

**Análisis y comparación de las recomendaciones de la UIT sobre la propagación de
señales milimétricas**

Juan Esteban Patiño Ramírez

Universitaria Agustiniana
Facultad de ingeniería
Programa Ingeniería en Telecomunicaciones
Bogotá DC
2020

**Análisis y comparación de las recomendaciones de la UIT sobre la propagación de
señales milimétricas**

Juan Esteban Patiño Ramírez

Director

Guillermo Fernando Valencia Plata

Trabajo de grado para optar al título en Ingeniería en Telecomunicaciones

Universitaria Agustiniana

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería en Telecomunicaciones

Bogotá DC

2020

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a mis padres que siempre en cada una de las etapas de mi vida han estado presentes enseñándome la formación y los valores necesarios que han hecho de mi una persona perseverante para poder cumplir mis metas y logros a futuro, a mis hermanos por estar siempre presentes acompañándome y por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida y en general agradezco a toda a mi familia que me brindaron la mayor motivación para poder ser la persona que soy hoy en día.

Agradecimientos

Le agradezco principalmente a Dios, por permitirme existir, por ser el inspirador y darme la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados que he soñado y a todas las personas de mi familia que siempre creyeron en mí y que me apoyaron de manera incondicional para la culminación del presente trabajo. Agradezco principalmente al director de mi trabajo de grado, el profesor Guillermo Valencia que siempre ha creído en mí y me apoyo durante todo este trabajo. Por ultimo quiero agradecer a todos los profesores de la universidad que durante el aprendizaje me enseñaron a fortalecer las habilidades para extender mis conocimientos y así aplicarlos en mi vida personal, familiar y laboral.

Resumen

En el presente capítulo se presenta un análisis de recomendaciones de la UIT relacionadas con la propagación de señales milimétricas, las cuales cobran interés debido al uso que se les va a dar en las redes de telefonía móvil de quinta generación y es por esto que los investigadores del programa Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universitaria Agustiniense realizan una investigación para validar el uso de las recomendaciones de la UIT en el territorio colombiano. Como integrante del semillero IDESTIC apoyé la investigación anteriormente mencionada, haciendo una identificación de doce recomendaciones de la UIT que están relacionadas con las ondas milimétricas, después estas recomendaciones fueron analizadas respecto a su pertinencia, cálculos involucrados y por lo tanto su nivel de complejidad. Gracias a este análisis se descartaron las recomendaciones 2001-3, 1409, 1815-1 y la 452-16, y se sugirió usar las recomendaciones 1411-5, 618-13 y 1238-10 en la validación que planean hacer.

Palabras clave: Redes, transmisión, recepción, Ondas milimétricas, banda de frecuencia, Cobertura.

Tabla de contenido

Introducción.....	11
Problema de investigación.....	12
Justificación.....	13
Objetivos	14
General.....	14
Específicos.....	14
Marco referencial.....	15
Marco teórico.....	15
Unión internacional de telecomunicaciones (UIT).....	15
Agencia Nacional del Espectro (ANE).....	16
Red 5G.....	16
Ondas milimétricas.....	17
Antecedentes investigativos.....	17
Marco Legal.....	18
Metodología.....	20
Cronograma	21
Recomendaciones de la UIT relacionadas con ondas milimétricas.....	22
Recomendación UIT-R P.1410-2	22
Recomendación UIT-R P.1410-5	23
Recomendación UIT-R P.1411-5	23
Recomendación UIT-R P.620-7	23
Recomendación UIT-R P.2001-3	24
Recomendación UIT-R P.618-13	24
Recomendación UIT-R P.1409.....	24
Recomendación UIT-R P.1238-10	24
Recomendación UIT-R P.1815-1	24

Recomendación UIT-R P.452-16	25
Recomendación UIT-R P.833-9	25
Recomendación UIT-R P.1144-10	25
Especificaciones técnicas de las recomendaciones identificadas	26
Recomendación UIT-R P.1410-5	26
Cobertura de zona.	26
Bloqueo producido por edificios.....	26
Requisitos de trazado de rayos.....	26
Modelo estadístico	28
Resultados del trazado de rayos.....	29
Reflexiones y dispersión.....	30
Modelo de dispersión en superficie rugosa.....	30
Geometría.....	30
Transmisión a través de edificios.....	31
Ampliación de la cobertura utilizando dos o más estaciones base	31
Recomendación UIT-R P.1411-5	32
Modelos de pérdidas del trayecto	32
Situaciones de LoS en el interior de cañones urbanos.....	32
Modelos para las situaciones NLoS.....	32
Parámetros por defecto para los cálculos de un emplazamiento general.....	33
Pérdidas de entrada a los edificios.....	33
Recomendación UIT-R P.620-7	33
Visión general de los modelos de propagación	33
Datos radioclimáticos	34
Límites de distancia mínima	35

Límites de distancia máxima	36
Recomendación UIT-R P.618-13	36
Atenuación debida a los gases atmosféricos.....	36
Cálculo de las estadísticas de atenuación a largo plazo debida a la lluvia, a partir de la intensidad de lluvia caída en un punto.....	37
Recomendación UIT-R P.1238-10	40
Daños de la propagación y medidas de calidad en sistemas de radio en interiores.	40
Modelos básicos de pérdidas de transmisión.	40
Modelos de sitio general	40
Modelos de sitios específicos	43
Recomendación UIT-R P.833-9	43
Trayecto terrenal con un terminal en zona boscosa.	43
Trayectos oblicuos.	45
Despolarización.	47
Recomendación UIT-R P.1144-10	48
Recomendaciones sugeridas de la UIT que deben ser validadas.....	55
Conclusiones.....	57
Referencias	58

Lista de figuras

Figura 1. Definiciones de alturas y distancias. (UIT-R, 2012).....	27
Figura 2. Dos hipótesis en las que el área cubierta es la misma pero el número de interacciones del rayo es diferente. (UIT-R, 2012)	29
Figura 3. Geometría de reflexión. (UIT-R, 2012)	31
Figura 4. Representación esquemática de un trayecto Tierra-espacio indicando los parámetros que se utilizarán para la predicción de atenuación. (UIT-R, 2017)	37
Figura 5. Trayecto radioeléctrico representativo en zona boscosa. (UIT-R, 2016)	44
Figura 6. Atenuación específica en zona boscosa. (UIT-R, 2016).....	45
Figura 7. Definición de la geometría. (UIT-R, 2016).....	46

Lista de tablas

Tabla 1. Cronograma de actividades.....	21
Tabla 2. Requisitos mínimos para la base de datos	27
Tabla 3. Distancias máximas de cálculo para el modo de propagación 2 ($d_{máx2}$).....	36
Tabla 4. Coeficientes de pérdida de potencia, N, para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores	41
Tabla 5. Tamaño y densidad medidos de las ramas y hojas de un roble en Boxtel, Países Bajos.....	46
Tabla 6. Métodos de predicción de la propagación de las ondas radioeléctricas	48
Tabla 7. Recomendaciones sugeridas para el proyecto de investigación	55

Introducción

Las redes 5G son la nueva generación de telefonía móvil, esta tecnología brindará mejor velocidad, cobertura, y capacidad de transmisión en las redes inalámbricas y se espera que esta tecnología satisfaga al internet de las cosas masivo (IOT). Para que estas redes puedan satisfacer las necesidades de muchos o varios dispositivos conectados a internet, con el fin de dar un equilibrio entre la latencia, velocidad y costo, es necesario trabajar en la banda de frecuencias de 30-300 GHz (banda de EHF, según la UIT), estas frecuencias son llamadas ondas o señales milimétricas y son utilizadas para poder obtener anchos de banda mayores debido a las frecuencias altas que se pueden utilizar en la banda anteriormente mencionada.

Por otro lado, la Agencia Nacional del Espectro (ANE) es el ente encargado de realizar la planeación, atribución, vigilancia y control del espectro radioeléctrico en Colombia, pero no cuenta con suficientes datos estadísticos que le permitan predecir el alcance de las ondas radioeléctricas en las bandas de frecuencias del orden de Giga Hertz y estas bandas serán útiles para una futura implementación de 5G en Colombia y específicamente para zonas urbanas densas (Agencia Nacional del Espectro, 2019).

Con el presente trabajo se busca colaborar al proyecto de investigación denominado “Verificación y validación de las recomendaciones de la UIT, relacionadas con la atenuación de señales milimétricas, para una futura implementación de 5G en Colombia”, este proyecto será realizado por profesores del programa de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universitaria Agustiniana.

Problema de investigación

Las redes 5G son la nueva generación de telefonía móvil, esta tecnología brindará mejor velocidad, cobertura, y capacidad de transmisión en las redes inalámbricas y se espera que esta tecnología satisfaga al internet de las cosas masivo (IOT). Para que estas redes puedan satisfacer las necesidades de muchos o varios dispositivos conectados a internet, con el fin de dar un equilibrio entre la latencia, velocidad y costo, es necesario trabajar en la banda de frecuencias de 30-300 GHz (banda de EHF, según la UIT), estas frecuencias son llamadas ondas o señales milimétricas y son utilizadas para poder obtener anchos de banda mayores debido a las frecuencias altas que se pueden utilizar en la banda anteriormente mencionada.

Por otro lado, la Agencia Nacional del Espectro (ANE) es el ente encargado de realizar la planeación, atribución, vigilancia y control del espectro radioeléctrico en Colombia, pero no cuenta con suficientes datos estadísticos que le permitan predecir el alcance de las ondas radioeléctricas en las bandas de frecuencias del orden de Giga Hertz y estas bandas serán útiles para una futura implementación de 5G en Colombia y específicamente para zonas urbanas densas (Agencia Nacional del Espectro, 2019).

Con el presente trabajo se busca colaborar al proyecto de investigación denominado “Verificación y validación de las recomendaciones de la UIT, relacionadas con la atenuación de señales milimétricas, para una futura implementación de 5G en Colombia”, este proyecto será realizado por profesores del programa de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universitaria Agustiniana.

Justificación

Con la elaboración del siguiente proyecto se busca investigar sobre las recomendaciones que la UIT establece para la propagación de las ondas o señales milimétricas. Estas recomendaciones están destinadas para evaluar cómo funcionan e interactúan las redes de telecomunicaciones. A través de este trabajo se busca colaborar y apoyar al proyecto de investigación mencionado en el problema de investigación en la búsqueda de estas recomendaciones que ofrece la UIT para la propagación de señales milimétricas, pero para ello se deben tener en cuenta que estas recomendaciones deben trabajar en bandas de frecuencias superiores a los 24Ghz para poder cumplir con lo mencionado anteriormente.

Este trabajo permitirá al autor aumentar sus conocimientos respecto a la nueva generación de redes de telefonía móvil (5G) y a las ondas milimétricas. También permitirá aplicar ciertos conocimientos adquiridos en los cursos de Análisis de señales, Medios de Transmisión, Comunicaciones Digitales y Sistemas Inalámbricos I y II que se tomaron durante la carrera, para dar un enfoque de mayor calidad, con el fin de que él autor obtenga unos mejores resultados en el desarrollo del presente trabajo para que fortalezca su formación como ingeniero y sus habilidades y actitudes para su vida personal, familiar, laboral, entre otros.

Objetivos

General

Analizar las recomendaciones de la UIT relacionadas con las ondas milimétricas para comprender los parámetros relacionados con la propagación de estas ondas.

Específicos

Identificar las recomendaciones de la UIT con respecto a las ondas milimétricas que trabajan en bandas de frecuencia superiores a 24 GHz.

Reconocer las especificaciones técnicas de cada recomendación.

Sugerir las recomendaciones encontradas de la UIT que deben ser validadas por los investigadores del programa de Ingeniería en Telecomunicaciones.

Marco referencial

Marco teórico

Unión internacional de telecomunicaciones (UIT).

La UIT ejerce un liderazgo en la gestión del espectro radioeléctrico y en la elaboración de normas aplicables a escala mundial para las IMT-2020. Sus actividades sirven de base para el desarrollo e implementación de reglamentaciones y normas internacionales destinadas a asegurar que las redes 5G sean seguras, interoperables y que funcionen sin causar interferencia perjudicial a servicios adyacentes o recibirla de los mismos.

Basándose en su experiencia de elaboración de normas para las Telecomunicaciones móviles internacionales (IMT) en 2G, 3G y 4G, la UIT está reuniendo a los principales ingenieros y expertos en tecnologías de retroceso móviles y fijas para que trabajen en las 5G y en las futuras generaciones de servicios de banda ancha móvil.

En el marco del programa IMT-2020 de la UIT, los miembros de la UIT están desarrollando las normas internacionales para lograr unas redes 5G que funcionen adecuadamente.

En la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2019 de la UIT (CMR-19), las partes interesadas de todo el mundo están trabajando para lograr un consenso sobre el espectro adicional para las IMT. La CMR-19, que tendrá lugar en Egipto del 28 de octubre al 22 de noviembre de 2019, examinará las nuevas atribuciones al servicio móvil y la identificación de frecuencias para las IMT dentro de las siguientes gamas de frecuencias: 24,25-27,5 GHz, 31,8-33,4 GHz, 37-40,5 GHz, 40,5-42,5 GHz, 42,5-43,5 GHz, 45,5-47 GHz, 47-47,2 GHz, 47,2-50,2 GHz, 50,4 GHz-52,6 GHz, 66-76 GHz y 81-86 GHz.

Los resultados de los estudios de compatibilidad entre las IMT y otras aplicaciones que funcionan en estas bandas efectuados por la UIT, junto con ejemplos de soluciones reglamentarias, se han consolidado en el informe de la Reunión Preparatoria de la Conferencia a la CMR-19.

Numerosos países han iniciado pruebas de 5G, cuyos resultados están siendo evaluados. En muchas partes del mundo se han establecido estrategias para el despliegue de 5G. Algunos reguladores ya han subastado licencias para explotar redes 5G en las bandas de frecuencias atribuidas al servicio móvil terrestre en el Reglamento de Radiocomunicaciones (RR). Se prevé que los primeros despliegues comerciales a gran escala para la 5G se produzcan poco

después de que se hayan finalizado las especificaciones de las IMT-2020 (Unión internacional de telecomunicaciones, 2019).

Agencia Nacional del Espectro (ANE).

La Agencia Nacional del Espectro es la entidad que se encarga de planear estratégicamente el uso del espectro radioeléctrico, así como su vigilancia y control en todo el territorio nacional colombiano. Realiza la planeación atribución, vigilancia y control del Espectro Radioeléctrico en Colombia, así como brindar la asesoría técnica para la gestión eficiente del mismo y fomentar su conocimiento.

La Agencia Nacional del Espectro será una entidad de referencia internacional reconocida por su excelencia en la eficiente administración del espectro radioeléctrico, aplicando las mejores prácticas para lograr sus objetivos, con un equipo de trabajo comprometido con sus principios y valores (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2019).

Red 5G.

5G representa una evolución única en redes móviles por ser la generación que propiciará una transformación a la sociedad con múltiples y nuevas aplicaciones originadas por el desarrollo y análisis de grandes cantidades de datos enmarcados en una economía digital avanzada. Las generaciones anteriores estuvieron marcadas por el desarrollo de redes y una interacción entre operadores de redes móviles y usuarios finales. En 5G, el activo principal ya no es la red, sino los datos que por ella circulan y el número de actores que intervienen aumenta considerablemente, al tener empresas que son clientes de los operadores de redes y que interactúan con los usuarios finales ofreciéndoles servicios y aplicaciones.

Adicionalmente las redes de quinta generación no conectarán sólo a las personas, sino que estaremos en una realidad en la que estarán conectados objetos y personas, que intercambiarán datos constantemente a través de la red. Probablemente, las redes 5G, estarán interconectadas con otras redes, abarcando tecnologías móviles de antiguas generaciones, redes privadas, redes de datos, así como, redes heterogéneas o HetNets. La conectividad entre dispositivos, sensores y máquinas impactará de manera transversal diferentes verticales,

como educación, salud, transporte y producción entre otros (Agencia Nacional del Espectro, 2019).

Ondas milimétricas.

Las ondas electromagnéticas denominadas ondas milimétricas (*MMW*), son ondas de frecuencia comprendida entre 30 GHz y 300 GHz (banda de *EHF*, según la *UIT*). Estas ondas son parte de las llamadas microondas (ondas en el rango de frecuencia comprendido entre 300 MHz y 300 GHz, este rango incluye las bandas de *UHF*, *SHF* y *EHF*). Las frecuencias por debajo de 50 GHz ya son explotadas de manera diversa, de aquí la necesidad de explorar nuevas bandas de frecuencia, en este caso más altas para satisfacer los requisitos y la demanda (actuales y futuros).

Hoy en día uno de los atractivos más importantes de las *MMW* es que a frecuencias tan elevadas los anchos de banda disponibles son mucho mayores, permitiendo la instalación de radioenlaces con capacidades de múltiples Gbps. Como se vio en la sección de pequeñas celdas, el *backhaul* de las redes inalámbricas móviles debe hacer frente al aumento en la capacidad necesaria para satisfacer la demanda de servicios. Las *MMW* pueden proporcionar una alternativa para enfrentar este tipo de desafíos (Esopo, 2019).

Antecedentes investigativos

La siguiente fuente de información fue escogida porque apoya al trabajo que se está realizando en cuanto a la utilización de la banda de frecuencia que trabajan las ondas milimétricas (mm) a 24, 28, 38, y 60 GHz, debido a que se han convertido recientemente en una opción importante para sistemas de comunicación de corto alcance y alta velocidad. Oladunni F. et al (2014), explica que estas bandas pueden ofrecer un rendimiento de Gb/s según lo requieran las aplicaciones multimedia orientadas al consumidor, como el vídeo sin comprimir servicios de transmisión y descarga de kioscos. Es bien sabido que las mayores pérdidas de propagación encontradas por ondas milimétricas pueden reducir drásticamente el rango (al de una habitación individual) a menos que se utilicen antenas de alta ganancia al final. Los resultados de esta investigación mostraron que el multirayecto y los efectos de reflexión mejoraron el rendimiento de los datos en 24-GHz al entorno del NLOS. Con una ganancia de antena dada de 33 dBi, el patrón de radiación fue posteriormente medido y

confirmado en 3.5, un ancho de haz tan estrecho confinó la señal de manera guía-onda a lo largo de los corredores. Las velocidades de datos se acercaron a 1,25 Gb/s (Oladunni, 2014).

Por otro lado la siguiente fuente de información aporta al proyecto en un análisis de basado en la propagación por radio de ondas cm a través de la vegetación a 24 GHz. Se realizó un conjunto de mediciones direccionales dedicadas con antenas de bocina ubicadas cerca del nivel de la calle dentro de un área densamente iluminada desde arriba. Se examinó el acimut completo para determinar el rango de elevación de +10 a +30 grados en cada una de las posiciones de medición para explorar las características direccionales del canal. El análisis detallado de los componentes espaciales de trayectos múltiples dispersos de los árboles sugiere, en promedio, la presencia de 5 componentes dispersos de árboles fuertes por ubicación con una desviación azimutal de aproximadamente 20 grados entre los componentes transmisor-receptor más fuertes y directos. Se estima una ganancia de diversidad de aproximadamente 7 dB, más 2 dB adicionales en el caso de considerar técnicas de combinación de haces múltiples. Se encontró que la atenuación del desorden de los árboles estaba en el rango de 2.6-3.8 dB / m para los primeros metros dentro del área con vegetación. Los modelos actuales del UIT-R pueden predecir esta atenuación, aunque se sugieren algunas modificaciones. La atenuación de un solo árbol se estimó en aproximadamente 20 dB. Los diferentes modelos y observaciones presentados a lo largo del documento son útiles para la simulación y la planificación de redes de radio de futuros sistemas inalámbricos que funcionan a 24 GHz en presencia de vegetación (Rodríguez, 2016).

Marco Legal

La UIT es el organismo especializado de las Naciones Unidas para las tecnologías de la información y la comunicación (las TIC). Fundada en 1865 para facilitar la conectividad internacional en redes de comunicaciones, asignan espectro de radio global y órbitas satelitales, desarrollan los estándares técnicos que aseguran que las redes y tecnologías se interconecten sin problemas, y se esfuerzan por mejorar el acceso a las TIC a las comunidades desatendidas en todo el mundo. Cada vez que un usuario realiza una llamada telefónica a través del móvil, accede a Internet o envía un correo electrónico, se beneficia del trabajo de la UIT.

Por lo tanto, debido a que la UIT se creó para el beneficio general de las naciones, ellos promueven o dan acceso sin límites a las recomendaciones para que sean consultadas por quien las necesite, lo anterior específicamente se menciona en la página de las recomendaciones de la UIT de la siguiente manera “El acceso gratuito en línea a todas las Recomendaciones e Informes actuales del UIT-R ahora se proporciona al público en general” (Unión internacional de telecomunicaciones, 2020).

Metodología

Este trabajo se realizó a partir de una búsqueda que se hace al entrar a la página de la UIT en la parte de las recomendaciones, para ello se analizaron solamente las recomendaciones que corresponden con la obtención de datos de ondas milimétricas como lo dice la investigación cuantitativa, ya que este trabajo se realizó en un orden específico tal como lo dice cada proceso de esta metodología en donde se recolectaron los datos debido a que en esta metodología no se pueden eludir pasos, es decir las características encontradas de cada recomendación son para sacar de cada una su idea principal para asimismo comparar cada recomendación encontrada con el fin de poder aportar al proyecto de investigación denominado “Verificación y validación de las recomendaciones de la UIT, relacionadas con la atenuación de señales milimétricas, para una futura implementación de 5G en Colombia”, este proyecto será realizado por profesores del programa de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universitaria Agustiniense. En base a esto se escogió este enfoque cuantitativo para que después se pudieran analizar estas recomendaciones que corresponden a las ondas milimétricas y así elaborar una comparación de datos y resultados para dar un apoyo al proyecto de investigación anteriormente mencionado (Sampieri, 2014).

Cronograma

Tabla 1.

Cronograma de actividades

Semana Actividad	Mes1				Mes2				Mes3				Mes4			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1. Encontrar las recomendaciones de la UIT que hablen sobre las ondas milimétricas.	X	X	X	X												
2. Averiguar cómo estas recomendaciones trabajan en bandas de frecuencia superiores a 24 GHz.			X	X	X											
3. Escribir la idea principal de cada recomendación.					X	X	X	X	X							
4. Realizar las especificaciones técnicas de cada recomendación.									X	X	X	X	X	X		
5. Comparar y analizar las recomendaciones encontradas.											X	X	X	X	X	X

Nota. Autoría propia.

Recomendaciones de la UIT relacionadas con ondas milimétricas

Se realizó el proceso de búsqueda de las recomendaciones en la página de la UIT entre las cuales se evidenció que la UIT organiza las recomendaciones por series, las series que manejan son las siguientes:

BO (Distribución por satélite).

BR (Registro para producción, archivo, y reproducción; películas en televisión).

S (Servicio de radiodifusión (sonora)).

BT (Servicio de radiodifusión (televisión)).

F (Servicio fijo).

M (Servicios móviles, de radio determinación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos).

P (Propagación de las ondas radioeléctricas).

RA (Radioastronomía).

RS (Sistemas de detección a distancia).

S (Servicio fijo por satélite).

SA (Aplicaciones espaciales y meteorología).

SF (Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo).

SM (Gestión del espectro).

SNG (Periodismo electrónico por satélite).

TF (Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias).

V (Vocabulario y cuestiones afines).

Se evidenció que para el trabajo de investigación que se está realizando se deben escoger solamente las recomendaciones que tengan que ver con las ondas milimétricas que es la serie “P”, por lo tanto fue la que se investigó. A continuación, se listan las recomendaciones encontradas que trabajan en una banda de frecuencias igual o superior a 24GHz.

Recomendación UIT-R P.1410-2

Habla de los datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha en ondas milimétricas que funcionan en una gama de frecuencias de 20-50 GHz aproximadamente (UIT-R, 2003).

Recomendación UIT-R P.1410-5

Maneja los datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 GHz aproximadamente (UIT-R, 2012).

Recomendación UIT-R P.1411-5

La presente recomendación proporciona directrices sobre la propagación de corto alcance en exteriores en la gama de frecuencias comprendida entre 300 MHz y 100 GHz. Facilita además información sobre modelos de pérdida de trayecto para entornos con visibilidad directa (LoS) y sin visibilidad directa (NLoS), pérdidas de entrada en edificios, modelos multitrayecto para la propagación entre calles y por encima de los tejados, número de componentes de la señal, así como características de polarización y de desvanecimiento (UIT-R, 2009).

Recomendación UIT-R P.620-7

En esta Recomendación se incluye un método de predicción para determinar la zona de coordinación alrededor de una estación terrena en las bandas de frecuencias entre 100 MHz y 105 GHz. Se facilitan métodos de predicción para calcular la zona de coordinación durante periodos tanto de atmósfera despejada como de dispersión por hidrometeoros (por ejemplo dispersión por la lluvia) (UIT-R, 2017).

La zona de coordinación representa la zona fuera de la cual se puede considerar despreciable la interferencia entre la estación terrena y las estaciones terrenales (o entre estaciones terrenales que funcionan bidireccionalmente) que funcionan en el marco de las hipótesis prudenciales indicadas en otro lugar. En el resto de la presente Recomendación, la expresión estaciones terrenales puede significar también estaciones terrenales que funcionan bidireccionalmente. La determinación de la distancia de coordinación exige, por tanto, que se compare la pérdida de transmisión requerida (pérdida de transmisión básica mínima permisible, $L_b(p)$ (dB), no superada durante un porcentaje de tiempo anual, p), basada en las consideraciones relativas al sistema y al modelo de interferencia, con la pérdida de transmisión producida por el medio de propagación. La distancia de coordinación requerida es aquella en que estas dos pérdidas llegan a ser iguales.

Recomendación UIT-R P.2001-3

Esta Recomendación contiene un modelo de propósito general de amplio alcance para la propagación terrestre que predice las pérdidas básicas de transmisión debidas tanto a las mejoras de la señal como al desvanecimiento en la gama del 0% al 100% de un año promedio. Esto hace que el modelo sea particularmente adecuado para los métodos de Monte Carlo y los estudios en los que es conveniente utilizar el mismo modelo de propagación, sin discontinuidades en su salida, para señales que pueden ser deseadas o potencialmente interferentes. El modelo abarca la gama de frecuencias de 30 MHz a 50 GHz, y distancias de 3 km a por lo menos 1 000 km (UIT-R, 2019).

Recomendación UIT-R P.618-13

Esta recomendación habla sobre parámetros de propagación necesarios en la planificación de sistemas Tierra-espacio que funcionan en el sentido Tierra-espacio o espacio-Tierra. De esta recomendación lo que nos interesa es el cálculo de las estadísticas de atenuación a largo plazo debido a la lluvia, a partir de la intensidad de lluvia caída en un punto. Este método proporciona estimaciones a largo plazo de las estadísticas que facilitan la atenuación debida a la lluvia sobre trayectos oblicuos en un determinado punto para frecuencias de hasta 55 GHz (UIT-R, 2017).

Recomendación UIT-R P.1409

Esta recomendación maneja los datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas que utilizan estaciones en plataforma a gran altitud a unos a unos 47 GHz (UIT-R, 1999).

Recomendación UIT-R P.1238-10

Esta recomendación habla sobre los datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicación en interiores y redes de área local de radio en el rango de frecuencia de 300 MHz a 450 GHz (UIT-R, 2019).

Recomendación UIT-R P.1815-1

El método que se describe en esta recomendación permite predecir las estadísticas conjuntas de atenuación diferencial entre un satélite y dos puntos situados en la superficie de la Tierra, y es válido para frecuencias de hasta 55 GHz, ángulos de elevación por encima de unos 10°, y distancias entre los emplazamientos entre 0 y, por lo menos, 250 km (UIT-R, 2009).

Recomendación UIT-R P.452-16

En esta Recomendación se describe un método de predicción para evaluar la interferencia entre estaciones situadas en la superficie de la Tierra a frecuencias desde unos 0,1 GHz a 50 GHz, teniendo en cuenta los mecanismos de interferencia por dispersión debida a los hidrometeoros y en cielo despejado (UIT-R, 2015).

Recomendación UIT-R P.833-9

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT, considerando que la atenuación debida a la vegetación puede ser importante en diversas aplicaciones prácticas, recomienda que se utilice el contenido del Anexo 1 para evaluar la atenuación debida a la vegetación con diversos modelos para la gama de frecuencias comprendidas entre 30 MHz y 100 GHz (UIT-R, 2016).

Recomendación UIT-R P.1144-10

Esta Recomendación proporciona una guía de las Recomendaciones de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones, que contienen métodos de predicción de la propagación. En ella se aconseja a los usuarios sobre los métodos más adecuados para aplicaciones concretas, así como los límites, la información de entrada necesaria y la salida de cada uno de estos métodos (UIT-R, 2019).

Para finalizar el desarrollo de este objetivo, es importante mencionar que las siguientes 5 recomendaciones no se tomaran en cuenta en el desarrollo del segundo objetivo:

Recomendación UIT-R P.1410-2.

Recomendación UIT-R P.2001-3.

Recomendación UIT-R P.1409.

Recomendación UIT-R P.1815-1.

Recomendación UIT-R P.452-16.

Después de hacer una lectura más detallada de estas recomendaciones se observó que la recomendación 1410-2, es prácticamente la misma recomendación 1410-5, debido a que esta última es una versión más reciente. Por otro lado las recomendaciones 2001-3, 1409, 1815-1 y la 452-16, se observó que no tienen nada relacionado con las ondas milimétricas y tampoco suministran información para poder hacer un análisis para comprender los parámetros de la propagación de estas ondas.

Especificaciones técnicas de las recomendaciones identificadas

A continuación, se puede evidenciar como se realizó el debido análisis de las recomendaciones en sus respectivos documentos de información, con el fin de mostrar las especificaciones más importantes de cada recomendación encontrada sobre las ondas milimétricas.

Recomendación UIT-R P.1410-5

La siguiente recomendación se especifica sobre el acceso inalámbrico de banda ancha, el cual es un método importante a la hora de brindar el servicio a las empresas y hogares por la gama de frecuencias de 3 a 60 GHz, dando cobertura con línea de vista directa (LoS) y también sin mecanismos de propagación sin LoS. Es por eso que la anterior recomendación se estableció para diseñar sistemas terrenales de acceso radioeléctrico que trabajan en la gama de frecuencias mencionada anteriormente.

Cobertura de zona.

Podemos notar que cuando se planifica un sistema celular, el operador debe elegir la ubicación de la estación base y su altura de forma cuidadosa con respecto al suelo para poder brindar un servicio deseado dentro de la zona. El tamaño de la red celular puede variar en función de la topografía y del número de usuarios para el cual se ofrece un servicio de radiocomunicaciones.

Bloqueo producido por edificios.

Ahora bien, sabiendo la planificación del sistema celular, es necesario estimar la probabilidad de bloqueo producido por edificios y la mejor manera es la utilización de técnicas de trazado de rayos con datos reales extraídos de bases de datos exhaustivas sobre los edificios y el terreno. A continuación, se describen los requisitos para la técnica mencionada anteriormente.

Requisitos de trazado de rayos.

Para esta técnica se puede hacer una predicción mediante el trazado de rayos en las zonas que disponen de una base de datos sobre la cobertura del terreno, porque al ser tan elevado el valor de la frecuencia y el corto alcance en las longitudes de los trayectos, se puede realizar aproximaciones ópticas en línea recta.

En este tipo de técnicas se puede hacer una aproximación de primer orden con el objetivo de poder estimar la cobertura, pero es necesario la determinación óptica en línea recta, es a

lo que llamamos (LoS, *line-of-sight*), esta aproximación óptica se puede establecer no menos del 60% de la apertura de la primera zona de Fresnel para asegurar pérdidas adicionales despreciables. En la Figura 1, se puede observar las mediciones de las características de la señal al ser comparadas con los modelos de trazado de rayos, debido a que han mostrado un buen ajuste a los valores estadísticos, pero las mediciones han demostrado una variabilidad importante de la señal con la posición y con el tiempo en trayectos donde no hay una clara LoS. Por lo tanto, debido a la precisión limitada de las bases de datos reales de los edificios, no será posible efectuar predicciones sobre la calidad del servicio para trayectos específicos con LoS.

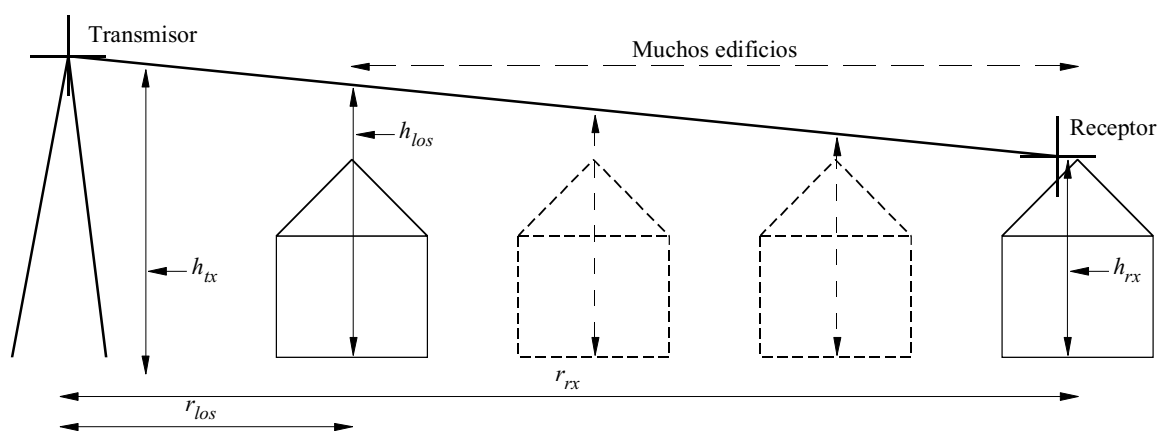


Figura 1. Definiciones de alturas y distancias UIT-R (2012).

Por otro lado, en esta recomendación hablan de que la vegetación es un factor el cual afecta la degradación del servicio en especial los árboles que son de una gran altura y lo ideal es que se incluyan dentro de la base de datos. Los requisitos mínimos para la base de datos se muestran a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2.

Requisitos mínimos para la base de datos

Objeto	Formato	Definición horizontal (m)	Definición vertical (m)
Terreno	Cuadrícula de alturas puntuales	50	1
Edificios	Orientado al objeto o imágenes por puntos de alta definición	1	1
Vegetación			

Nota. Unión Internacional de Telecomunicaciones (2012).

Ahora bien, ya sabiendo lo que es y cómo es la utilización de la técnica de trazados de rayos con sus respectivas bases de datos es necesario decir que, en muchas zonas de bloques por edificios no se disponen de bases de datos adecuadas, para ello se recomienda el modelo estadístico esbozado que se describe a continuación.

Modelo estadístico.

En este modelo para el trayecto de propagación del rayo, se debe emplear una determinada posición del transmisor (Tx) y del receptor (Rx), debido a que hay probabilidad de que exista una combinación entre el Tx y el Rx en la LoS del rayo y el trayecto de propagación este por debajo de la altura del rayo que une al transmisor y al receptor en el punto en el que el rayo cruza por el edificio. En este modelo se parte de la hipótesis de que el terreno es llano o tiene una pendiente uniforme en la zona de interés.

La altura del rayo en el punto de obstrucción, h_{los} , viene dada por:

$$h_{los} = h_{tx} - \frac{r_{los}(h_{tx} - h_{rx})}{r_{rx}} \quad (1)$$

siendo:

h_{tx} : altura del transmisor con respecto al suelo

h_{rx} : altura del receptor a la distancia, r_{rx}

r_{los} : distancia entre el transmisor y el obstáculo.

Si se parte de que, por término medio, los edificios están espaciados de forma uniforme, puede calcularse el número de edificios que hay entre dos puntos. La probabilidad de que exista un rayo con LoS es:

$$P(LoS) = \prod_{b=1}^{b_r} P(\text{altura}_{edificio} < h_{los}) \quad (2)$$

siendo b_r el número de edificios por los que pasa el rayo.

Para este modelo sencillo, se requieren tres parámetros:

- α : relación entre la superficie de tierra cubierta por edificios y la superficie total (adimensional);
- β : número medio de edificios por unidad de superficie (edificios/km²);
- γ : variable que determina la distribución de la altura de los edificios.

Para la distribución de Rayleigh propuesta, la variable γ es igual a la altura más probable de los edificios. El motivo de la distinción entre α y β se ilustra en la Figura 2. Tanto la Figura 2a como la Figura 2b, tienen la misma superficie de tierra cubierta y, por consiguiente, el mismo valor de α , pero se prevén más interacciones de rayos en la Figura 2a que en la Figura 2b. El parámetro α por sí solo no diferencia a los dos diagramas que se muestran en la Figura 2. Si los edificios tienen una altura similar en los dos diagramas de la figura 2, la probabilidad de despejar un mayor número de edificios pequeños será significativamente menor que si sólo hay un gran edificio.

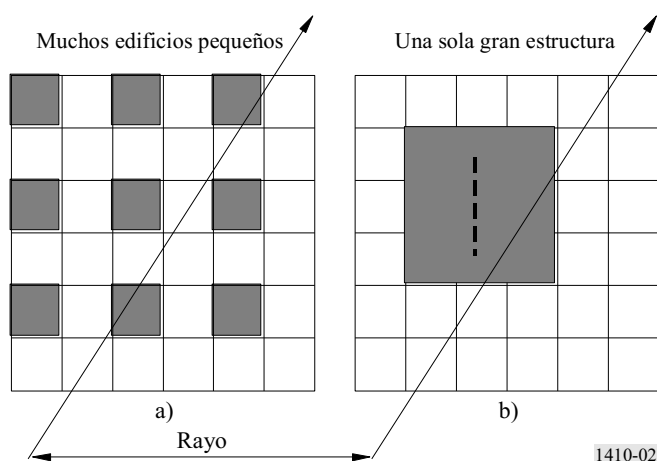


Figura 2. Dos hipótesis en las que el área cubierta es la misma pero el número de interacciones del rayo es diferente UIT-R (2012).

Para emplazamientos que van de las zonas de edificaciones bajas a las de rascacielos, el valor de α irá de 0,1 a 0,8 y el de β de 750 a 100 respectivamente.

La distribución de probabilidad de Rayleigh, $P(h)$, de la altura, h , define el parámetro γ :

$$P(h) = \frac{e^{-\frac{h^2}{2\gamma^2}} h}{\gamma^2} \quad (3)$$

Resultados del trazado de rayos.

Las simulaciones de trazado de rayos han mostrado que el problema del multitrayecto parece ser leve en las condiciones en las que el sistema deberá funcionar. La pequeñísima anchura del haz de la antena receptora provoca una fuerte atenuación de la mayoría de las señales de multitrayecto. Únicamente los rayos rasantes muy superficiales procedentes de los tejados cercanos y del suelo llegan al receptor con una magnitud apreciable. Consecuencia

de ello es que los valores de dispersión de los tiempos de propagación que se dan en las simulaciones son muy bajos.

Los ejemplos de cálculos por trazado de rayos de la dispersión de los tiempos de propagación en los emplazamientos del receptor, realizados a partir de una amplia base de datos (de Oxford, en el Reino Unido) muestran valores extremadamente pequeños, debido a los ínfimos niveles de multitrayecto. El valor eficaz de la dispersión de los tiempos de propagación estaba en torno a 0,01 ns, lo que corresponde aproximadamente a una anchura de banda de coherencia de 15 GHz. Ello no debería causar problemas a un sistema de acceso radioeléctrico de banda ancha. Es improbable que el verdadero valor eficaz de la dispersión de los tiempos de propagación tenga un valor tan bajo como éste en la realidad, debido a los rayos difractados mencionados más arriba, pero tomar una anchura de banda de coherencia de hasta 5 GHz puede todavía considerarse realista. La desviación típica del valor eficaz de la dispersión de los tiempos de propagación está en torno a 0,01 ns (UIT-R, 2003).

Reflexiones y dispersión.

Para las reflexiones en edificios que son cercanos se puede suponer el mecanismo de propagación dominante, es decir sin LoS; sin embargo, se ha investigado sobre los métodos que hay en bases de datos sobre el cálculo de estas reflexiones, ya que al considerar reflexiones y difracciones múltiples se puede poner difícil estos mecanismos de propagación. Por esta razón, se recomienda un modelo de rebote único con cada trayecto al reflector y desde el mismo sujeto a sus propias pérdidas por difracción vertical y horizontal.

Modelo de dispersión en superficie rugosa.

Se sugiere que se utilice el modelo simple aquí proporcionado con objeto de minimizar la tara de cálculo. Dicho modelo es de tipo escalar para la dispersión incoherente producida por una superficie rugosa. Es decir, únicamente considera potencia de dispersión e ignora los efectos de fase y polarización.

Geometría.

En el siguiente ejemplo se puede apreciar la geometría de dispersión.

Considérese el lado F de una superficie rugosa de área A , siendo T y R el transmisor y el receptor respectivamente. \vec{l} y \vec{m} son vectores unitarios en las direcciones TF y FR , y n es la normal al citado lado y se puede apreciar en la Figura 3

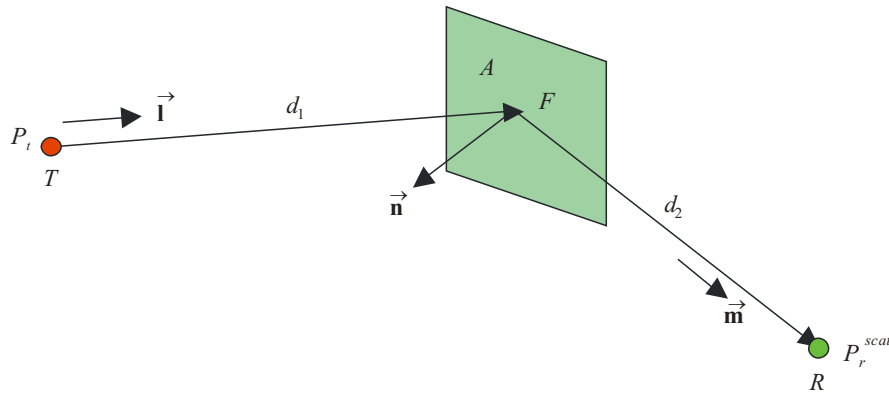


Figura 3. Geometría de reflexión UIT-R (2012).

P_t y P_r^{scat} son las potencias de dispersión transmitidas y recibidas respectivamente, y sin pérdida de generalidad, se suponen antenas omnidireccionales en T y R (UIT-R, 2012).

Transmisión a través de edificios.

En la recomendación UIT-R P.1411, muestra que las mediciones de las señales ingresadas a través de edificios en la gama de frecuencias más baja podrían convertirse en un mecanismo de propagación significativo cuando las pérdidas de difracción en un edificio son en torno o incrementadas, es decir pérdidas adicionales entre 20 a 40 dB. De igual manera los coeficientes de atenuación de reflexión, son pérdidas que están en relación con los materiales de construcción, así como con las frecuencias radioeléctricas y la estructura interna de los edificios. Las pérdidas podrían modelarse como una serie de pérdidas en los muros o bien como pérdidas por metro a través del edificio. Si más de un edificio bloquea el trayecto directo, podría ser mejor ignorar este mecanismo puesto que si no deberían tenerse en cuenta asimismo combinaciones de trayectos difractados, reflejados y a través de edificios.

Ampliación de la cobertura utilizando dos o más estaciones base.

Para un modelo de red celular o topología se puede ampliar su cobertura siempre y cuando esta red permita a los receptores elegir entre varias estaciones base. Por ejemplo para el caso de unas antenas transmisoras de 30 m de altura la cobertura de una red celular fue de 2 km, lo cual generó que pasara de una estación base del 44% al 80% con dos estaciones base y a un 90% con cuatro estaciones base. Asumiendo que las probabilidades de trayectos LoS hasta las distintas estaciones de base de interés son estadísticamente independientes, puede calcularse la probabilidad de que exista al menos un trayecto. En primer lugar, debe calcularse cada $P_{LoS,i}$ a partir de la ecuación que se muestra a continuación:

$$P_{LoS,i} = 1 - \prod_{K=1}^m (1 - P_{LoS,i,k}) \quad (4)$$

En esta ecuación se puede ver al menos un trayecto visible cuando hay m posibles estaciones de base.

Recomendación UIT-R P.1411-5

Para la propagación por trayectos de longitud inferiores a 1 km, se ve afectada especialmente por construcciones o los árboles, incluso más que por los cambios en las elevaciones del terreno. La mayoría de los enlaces radioeléctricos de un corto trayecto se dan en los sectores urbanos y suburbanos, así que lo más posible es que el móvil este ubicado en un vehículo o en manos de una persona.

Modelos de pérdidas del trayecto.

En este modelo para los sectores urbanos se puede aplicar algunos algoritmos de tipo cerrado. En estos modelos de propagación se utilizan cálculos específicos, ya sean para los generales o de emplazamiento, para el tipo de modelo depende de la gama de frecuencias, por otro lado se debe aplicar modelos distintos para la propagación de ondas decimétricas y milimétricas. Para este trabajo solo se trabajó para la propagación de las ondas milimétricas en las que estas ondas solo se considera la LoS.

Situaciones de LoS en el interior de cañones urbanos.

En la propagación de ondas milimétricas, las frecuencias superiores a unos 10 GHz, la distancia al punto de inflexión es mayor al radio máximo de la zona de cobertura radioeléctrica. Según esta recomendación, lo anterior no debe esperar a una ley cuarta de potencias en esta banda de frecuencia, porque así la tasa de disminución de la potencia con la distancia estaría muy relacionada con la regla de las pérdidas en el espacio libre, con un exponente de pérdidas del trayecto aproximadamente de 2,2.

Modelos para las situaciones NLoS.

Las situaciones para este caso son que la cobertura de la señal en ondas milimétricas son consideradas únicamente para la LoS, precisamente por las altas pérdidas de difracción que se producen cuando hay obstáculos, ya que estos hacen que el trayecto de propagación se convierta a NLoS. Para las situaciones NLoS, las reflexiones multitrayecto y la dispersión serán el método más probable de propagación de la señal.

Parámetros por defecto para los cálculos de un emplazamiento general.

En esta recomendación describen los parámetros por defecto de la siguiente manera:

Si no se conocen los datos sobre la estructura de los edificios y las avenidas (situaciones de emplazamiento general), se recomiendan los valores por defecto siguientes:

$$h_r = 3 \times (\text{número de pisos}) + \text{altura de la azotea (m)} \quad (5)$$

altura de la azotea = 3 m para tejados con inclinación

= 0 m para azoteas planas

$$w = \frac{b}{2} \quad b = 20 \text{ a } 50 \text{ m} \quad \phi = 90^\circ \quad (6)$$

(UIT-R, 2009).

Pérdidas de entrada a los edificios.

Son las pérdidas debido a la existencia de un muro en un edificio (incluidas las ventanas y demás elementos). Estas pérdidas son definidas por la diferencia entre la señal en el interior y exterior del edificio a una misma altura, también es necesario tener en cuenta el ángulo de incidencia. La UIT lo explica en la presente recomendación de la siguiente manera “Cuando la longitud del trayecto es inferior a unos 10 m, debe tenerse en cuenta la diferencia en las pérdidas en el espacio libre debidas al cambio de la longitud del trayecto para las dos mediciones, al determinar las pérdidas de entrada en el edificio. Para los emplazamientos de antena próximos al muro, también puede ser necesario considerar los efectos del campo cercano” (UIT-R, 2009).

Recomendación UIT-R P.620-7

En la siguiente recomendación, la UIT suministra datos de propagación para el debido cálculo en la zona de coordinación, y también proporciona un método directo para los factores de propagación que influyen en la determinación de las distancias de coordinación.

Visión general de los modelos de propagación.

Los fenómenos de propagación se clasifican en dos modos:

Modo 1: Fenómenos de propagación en el cielo despejado.

Modo 2: Dispersión producida por hidrometeoros.

En el caso del modo de propagación 1, la determinación de las distancias de coordinación se ha dividido en tres partes para la gama de frecuencias posibles que se pueden aplicar:

Frecuencias de ondas métricas/decimétricas entre 100 MHz y 790 MHz, el modelo se basa en un ajuste empírico a los datos medidos.

Frecuencias de 790 MHz a 60 GHz, se utiliza un modelo de propagación que tiene en cuenta la dispersión troposférica, la propagación por conductos y la reflexión/refracción en capas.

Frecuencias de 60 GHz a 105 GHz, se utiliza un modelo milimétrico, basado en la pérdida en el espacio libre y una estimación conservadora de la absorción gaseosa, más un margen de tolerancia para mejoras de la señal en porcentajes de tiempo reducidos.

Para el presente trabajo de investigación, se utilizan las frecuencias comprendidas entre 790MHz-60GHz y 60GHz-105GHz, también se tiene cuenta los parámetros de entrada de cada uno de los mecanismos ya que son diferentes por lo general.

En el modo de propagación 2, para poder determinar las distancias de coordinación se modela la dispersión isotrópica procedente de hidrometeoros situados en el volumen común formado por los haces principales de las estaciones potencialmente interferidoras. A efectos de la coordinación de frecuencias se puede ignorar la interferencia causada por la dispersión producida por hidrometeoros a frecuencias por debajo de 1 GHz y por encima de 40,5 GHz. Por debajo de 1 GHz, el nivel de la señal dispersada es muy bajo y por encima de 40,5 GHz, aunque se produce una dispersión significativa, la señal dispersada está entonces muy atenuada en el trayecto del volumen de dispersión a la estación terrena (UIT-R, 2017).

Datos radioclimáticos.

En este caso se recopila información de los términos que hay en las zonas radioclimáticas, para el cálculo en la distancia de coordinación en el modo de propagación 1 y según un parámetro radio meteorológico, β_p , que refleja la incidencia relativa de las condiciones anómalas de propagación con cielo despejado. Para continuar, la UIT recomienda lo siguiente con respecto a lo anterior y lo expresa de la siguiente manera:

El valor de β_p depende de la latitud. La latitud que se ha de utilizar para determinar el valor correcto de β_p , viene dado por:

$$\zeta_r = \begin{cases} |\zeta| - 1,8 & \text{para } |\zeta| > 1,8^\circ \\ 0 & \text{para } |\zeta| \leq 1,8^\circ \end{cases} \quad (7)$$

donde ζ es la latitud de la estación terrena (grados).

β_p se determina entonces mediante la expresión siguiente:

$$\beta_p = \begin{cases} 10^{1,67-0,015\zeta_r} & \text{para } \zeta_r \leq 70^\circ \\ 4,17 & \text{para } \zeta_r > 70^\circ \end{cases} \quad (8)$$

Para frecuencias entre 790 MHz y 60 GHz, se utiliza el coindice de refracción en la superficie a nivel del mar del centro del trayecto, N_0 , en los cálculos del modo de propagación (1). Se calcula mediante la expresión siguiente:

$$N_0 = 330 + 62,6 e^{-\left(\frac{\zeta-2}{32,7}\right)^2} \quad (9)$$

Límites de distancia mínima.

Los factores de propagación en las distancias de coordinación para cualquier dirección, son fundamentales ya que mediante un cierto número de factores las distancias podrían variar cientos de kilómetros a una estación terrena. Sin embargo la UIT en esta recomendación indica lo siguiente “por motivos prácticos y también para tener en cuenta las hipótesis establecidas a propósito del trayecto radioeléctrico, es necesario establecer límites más bajos a las distancias de coordinación (d_{min})” (UIT-R, 2017).

También la UIT recomienda calcular las distancias de coordinación de la siguiente forma:

Como primer paso se calcula la distancia de coordinación mínima como una función de la frecuencia, f (GHz), y hasta 40 GHz, mediante la siguiente expresión:

$$d'_{min}(f) = 100 + \frac{(\beta_p - f)}{2} Km \quad (10)$$

Luego se calcula la distancia de coordinación mínima a cualquier frecuencia de la banda de 100 MHz a 105 GHz mediante la expresión siguiente:

$$d_{min}(f) = \left\{ \begin{array}{lll} d'_{min}(f) & Km & \text{para } f < 40Ghz & A \\ \frac{(54 - f)d'_{min}(40) + 10(f - 40)}{14} & Km & \text{para } 40Ghz \leq f < 54GHz & B \\ \frac{10}{10} & Km & \text{para } 54GHz \leq f < 66GHz & C \\ \frac{10(75 - f) + 45(f - 66)}{9} & Km & \text{para } 66GHz \leq f < 75GHz & D \\ \frac{45}{45} & Km & \text{para } 75GHz \leq f < 90GHz & E \\ 45 - \frac{(f - 90)}{1,5} & Km & \text{para } 90GHz \leq f < 105GHz & F \end{array} \right. \quad (11)$$

En la ecuación B, $d'_{min}(40)$, se calcula utilizando la ecuación (10) con $f=40$.

Límites de distancia máxima.

La UIT también recomienda que es necesario utilizar estos límites ($d_{máx1}$ y $d_{máx2}$), para una distancia máxima que es utilizada en los cálculos iterativos para los modos 1 y 2 de propagación, por consiguiente la UIT los describe de la siguiente manera:

El límite de la distancia máxima de cálculo para el modo de propagación (1) ($d_{máx1}$) viene dado por la siguiente ecuación:

$$d_{máx1} = \begin{cases} 1200 & km \text{ para } f \leq 60GHz \\ 80 - 10 \log\left(\frac{p_1}{50}\right) & km \text{ para } f > 60GHz \end{cases} \quad (12)$$

En el modo 2 de propagación, es decir ($d_{máx2}$), la distancia máxima de cálculo que se debe utilizar depende de la latitud y se describe en la Tabla 3.

Tabla 3.

Distancias máximas de cálculo para el modo de propagación 2 ($d_{máx2}$)

Latitud (grados)	0-30	30-40	40-50	50-60	> 60
Distancia (km)	350	360	340	310	280

Nota. Unión Internacional de Telecomunicaciones (2017).

Recomendación UIT-R P.618-13

La siguiente recomendación considera que para planificar los sistemas de telecomunicación Tierra-espacio, es necesario determinar los datos de propagación y técnicas de predicción adecuadas.

Atenuación debida a los gases atmosféricos.

La atenuación de los gases atmosféricos es causada por la absorción y depende especialmente de:

Frecuencia.

Angulo de elevación.

Altura sobre el nivel del mar.

Densidad de vapor de agua (humedad absoluta).

Para las frecuencias inferiores a 10 GHz, generalmente son ignoradas. Sin embargo para las frecuencias superiores a los 10 GHz, son especialmente para los ángulos de elevación bajos.

Cálculo de las estadísticas de atenuación a largo plazo debida a la lluvia, a partir de la intensidad de lluvia caída en un punto.

La UIT en esta recomendación enseña un método el cual proporciona estadísticas para que facilite la atenuación debida a la lluvia sobre trayectos oblicuos en un punto establecido para frecuencias de un máximo de 55 GHz. A continuación, se muestra un ejemplo de este método por pasos que la UIT estableció.

Se desean conocer los siguientes parámetros:

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

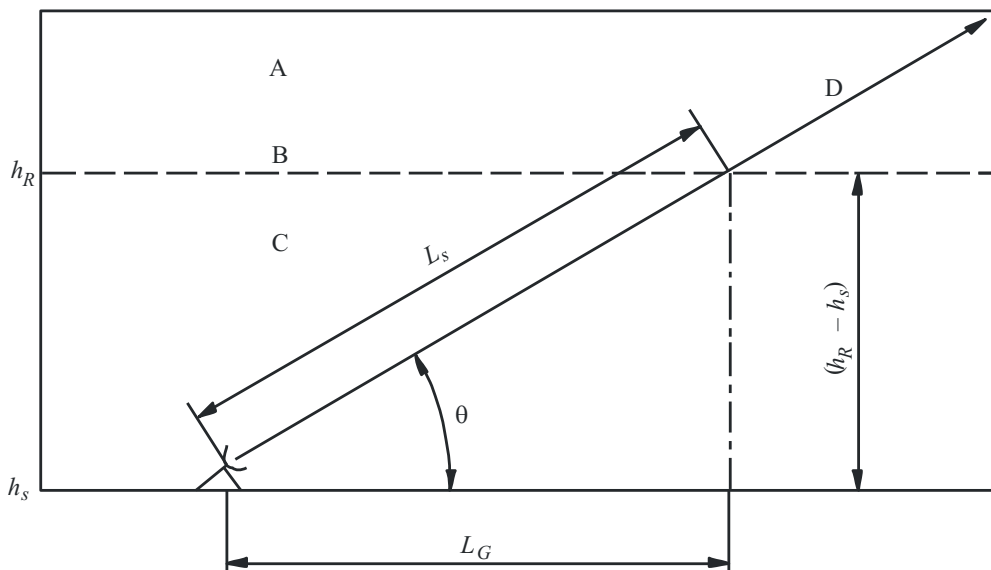
h_s : Altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar (km)

θ : Angulo de elevación (grados)

φ : Latitud de la estación terrena (grados)

f : Frecuencia (GHz)

R_e : Radio efectivo de la Tierra (8 500 km)



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

P.0618-01

Figura 4. Representación esquemática de un trayecto Tierra-espacio indicando los parámetros que se utilizarán para la predicción de atenuación UIT-R (2017).

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

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

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\text{sen } \theta} \quad km \quad (13)$$

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

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left(\text{sen}^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e}\right)^{1/2} + \text{sen } \theta} \quad km \quad (14)$$

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

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

$$L_G = L_s \cos \theta \quad km \quad (15)$$

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

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

$$\gamma_R = k (R_{0,01})^\alpha \quad dB/km \quad (16)$$

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

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0,38 (1 - e^{-2L_G})} \quad (17)$$

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

$$\zeta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{h_R - h_s}{L_G r_{0,01}} \right) \quad \text{grados} \quad (18)$$

Para $\zeta > \theta$,

$$L_R = \frac{L_G r_{0,01}}{\cos \theta} \text{ km} \quad (19)$$

De otro modo,

$$L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \text{ km} \quad (20)$$

Si $|\varphi| < 36^\circ$,

$$\chi = 36 - |\varphi| \text{ grados} \quad (21)$$

De otro modo,

$$\chi = 0 \text{ grados} \quad (22)$$

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 (1 - e^{-(\theta/(1 + \chi))}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0,45 \right)} \quad (23)$$

Paso 8: La longitud de trayecto efectiva es:

$$L_E = L_R v_{0,01} \text{ km} \quad (24)$$

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

$$A_{0,01} = L_R \gamma_R L_E \text{ dB} \quad (25)$$

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

$$\text{Si } p \geq 1\% \text{ o } |\varphi| \geq 36^\circ: \quad \beta = 0 \quad (26)$$

$$\text{Si } p < 1\% \text{ y } |\varphi| < 36^\circ \text{ y } \theta \geq 25^\circ: \quad \beta = -0,005(|\varphi| - 36) \quad (27)$$

De otro modo:

$$\beta = -0,005(|\varphi| - 36) + 1,8 - 4,25 \sin \theta \quad (28)$$

$$A_p = A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-(0,655 + 0,033 \ln(p) - 0,045 \ln(A_{0,01}) - \beta(1 - p) \sin \theta)} \text{ dB} \quad (29)$$

El método anterior, proporciona las estadísticas a largo plazo de la atenuación debida a la lluvia. Si se comparan los datos obtenidos con los datos previstos, habrá de tenerse en cuenta la importante variación anual que registran las estadísticas de intensidad de lluvia. La Recomendación UIT-R P.678 según la UIT expone estos datos (UIT-R, 2017).

Recomendación UIT-R P.1238-10

La siguiente recomendación provee orientación sobre la propagación en interiores en la gama de frecuencias de 300 MHz a 450GHz. Sin embargo, en el caso de interiores, la extensión de la cobertura está bien definida por la geometría del edificio, y los límites del propio edificio afectarán a la propagación. Por último, el alcance muy corto, en particular cuando se utilizan frecuencias de ondas milimétricas, significa que pequeños cambios en el entorno inmediato del trayecto radioeléctrico pueden tener efectos sustanciales en las características de propagación.

Daños de la propagación y medidas de calidad en sistemas de radio en interiores.

En un canal de radio en interiores los obstáculos que puede haber por la propagación son causados principalmente por:

La difracción y la reflexión en torno los objetos de las habitaciones, incluyendo las paredes y los suelos.

La pérdida de transmisión entre las paredes, los suelos y otros obstáculos.

La canalización de la energía, principalmente en los corredores con frecuencias altas.

Los movimientos de las personas y otros objetos en la habitación, incluido uno o ambos extremos del radioenlace probablemente.

Modelos básicos de pérdidas de transmisión.

Para el uso de este modelo de pérdida de transmisión en interiores parte de que la estación base y el terminal móvil están ubicados en el mismo edificio. En la estación base la pérdida de transmisión en interiores se puede estimar con modelos generales o específicos del lugar.

Modelos de sitio general.

Los modelos que se describen en esta sección son llamados generales debido a que requieren de poca información del trayecto o el lugar. La pérdida de transmisión básica de radio en interiores se caracteriza tanto por una pérdida de transmisión básica media como por sus estadísticas de desvanecimiento de sombra asociadas. En los modelos de pérdida de transmisión básica en interiores, tienen en cuenta la atenuación de la señal a través de varias

paredes y pisos. El modelo descrito en esta sección tiene en cuenta la pérdida a través de múltiples pisos para permitir características tales como la reutilización de la frecuencia entre pisos.

La UIT en esta recomendación explica el siguiente modelo básico que tiene la siguiente forma:

$$L_{total} = L(d_o) + N \log_{10} \frac{d}{d_o} + L_f(n) \text{ dB} \quad (30)$$

donde:

- N : coeficiente de pérdida de potencia a distancia
- f : frecuencia (MHz)
- d : distancia de separación (m) entre la estación base y la terminal portátil (donde $d \geq 1$ m)
- d_o : distancia de referencia (m)
- $L(d_o)$: pérdida de transmisión básica en d_o (dB), para una distancia de referencia d_o a 1 m, y suponiendo una propagación en espacio libre $L(d_o) = 20 \log_{10} f - 28$ donde f está en MHz
- L_f : factor de pérdida de penetración en el suelo (dB)
- n : número de pisos entre la estación base y la terminal portátil ($n \geq 0$), $L_f = 0$ dB para $n = 0$.

Para este mismo modelo la UIT expresa en la Tabla 4, coeficientes de pérdida de potencia, N , para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores.

Tabla 4.

Coefficientes de pérdida de potencia, N , para el cálculo de la pérdida de transmisión en interiores

Frequency (GHz)	Residential	Office	Commercial	Factory	Corridor	Data Centre
0.8	–	22.5 ⁽¹⁴⁾	–	–	–	–
0.9	–	33	20	–	–	–
1.25	–	32	22	–	–	–
1.9	28	30	22	–	–	–
2.1	–	25.5 ⁽⁴⁾	20	21.1	17 ⁽⁹⁾	–

2.2	–	20.7 ⁽¹⁴⁾	–	–	–	–
2.4	28	30	–	–	–	–
2.625	–	44 ⁽⁵⁾	–	33 ⁽⁶⁾	–	–
3.5	–	27	–	–	–	–
4	–	28	22	–	–	–
4.7	–	19.8 ⁽¹⁴⁾	–	–	–	–
5.2	30 ⁽²⁾ 28 ⁽³⁾	31	–	–	–	–
5.8	–	24	–	–	–	–
26	–	19.5 ⁽¹⁴⁾	–	–	–	–
12.65-14.15	–	–	–	19.5 ^(12,18) 39.3 ^(12,18)	18.3 ^(4,12,18) 44.5 ^(4,12,18)	–
25.3-28.3	–	–	–	19.0 ^(12,18) 37.8 ^(12,18)	19.2 ^(4,12,18) 37.7 ^(4,12,18)	–
28	–	18.4 ⁽¹²⁾ 29.9 ⁽¹²⁾	27.6 ⁽⁸⁾ 17.9 ^(12, 13) 24.8 ^(12, 13)	–	–	–
37	–	15.6 ⁽¹⁴⁾	–	–	–	–
38	–	20.3 ⁽¹²⁾ 29.6 ⁽¹²⁾	18.6 ^(12, 13) 25.9 ^(12, 13)	–	–	–
51-57	–	15 ⁽¹⁰⁾	–	–	13 ⁽¹⁰⁾ 16.3 ^(4, 10)	–
60	–	22 ⁽¹⁾	17 ⁽¹⁾	–	16 ^{(1) (7)(9)}	–
67-73	–	19 ⁽¹¹⁾	–	18.3 ^(12,18) 38.8 ^(12,18)	18.8 ^(4, 12,18) 35.1 ^(4, 12,18)	–
70	–	22 ⁽¹⁾	–	–	–	–
250	–	20.1 ⁽¹⁶⁾	–	–	19.0 ^(9, 16)	–
275	–	20 ⁽¹⁶⁾	–	–	19.2 ^(9, 16)	–
300	–	20 ⁽¹⁵⁾	–	–	19.5 ^(9, 15)	20.2 ⁽¹⁵⁾
325	–	19.8 ⁽¹⁷⁾	–	–	19.6 ^(9, 17)	–

Nota. Unión Internacional de Telecomunicaciones (2019).

La UIT expone que para los valores de 60 GHz y 70 GHz suponen una propagación dentro de una sola habitación o espacio, y no incluyen ningún margen para la transmisión a través de las paredes. La absorción gaseosa en torno a 60 GHz también es importante para distancias superiores a unos 100 m, lo que puede influir en las distancias de reutilización de frecuencias

Modelos de sitios específicos.

Los modelos específicos del lugar son también útiles para estimar la pérdida de transmisión básica o la fuerza de campo. Para estos modelos de predicción de la fuerza de campo en interiores se puede disponer de la teoría uniforme de difracción (UTD) y también de la técnica de trazados de rayos mencionado anteriormente en la recomendación UIT-R P.1410-2. Para el cálculo de la fuerza de campo en interiores se necesita información detallada de la estructura del edificio. El método que tiene cuenta la UIT para estos modelos se basan en los rayos directos, los rayos difractados y los rayos reflejados, y puede ampliarse a la difracción múltiple o a la reflexión múltiple, así como a combinaciones de rayos difractados y reflejados. Al incluir los rayos reflejados y difractados, la precisión básica de la predicción de las pérdidas de transmisión se mejora considerablemente.

Recomendación UIT-R P.833-9

En la siguiente recomendación comprende los casos debido a la vegetación ya que puede ser importante para los sistemas terrenales como para los sistemas tierra-espacio, también esta recomendación presenta modelos aplicables a diversos tipos de vegetación para varias geometrías de trayecto adaptadas para calcular la atenuación de las señales que pasan a través de la vegetación.

Trayecto terrenal con un terminal en zona boscosa.

La terminal del trayecto radioeléctrico terrenal está ubicado en un bosque o en una zona similar de vegetación extensa, por otro lado la pérdida adicional debida a la vegetación se puede describir en dos parámetros, estos parámetros se describen a continuación:

El índice de atenuación específica (dB/m) debida fundamentalmente a la dispersión de energía fuera del trayecto radioeléctrico, que se mediría en un trayecto muy corto.

La atenuación adicional total máxima debida a la vegetación en un trayecto radioeléctrico (dB) limitada por el efecto de otros mecanismos, entre ellos, la propagación de ondas de superficie por encima del medio vegetal y la dispersión dentro del mismo.

Para una mejor explicación la UIT establece en esta recomendación unas indicaciones que expresan las situaciones para el trayecto radioeléctrico en una zona boscosa y también la atenuación específica en zona boscosa, a continuación se describen estas indicaciones.

En la Figura 5, se puede ver que el transmisor está fuera de la zona boscosa y el receptor está a una cierta distancia, d , dentro de la misma. La atenuación excesiva, A_{ev} , debida a la presencia de la vegetación está dada por la siguiente ecuación:

$$A_{ev} = A_m \left[1 - \exp\left(-\frac{d\gamma}{A_m}\right) \right] \quad (31)$$

siendo:

d : Longitud del trayecto dentro de la zona boscosa (m)

γ : Atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos (dB/m)

A_m : Atenuación máxima cuando un terminal está dentro de una zona de vegetación de un tipo y profundidad específicos (dB).

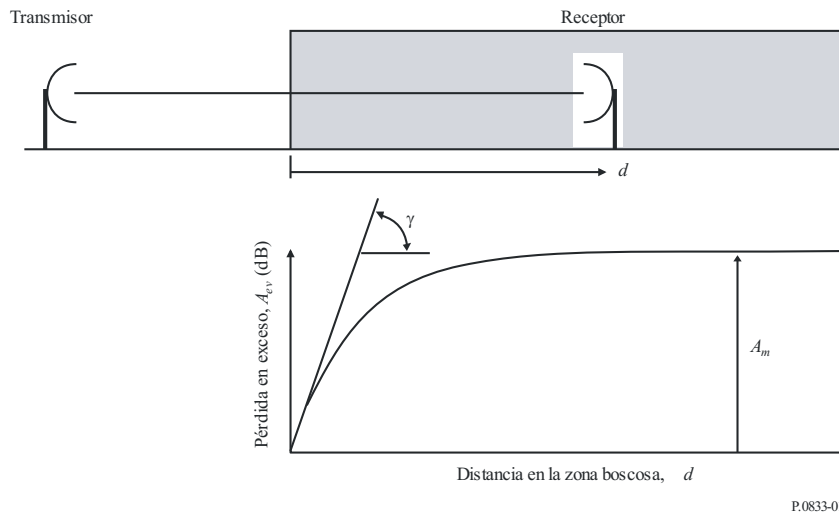


Figura 5. Trayecto radioeléctrico representativo en zona boscosa UIT-R (2016).

Para complementar lo anterior, el valor de atenuación específica debida a la vegetación (γ dB/m), depende de la especie y la densidad de dicha vegetación. En la Figura 6, se muestran valores típicos de atenuación específica obtenidos a partir de diferentes mediciones en la gama de frecuencias que va de 30 MHz a 30 GHz aproximadamente en zona boscosa. Por debajo de 1 GHz las señales polarizadas verticalmente tienen tendencia a experimentar una atenuación superior a la que experimentan las polarizadas horizontalmente, aunque esto se debe a la dispersión causada por los troncos de los árboles (UIT-R, 2016).

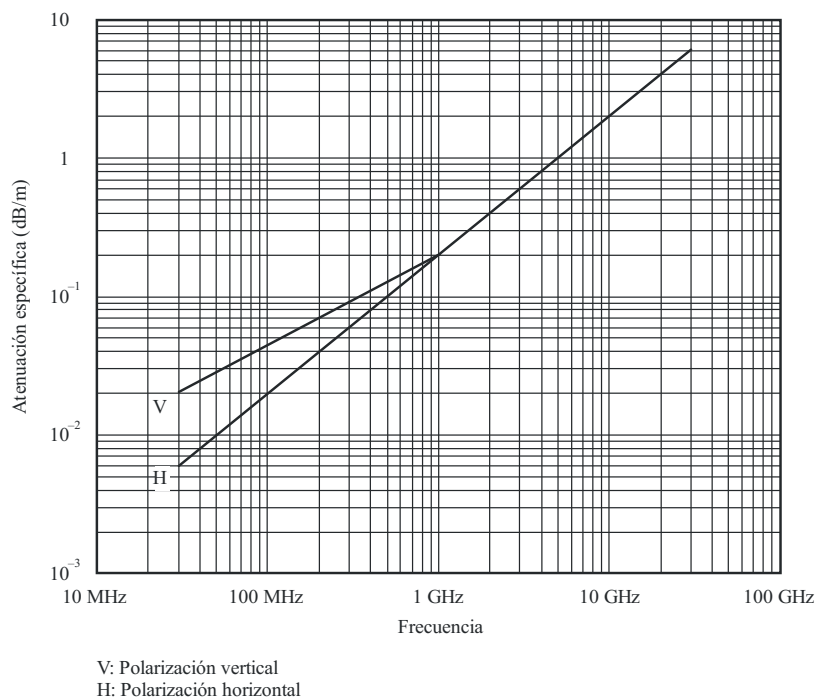


Figura 6. Atenuación específica en zona boscosa UIT-R (2016).

Es importante aclarar que la atenuación debida a la vegetación cambia considerable debida a la naturaleza irregular del medio y a la gran variedad de especies, densidades y condiciones de humedad que se da en la práctica. También puede haber variaciones de la atenuación debido al movimiento del follaje, por ejemplo a causa del viento.

Trayectos oblicuos.

Se recomiendan dos métodos para los trayectos oblicuos para la copa de un solo árbol, los cuales son en función de si la frecuencia es inferior o superior.

Para las frecuencias inferiores de 1 a 30 GHz, la UIT recomienda seguir una serie de 15 pasos que ellos mismos establecen en esta recomendación, la cual se encuentra en la sección 3.2.2.1, para poder calcular lo siguiente:

- Las pérdidas totales debidas a los árboles.

$$L_{total} = -10 \log_{10} \left\{ 10^{\left(\frac{-L_{sidea}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{sideb}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{top}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{ground}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-L_{scat}}{10}\right)} \right\} \quad (32)$$

- El factor de Rice.

$$K = 10 \log_{10} \left(\frac{a^2}{2\sigma^2} \right) \quad (33)$$

- La distribución acumulativa a pequeña escala de la potencia recibida.

$$\text{Prob}(X > x) = 2 \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right) \int_{x/\sigma\sqrt{2}}^{\infty} v \exp(-v^2) I_0\left(\frac{2va}{\sigma\sqrt{2}}\right) dv \quad (34)$$

Los parámetros del modelo son los siguientes:

R : radio de la copa del árbol (m)

H : altura de la copa del árbol (m)

θ_i : ángulo de elevación incidente a la copa del árbol (rad)

ϕ_i : ángulo acimutal incidente a la copa del árbol (rad)

ϕ_s : ángulo de dispersión acimutal (rad)

f : frecuencia (GHz, entre 1 y 30 GHz)

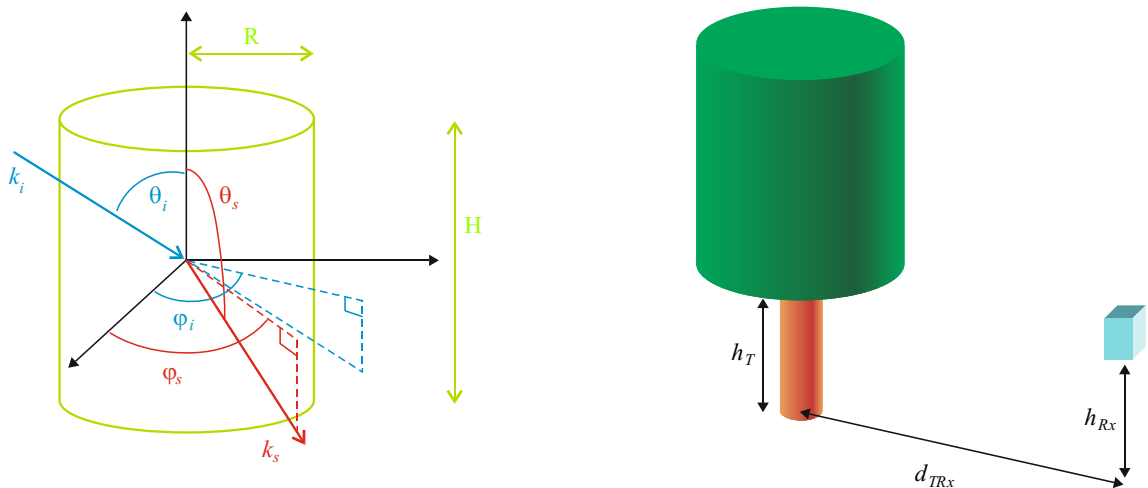
d_{TRx} : distancia horizontal desde la antena de recepción hasta el árbol (m)

h_T : altura de la base de la copa del árbol (m)

h_{Rx} : altura de la antena de recepción (m, debe ser inferior a $h_T + H/2$):

polarización del enlace (V , H , circular dextrógira o circular levógira)

La Figura 7 que se muestra a continuación es la del modelo que es la definición de la geometría en este tipo de frecuencias inferiores comprendidas entre 1 a 30 GHz.



P.0833-0

Figura 7. Definición de la geometría UIT-R (2016).

Tabla 5.

Tamaño y densidad medidos de las ramas y hojas de un roble en Bostel, Países Bajos.

Tipo de dispersor	Radio (cm)	Longitud/espesor (cm)	Densidad (m ⁻³)
Rama (1)	11,4	131	0,013
Rama (2)	6,0	99	0,073
Rama (3)	2,8	82	0,41
Rama (4)	0,7	54	5,1
Rama (5)	0,2	12	56
Hoja	3,7	0,02	420

Nota. Unión Internacional de Telecomunicaciones (2016).

La UIT también establece un método de 4 pasos que recurre a una modelización casi óptica y se utiliza para las frecuencias que están comprendidas entre 30 GHz a 100 GHz. A continuación se describen los pasos:

Paso 1 Realizar un modelo explícito del árbol con arreglo a la 0, que incluya todos los elementos (ramas y hojas) cuyo radio sea mayor que $\lambda/2$, siendo λ la longitud de onda.

Paso 2 Para los elementos más pequeños que $\lambda/2$, calcular los parámetros de la copa utilizando el método para 1-30 GHz.

Paso 3 Determinar los tres elementos del modelo explícito del paso 1 que son interceptados por el rayo.

Paso 4: Si ningún elemento ha sido interceptado por el rayo, utilizar los parámetros de la copa calculados en el paso 2; de lo contrario, añádase una atenuación de 40 dB a la atenuación en el espacio libre.

Despolarización.

Para la despolarización, la UIT hizo unas mediciones previas a 38 GHz, en la que nombra que la despolarización a través de la vegetación puede ser muy importante, debido a que la señal de polarización cruzada transmitida puede ser similar a la señal copolar a través de la vegetación. Sin embargo, para las profundidades mayores de la vegetación que se requieren para que esto ocurra, la atenuación sería tan grande que ambos componentes, el copolar y el de polarización cruzada, quedarían por debajo de la gama dinámica de la antena receptora (UIT-R, 2016).

Recomendación UIT-R P.1144-10

En esta recomendación la UIT, suministra información sobre los métodos de predicción de la propagación. Lo importante de esta recomendación es la información contenida que se muestra en la Tabla 6 a continuación.

Tabla 6.

Métodos de predicción de la propagación de las ondas radioeléctricas

Method	Title	Application	Type	Output	Frequency	Distance	% time	% location	Terminal height	Input data
Rec. ITU-R P.368	Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz	All services	Point-to-point	Field strength	10 kHz to 30 MHz	1 to 10 000 km	Not applicable	Not applicable	Ground-based	Frequency Ground conductivity
Rec. ITU-R P.452	Prediction procedure for the evaluation of interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.1 GHz	Services employing stations on the surface of the Earth; interference	Point-to-point	Path loss	100 MHz to 50 GHz	Not specified but up to and beyond the radio horizon	0.001 to 50 Average year and worst month	Not applicable	No limits specified, within the surface layer of the atmosphere. (Not suitable for aeronautical applications)	Path profile data Frequency Percentage time Tx antenna height Rx antenna height Latitude and longitude of Tx Latitude and longitude of Rx Meteorological data Polarization
Rec. ITU-R P.528	Propagation curves for aeronautical mobile and radionavigation services using the VHF, UHF and SHF bands	Aeronautical mobile	Point-to-area	Path loss	125 MHz to 15.5 GHz	0 to 1 800 km (for aeronautical applications 0 km horizontal distance does not mean 0 km path length)	1 to 99	Not applicable	H1: Minimum of 1.5 m H2: Minimum of 1.5 m	Distance Tx height Frequency Rx height Percentage time
Rec. ITU-R P.530	Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems	Line-of-sight fixed links	Point-to-point line-of-sight	Path loss Diversity improvement (clear air conditions) XPD ⁽²⁾ Outage Error performance	Approximately 150 MHz to 100 GHz	Up to 200 km if line-of-sight	All percentages of time in clear-air conditions; 1 to 0.001 in precipitation conditions ⁽¹⁾ And worst month for attenuation	Not applicable	High enough to ensure specified path clearance	Distance Tx height Frequency Rx height Percentage time Path obstruction data Climate data Terrain information

Tabla 6 (continuación)

Method	Title	Application	Type	Output	Frequency	Distance	% time	% location	Terminal height	Input data
Rec. ITU-R P.533	Method for the prediction of the performance of HF circuits	Broadcasting Fixed Mobile	Point-to-point	Basic MUF Sky-wave field strength Available receiver power Signal-to-noise ratio LUF Circuit reliability	2 to 30 MHz	0 to 40 000 km	All percentages	Not applicable	Not applicable	Latitude and longitude of Tx Latitude and longitude of Rx Sunspot number Month Time(s) of day Frequencies Tx power Tx antenna type Rx antenna type
Rec. ITU-R P.534	Method for calculating sporadic-E field strength	Fixed Mobile Broadcasting	Point-to-point via sporadic E	Field strength	30 to 100 MHz	0 to 4 000 km	0.1 to 50	Not applicable	Not applicable	Distance Frequency
Rec. ITU-R P.617	Propagation prediction techniques and data required for the design of trans-horizon radio-relay systems	Trans-horizon fixed links	Point-to-point	Path loss	> 30 MHz	100 to 1 000 km	0.001 to 99.999	Not applicable	No limits specified within the surface layer of the atmosphere. (Not suitable for aeronautical applications)	Frequency Tx antenna gain Rx antenna gain Path geometry
Rec. ITU-R P.618	Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems	Satellite	Point-to-point	Path loss Diversity gain and (for precipitation condition) XPD ⁽²⁾	1 to 55 GHz	Any practical orbit height	0.001-5 for rain attenuation; 0.001-50 for total attenuation, 0.001-1 for XPD ⁽²⁾ Also worst month for attenuation	Not applicable	No limit	Meteorological data Frequency Elevation angle Height of earth station Separation and angle between earth station sites (for diversity gain) Antenna diameter and efficiency (for scintillation) Polarization angle (for XPD ⁽²⁾)
Rec. ITU-R P.619	Propagation Data Required for the Evaluation of Interference Between Stations in Space and those on the Surface of the Earth	Satellite	Point-to-point	Basic transmission loss for single-entry interference Clear-air basic transmission loss for multiple-entry interference	0.1 to 100 GHz	Any practical orbit height	0.001 to 50	Not applicable	No limit	Frequency Earth-station elevation angle Angular path separation Path length Gaseous attenuation Scintillation "gain" Maximum allowed attenuation of the wanted signal

Tabla 6 (continuación)

Method	Title	Application	Type	Output	Frequency	Distance	% time	% location	Terminal height	Input data
Rec. ITU-R P.620	Propagation data required for the evaluation of coordination distances in the frequency range 100 MHz to 105 GHz	Earth station frequency coordination	Coordination distance	Distance of which the required propagation loss is achieved	100 MHz to 105 GHz	Up to 1 200 km	0.001 to 50	Not applicable	No limits specified within the surface layer of the atmosphere. (Not suitable for aeronautical applications)	Minimum basic transmission loss Frequency Percentage of time Earth-station elevation angle
Rec. ITU-R P.678	Characterization of the variability of propagation phenomena and estimation of the risk associated with propagation margin	Rain rate models Satellite	Point-to-point	Variability of propagation phenomena	12 to 50 GHz	Any practical orbit height	0.01-2 for rainfall rate and rain attenuation along slant paths	Not applicable	No limit	Probability of exceedance
Rec. ITU-R P.679	Propagation data required for the design of broadcasting-satellite systems	Broadcast satellite	Point-to-area	Path loss Effect of local environment	0.5 to 5.1 GHz	Any practical orbit height	Not applicable	No limits specified	No limits specified	Frequency Elevation angle Features of local environment
Rec. ITU-R P.680	Propagation data required for the design of Earth-space maritime mobile telecommunication systems	Maritime mobile satellite	Point-to-point	Sea-surface fading Fade duration Interference (adjacent satellite)	0.8-8 GHz	Any practical orbit height	To 0.001% via Rice-Nakagami distribution Limit of 0.01% for interference	Not applicable	No limit	Frequency Elevation angle Maximum antenna boresight gain
Rec. ITU-R P.681	Propagation data required for the design of Earth-space land mobile telecommunication systems	Land mobile satellite	Point-to-point	Path fading Fade duration Non-fade duration	0.8 to 20 GHz	Any practical orbit height	Not applicable Percentage of distance travelled ⁽¹⁾ 1 to 80%	Not applicable	No limit	Frequency Elevation angle Percentage of distance travelled Approximate level of optical shadowing
Rec. ITU-R P.682	Propagation data required for the design of Earth-space aeronautical mobile telecommunication systems	Aeronautical mobile satellite	Point-to-point	Sea-surface fading Multipath from ground and aircraft during landing	1 to 2 GHz (sea-surface fading) 1 to 3 GHz (multipath from ground)	Any practical orbit height	To 0.001% via Rice-Nakagami distribution ⁽¹⁾	Not applicable	No limit for sea-surface fading Up to 1 km for ground reflection during landing	Frequency Elevation angle Polarization Maximum antenna boresight gain Antenna height

Tabla 6 (continuación)

Method	Title	Application	Type	Output	Frequency	Distance	% time	% location	Terminal height	Input data
Rec. ITU-R P.684	Prediction of field strength at frequencies below about 150 kHz	Fixed Mobile	Point-to-point Point-to-area	Sky-wave field strength	30 to 150 kHz	0 to 16 000 km	50	Not applicable	Not applicable	Latitude and longitude of Tx Latitude and longitude of Rx Distance Tx power Frequency Ground constants Season Sunspot number Hour of day
Rec. ITU-R P.843	Communication by meteor-burst propagation	Fixed Mobile Broadcasting	Point-to-point via meteor-burst	Received power Burst rate	30 to 100 MHz	100 to 1 000 km	0 to 5	Not applicable	Not applicable	Frequency Distance Tx power Antenna gains
Rec. ITU-R P.1147	Prediction of sky-wave field strength at frequencies between about 150 and 1 700 kHz	Broadcasting	Point-to-area	Sky-wave field strength	0.15 to 1.7 MHz	50 to 12 000 km	1, 10, 50	Not applicable	Not applicable	Latitude and longitude of Tx Latitude and longitude of Rx Distance Sunspot number Tx power Frequency
Rec. ITU-R P.1238	Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz	Mobile RLAN	In-building propagation methods	Path loss Delay spread	300 MHz to 450 GHz	Within buildings	Not applicable	Not applicable	Base: about 2-3 m Mobile: about 0.5-3 m	Frequency Distance Floor and wall factors
Rec. ITU-R P.1410	Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband radio access systems operating in a frequency range from 3 to 60 GHz	Broadband radio access	Point-to-area	Coverage Temporal coverage reduction due to rain	3 to 60 GHz	0-5 km	0.001 to 1 (for calculating reduction in coverage due to rain)	Up to 100	No limit; 0-300 m (typical)	Frequency Cell size Terminal heights Building height statistical parameters

Tabla 6 (continuación)

Method	Title	Application	Type	Output	Frequency	Distance	% time	% location	Terminal height	Input data
Rec. ITU-R P.1411	Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz	Mobile	Short-path propagation methods	Path loss Delay spread	300 MHz to 100 GHz	< 1 km	Not applicable	Not applicable	Base: about 4-50 m Mobile: about 0.5-3 m	Frequency Distance Street dimensions Structure heights
Rec. ITU-R P.1546	Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz	Terrestrial services	Point-to-area	Field strength	30 to 4 000 MHz	1 to 1 000 km	1 to 50	1 to 99	<i>Tx/base:</i> effective height from less than 0 m to 3 000 m <i>Rx/mobile:</i> ≥ 1 m	Terrain height and ground cover (optional) Path classification Distance Tx antenna height Frequency Percentage time Rx antenna height Terrain clearance angle Percentage locations Refractivity gradient
Rec. ITU-R P.1622	Prediction methods required for the design of Earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz	Satellite optical links	Point-to-point	Absorption loss Scattering loss Background noise Amplitude scintillation Angle of arrival Beam wander Beam spreading	20 to 375 THz	Far-field Earth-to-space optical links	Not applicable	Not applicable	No limit	Wavelength Terminal height Elevation angle Turbulence structure parameter
Rec. ITU-R P.1623	Prediction method of fade dynamics on Earth-space paths	Satellite	Point-to-point	Fade duration, fade slope	10 to 50 GHz	Any practical orbit height	Not applicable	Not applicable	No limit	Frequency Elevation angle Attenuation threshold Filter bandwidth
Rec. ITU-R P.1812	A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands	Terrestrial services	Point-to-area	Field strength	30 MHz to 3 000 MHz	Not specified but up to and beyond the radio horizon	1 to 50	1 to 99	No limits specified, within the surface layer of the atmosphere. (Not suitable for aeronautical applications)	Path profile data Frequency Percentage time Tx antenna height Rx antenna height Latitude and longitude of Tx Latitude and longitude of Rx Meteorological data Polarization

Tabla 6 (fin)

Method	Title	Application	Type	Output	Frequency	Distance	% time	% location	Terminal height	Input data
Rec. ITU-R P.1814	Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links	Terrestrial optical links	Point-to-point	Absorption loss Scattering loss Background noise Amplitude scintillation Beam spreading	20 to 375 THz	No limit	Not applicable	Not applicable	No limit	Wavelength Visibility (in fog) Path length Turbulence structure parameter
Rec. ITU-R P.1853	Tropospheric attenuation time series synthesis	Terrestrial satellite	Point-to-point	Rain attenuation for terrestrial paths Total attenuation and tropospheric scintillation for Earth-space paths	4 to 40 GHz for terrestrial paths 4 to 55 GHz for Earth-space paths	Between 2 and 60 km for terrestrial paths GEO satellite	Not applicable	Not applicable	No limit	Meteorological data Frequency Elevation angle Height of earth station Separation and angle between earth station sites (for diversity gain) Antenna diameter and efficiency (for scintillation)
Rec. ITU-R P.2001	A general purpose wide-range terrestrial propagation model in the frequency range 30 MHz to 50 GHz	Terrestrial services	Point-to-point	Path loss	30 MHz to 50 GHz	3 to 1 000 km	0.001 to 99.999	Not applicable	<8000 m above m.s.l. but near the ground, within the troposphere	Path profile data Frequency Percentage time Tx antenna height, gain and azimuthal direction Rx antenna height, gain and azimuthal direction Latitude and longitude of Tx Latitude and longitude of Rx Polarization
Rec. ITU-R P.2041	Prediction of path attenuation on links between an airborne platform and Space and between an airborne platform and the surface of the Earth	Airborne	Point-to-point	Path loss	1 to 55 GHz	Any height	0.001 to 50	Not applicable	Between the surface of the Earth and space	Meteorological data Frequency Elevation angle Availability Height of airborne platform Antenna diameter and efficiency (for scintillation)

Nota. Unión Internacional de Telecomunicaciones (2019).

Para cada una de las recomendaciones que se exponen en la tabla 5, se debe indicar la información que hay en cada columna y para ello se presenta las siguientes definiciones:

Aplicación: Es el servicio o la aplicación a los que se destina la Recomendación.

Tipo: La situación a la que se aplica la Recomendación, como punto a punto, punto a zona, línea de vista, entre otras.

Salida: Es el valor del parámetro de salida producido por el método de la Recomendación, como las pérdidas de trayecto.

Frecuencia: La gama de frecuencias aplicable de la Recomendación.

Distancia: Es el rango de distancia aplicable de la Recomendación.

% tiempo: Son los valores porcentuales de tiempo aplicables o el rango de valores de la Recomendación; el porcentaje de tiempo es el que supera la señal prevista durante un año medio.

% ubicación: Es el rango de ubicación aplicable de la Recomendación; el porcentaje de ubicaciones, por ejemplo puede ser, un cuadrado de 100 a 200 m de lado en el que se excede la señal prevista.

Altura del terminal: Es la gama de altura de antena terminal aplicable de la Recomendación.

Datos de entrada: Son una lista de parámetros utilizados por el método de la Recomendación; la lista está ordenada por la importancia del parámetro y, en algunos casos, pueden utilizarse valores por defecto.

Por otro lado, la información alojada en la tabla anterior permite a los usuarios explorar rápidamente las capacidades y limitaciones de las recomendaciones sin necesidad de buscar en sus respectivos documentos de información.

Recomendaciones sugeridas de la UIT que deben ser validadas

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se recopila la información de cada una de las recomendaciones descritas en el objetivo específico dos, también se describe la dificultad de cada recomendación, es decir la dificultad de los cálculos matemáticos que se deben hacer para el uso de cada una de ellas, de esta manera fue como se pudo determinar el nivel de dificultad de cada recomendación, con el fin de sugerir de cada una lo más esencial para que asimismo aporte al proyecto de investigación que será realizado por los profesores del programa de Ingeniería en Telecomunicaciones.

Tabla 7.

Recomendaciones sugeridas para el proyecto de investigación

RECOMENDACIONES	CALCULOS	DIFICULTAD
UIT-R P. 1410-5	Esta recomendación sirve para calcular la probabilidad de que exista un rayo con LoS.	Media
UIT-R P. 1411-5	Esta recomendación proporciona datos para calcular las pérdidas por espacio libre y la pérdida total del trayecto para propagación en cañones urbanos.	Media
UIT-R P. 620-7	La siguiente recomendación sirve para calcular las distancias de coordinación máxima y mínima en los modelos de propagación.	Media
UIT-R P. 618-13	Esta recomendación sirve para calcular las estadísticas de atenuación debida a la lluvia.	Baja
UIT-R P. 1238-10	Esta recomendación sirve para calcular la pérdida de transmisión en interiores.	Baja
UIT-R P. 833-9	Esta recomendación sirve para calcular la atenuación de las señales que pasan a través de la vegetación	Alta
UIT-R P. 1144-10	Esta recomendación sirve para la información que hay sobre los métodos de predicción de la propagación y permite a los usuarios explorar rápidamente sobre las capacidades y limitaciones de las recomendaciones.	Media

Nota. Autoría propia.

Teniendo en cuenta la información que se recopiló en la tabla anterior, las recomendaciones que sugiero al proyecto de investigación son:

Recomendación 1411-5: Debido a que tienen en cuenta los modelos de pérdidas del trayecto para los sectores urbanos y aplican algoritmos de tipo cerrado para estos sectores.

Recomendación 618-13: Porque tienen en cuenta la atenuación debida a los gases atmosféricos y también proporcionan estadísticas que facilite la atenuación debida a la lluvia.

Recomendación 1238-10: Debido a que tienen en cuenta la orientación sobre la propagación en interiores, es decir obstáculos que hay en la propagación, como por ejemplo las paredes y los suelos, esto hace que haya pérdidas de transmisión.

Estas recomendaciones se escogieron porque para el uso de las redes 5G, las señales milimétricas son fundamentales, debido a que ofrecen conectividad de alta capacidad lo que sin duda beneficiara a muchos de nosotros, ya que sabemos que la velocidad y capacidad de internet son dos factores muy importantes hoy en día porque en los últimos años ha mejorado, pero con la llegada de la tecnología 5G incrementara aún más lo que hemos tenido hasta ahora.

En conclusión, las ondas o señales milimétricas van a mejorar la capacidad del área de cobertura, porque va a requerir de un rango menor de actuación debido al uso de celdas que son más pequeñas, lo cual va a facilitar el despliegue para las zonas urbanas y también las instalaciones en carretera.

Conclusiones

En la búsqueda realizada de la información acerca de las recomendaciones que ofrece la UIT, se identifica que las recomendaciones tienen un guion y número después, lo cual hace referencia a las versiones de cada recomendación, por lo tanto se debe tener en cuenta la versión más reciente.

Se evidenció que las recomendaciones 2001-3, 1409, 1815-1 y la 452-16, no tienen nada relacionado con las ondas milimétricas y tampoco suministran la suficiente información para poder hacer un análisis para comprender los parámetros de la propagación sobre estas ondas.

Para el proyecto de investigación denominado “Verificación y validación de las recomendaciones de la UIT, relacionadas con la atenuación de señales milimétricas, para una futura implementación de 5G en Colombia” que será realizado por los investigadores del programa de Ingeniería en Telecomunicaciones, se sugirieron las siguientes recomendaciones 1411-5, 618-13 y 1238-10, que sirven de apoyo para el uso de las ondas milimétricas sobre todo en las ciudades que se puedan presentar lluvias.

Referencias

- Agencia Nacional del Espectro. (2019). *Documento de Consulta Pública sobre las Bandas De Frecuencia para 5G en Colombia*. Obtenido de https://www.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/consultapublica/5G/20190401_Consulta_Publica_5G_ANE_Colombia.pdf
- Oladunni, et al. (2014). *An Experimental Investigation Into GbE Wireless Data Communication at 24 GHz in Non-Line-of-Sight and Multipath Rich Environments*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6846278>
- Esopo. (2019). *Ondas milimétricas*. Obtenido de <https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/ondas-milimetricas/>
- Gemalto. (2019). *Red 5G – Características y usos de esta tecnología (2019)*. Obtenido de <https://www.gemalto.com/latam/telecom/inspiracion/5g>
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2019). *Agencia Nacional del Espectro (ANE)*. Obtenido de https://www.mintic.gov.co/portal/604/w3-propertyvalue-6179.html?_noredirect=1
- R, I. A. (2016). *24 GHz cmwave radio propagation through vegetation: Suburban tree clutter attenuation*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7481471>
- Sampieri, R. H. (2014). *Metología de la investigación sexta edición*. México: Mc Graw Hill Education.
- UIT-R. (1999). *Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas que utilizan estaciones de plataforma de gran altitud a aproximadamente 47 GHz*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1409-0-199910-S/en>
- UIT-R. (2003). *Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha en ondas milimétricas que funcionan en una gama de frecuencias de 20-50 GHz aproximadamente*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1410-2-200304-S/es>
- UIT-R. (2009). *Atenuación diferencial por lluvia*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1815-1-200910-I/en>
- UIT-R. (2009). *Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones de exteriores de corto alcance y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 300Mhz a 100Ghz*.

Obtenido de https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-5-200910-S!!PDF-S.pdf

- UIT-R. (2012). *Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 GHz aproximadamente*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1410-5-201202-I/es>
- UIT-R. (2015). *Procedimiento de predicción para la evaluación de interferencia entre estaciones en la superficie de la Tierra a frecuencias superiores a aproximadamente 0.1 GHz*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.452-16-201507-I/en>
- UIT-R. (2016). *Atenuación en vegetación*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.833-9-201609-I/en>
- UIT-R. (2017). *Datos de propagación necesarios para evaluar las distancias de coordinación en la banda de frecuencias de 100 MHz a 105 GHz*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.620-7-201706-I/es>
- UIT-R. (2017). *Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicaciones Tierra-espacio*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.618-13-201712-I/en>
- UIT-R. (2019). *Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicación en interiores y redes de área local de radio en el rango de frecuencia de 300 MHz a 450 GHz*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238-10-201908-I/en>
- UIT-R. (2019). *Guía para la aplicación de los métodos de propagación de la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1144-10-201908-I/en>
- UIT-R. (2019). *Un modelo de propagación terrestre de amplio alcance de uso general en el rango de frecuencia de 30 MHz a 50 GHz*. Obtenido de <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2001-3-201908-I/en>
- Unión internacional de telecomunicaciones. (2019). *5G – Quinta generación de tecnologías móviles*. Obtenido de <https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>

Unión internacional de telecomunicaciones. (2020). *Recomendaciones del UIT-R*. Obtenido de <https://www.itu.int/pub/R-REC>