Trabajo puesto que se concluye que existe una dependencia de las precipitaciones y la frecuencia de transmisión. En otras palabras, es cierto que, conforme a los resultados obtenidos, las precipitaciones afectan directamente a la calidad de las comunicaciones por satélite. Sin embargo, esta certeza debe ser analizada con cuidado porque al realizar este Trabajo se ha observado que un aspecto a tener en gran consideración a la hora de hacer estos estudios es la región que se desee analizar debido a que cada uno de los modelos actualmente disponibles actúa de manera diferente dependiendo de la zona o región analizada.

En cuanto a las diferencias observadas respecto al modelo de la ITU-R utilizado como el de referencia, son debidas a que cada uno de ellos modela de diferente manera la información proporcionada y utiliza diferentes parámetros para este cálculo. Cabe destacar, que este modelo de la ITU-R es el modelo estandarizado y utilizado en la mayoría de los cálculos de estimación de la atenuación por lluvia para los enlaces de comunicación.

De acuerdo con los datos obtenidos, se puede concluir, además, que a altas frecuencias y para poder compensar estas atenuaciones por lluvia, las disponibilidades deben estar en el orden de 99,9% a 99%. En concordancia con la información obtenida, se pueden deducir los efectos de atenuación por lluvia y dar alternativas para mejorar el rendimiento de los enlaces ante estos fenómenos meteorológicos.

Con todo lo anterior, no se quiere perder la oportunidad de proponer futuras líneas de estudio para trabajos futuros. Algunas de estas son:

- El estudio de los modelos de atenuación por lluvia analizados en este trabajo para otras regiones y así poder ver su comportamiento para deducir cual es el más adecuado para otros lugares con climas diferentes.
- Esta comparación se realizó con el objetivo de conseguir en trabajos futuros decidir dónde colocar los *gateways* en tierra a partir de una disponibilidad para la región a considerar.
- Extender el estudio a satélites de órbita baja (LEO) incluyendo en el código de MATLAB lo necesario para que encuentre el satélite correspondiente cada vez que este se mueva ya que no se quedan fijos en un punto.
- Utilización de alguna de las técnicas de *machine learning* que no son tan utilizadas (como LSTM o EPANN) con el fin de compararla tanto con el modelo de la ITU-R como con los analizados en este trabajo.

7. Glosario

θ	Ángulo de elevación.
γ_R	Atenuación específica.
5G	Fifth Generation of mobile service.
$A_{0,01}$	Atenuación de rebasamiento estimada.
ACM	Adaptive Coding and Modulation.
A_e	Apertura efectiva.
ALC	Automatic Level Control.
AUPC	Automatic Uplink Power Control.
BPF	Band Pass Filter.
C/N	Carrier-to-noise ratio.
DBSG3	Databank of Study Group 3.
DEA	Enfoque de Evolución Diferencial.
DFP	Densidad de Flujo de Potencia.
DGMR	Deep Generative Model of Rain.
dSCPC	Dynamic Bandwidth Management.
E	Radio efectivo de la Tierra.
E_b/N_0	Energía por bit/ densidad espectral de potencia de ruido.
E_s/N_0	Energía de la señal por símbolo/ densidad espectral de potencia del ruido.
GEO	Geosynchronous Equatorial Orbit.
G_r	Ganancia de la antena receptora.
GSO	Geostationary Satellite Orbit.
HPA	High-Power Amplifier.
h_R	Altura de la lluvia.
H_s	Altura de la antena desde el nivel del mar.
IA	Inteligencia Artificial.
IF	Intermediate Frequency.
IoT	Internet of Things.
ISS	Estación Espacial Internacional
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union- Radiocommunication Sector.

L	Pérdidas del enlace.
L_a	Pérdidas adicionales.
L_{at}	Pérdidas de absorción atmosféricas.
L_{bf}	Pérdidas básicas de propagación en espacio libre.
L_E	Longitud de trayecto efectiva.
LEO	Low Earth Orbit.
L_G	Proyección horizontal de la longitud del trayecto oblicuo.
L_{lluv}	Pérdidas por lluvia.
LNA	Low-Noise Amplifier.
L_{pol}	Pérdidas de despolarización.
L_{punt}	Pérdidas por desapuntamiento.
L_s	Longitud del trayecto oblicuo.
LSTM	Long Short-Term Memory.
MEO	Medium Earth Orbit.
NASA	National Aeronautics and Space Administration.
NGSO	Non-Geostationary Satellite Orbit.
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte.
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente.
P_r	Potencia recibida por la antena receptora.
P_t	Potencia aplicada a la antena transmisora.
Puntos L	Puntos de Lagrange.
r_{0,01}	Factor de reducción horizontal.
R_{0,01}	Intensidad de la lluvia.
RF	Radiofrecuencia
RMS	Raíz cuadrada media.
RMSE	Error cuadrático medio.
SatCom	Sistema de comunicaciones por satélite.
S_{eq}	Superficie equivalente de la antena.
SNR	Relación señal-ruido.
SSO	Sun-Synchronous Orbit.
T-C	Two-Component.
Trabajo	Este Trabajo Final de Máster.
V_{0,01}	Factor de ajuste vertical.

VHTS

Very High Throughput Satellite.

8. Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de Gantt	5
Figura 2. Sistema de Comunicaciones por Satélite [1]	9
Figura 3. Tipos de órbitas [4]	13
Figura 4. Modelo de espacio libre	21
Figura 5. Taxonomía de modelos de atenuación por lluvia	25
Figura 6. DGRM de DeepMind [33]	29
Figura 7. Modelos para compensar la atenuación por lluvia	29
Figura 8. Criterios del análisis	32
Figura 9. Taxonomía de aprendizaje automático que pueden utilizarse en modelos de atenuación por lluvia [33].	43
Figura 10. Representación esquemática de un trayecto tierra-espacio con indicación de parámetros [51].	47
Figura 11. Atenuación en función de la probabilidad para 12,5 GHz (banda Ku) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°	56
Figura 12. Atenuación en función de la probabilidad para 25 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°	57
Figura 13. Atenuación en función de la probabilidad para 35 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°	57
Figura 14. Atenuación en función de la probabilidad para 50 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°	58
Figura 15. Atenuación en función de la probabilidad para 60 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 25°	59
Figura 16. Atenuación en función de la probabilidad para 12,5 GHz (banda Ku) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 45°	61
Figura 17. Atenuación en función de la probabilidad para 25 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 45°	62
Figura 18. Atenuación en función de la probabilidad para 35 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 45°	63
Figura 19. Atenuación en función de la probabilidad para 50 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 45°	64
Figura 20. Atenuación en función de la probabilidad para 60 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 45°	65

Figura 21. Atenuación en función de la probabilidad para 12,5 GHz (banda Ku) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 60°	67
Figura 22. Atenuación en función de la probabilidad para 25 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 60°	67
Figura 23. Atenuación en función de la probabilidad para 35 GHz (banda Ka) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 60°	68
Figura 24. Atenuación en función de la probabilidad para 50 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 60°	69
Figura 25. Atenuación en función de la probabilidad para 60 GHz (banda Q/V) en satélites GEO para un ángulo de elevación de 60°	70
Figura 26. Atenuación por lluvia para una disponibilidad del 99,999%	71
Figura 27. Atenuación por lluvia para una disponibilidad del 99,99%	72
Figura 28. Atenuación por lluvia para una disponibilidad del 99,90%	72
Figura 29. Atenuación por lluvia para una disponibilidad del 99,50%	73
Figura 30. Atenuación por lluvia para una disponibilidad del 99%	74

9. Lista de Tablas

Tabla 1. Bandas de frecuencia tradicionales	16
Tabla 2. Reglamento de la IUT para las bandas de frecuencia compartidas entre los satélites GSO y los NGSO	17
Tabla 3. Parámetros de entrada que atenúan la señal de comunicaciones.	31
Tabla 4. Análisis de modelos para enlaces terrestres o tierra-espacio	33
Tabla 5. Bandas de frecuencia para modelos de atenuación por lluvia.	35
Tabla 6. Categorización de los modelos de atenuación por lluvia en función de parámetros de entrada de enlace.	37
Tabla 7. Categorización de los modelos de atenuación por lluvia en función de parámetros de entrada de disponibilidad.	39
Tabla 8. Modelos y factores relevantes en diferentes artículos.	40
Tabla 9. Técnicas de machine learning empleadas para mejorar la predicción en los modelos de atenuación por lluvia	43
Tabla 10. Coeficientes por zona geográfica con $e=10^4$	52
Tabla 11. Parámetros de simulación escenario 1	55
Tabla 12. Parámetros de simulación escenario 2	60
Tabla 13. Parámetros de simulación escenario 3	66
Tabla 14. Parámetros de simulación escenario 4	71

10. Bibliografía

- [1] Kodheli, O.; Lagunas, E.; Maturo, N.; Sharma, S. K.; Shankar, B.; Montoya, J. F. M.; Duncan, J. C. M.; Spano, D.; Chatzinotas, S.; Kisseleff, S.; Querol, J.; Lei, L.; Vu, T. X. y Goussetis, G. (2021) "Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges" en *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, nº 1, pp. 70-109 [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9210567> [último acceso enero 2023]
- [2] Hispasat, S.A. (2022) *Centros de Control* [Online] Available: <https://www.hispasat.com/es/flota-de-satelites/centros-de-control> [último acceso enero 2023]
- [3] The European Space Agency (2020) *Types of Orbits* [Online] Available: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits [último acceso enero 2023]
- [4] Tecnologías de la comunicación (2022) *Tipos de satélite según su órbita* [Online] Available: <https://sites.google.com/site/comunicateconjavieryblanca/satelites-artificiales/tipos-de-satelite-segun-su-orbita> [último acceso enero 2023]
- [5] Baeza, V. M.; Ha, V. N.; Querol, J. y Chatzinotas, S. (2022) "Non-Coherent Massive MIMO Integration in Satellite Communication" en *27th Ka and 39th ICSSC Joint Conference 2022, Stresa Italy* [Online] Available: <https://orbilu.uni.lu/handle/10993/52126> [último acceso enero 2023]
- [6] Clarke, N. (2022) "Amazon's Project Kuiper vs Starlink: What We Know" en *Starlink Hardware* [Online] Available: <https://www.starlinkhardware.com/amazons-project-kuiper-vs-starlink-what-we-know/> [último acceso enero 2023]
- [7] V.M. Baeza, E. Lagunas, H. Al-Hraishawi and S. Chatzinotas, "An Overview of Channel Models for NGSO Satellites", 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall), London, United Kingdom, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10012693.
- [8] Stangl, M. (2021) "Q/V Band Converters... Essential for supporting next-gen broadband applications" en *SatMagazine* [Online] Available: <http://www.satmagazine.com/story.php?number=1766207841> [último acceso enero 2023]
- [9] Fiser, O.; Zikesova, A. y Kovalchuk, M. (2022) "Tests of Rain Attenuation Prediction Models for Satellite links through Long Term Data" en *32nd International Conference Radioelektronika*, pp. 1-4 [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9764907> [último acceso enero 2023]

- [10] Abdus Samad, M. D.; Debo Diba, F. y Choi, D.-Y. (2021) "A Survey of Rain Attenuation Prediction Models for Terrestrial Links—Current Research Challenges and State-of-the-Art" en *MDPI* [Online] Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1207> [último acceso enero 2023]
- [11] Lin, S. H. (1977) "11-GHz radio: Nationwide long-term rain rate statistics and empirical calculation of 11-GHz microwave rain attenuation" en *The Bell System Technical Journal*, vol. 56, no. 9, pp. 1581-1604 [online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6770885> [último acceso enero 2023]
- [12] Crane, R. (1980) "Prediction of Attenuation by Rain," en *IEEE Transactions on Communications*, vol. 28, no. 9, pp. 1717-1733 [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1094844> [último acceso enero 2023]
- [13] da Silva Mello, L. y Pontes, M. S. (2012) "Unified method for the prediction of rain attenuation in satellite and terrestrial links" en *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications* [Online] Available: <https://www.scielo.br/j/jmoea/a/jkfMKw4Qdv9FQdHgzdbc5Qm/?lang=en> [último acceso enero 2023]
- [14] Moupfouma, F. (2009) "Electromagnetic Waves Attenuation due to Rain: A Prediction Model for Terrestrial or L.O.S SHF and EHF Radio Communication Links" en *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 30, pp. 622–632 Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10762-009-9481-y> [último acceso enero 2023]
- [15] da Silva Mello, L. y Pontes, M. S. (2009) "Improved Unified Method for the Prediction of Rain Attenuation in Terrestrial and Earth Space Links" en *2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, pp. 569-573 [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5427520> [último acceso enero 2023]
- [16] Crane, R. (1982) "A two-component rain model for the prediction of attenuation statistics" en *Radio Science*, vol. 17, issue 6, pp. 1371-1387 [Online] Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/RS017i006p01371> [último acceso enero 2023]
- [17] Ghiani, R.; Luini, L. y Fantì, A. (2017) "A physically based rain attenuation model for terrestrial links" en *Radio Science*, vol. 52, issue 8, pp. 972-980 [Online] Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017RS006320> [último acceso enero 2023]
- [18] Capsoni, C.; Fedi, F. y Paraboni, A. (1987) "A comprehensive meteorologically oriented methodology for the prediction of wave propagation parameters in telecommunication applications beyond 10 GHz,"

- in *Radio Science*, vol. 22, no. 03, pp. 387-393 [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7775204> [último acceso enero 2023]
- [19] Internacional Telecommunication Union (2021) *P.530-17, «Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems* [Online] Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530/en> [último acceso enero 2023]
- [20] Singh, H.; Kumar, V.; Saxena, K.; Boncho, B. y Prasad, R. (2020) "Proposed Model for Radio Wave Attenuation due to Rain (RWAR)" en *Wireless Personal Communications*, vol. 115, pp. 791–807 [Online] Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-020-07598-3#citeas> [último acceso en enero 2023]
- [21] Panagopoulos, A. D.; Arapoglou, P.-D. M.; Kanellopoulos, J. D. y Cottis, P. G. (2005) "Long-term rain attenuation probability and site diversity gain prediction formulas" in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 7, pp. 2307-2313 [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1461558> [último acceso enero 2023]
- [22] Andrade, F. J. A.; de Medeiros, Á. A. M. y L. A. R. da Silva Mello, "Short-Term Rain Attenuation Predictor for Terrestrial Links in Tropical Area," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1325-1328 [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7762832> [último acceso enero 2023]
- [23] Chebil, J.; Zyoud, A.-H.; Hadi Habaebi, M.; Rafiqul, Islam Md. y Dao, H. (2020) "Analysis of rain fade slope for terrestrial links" en *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 18, issue 2 [Online] Available: <https://ijeecs.iaescore.com/index.php/IJECS/article/view/19794> [último acceso enero 2023].
- [24] Develi, I. (2007) "Differential evolution based prediction of rain attenuation over a LOS terrestrial link situated in the southern United Kingdom" in *Radio Science*, vol. 42, no. 03, pp. 1-6 [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7771589> [último acceso enero 2023]
- [25] Lu, C. S.; Zhao, Z. W.; Wu, Z. S.; Lin, L. K.; Thiennviboon, P. y Z. F. Lv (2018) "A New Rain Attenuation Prediction Model for the Earth-Space Links" en *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 10, pp. 5432-5442 [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8408531> [último acceso enero 2023]
- [26] Stutzman, W. L. y Dishman, W. K. (1982) "A simple model for the estimation of rain-induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths" en *Radio Science*, vol. 17, no. 06, pp. 1465-1476 [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7768109> [último acceso enero 2023]

- [27] Núñez-Torrón Stock (2021) "La inteligencia artificial de Google ya es capaz de predecir con precisión si lloverá en los próximos minutos" en *Business Insider* [Online] Available: <https://www.businessinsider.es/ia-google-ya-puede-saber-llovera-2-horas-precision-940259> [último acceso enero 2023]
- [28] Kardoudi, O. (2021) "La nueva herramienta que predice con exactitud si va a llover" en *El Confidencial* [Online] Available: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2021-09-30/hombre-del-tiempo-digital-acierta-mas-humanos_3299051/ [último acceso enero 2023]
- [29] European Union Agency for the Space Programme (2022) *Description of the fields* [Online]. Available: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/sar-information/sargalileo-satellites-information/description-of-the-fields> [último acceso enero 2023]
- [30] Satoms (2017) *Adaptive Coding Modulation (ACM)* [Online] Available: <https://satoms.com/adaptive-coding-modulation-acm/> [último acceso enero 2023]
- [31] SatExpander (2022) *SatExpander AUPC (Automatic Uplink Power)* [Online] Available: <https://www.satexpander.com/satexpander-aupc> [último acceso enero 2023]
- [32] Pimienta del Valle, D. (2019) "Contribution to the millimeter-wave propagation characterization for satellite and 5G wireless links" en *Dialnet* [Online] Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=255592> [último acceso enero 2023]
- [33] Alozie, E.; Abdulkarim, A.; Abdullahi, I.; Usman, A. D.; Faruk, N.; Olayinka, I. F. Y.; Adewole, K. S.; Oloyede, A. A.; Chiroma, H.; Sowande, O. A.; Olawoyin, L. A.; Garba, S.; Imoize, A. L.; Musa, A. ; Adediran, Y. A. and Taura, L. S. (2022) "A Review on Rain Signal Attenuation Modeling, Analysis and Validation Techniques: Advances, Challenges and Future Direction" en *MDPI*, vol. 14, issue 18. pp. 11744 [Online] Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11744> [último acceso enero 2023]
- [34] Ghiani, R.; Luini, L. y Fanti, A. (2017) "A physically based rain attenuation model for terrestrial links" en *Radio Science*, vol. 52, issue 8, pp. 972-980 [Online] Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017RS006320> [último acceso enero 2023]
- [35] Kourogorgas, C. y Panagopoulos, A. D. (2013) "New physical-mathematical model for predicting slant-path rain attenuation statistics based on inverse Gaussian distribution" en *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 7, issue 12, pp. 970-975 [Online] Available: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-map.2013.0206> [último acceso enero 2023]

- [36] Maitra, A. y Chakravarty, K. (2005) "Ku-Band Rain Attenuation Observations on an Earth-Space Path in the Indian Region in *URSI General Assembly* [Online] Available: [https://ursi.org/proceedings/procGA05/pdf/F01.4\(0650\).pdf](https://ursi.org/proceedings/procGA05/pdf/F01.4(0650).pdf) [último acceso enero 2023]
- [37] Panchal, P. y Joshi, R. (2016) "Performance Analysis and Simulation of Rain Attenuation Models at 12–40 GHz Band for an Earth Space Path over Indian Cities" en *Procedia Computer Science*, vol. 79, pp. 801-808 [Online] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916002416> [último acceso enero 2023]
- [38] Panchal, P. y Joshi, R. (2016) "Performance Analysis and Simulation of Rain Attenuation Models at 12–40 GHz Band for an Earth Space Path over Indian Cities" en *Procedia Computer Science*, vol. 79, pp. 801-808 [Online] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916002416> [último acceso enero 2023]
- [39] Omotosho, T. V.; Akinwumi, S. A.; Ometan, O. O.; Adewusi, M. O.; Mandeep, J. S. y Abdullah, M. (2017) "Earth-Space Rain Attenuation Prediction: Its Impact at Ku, Ka and V-band Over Some Equatorial Stations" en *Journal of Informatics and Mathematical Sciences*, vol. 9, issue 2, pp. 359-374 [Online] Available: <https://www.rgnpublications.com/journals/index.php/jims/article/view/738> [último acceso enero 2023]
- [40] Igwe, K. C. y Joshua, J. A. (2019) "Analysis of Rain Attenuation for Earth-Space Communication Links at Ku and Ka-Bands" en *School of Physical Sciences Biennial International Conference*, pp. 975-986 [Online] Available: <http://repository.futminna.edu.ng:8080/jspui/handle/123456789/12949> [último acceso enero 2023]
- [41] Usha, A. y Karunakar, G. (2020) "Performance Analysis Of Rain Attenuation Of An Earth Space Path" en *International Journal of Scientific & Technology Research* vol. 9, issue 4, pp. 1706-1710 [Online] Available: <https://www.ijstr.org/final-print/apr2020/Performance-Analysis-Of-Rain-Attenuation-Of-An-Earth-Space-Path.pdf> [último acceso enero 2023]
- [42] Dafda, A. H. y Maradia, K. G. (2019) "A novel method for estimation of rainfall attenuation using coarse rainfall data and proposal of modified ITU-R rain model for India" en *SN Appl. Sci.*, vol. 1, issue 379 [Online] Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-019-0356-0> [último acceso enero 2023]
- [43] Adeyemo, Z. K.; Akande, D. O. y Ojo, F. K. (2012) "Investigation of the Applicability of Garcia and ITU-R Models to Rainfall on Satellite

- Communication Link in Nigeria" en *Internacional Journal of Scientific and Engineering Reseach*, vol. 3, issue 11 [Online] Available: https://www.researchgate.net/publication/303842436_Investigation_of_the_Applicability_of_Garcia_and_ITU-R_Models_to_Rainfall_on_Satellite_Communication_Link_in_Nigeria [último acceso enero 2023]
- [44] Gaur, A. y Sharma, S. K. (2017) "Analysis of rain attenuation prediction models along earth-satellite path over Indian cities" en *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, pp. 1-6 [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8245002> [último acceso enero 2023]
- [45] Ojo, J. S.; Adedayo, K. D. y Uchegbu, A. N. (2020) "Evaluation of simulated rain-based attenuation techniques at k-v frequency bands for satellite services under different modulation techniques over Southwestern Nigeria" en *International Journal of Physical Sciences*, vol. 16, issue 1, pp. 1-15 [Online] Available: <https://academicjournals.org/journal/IJPS/article-full-text-pdf/81DB02265819> [último acceso enero 2023]
- [46] Stutzman, W. y Yon, K. M. (1986) "A simple rain attenuation model for earth-space radio links operating at 10–35 GHz" en *Radio Science*, vol. 21, pp. 65-72 [Online] Available: [último acceso enero 2023]
- [47] Internacional Telecommunication Union (2017) *P.618: Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación* [Online] Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618/es> [último acceso enero 2023]
- [48] Garcia-Lopez, J.; Hernando, J. y Selga, J. (1988) "Simple Rain Attenuation Prediction Method for Satellite Radio Links" en *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 3, pp. 444-448 [Online] Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/192129> [último acceso enero 2023]