

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FIE**  
Facultad de  
Ingeniería Eléctrica

**DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**"Herramienta para el cálculo de la atenuación por onda troposférica bajo diferentes condiciones de propagación."**

Autor: Pedro Luis Ofarrill Giraut

Tutor: MSc. Rafael Alejandro Olivera Solís

Santa Clara, Julio 2018  
Copyright©UCLV

---

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Tutor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

---

## **PENSAMIENTO**

*Lo que distingue las mentes verdaderamente originales no es que sean las primeras en ver algo nuevo, sino que son capaces de ver como nuevo lo que es viejo, conocido, visto y menospreciado por todos.*

*Friedrich Wilhelm Nietzsche*

---

## DEDICATORIA

*No hubiese sido posible este momento sin esa persona que me apoyó y estuvo a mi lado:*

*A mi mamá ser esa persona, esa madre q todos desean tener, la que es madre y padre al mismo tiempo, la q te da consejos diariamente, la q se desvive para complacer los deseos de su hijo y poco a poco le da todo lo q puede recordándole q tiene una misión en la vida y es por la cual está en la universidad y ella se desvivía día a día, hacerse un profesional. Por eso todo lo que soy se lo dedico a ella por haberme criado y educado de la manera como lo hizo. Gracias a ella soy la persona que soy la quiero con la vida.*

---

## AGRADECIMIENTOS

*A mis profesores, que considero que escogieron la profesión más hermosa del mundo, enseñar, a ellos muchas gracias por su exigencia y dedicación.*

*A todos mis compañeros de aula, los cuales me permitieron incorporarme con ellos y convertirnos en la familia que hoy somos, especialmente a Diago, Reinier, Pochi y Ernesto.*

*A mi tutor Rafael, el cual quiero y respeto como profesor y como amigo. Por todo su apoyo y dedicación incondicional y por estar ahí siempre para mí en el momento en el que lo necesitaba.*

*A mi novia por estar conmigo en todos los momentos buenos y malos y brindarme todo su apoyo y comprensión.*

*Gracias.*

---

## **TAREA TÉCNICA**

Con la intención de dar cumplimiento a los objetivos trazados para la realización de esta tesis, se tuvo en cuenta una serie de tareas, ellas fueron:

1. Búsqueda bibliográfica de información relacionada con la propagación de ondas troposféricas en diferentes medios.
2. Estudio de las recomendaciones dadas por la UIT para la estimación de la propagación de las ondas troposféricas en distintos medios de propagación.
3. Elaboración de algoritmos que realicen el cálculo de la atenuación por onda troposférica.
4. Aplicación de herramientas de simulación para la evaluación de las técnicas seleccionadas.
5. Validación.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

---

## RESUMEN

El presente trabajo de diploma se dedicó al proceso de elaborar y desarrollar una herramienta didáctica, de apoyo al proceso de enseñanza-aprendizaje de la asignatura “Radiopropagación. Se demuestra la influencia que ejerce el uso de las TIC en el proceso de aprendizaje a la hora de alcanzar los retos planteados por los diferentes sistemas educativos. Se tratan algunos conceptos referentes a las ondas electromagnéticas, propagación, atenuación. También, son analizados los mecanismos físicos que permiten la propagación de ondas en la troposfera. Se aborda todo lo relacionado con las recomendaciones de la UIT respecto a la atenuación por difracción. También, lo regulado por la UIT sobre los métodos para obtener las pérdidas relacionadas a los gases y vapores atmosféricos, la vegetación y la lluvia. Se hace referencia a la herramienta creada en *MatLab* para la evaluación de las pérdidas bajo diferentes condiciones de propagación. Se realiza una descripción de los diferentes entornos de trabajo y luego, mediante ejemplos, se comprueba el funcionamiento del mismo.

---

## Tabla de contenido

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| PENSAMIENTO .....                                                                       | i   |
| DEDICATORIA .....                                                                       | ii  |
| AGRADECIMIENTOS .....                                                                   | iii |
| TAREA TÉCNICA .....                                                                     | iv  |
| RESUMEN .....                                                                           | v   |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                      | 1   |
| CAPÍTULO 1: USO DE LAS TIC. PROPAGACION DE ONDAS ELECTROMAGNETICAS. LA TROPOSFERA. .... | 4   |
| 1.1 Las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.....                         | 4   |
| 1.1.1 Las TIC en la Educación Superior .....                                            | 6   |
| 1.1.2 Ventajas y Desventajas del uso de las TIC en la Educación Superior .....          | 8   |
| 1.2 Conceptos de ondas electromagnéticas, propagación, atenuación y troposfera.         | 10  |
| 1.2.1 Onda Troposférica .....                                                           | 10  |
| 1.2.3 Propagación .....                                                                 | 11  |
| 1.2.2 Atenuación.....                                                                   | 11  |
| 1.2.4 Temperatura, altura, composición y otras características de la troposfera.....    | 11  |
| 1.3 Propagación por onda troposférica .....                                             | 12  |
| 1.3.1 Efectos de la Troposfera en la propagación.....                                   | 12  |
| 1.4 Índice de refracción .....                                                          | 13  |
| 1.5 Dispersión Troposférica.....                                                        | 16  |
| CAPÍTULO 2: ATENUACION POR ONDAS TROPOSFERICAS.....                                     | 19  |
| 2.1 Introducción del capítulo .....                                                     | 19  |
| 2.2 Ondas Troposféricas en la asignatura Radiopropagación.....                          | 19  |

---

|                                          |                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3                                      | Atenuación por gases y vapores atmosféricos. (UITR-P. 676-10) .....                                                                                              | 20 |
| 2.3.1                                    | Método de Rayas.....                                                                                                                                             | 20 |
| 2.3.2                                    | Método Aproximado .....                                                                                                                                          | 22 |
| 2.3.3                                    | Método Aproximado para El vapor de agua.....                                                                                                                     | 24 |
| 2.4                                      | Atenuación por vegetación (UIT R-P. 833-9).....                                                                                                                  | 25 |
| 2.4.1                                    | Obstrucción en zonas boscosas .....                                                                                                                              | 25 |
| 2.5                                      | Atenuación por lluvia (UIT-R P.838-3).....                                                                                                                       | 28 |
| 2.6                                      | Atenuación por difracción (UIT R- P.526-16) .....                                                                                                                | 29 |
| 2.6.1                                    | Obstáculo Aislado .....                                                                                                                                          | 29 |
| 2.6.2                                    | Obstáculo agudo .....                                                                                                                                            | 30 |
| 2.6.3                                    | Obstáculo redondeado.....                                                                                                                                        | 31 |
| 2.6.4                                    | Difracción sobre tierra esférica.....                                                                                                                            | 33 |
| CAPITULO 3: RESULTADOS Y DISCUSION. .... |                                                                                                                                                                  | 36 |
| 3.1                                      | Introducción del capítulo .....                                                                                                                                  | 36 |
| 3.2                                      | Descripción del Software.....                                                                                                                                    | 36 |
| 3.3                                      | Ejemplos resueltos .....                                                                                                                                         | 38 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....     |                                                                                                                                                                  | 44 |
| Conclusiones: .....                      |                                                                                                                                                                  | 44 |
| Recomendaciones:.....                    |                                                                                                                                                                  | 46 |
| 1.                                       | Continuar en el perfeccionamiento de dicha herramienta con la incorporación de nuevos métodos acordes a condiciones de propagación más diversas y complejas..... | 46 |
| 2.                                       | Aplicar la herramienta de forma inmediata en la asignatura Radiopropagación....                                                                                  | 46 |
| 3.                                       | Perfeccionar los materiales de apoyo y la ayuda de la herramienta para brindar el estudiante toda la información posible sobre la materia que se estudia .....   | 46 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....         |                                                                                                                                                                  | 47 |
| ANEXOS.....                              |                                                                                                                                                                  | 50 |

---

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Anexo 1: Coeficientes para calcular $k$ en polarizaciones horizontal y vertical.....                    | 50 |
| Anexo 2: Coeficientes para calcular $\alpha$ en polarizaciones horizontal y vertical. ....              | 51 |
| Anexo 3: Coeficientes que dependen de la frecuencia para estimar la atenuación debida a la lluvia. .... | 52 |
| Anexo 4: Atenuación específica debido a los gases atmosféricos.....                                     | 56 |
| Anexo 5: Coeficientes espectroscópicos para la atenuación del oxígeno. ....                             | 57 |
| Anexo 6: Coeficientes espectroscópicos para la atenuación del vapor de agua.....                        | 58 |

---

## INTRODUCCIÓN

La posibilidad de comunicarnos con otra persona a través de un teléfono móvil o poder ver una señal de televisión originada al otro lado del mundo, sólo puede ser posible gracias a los satélites, que poseen la capacidad de amplificar las señales radioeléctricas recibidas desde la tierra para luego enviarlas a otro punto muy lejano en el planeta. Sin embargo, muchas veces este proceso se ve perturbado o interrumpido por la influencia de fenómenos atmosféricos como lo son los hidrómetros o lluvia, que hoy en día está comprobado que es uno de los efectos de mayor incidencia negativa en la propagación de las señales, llegando incluso a interrumpir la transmisión.

Los fenómenos atmosféricos como la lluvia, el granizo o la niebla ocurren en la capa baja de la tierra la troposfera.

Entre los efectos que sufren las transmisiones producto de la variación dieléctrica se tienen el índice de refracción, el cual varía a medida que las ondas se propagan en la atmósfera, de acuerdo al aumento gradual de la altura; las variaciones en la temperatura atmosférica, humedad, presión, la dependencia del clima y el estado del tiempo local.

La energía emitida por un radar en una atmósfera despejada es debilitada por la absorción, por el oxígeno y vapor de agua donde las moléculas son absorbidas y se pierden en forma de calor. La niebla, el granizo, las nubes y lluvia, absorben y dispersan también la energía. Por otra parte, la propagación de señales a través de la troposfera es influenciada por diversos componentes gaseosos de la misma (oxígeno y vapor de agua), las nubes y las precipitaciones que en ella ocurren. La influencia de estos elementos depende del clima y la frecuencia.

Los gases y vapores atmosféricos, principalmente el oxígeno y el vapor de agua producen una absorción de la energía electromagnética, lo que se traduce en una atenuación adicional para las ondas. Lo mismo sucede con las precipitaciones, sobre

---

todo la lluvia y, en ciertos casos con las nubes y la niebla. Debido a todos estos efectos que ocurren la troposfera es q tienen lugar la propagación de dichas ondas troposféricas bajo las diferentes condiciones de propagación.

El proceso de las comunicaciones en su tránsito por la troposfera al ser afectada específicamente por la lluvia causa atenuación en la comunicación, es decir, las gotas de agua absorben la energía de la señal disminuyendo su potencia, el rendimiento de la misma y afectando el normal desenvolvimiento de la comunicación.

Los antecedentes referidos con anterioridad, derivan en la necesidad de calcular la atenuación por ondas troposféricas bajo diferentes condiciones de propagación mediante la elaboración de una herramienta de software para apoyar el estudio y aprendizaje de los estudiantes en la asignatura de Radiopropagación. Estas adecuaciones, conducen al autor de este estudio, referir el siguiente **problema científico**: ¿Cómo contribuir al cálculo de la atenuación por propagación troposférica bajo diferentes condiciones de propagación en la asignatura Radiopropagación?

Atendiendo a esta interrogante se plantean el siguiente **objetivo general**:

Estimar la atenuación de la onda troposférica en diferentes condiciones de propagación utilizando las recomendaciones de la UIT.

#### **Objetivos específicos:**

1. Fundamentar la propagación troposférica como tema de la asignatura Radiopropagación.
2. Describir las especificaciones de la UIT para la propagación troposférica bajo diferentes condiciones de propagación.
3. Solucionar ejemplos prácticos de propagación por onda troposférica bajo diferentes condiciones de propagación.

#### **Interrogantes Científicas:**

1. ¿Cuáles son los fundamentos de la propagación troposférica y las pérdidas asociadas dentro de la asignatura Radiopropagación?
2. ¿Qué especificaciones debe cumplir un software que realice, de manera didáctica, el cálculo de la atenuación de la onda troposférica?

---

3. ¿Cómo validar el correcto funcionamiento del software empleado para el cálculo de la atenuación de la onda troposférica?

El informe de la investigación estará conformado por introducción, capitulario, conclusiones, referencias bibliográficas y anexos. En la introducción se dejará definida la importancia, actualidad, y necesidad de la tarea acometida en el trabajo, así como se dejan explícitos los elementos del diseño teórico. En el Capítulo 1 se comenta sobre la importancia de las TIC en el proceso enseñanza-aprendizaje y de las ventajas de su uso, así como los preceptos teóricos de la propagación de ondas electromagnéticas en la troposfera. En el Capítulo 2 hace referencia al diseño estructural y metodológico del tema dentro de la asignatura. Se muestran los métodos de estimación de la atenuación para diferentes condiciones de propagación en la troposfera. El Capítulo 3 se dedicará a la presentación de la herramienta de *software*, así como la validación del mismo mediante ejemplos comprobados en la asignatura Radiopropagación. Las conclusiones muestran un resumen de los resultados obtenidos y están en función del cumplimiento de los objetivos propuestos. Las Recomendaciones conducen a la necesidad del enriquecimiento científico (estudios futuros) que puedan ser derivados de la propuesta realizada. Seguidamente la bibliografía, actualizada y con el rigor requerido para este tipo de trabajo. Culminando el documento con la sesión de anexos que enriquecen el resultado ofrecido.

## **CAPÍTULO 1: USO DE LAS TIC. PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. LA TROPOSFERA.**

En el presente capítulo se aborda de manera precisa los elementos que relacionan la utilización de la TIC en el proceso enseñanza aprendizaje en la Educación Superior Cubana. Además, en el mismo se tratan algunos conceptos referentes a las ondas electromagnéticas, propagación, atenuación. También, son analizados los mecanismos físicos que permiten la propagación de ondas en la troposfera.

### **1.1 Las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones**

Desde los años 90' la Internet pasó de ser un instrumento exclusivo de la comunidad científica, a ser una red de fácil uso; que modificó las pautas de interacción social. Las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) son aquellas herramientas computacionales e informáticas que procesan, almacenan, resumen, recuperan y presentan la información de la más variada forma [1], [2]. Constituyen la palanca principal de transformaciones sin precedentes en el mundo contemporáneo. Ninguna otra tecnología originó tan grandes mutaciones en la sociedad, en la cultura y en la educación. La humanidad viene alterando significativamente los modos de comunicar, entretener, trabajar, socializar y educar, sobre la base de la difusión y uso de las TIC a escala global. Es universalmente reconocido también que las TIC son responsables de aumentos en productividad, anteriormente inimaginables, en los más variados sectores de la actividad empresarial, y de manera destacada en las economías del conocimiento y de la innovación [3].

Estas se convierten en dispositivos facilitadores y articuladores de muchas de las tareas que debe llevar a cabo un profesional del siglo XXI. Un uso estratégico y a la vez crítico

de las TIC, así como del conocimiento, ha de perfilarse como un eje transversal en los proyectos educativos de nuestros días [4].

Las TIC se definen colectivamente como innovaciones en microelectrónica y computación (*hardware* y *software*), telecomunicaciones y optoelectrónica; microprocesadores, semiconductores y fibra óptica. Estas permiten el procesamiento y acumulación de enormes cantidades de información, además de una rápida distribución de la información a través de redes de comunicación [5], [6].

La vinculación de estos dispositivos electrónicos, permite que se comuniquen entre sí, creando sistemas de información en red basados en un protocolo en común [7]. Esto va cambiando radicalmente el acceso a la información y la estructura de la comunicación, extendiendo el alcance de la red a casi todo el mundo. Serían entonces, herramientas que las personas usan para compartir, distribuir y reunir información, y comunicarse entre sí, o en grupos, por medio de las computadoras o las redes de computadoras interconectadas. Se trata de medios que utilizan tanto las telecomunicaciones como las tecnologías de la computación para transmitir información [8]. Ello conforma una serie de nuevos medios que van desde los hipertextos, las multimedia, Internet, la realidad virtual, o la televisión por satélite. Una característica común que las definen es que estas nuevas tecnologías giran de manera interactiva en torno a las telecomunicaciones, la informática y los audiovisuales [9], [10].

La acelerada innovación de estos dispositivos ha incidido en diversos escenarios. Entre ellos destacan: las relaciones sociales, las estructuras organizacionales, los métodos de enseñanza-aprendizaje, las formas de expresión cultural, los modelos negocios, las políticas públicas nacionales e internacionales, la producción científica (I+D), entre otros. En el contexto de las sociedades del conocimiento, estos medios pueden contribuir al desarrollo educativo, laboral, político, económico, al bienestar social, entre otros ámbitos de la vida diaria [11].

En la actualidad, cuando se habla de nuevas tecnologías, lo primero que viene a la mente son las redes informáticas. Ellas permiten la interacción entre los ordenadores ampliando la potencia y funcionalidad que tienen de forma individual. Permiten no sólo procesar información almacenada en soportes físicos, sino también acceder a recursos y servicios prestados por ordenadores situados en lugares remotos. Las nuevas tecnologías

se diferencian de las tradicionales, en las posibilidades de creación de nuevos entornos comunicativos y expresivos que facilitan a los receptores la posibilidad de desarrollar nuevas experiencias formativas, expresivas y educativas [12].

Las TIC hicieron que el aprendizaje se volviera ubicuo. Este puede ocurrir en la escuela, en el trabajo, en casa, por movilidad, es así que el nuevo aprendizaje ocurre en cualquier sitio y en cualquier momento [13]. Las mismas proporcionan una fuente inagotable de información multimedia e interactiva disponible de manera inmediata en el aula, que permite aprovechar didácticamente los materiales realizados por profesores, alumnos y personas ajenas al mundo educativo [14], [15].

### **1.1.1 Las TIC en la Educación Superior**

Se hace evidente que estas nuevas tecnologías, además de, aplicarse en la vida cotidiana son necesarias implantarlas en lugares que ayuden a que el conocimiento adquirido por nuestra sociedad no se pierda. En las instituciones de Educación Superior, especialmente en las de carácter no presencial, el impacto de las nuevas tecnologías de la información y comunicación, en el proceso de enseñanza–aprendizaje, producen “un cambio de paradigma” [16]. Transforman los sistemas educativos, exigiendo nuevos roles y metodologías de enseñanza. La relación entre las TIC y la educación tiene dos vertientes. Por un lado, los ciudadanos se ven abocados a conocer y aprender sobre las TIC. y por otro, las TIC pueden aplicarse al proceso educativo. Ese doble aspecto se refleja en dos expectativas educativas distintas. En una arista están los informáticos, interesados en aprender informática, y en la otra, a los profesores interesados en el uso de la informática para la educación [17].

Las mismas también incrementarían los niveles educativos debido a los cambios que generarían en los procesos y estrategias didácticas-pedagógicas implementadas por los docentes, en la promoción de experiencias de aprendizaje. Las cuales serían más creativas y diversas, y en la posibilidad de propiciar un aprendizaje independiente y permanente de acuerdo con las necesidades de los estudiantes [18].

Existe evidencia de la colaboración entre los distintos países de América Latina para un correcto y aprovechado uso de estas tecnologías en el proceso enseñanza-aprendizaje de las instituciones educativas, para lo cual en el acta de constitución de la Red

Latinoamericana de Portales Educativos (RELPE), los Ministros de Educación de los 17 países acordaron distintivamente:

Constituir la Red Latinoamericana de Portales Educativos. Ello posibilitará establecer acciones para el intercambio de políticas, experiencias y colaboración en el uso de las TIC en el ámbito de la educación [12].

Con la llegada de la era digital, la informatización y la llegada de las computadoras portátiles, como el aporte de las telecomunicaciones en la transformación de la información han evolucionado distintivamente los procesos de la comunicación. Surge la telemática a partir de la fusión de las telecomunicaciones y la informática, con ella los diversos procesos interactivos a distancia: videotextos, videoconferencias, acceso a banco de datos o imágenes, correo electrónico. Con el desarrollo que han alcanzado las tecnologías de la información y las comunicaciones en la actualidad y el impulso que ha dado Internet al intercambio de información entre personas e instituciones a través de todo el mundo. Se han revolucionado también los métodos de enseñanza y aprendizaje y en este contexto ha tenido lugar la renovación y la introducción de nuevos conceptos orientados a hacer más dinámico, más flexible y más creativo el proceso de enseñanza-aprendizaje en las universidades [13].

En este sentido, se destacan los procesos de innovación respecto a la utilización de las TIC en la docencia que suelen partir, la mayoría de las veces, de las disponibilidades y soluciones tecnológicas existentes. Sin embargo, una equilibrada visión del fenómeno lleva a la integración de las innovaciones tecnológicas en el contexto de la tradición de las instituciones [8].

Cada una de las instituciones al integrar las TIC en los procesos de la enseñanza, realiza un análisis del contexto a innovar:

1. **Punto de vista geográfico:** la distribución de la población, la ruptura del territorio en islas como es nuestro caso, las condiciones socio-laborales en las que los alumnos se desenvuelven.
2. **Pedagógico:** nuevos roles de profesor y alumno, mayor abanico de medios de aprendizaje, cambios en las estrategias didáctica.
3. **Tecnológico:** disponibilidad tecnológica de la institución y de los usuarios.

Hay que tener presente que como cualquier innovación educativa se encuentra frente un proceso multidimensionado, pues en él intervienen factores políticos, económicos, ideológicos, culturales y psicológicos y afectos a diferentes niveles contextuales, desde el nivel del aula hasta el del grupo de universidades. El éxito o fracaso de las innovaciones educativas depende, en gran parte, de la forma en que los diferentes actores educativos interpretan, redefinen, filtran y dan forma a los cambios propuestos [11].

### **1.1.2 Ventajas y Desventajas del uso de las TIC en la Educación Superior**

Las experiencias con la que cuentan las instituciones ofrecen razonables expectativas de redoblar en la nueva configuración avanzada del uso de estas tecnologías, abriendo un campo de extraordinarias posibilidades para los modelos de aprendizaje y conocimiento focalizados hasta ahora fundamentalmente en las comunidades de práctica. De hecho ya se están experimentando en la comunidad educativa algunas de las ventajas de su utilización, como son [9], [16], [19]:

- Fomentan el autoaprendizaje y la preparación individual, lo cual contribuye a la transformación de la manera de actuar de los estudiantes para su futura preparación profesional.
- Enriquece el proceso de enseñanza-aprendizaje, debido al acceso a múltiple información.
- Permite la masividad del aprendizaje.
- Prepara al alumno como investigador al asumir el aprendizaje de manera responsable y menos dependiente del profesor.
- Plantean estructuras más abiertas en la cual los alumnos pueden enfatizar individualmente en los módulos de enseñanza que presente mayores dificultades.
- Brinda al profesor la posibilidad de atender y supervisar mayor número de estudiantes.
- Propicia el trabajo colaborativo en la red a través de las facilidades que brinda el correo electrónico, chat, foros de discusión.
- Supone la utilización de un instrumento atractivo y entretenido.
- Proporciona instrumentos para procesar información.
- Permite la autoevaluación de los aprendizajes.

- El estudiante tiene más flexibilidad y autonomía para el estudio.
- Mayor interacción entre estudiantes y profesores a través de las videoconferencias, el correo electrónico e Internet.
- Colaboración mayor entre estudiantes, favoreciendo la aparición de grupos de trabajo y de discusión.
- Incorporación de simuladores virtuales como nueva herramienta de aprendizaje.

En ocasiones, el esfuerzo que alumnos y profesores realizan para entender el manejo del ordenador y seguir las instrucciones que conducen a los textos previstos puede limitar el trabajo de elaboración conceptual, por esto se pueden recalcar en las limitaciones a las cuales se manifiestan al utilizar estas tecnologías [2], [20]:

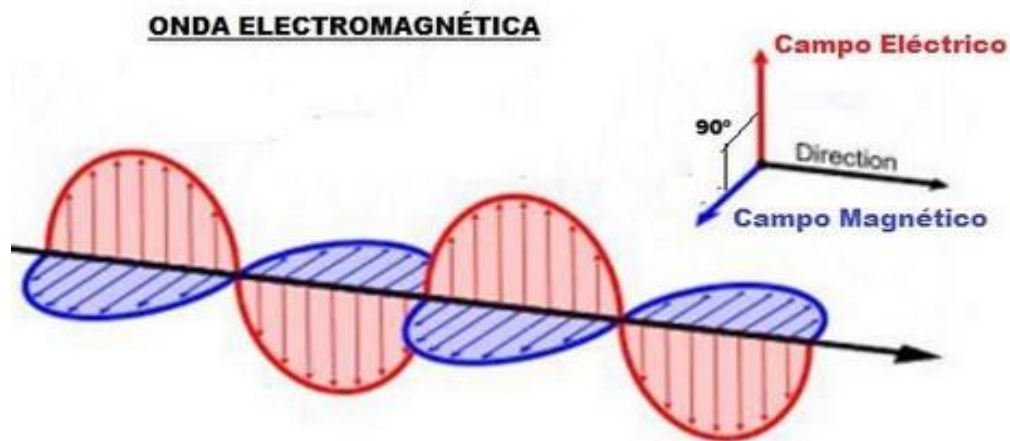
- Distracciones.
- Aprendizaje superficial.
- Proceso educativo poco humano.
- No es completamente inclusivo.
- Puede anular habilidades y capacidad crítica.
- Pérdida de tiempo por el exceso de información disponible.
- Puede traer problemas de sociabilidad, debido al aislamiento que genera su uso.
- Produce cierto cansancio visual.
- Requiere inversión de tiempo.
- Existe peligro de contagio de virus informáticos.
- Falta de privacidad.
- Aislamiento.
- Fraude.
- Merma los puestos de trabajo.

En cualquier caso, comienza a superarse, con estas tecnologías, la utopía de la comunicación humana como exclusiva de la enseñanza presencial. En muchos casos un diálogo mediante ordenadores interconectados en tiempo real o cualquier proceso interactivo pueden proporcionar una comunicación mucho más próxima y cálida [18]. La enseñanza presencial, mantiene la creencia de que el solo contacto visual entre profesor-estudiante proporciona una comunicación didáctica más directa y humana que a través de cualquier sistema de telecomunicaciones. Ni la enseñanza presencial

presupone comunicación efectiva y apoyo al estudiante, ni la enseñanza a distancia deja enteramente todo el proceso de aprendizaje en manos del alumno. El grado más elevado de “distancia” se encuentra cuando una persona estudia sin apoyo alguno.

## 1.2 Conceptos de ondas electromagnéticas, propagación, atenuación y troposfera.

### Ondas electromagnéticas



**Figura1.1.** Ondas electromagnéticas [21].

Las ondas electromagnéticas son aquellas que no necesitan un medio material para propagarse. Incluyen las de luz visible, las ondas de radio, telefonía y móviles. Todas se propagan en el vacío a una velocidad constante de 300000 Km/s. Gracias a ello se puede observar la luz emitida por una estrella lejana [2], [5], [6], [22].

#### 1.2.1 Onda Troposférica

Se considera como troposfera la región de la atmósfera adyacente a la tierra y que se extiende hasta unos diez kilómetros de altura. Es esta región donde se forman las nubes. La temperatura de la troposfera disminuye con la altura al ritmo de unos 6,5°C por kilómetro hasta un valor de unos -50°C como límite superior. Sobre la troposfera está la atmósfera. Puede existir la propagación de ondas más allá de la línea visual dentro de la troposfera debido a distintos mecanismos, que pueden clasificarse como difracción, refracción normal, reflexión y refracción anormal y dispersión troposférica [23]–[25].

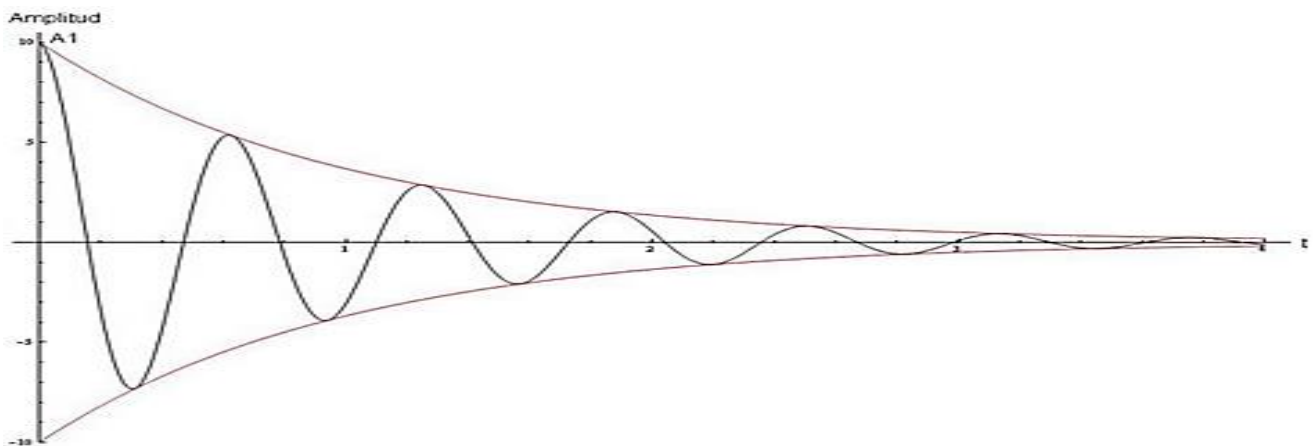
### 1.2.3 Propagación

Las radiocomunicaciones se desarrollan a partir de la propagación de ondas de radio. El comportamiento de estas ondas estará vinculado a las bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico.

El emisor produce una onda portadora que actúa sobre un conductor eléctrico (la antena). El movimiento de la carga eléctrica inducido por la onda en la antena hace que ésta pueda transformar la onda en una señal de audio, video, etc. Así, el receptor capta la onda y la convierte en información que puede ser comprendida por el público [22], [24].

### 1.2.2 Atenuación

En telecomunicación, se denomina atenuación de una señal, sea esta acústica, eléctrica u óptica, a la pérdida de potencia sufrida por la misma al transitar por cualquier medio de transmisión [22], [26]. Por ejemplo, La atenuación del sonido es el reparto de energía de la onda entre un volumen de aire cada vez mayor.



**Figura1.2.** Reducción de amplitud de una señal sinusoidal [27].

### 1.2.4 Temperatura, altura, composición y otras características de la troposfera

- La troposfera se caracteriza por una disminución de su temperatura a medida que aumenta la altura; esto ocurre a razón de 3,5 grados Fahrenheit por cada mil pies, o 6,5 grados Celsius por cada kilómetro). La temperatura en la parte superior de la troposfera es aproximadamente de  $-55^{\circ}\text{C}$  ( $-64^{\circ}\text{F}$ ).

- El aire de la troposfera también se vuelve menos denso (más “delgado”) a medida que se incrementa la altura. Esta es la causa por la que los alpinistas suelen usar oxígeno embotellado para respirar.
- La troposfera tiene entre 5 y 9 millas (8 y 14 kilómetros) de espesor, dependiendo del lugar en la Tierra. Es más delgada en el Polo Norte y en el Polo Sur.
- El aire en esta capa está compuesto por un 78% de nitrógeno y un 21% de oxígeno. El 1% restante está compuesto de argón, vapor de agua y dióxido de carbono.
- La parte inferior de la troposfera, es decir la zona más cercana a la superficie de la Tierra, se denomina “capa límite”.
- El aire es más denso en la troposfera que en las otras capas atmosféricas. De hecho, la troposfera representa el 80% de la masa de toda la atmósfera [22], [24].

### **1.3 Propagación por onda troposférica**

#### **1.3.1 Efectos de la Troposfera en la propagación**

La Troposfera es una región de la atmósfera que se extiende desde la superficie terrestre hasta una altura de 8 a 10 Km. en las latitudes polares, de 10 a 12 km en las latitudes moderadas y de 16 a 18 km en el Ecuador. La propiedad más importante de la troposfera es que su temperatura decrece con la altura. El promedio de variación vertical de la temperatura es de 6 grados por Km [22].

- Para frecuencias superiores a unos 30 MHz, dejan de ser utilizables los modelos de propagación por onda de superficie y onda ionosférica. Las radiocomunicaciones se efectúan a través de las capas bajas de la atmósfera terrestre, en la región denominada troposfera, entre antenas elevadas varias longitudes de ondas sobre el suelo. Es necesario conocer la trayectoria de la onda en estos casos y sobre todo su posición relativa respecto de los accidentes del terreno, puesto que estos pueden interceptar el rayo, produciendo una atenuación importante.
- También pueden producirse modos de propagación por trayectos múltiples como consecuencia de la reflexión de las ondas en el suelo o en las fronteras de separación entre capas de una atmósfera estratificada. Este fenómeno puede degenerar en la

formación de conductos troposférico. Una onda encerrada en un conducto puede tener un alcance superior al previsto, con la posibilidad de producir interferencias.

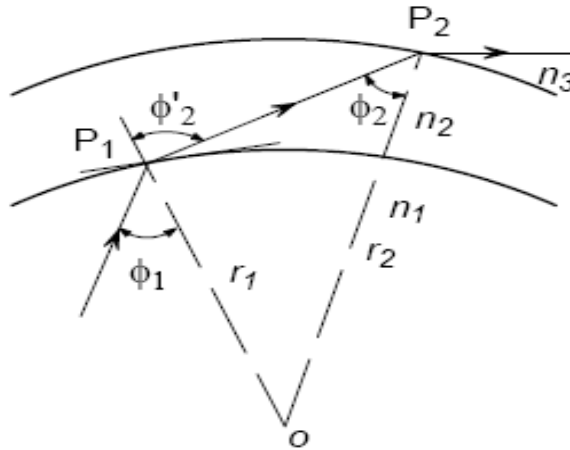
- Las ondas que viajan por la troposfera experimentan una refracción a causa de la no uniformidad de las capas atmosféricas, que se manifiesta como una variación del índice de refracción con la altura. Como consecuencia de la refracción, la trayectoria del rayo es curvilínea, lo cual, en radioenlaces terrenales, puede influir sobre el efecto de los obstáculos del terreno y en los radioenlaces espaciales afecta la puntería de la antena hacia el satélite.
- Los gases y vapores atmosféricos, principalmente el oxígeno y el vapor de agua, producen una absorción de la energía electromagnética, lo que se traduce en una atenuación adicional para las señales. Este efecto se manifiesta por encima de unos 10 GHz. Lo mismo sucede con las precipitaciones, sobre todo la lluvia y en ciertos casos, con las nubes y niebla.
- Las absorciones atmosféricas y por lluvia producen, además, un aumento en la temperatura de ruido de la antena receptora y una despolarización de la señal. Por último, también tiene lugar en la troposfera efectos de dispersión, de forma que «iluminando» una zona de la troposfera con una radiación potente puede aprovecharse componentes de dispersión para constituir un enlace de radio. Evidentemente, la dispersión produce también trayectos interferentes.
- Las radiocomunicaciones por la troposfera tienen un alcance del orden de la distancia de visión entre las antenas. Más allá de esta distancia, llamada horizonte óptico, pueden lograrse enlaces, pero con pérdidas adicionales por difracción. Si la distancia es aún mayor, todavía es posible la comunicación utilizando la dispersión troposférica. No obstante, deben tenerse en cuenta en los estudios de interferencia. Como el mecanismo básico regulador de la propagación troposférica es la refracción, se comenzará a estudiar a partir del índice de refracción [22], [25].

#### **1.4 Índice de refracción**

El comportamiento de un rayo, asociado a una onda electromagnética que viaja a través de la atmósfera, está determinado por el índice de refracción que, por definición es la raíz cuadrada de la constante dieléctrica. Si la atmósfera es isotrópica y homogénea, el

índice de refracción es constante y el rayo seguirá una trayectoria rectilínea. Si el índice de refracción varía, el rayo será refractado y seguirá una trayectoria quebrada o curva.

El efecto de esta situación se ilustra esquemáticamente en la figura 1.3. Para el caso de refracción de una onda electromagnética que incide de una capa con índice de refracción  $n_1$  sobre una segunda capa superior de índice  $n_2$  y finalmente sobre una tercera capa de índice  $n_3$  [28].



**Figura1.3.** Refracción atmosférica [28].

Si se asume a la atmósfera como una mezcla de gases perfectos, el exceso en el índice de refracción, respecto al índice en el espacio libre, será proporcional a su masa volumétrica y puede expresarse mediante la relación siguiente [22], [28]:

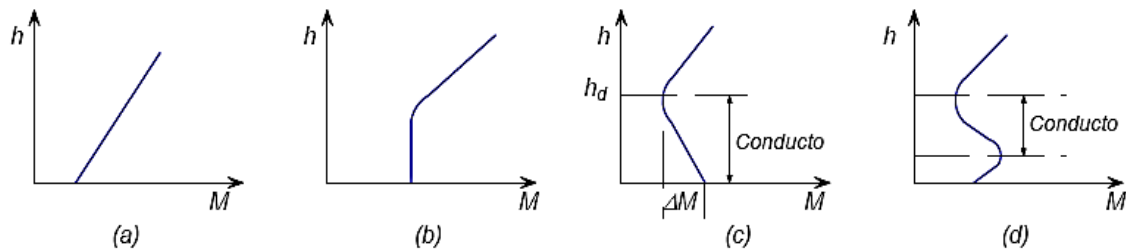
$$\Delta n = n - 1 = A \frac{p}{T} \quad (1.1)$$

Donde  $n$  es el índice de refracción,  $A$  es una constante,  $p$  la presión y  $T$  la temperatura en kelvin. El valor de  $\Delta n$  es generalmente muy pequeño y en los estudios de propagación se define un índice de refracción modificado, expresado como [22], [28]:

$$M = \left( n - 1 + \frac{h}{r_T} \right) \times 10^6 \quad (1.2)$$

Donde  $n$  es el índice de refracción,  $h$  la altura sobre la superficie terrestre en metros y el radio terrestre equivale a  $6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$ . El aspecto importante de la definición anterior para los estudios de propagación es el comportamiento del gradiente de  $M$  con la altura,  $dM/dh$ . Cuando  $n$  es constante, es decir, no depende de la altura, como ocurre a altitudes grandes,  $M$  aumenta 0,1575 unidades por metro. Sin embargo, cerca de la superficie de

la tierra, la constante dieléctrica decrece generalmente con la altura y, por consecuencia, el valor de  $M$  cerca de la superficie aumenta linealmente con un gradiente menor de 0,1575 unidades/m. En condiciones típicas, el valor de  $dM/dh$  se aproxima a 0,1181 unidades/m, esta condición se designa como atmósfera estándar y se ilustra en la figura 1.4.

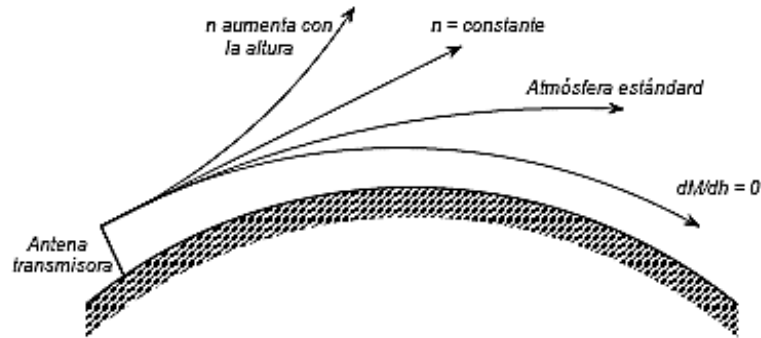


**Figura1.4.** Variación del índice de refracción modificado,  $M$ , en función de la altura [28].

Cuando las masas de aire forman capas que difieren en temperatura y contenido de vapor de agua,  $M$  no varía linealmente y se dan algunas situaciones como las ilustradas en la figura 1.4, Para altitudes grandes el gradiente de  $M$  tiende a alcanzar el valor estable de 0,1575 unidades/m.

Las variaciones en el índice de refracción hacen que los rayos no sigan trayectorias rectilíneas, sino curvas, alejándose de las regiones de baja constante dieléctrica hacia regiones de mayor permitividad, siguiendo la ley de Snell. Cuando las condiciones atmosféricas son las de la atmósfera estándar, la trayectoria de las ondas se curva, es decir, se refracta ligeramente. Esta condición corresponde a la figura 1.4(b) y se ilustra en la figura 1.5. Cuando el gradiente de  $M$  es cero, es decir que  $M$  no cambia con la altura, la curvatura del rayo es la misma que la de la tierra [22], [23], [28].

De hecho, la definición del índice de refracción modificado se ha elegido para tener este resultado. Por otra parte, si el índice de refracción aumenta con la altura se da la situación que el rayo se curva hacia arriba, desviándose de la superficie terrestre.



**Figura1.5.** Efectos de la variación del índice de refracción en los trayectos de propagación [22].

En el estudio del comportamiento de la onda de espacio ilustrado en la figura 1.5 es conveniente modificar las coordenadas de forma tal que las trayectorias de los rayos sean líneas rectas en lugar de curvas. Esto se consigue modificando el radio de la tierra de forma que se obtenga ese resultado y da lugar al concepto de radio equivalente de la tierra, que se define mediante la relación [22], [23], [25]:

$$K = \frac{\text{radio equivalente}}{6370\text{Km}} = \frac{0.1575}{dM/dh} \quad (1.3)$$

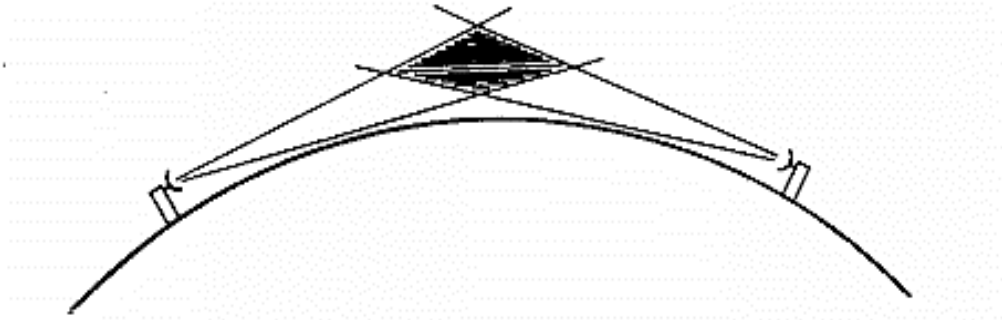
Para atmósfera estándar, en que  $dM/dh = 0,1181$  el radio es  $4/3 = 1,333$  veces el radio real de la tierra. Para el caso en que  $dM/dh = 0$  el radio equivalente es infinito, lo que significa que la tierra se comporta como si fuera plana [22], [23], [28].

### 1.5 Dispersión Troposférica

La propagación de las ondas radioeléctricas por dispersión, es consecuencia de irregularidades y discontinuidades en las propiedades físicas de troposfera. Las condiciones de propagación de estas ondas presentan una gran dependencia de la temperatura y humedad del aire contenido en la troposfera. Como estos valores no son constantes en ninguna zona, la propagación será irregular en esta capa atmosférica. Basta observar cualquier mapa meteorológico para darse cuenta de que la temperatura va disminuyendo con arreglo a la altura, cuanto más lejos estamos de la superficie más frío está el aire, y, por otro lado, las fotografías desde los satélites muestran una diferente localización de las nubes en cada momento del día y en cada punto del globo.

La dispersión troposférica es otra clase más del alargamiento de la propagación troposférica. El mecanismo que la produce parece ser la dispersión y las reflexiones

entre las inhomogeneidades del índice de refracción en la atmosfera, dentro del volumen común de la troposfera ocupado por los haces transmisor y receptor [22], [24].



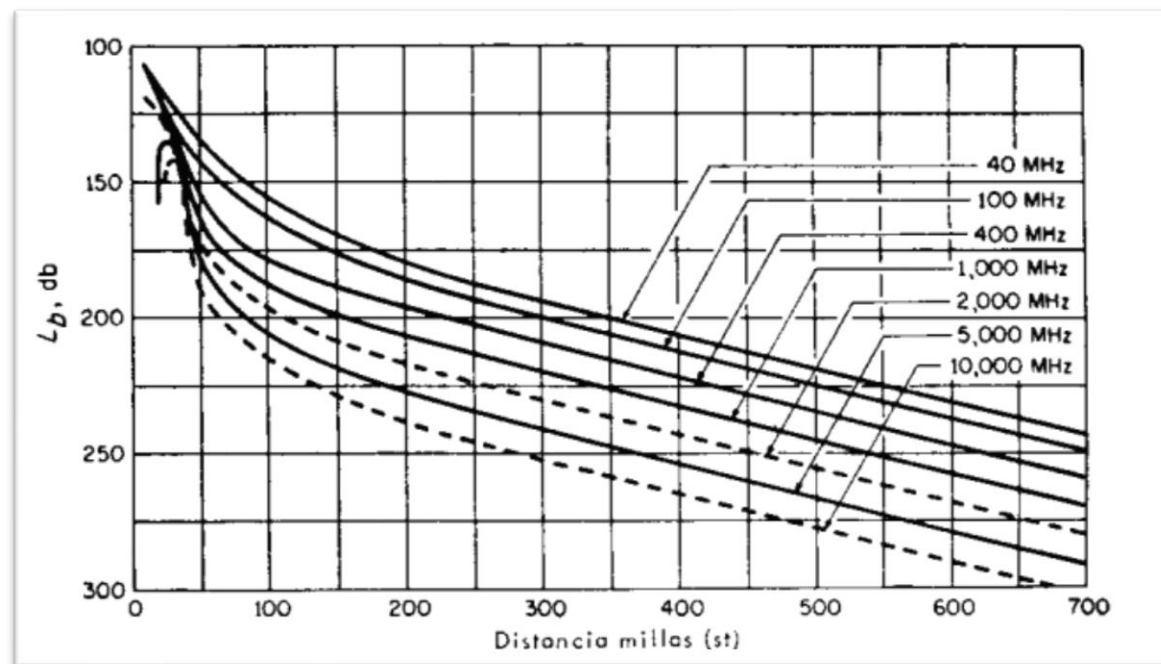
**Figura1.6.** Dispersión en el volumen común de los haces del transmisor y el receptor [29].

En distintas teorías que se han desarrollado sobre la dispersión, la señal recibida se atribuye a una dispersión en anillos de la atmosfera debidos a su turbulencia, o inversamente a reflexiones no correlacionadas entre las distintas capas de la extensión limitada y aspecto arbitrario. Las medidas han mostrado q las variaciones relativamente bruscas de la constante dieléctrica efectiva aparecen tanto en planos horizontales como verticales [22], [23].

Los resultados obtenidos en la transmisión más allá del horizonte pueden resumirse como se muestra a continuación.

- Más allá del horizonte la potencia recibida disminuye según la séptima u octava potencia de la distancia. El nivel de las señales tiene variaciones estacionales de  $\pm 10$  dB que parecen ser proporcionales a variaciones de  $k$ , factor efectivo del radio terrestre. Además, hay un rápido desvanecimiento que es esencialmente aleatorio, y cumple la distribución de *Rayleigh*.
- Se necesitan antenas de gran ganancia, pero cuando el diámetro de la antena es mayor que un 50%, las antenas dejan de tener plena ganancia por la incoherencia de las ondas a través de su apertura. La recepción por diversidad es casi esencial y requiere antenas separadas por lo menos  $100\lambda$ .

En la figura 1.7 se observa, en función de la distancia, las pérdidas estimadas básicas medias de transmisión.



**Figura 1.7.** Pérdidas de transmisión para ondas de tierra y de dispersión troposférica [24].

## **CAPÍTULO 2: ATENUACION POR ONDAS TROPOSFERICAS**

### **2.1 Introducción del capítulo**

En el presente capítulo se aborda todo lo relacionado con las recomendaciones de la UIT respecto a la atenuación por difracción. También, lo regulado por la UIT sobre los métodos para obtener las pérdidas relacionadas a los gases y vapores atmosféricos, la vegetación y la lluvia.

### **2.2 Ondas Troposféricas en la asignatura Radiopropagación**

La asignatura Radiopropagación está conformada por 4 temas fundamentales. El primero de ellos está dedicado a realizar una introducción a la asignatura brindando elementos matemáticos para la comprensión de los fenómenos de propagación menos complejos. El segundo de los temas se dedica a conocer los modelos de propagación, más sencillos, basados en la óptica geométrica del rayo. Se toman en consideración los modelos de Tierra Plana y Tierra Esférica. El tema 3, el más extenso de la asignatura, se dedica a describir los fenómenos de propagación que ocurren en la troposfera. Allí se abordan temáticas como el efecto del índice de refracción en la propagación de ondas electromagnéticas, las zonas de Fresnel, la difracción sobre obstáculo aislado y sobre tierra esférica. Además, se aborda el efecto sobre la amplitud de las ondas electromagnéticas, de los gases y vapores atmosféricos, la lluvia y la vegetación. Para ello se brindan herramientas matemáticas de alta complejidad expuestas en las regulaciones de la UIT. El tema 4 se dedica a la propagación por onda Ionosférica y describir los diferentes mecanismos de propagación que suceden para esta modalidad.

Dada la complejidad de los métodos matemáticos que se abordan en el tema # 3 es necesario dotar a los estudiantes que cursan la asignatura de una herramienta de

software sencilla, pero a su vez rigurosa, que les permita comprender los fenómenos asociados a la propagación por onda troposférica.

### **2.3 Atenuación por gases y vapores atmosféricos. (UITR-P. 676-10)**

La presente Recomendación define métodos para evaluar la atenuación causada por los gases atmosféricos en trayectos terrenales y oblicuos mediante una estimación de la atenuación causada por los gases, cuyo cálculo se efectúa sumando las rayas de absorción individuales, que es válida para la gama de frecuencias 1-1000 GHz y un método aproximado simplificado para evaluar la atenuación debida a los gases aplicable en la gama de frecuencias 1-350 GHz.

#### **2.3.1 Método de Rayas**

La atenuación específica en frecuencias de hasta 1 000 GHz debida al aire seco y al vapor de agua puede evaluarse con gran exactitud para cualquier valor de presión, temperatura y humedad. Para ello se suman cada una de las rayas de resonancia debidas al oxígeno y al vapor de agua, junto con los pequeños factores adicionales debidos al espectro de oxígeno no resonante de *Debye*, por debajo de 10 GHz, así como a la atenuación inducida por la presión del nitrógeno por encima de 100 GHz y al contenido de humedad por el exceso de absorción de vapor de agua, determinado de manera experimental [30].

En las proximidades de los 60 GHz muchas rayas de absorción del oxígeno se fusionan, a presiones correspondientes al nivel del mar, para formar una sola banda ancha de absorción. Se muestra asimismo la atenuación debida al oxígeno en alturas superiores, con las rayas individuales obtenidas a presiones inferiores. Algunas especies moleculares adicionales (por ejemplo, especie isotópica del oxígeno, especie del oxígeno estimulada por vibración, ozono, especie isotópica del ozono, especie del ozono estimulada por vibración y otras especies menores) no se incluyen en el método de predicción raya a raya. Dichas rayas adicionales resultan insignificantes para atmósferas típicas, pero pueden resultar importantes para una atmósfera de aire seco.

La atenuación específica causada por los gases,  $\gamma$ , viene dada por la fórmula [30]:

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_w = 0,1820 \cdot f \cdot N''(f) \text{ [dB/Km]} \quad (2.1)$$

Donde  $\gamma_0$  y  $\gamma_w$  son las atenuaciones específicas (dB/km) debidas al aire seco (atenuación causada por el oxígeno, atenuación del nitrógeno inducida por presión y la atenuación no resonante de *Debye*) y el vapor de agua, respectivamente y donde  $f$  es la frecuencia (GHz) y  $N''$  ( $f$  es la parte imaginaria del valor complejo de la refractividad, que depende de la frecuencia [30]:

$$N''(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f) \quad (2.2)$$

Si es el valor de la  $i$ -ésima raya,  $F_i$  es el factor de forma de raya y la suma se extiende a todas las rayas (para frecuencias,  $f$ , por encima de la raya de oxígeno de 118,750343 GHz, sólo deben incluirse en la suma las rayas de oxígeno por encima de 60 GHz); la suma debe empezar en  $i = 38$  vez de  $i = 1$ ;  $N''_D(f)$  es el espectro continuo de aire seco debido a la absorción del nitrógeno inducida por presión y al espectro de *Debye*.

El valor de la raya viene dado por [30]:

$$S_i = a_1 \cdot 10^{-7} \cdot p \cdot \theta^3 \cdot e^{[a_2(1-\theta)]} \quad \text{Para el oxígeno} \quad (2.3)$$

$$S_i = b_1 \cdot 10^{-1} \cdot e \cdot \theta^{3,5} \cdot e^{[b_2(1-\theta)]} \quad \text{Para el vapor de agua} \quad (2.4)$$

$p$ : presión de aire seco (hPa).

$e$ : Presión parcial del vapor de agua (hPa). La presión barométrica total es

$$p_{tot} = p + e$$

$\theta$ :  $300/T$

$T$ : Temperatura (K)

Se deben utilizar valores locales de los perfiles de  $p$ ,  $e$  y  $T$  medidos (por ejemplo, mediante radiosondas); no obstante, en ausencia de información local conviene utilizar el modelo de atmósferas de referencia descrito en [31]. (Obsérvese que cuando se calcula la atenuación atmosférica total, se emplea la misma presión parcial del vapor de agua para calcular las atenuaciones debidas al aire seco y al vapor de agua.)

La presión parcial del vapor de agua,  $e$ , puede obtenerse a partir de la densidad de vapor de agua utilizando la expresión [28]:

$$e = \frac{\rho \cdot T}{216,7} \quad (2.5)$$

El factor de forma de raya viene dado por [30]:

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[ \frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (2.6)$$

Donde  $f_i$  es la raya del oxígeno y el vapor de agua y  $\Delta f$  es la anchura de la raya.

$$\Delta f = a_3 \cdot 10^{-4} (p \cdot \theta^{(0,8-a_4)} + 1,1 \cdot e \cdot \theta) \quad \text{Para el oxígeno} \quad (2.7)$$

$$\Delta f = b_3 \cdot 10^{-4} (p \cdot \theta^{(b_4)} + b_5 \cdot e \cdot \theta^{b_6}) \quad \text{Para el vapor de agua} \quad (2.8)$$

La anchura de la raya  $\Delta f$  se modifica para tener en cuenta la separación de *Zeeman* de las rayas del oxígeno y el ensanchamiento debido al efecto *Doppler* de las rayas del vapor de agua [30]:

$$\Delta f^* = \sqrt{\Delta f^2 + 2,25 \cdot 10^{-6}} \quad \text{Para el oxígeno} \quad (2.9)$$

$$\Delta f^* = 0,535 \Delta f + \sqrt{0,217 \cdot \Delta f^2 + \frac{2,1316 \cdot 10^{-12} \cdot f_i^2}{\theta}} \quad \text{Para el vapor de agua} \quad (2.10)$$

El factor de corrección para tener en cuenta los efectos de interferencia en las rayas del oxígeno se obtiene como sigue [30]:

$$\delta = (a_5 + a_6 \cdot \theta) \cdot 10^{-4} \cdot (p + e) \cdot \theta^{0,8} \quad \text{Para el oxígeno} \quad (2.11)$$

$$\delta = 0 \quad \text{Para el vapor de agua} \quad (2.12)$$

Contenido espectral de aire seco [30]:

$$N''_D = f \cdot p \cdot \theta^2 \left[ \frac{6,14 \cdot 10^{-5}}{d \left[ 1 + \left( \frac{f}{d} \right)^2 \right]} + \frac{1,4 \cdot 10^{-12} \cdot p \cdot \theta^{1,5}}{1 + (1,9 \cdot 10^{-5} \cdot f^{1,5})} \right] \quad (2.13)$$

Donde  $d$  es el parámetro de ancho de banda del espectro de *Debye* [30]:

$$d = 5,6 \cdot 10^{-4} (p + e) \cdot \theta^{0,8} \quad (2.14)$$

### 2.3.2 Método Aproximado

Las atenuaciones específicas debidas al aire seco y al vapor de agua, y consideradas a partir del nivel del mar hasta una altura de 10 km, pueden estimarse utilizando los siguientes algoritmos simplificados, que se basan en la adaptación de curvas al cálculo

de raya por raya, y permiten los cálculos más exactos dentro de una media del 10% para frecuencias desplazadas de los centros con más rayas de absorción. La diferencia absoluta entre los resultados obtenidos con estos algoritmos y con el cálculo raya por raya es generalmente menor de 0,1 dB/Km y alcanza un máximo de 0,7 dB/Km cerca de los 60 GHz.

Para alturas superiores a 10 Km, y en los casos en que se necesita una mayor precisión, se deberá utilizar el cálculo raya por raya [30].

En el caso de aire seco, la atenuación  $\gamma_o$  (dB/Km) viene dada por las siguientes ecuaciones:

Para  $f \leq 54$  GHz [30]:

$$\gamma_o = \left[ \frac{7,2 \cdot r_t^{2,8}}{f^2 + (0,34 \cdot r_p^2 \cdot r_t^{1,6})} + \frac{0,62 \cdot \xi_3}{(54-f)^{1,16} \cdot \xi_1 + 0,83 \xi_2} \right] \cdot f^2 \cdot r_p^2 \cdot 10^{-3} \quad (2.15)$$

$$54 \text{ GHz} < f \leq 60 \text{ GHz:} \quad (2.16)$$

$$\gamma_o = e^{\left[ \frac{\ln \gamma_{54}}{24} (f-58)(f-60) - \frac{\ln \gamma_{58}}{8} (f-54)(f-60) + \frac{\ln \gamma_{60}}{12} (f-54)(f-58) \right]} \quad (2.17)$$

$$60 \text{ GHz} < f \leq 62 \text{ GHz:} \quad (2.18)$$

$$\gamma_o = \gamma_{60} + (\gamma_{62} - \gamma_{60}) \frac{f-60}{2} \quad (2.19)$$

$$62 \text{ GHz} < f \leq 66 \text{ GHz:} \quad (2.20)$$

$$\gamma_o = e^{\left[ \frac{\ln \gamma_{62}}{8} (f-64)(f-66) - \frac{\ln \gamma_{64}}{4} (f-62)(f-66) + \frac{\ln \gamma_{66}}{8} (f-62)(f-64) \right]} \quad (2.21)$$

$$66 \text{ GHz} < f \leq 120 \text{ GHz:} \quad (2.22)$$

$$\gamma_o = \left\{ 3,02 \cdot 10^{-4} r_t^{3,5} + \frac{0,283 \cdot r_t^{3,8}}{(f-118,75)^2 + 2,91 r_p^2 r_t^{1,6}} + \frac{0,502 \xi_6 [1 - 0,0163 \xi_7 (f-66)]}{(f-66)^{1,4346} \xi_4 + 1,15 \xi_5} \right\} \quad (2.23)$$

$$120 \text{ GHz} < f \leq 350 \text{ GHz:} \quad (2.24)$$

$$\gamma_o = \left[ \frac{3,02 \cdot 10^{-4}}{1 + (1,9 \cdot 10^{-5} \cdot f^{1,5})} + \frac{0,283 \cdot r_t^{0,3}}{(f-118,75)^2 + 2,91 r_p^2 r_t^{1,6}} \right] \cdot f^2 \cdot r_p^2 \cdot r_t^{3,5} \cdot 10^{-3} + \delta \quad (2.25)$$

Siendo [30]:

$$\xi_1 = \varphi(r_p; r_t; 0,0717; -1,8132; 0,0156; -1,6515) \quad (2.26)$$

$$\xi_2 = \varphi(r_p; r_t; 0,5146; -4,6368; -0,1921; -5,7416) \quad (2.27)$$

$$\xi_3 = \varphi(r_p; r_t; 0,3414; -6,5851; 0,2130; -8,5854) \quad (2.28)$$

$$\xi_4 = \varphi(r_p; r_t; -0,0112; 0,0092; -0,1033; -0,0009) \quad (2.29)$$

$$\xi_5 = \varphi(r_p; r_t; 0,2705; -27192; -0,3016; -4,1033) \quad (2.30)$$

$$\xi_6 = \varphi(r_p; r_t; 0,2445; -5,9191; 0,0422; -8,0719) \quad (2.31)$$

$$\xi_7 = \varphi(r_p; r_t; -0,1833; 6,5589; -0,2402; 6,131) \quad (2.32)$$

Siendo [30]:

$$\gamma_{54} = 2,192\varphi(r_p; r_t; 1,8286; -1,9487; 0,4051; -2,8509) \quad (2.33)$$

$$\gamma_{58} = 12,59\varphi(r_p; r_t; 1,0045; 3,5610; 0,1588; 1,2834) \quad (2.34)$$

$$\gamma_{60} = 15\varphi(r_p; r_t; 0,9003; 4,1335; 0,0427; 1,6088) \quad (2.35)$$

$$\gamma_{62} = 14,28\varphi(r_p; r_t; 0,9886; 3,4176; 0,1827; 1,3429) \quad (2.36)$$

$$\gamma_{64} = 6,819\varphi(r_p; r_t; 1,4320; 0,6258; 0,3177; -0,5914) \quad (2.37)$$

$$\gamma_{66} = 1,9008\varphi(r_p; r_t; 2,0717; -4,1404; 0,4910; -4,8718) \quad (2.38)$$

$$\delta = -000306\varphi(r_p; r_t; 3,211; -14,94; 1,583; -16,37) \quad (2.39)$$

$$\varphi(r_p; r_t; a; b; c; d) = r_p^a r_t^b \cdot e^{[c(1-r_p)+d(1-r_t)]} \quad (2.40)$$

### 2.3.3 Método Aproximado para El vapor de agua.

Para el vapor de agua,  $\gamma_w$  (dB/Km) esta dada por [30]:

$$\begin{aligned} \gamma_w = & \left\{ \frac{3,98\eta_1 e^{[2,23(1-r_t)]}}{(f-22,235)^2 + 9,42\eta_1^2} g(f, 22) + \frac{11,96\eta_1 e^{[0,7(1-r_t)]}}{(f-183,31)^2 + 11,14\eta_1^2} + \right. \\ & \frac{0,081\eta_1 e^{[6,44(1-r_t)]}}{(f-321,226)^2 + 6,29\eta_1^2} + \frac{3,66\eta_1 e^{[1,6(1-r_t)]}}{(f-325,153)^2 + 9,22\eta_1^2} + \frac{25,37\eta_1 e^{[1,09(1-r_t)]}}{(f-380)^2} + \\ & \frac{17,4\eta_1 e^{[1,46(1-r_t)]}}{(f-448)^2} + \frac{844,6\eta_1 e^{[0,17(1-r_t)]}}{(f-557)^2} g(f, 557) + \frac{290\eta_1 e^{[0,41(1-r_t)]}}{(f-752)^2} g(f, 752) + \\ & \left. \frac{8,3328 \times 10^4 \eta_2 e^{[0,99(1-r_t)]}}{(f-1780)^2} g(f, 1780) \right\} f^2 r_t^{2,5} \rho \times 10^4 \quad (2.41) \end{aligned}$$

## 2.4 Atenuación por vegetación (UIT R-P. 833-9)

En esta recomendación se presentan varios modelos que permitirán al lector evaluar el efecto de la vegetación en las señales de ondas radioeléctricas. Se presentan 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. La Recomendación contiene también datos medidos de la dinámica del desvanecimiento debido a la vegetación y características de la dispersión del retardo. En ciertos casos, la atenuación debida a la vegetación puede ser importante, tanto para los sistemas terrenales como para los sistemas Tierra-Espacio. Pero la gran diversidad de las condiciones y tipos de follaje dificultan la celebración de un procedimiento de predicción general. Además, existe una falta de datos experimentales convenientemente verificados [32].

### 2.4.1 Obstrucción en zonas boscosas

#### Trayecto terrenal con un terminal en zona boscosa

Para un trayecto radioeléctrico terrenal, uno de cuyos terminales está situado en un bosque o en una zona similar de vegetación extensa, la pérdida adicional debida a la vegetación puede describirse en base a dos parámetros:

- 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.

A continuación, se muestra el transmisor que 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 viene dada por [32]:

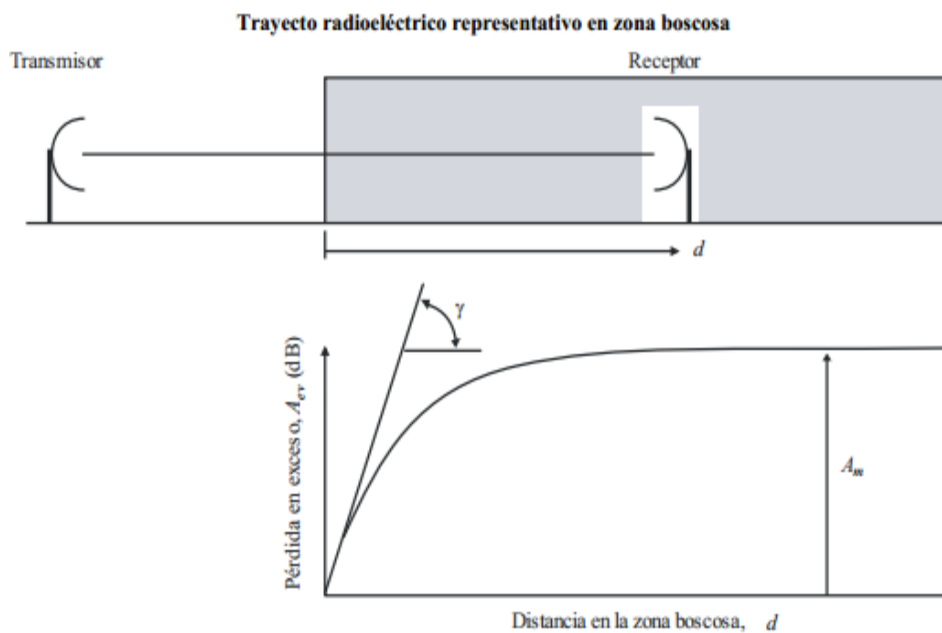
$$A_{ev} = A_m \cdot \left[ 1 - e^{-\left(\frac{d \cdot \gamma}{A_m}\right)} \right] \quad (2.42)$$

Donde:

$d$ : Longitud del Trayecto.

$\gamma$ : Atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos.

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

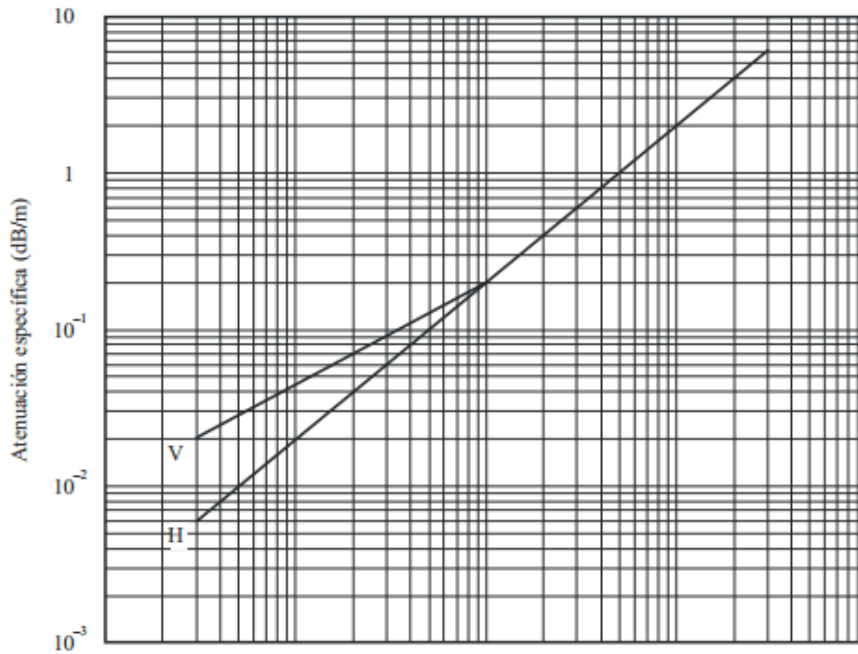


**Figura 2.1** Radioenlace representativo en zona boscosa [32].

Es importante observar que, en la definición de exceso de atenuación,  $A_{ev}$ , se incluye el exceso debido a todos los demás mecanismos, y no sólo la pérdida en espacio abierto. Por consiguiente, si la geometría del trayecto radioeléctrico de la figura. 2.1 fuese de tal forma que el despejamiento total de Fresnel del terreno no existiera,  $A_{ev}$  sería el exceso de atenuación producido tanto en espacio abierto como por la pérdida por difracción. De igual forma, si la frecuencia fuera suficientemente alta como para que la absorción gaseosa resultara significativa,  $A_{ev}$  sería también el exceso producido por la absorción gaseosa. Debe observarse asimismo que,  $A_m$ , es equivalente a la pérdida por ocupación del suelo observada frecuentemente en el caso de terminales obstruidos por alguna forma de cobertura del terreno u ocupación del suelo.

El valor de la atenuación específica debida a la vegetación,  $\gamma$  dB/m, depende de la especie y la densidad de dicha vegetación. En la figura. 2.2 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 [32].



**Figura 2.2.** Atenuación específica para una zona boscosa [32].

A frecuencias del orden de 1 GHz, la atenuación específica en zonas de árboles con hojas es normalmente un 20% superior (dB/m) que en las zonas de árboles sin hojas. También puede haber variaciones de la atenuación debido al movimiento del follaje, por ejemplo, a causa del viento.

El valor de la atenuación máxima,  $A_m$ , limitada por la dispersión de la onda de superficie, depende del tipo y la densidad de la vegetación, así como del diagrama de radiación de la antena del terminal que se encuentra dentro de la vegetación y de la distancia en vertical entre la antena y el punto más alto de la vegetación.

El valor de la atenuación máxima,  $A_m$ , limitada por la dispersión de la onda de superficie, depende del tipo y la densidad de la vegetación, así como del diagrama de radiación de la antena del terminal que se encuentra dentro de la vegetación y de la distancia en vertical entre la antena y el punto más alto de la vegetación [32].

$$A_m = A_1 \cdot f^\alpha \quad (2.43)$$

Donde  $f$  es la frecuencia (MHz)

### 2.5 Atenuación por lluvia (UIT-R P.838-3)

La atenuación específica  $\gamma_R$  (dB/Km) se obtiene a partir de la intensidad de la lluvia  $R$  (mm/h) mediante la ley potencial [33]:

$$\gamma_R = K \cdot R^\alpha \quad (2.44)$$

Los valores de los coeficientes  $k$  y  $\alpha$  se determinan en función de la frecuencia,  $f$  (GHz), en la gama de 1 a 1 000 GHz, a partir de las ecuaciones siguientes, que se han obtenido mediante el ajuste de curvas a los coeficientes de la ley potencial derivados de cálculos de dispersión [33].

$$\log_{10} K = \sum_{j=1}^4 a_j \cdot e^{\left[ -\left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right]} + m_k \cdot \log_{10} f + c_k \quad (2.45)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \cdot e^{\left[ -\left( \frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right]} + m_\alpha \cdot \log_{10} f + c_\alpha \quad (2.46)$$

Dónde:

$f$ : frecuencia (GHz)

$k$ : puede ser  $k_H$  o  $k_V$ .

$\alpha$ : puede ser  $\alpha_H$  o  $\alpha_V$ .

Para la polarización lineal y circular, y para cualquier geometría del trayecto, los coeficientes de la ecuación (2.44) pueden calcularse mediante los valores de las ecuaciones (2.45) y (2.46) utilizando las ecuaciones siguientes [33]:

$$k = \left[ \frac{k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau}{2k} \right] \quad (2.47)$$

$$\alpha = \left[ \frac{k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cdot \cos 2\tau}{2k} \right] \quad (2.48)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de elevación del trayecto y  $\tau$  es el ángulo de inclinación de la polarización con respecto a la horizontal ( $\theta = 45^\circ$  para la polarización circular).

## **2.6 Atenuación por difracción (UIT R- P.526-16)**

La presente Recomendación presenta varios modelos para que el lector evalúe el efecto de la difracción en la intensidad de campo recibida. Los modelos se aplican a diferentes tipos de obstáculos y a diversas geometrías de trayecto.

Aunque la difracción se produce únicamente por la superficie del suelo u otros obstáculos, para evaluar los parámetros geométricos situados en el plano vertical del trayecto (ángulo de difracción, radio de curvatura, altura del obstáculo) ha de tenerse en cuenta la refracción media de la atmósfera en el trayecto. Para ello, se traza el perfil del trayecto con el radio ficticio de la Tierra que convenga [34]. De no disponerse de otras indicaciones, se puede tomar un radio ficticio de la Tierra de 8500 km.

La difracción de las ondas radioeléctricas sobre la superficie de la Tierra se ve afectada por las irregularidades del terreno. En este contexto, antes de abordar en detalle los métodos de predicción utilizados para este mecanismo de propagación, se definen en este punto algunos conceptos básicos [35].

### **2.6.1 Obstáculo Aislado**

Un obstáculo puede considerarse aislado si no existe interacción entre dicho obstáculo y el terreno circundante.

1. La atenuación del trayecto se debe únicamente al obstáculo y el terreno que lo rodea no contribuye a dicha atenuación. No debe haber solapamiento entre las anchuras de penumbra de cada terminal y la parte superior del obstáculo.
2. El trayecto libre de obstáculos a ambos lados de los mismos debe ser, al menos, de un valor de 0,6 del radio de la primera zona de Fresnel. No se produce reflexión especular en ninguno de los dos lados del obstáculo [22], [35].

### **Anchura de penumbra**

La transición de la luz a la sombra define la región de penumbra. Esta transición se produce a lo largo de la franja estrecha (anchura de penumbra) en el límite de la sombra geométrica. En la figura se ilustra la anchura de penumbra ( $W$ ) en el caso de un transmisor ubicado a una altura  $h$  sobre la superficie lisa de la tierra esférica, que viene dada por la expresión [35]:

$$w = \sqrt[3]{\frac{\lambda(R')^2}{\pi}} \quad (2.49)$$

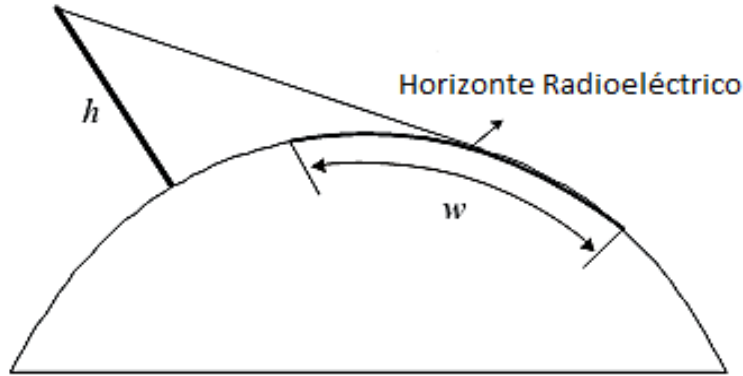


Figura 2.3. Anchura de penumbra [35].

### 2.6.2 Obstáculo agudo

La atenuación por difracción es [22], [35]:

$$L_D(v) = -10 \log \frac{1}{2} \left\{ \left[ \frac{1}{2} - C(v) \right]^2 + \left[ \frac{1}{2} - S(v) \right]^2 \right\} [\text{dB}] \quad (2.50)$$

$$C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \quad (2.51)$$

$$S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \quad (2.52)$$

Donde  $v$  es un parámetro definido por [22], [35]:

$$v = 2,58 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{f \cdot d}{d_1 \cdot d_2}} \cdot h \quad (2.53)$$

$$\text{Si } v \geq -0,78 \text{ entonces:} \quad (2.54)$$

$$L_D = 6,9 + 20 \log \left( \sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) [\text{dB}] \quad (2.55)$$

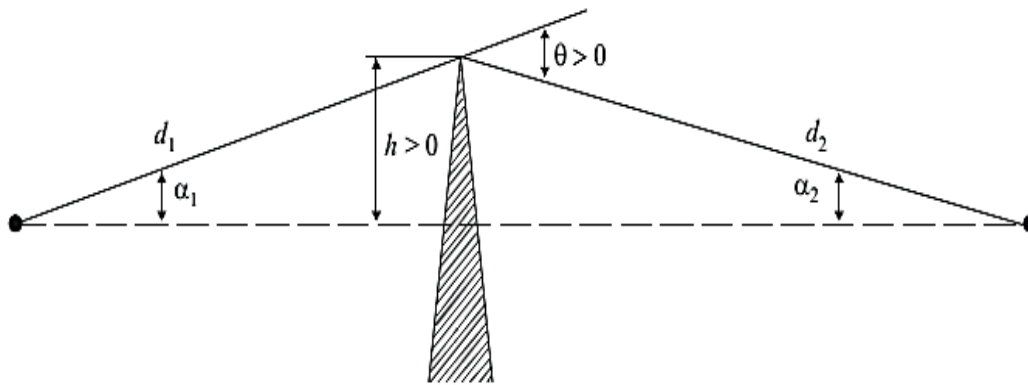


Figura 2.4(a). Obstáculo agudo con línea de vista por debajo del obstáculo [22].

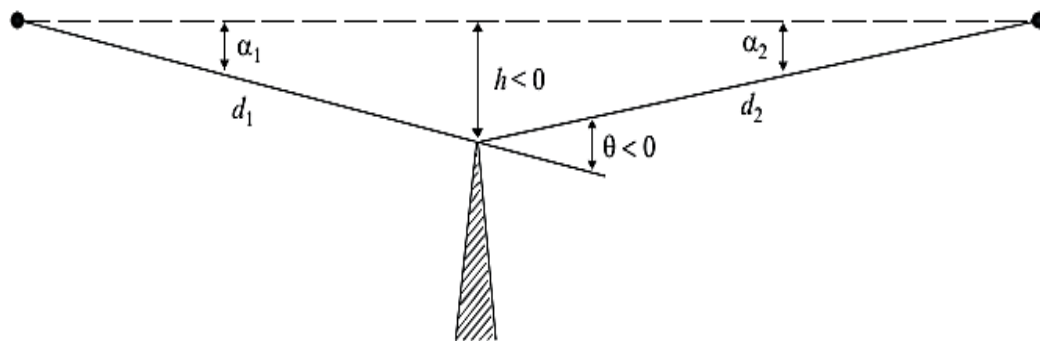


Figura 2.4 (b). Obstáculo agudo con línea de vista por encima del obstáculo [22].

### 2.6.3 Obstáculo redondeado

$d$ : Longitud del enlace.

$d_{ht}$  y  $d_{hr}$ : Distancia del transmisor y receptor a sus respectivos horizontes ópticos en Km.

$z_{ht}$  y  $z_{hr}$ : Alturas de los puntos de horizonte en metros.

$\theta$ : Ángulo de difracción en  $m rad$ .

$r$ : Radio de curvatura del obstáculo en Km.

$h$ : Altura del punto P de intersección de las visuales de las antenas.

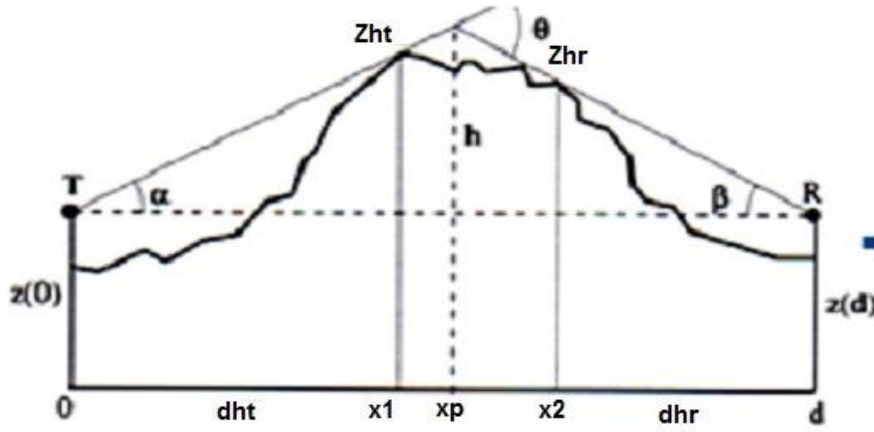


Figura. 2.5. Obstáculo redondeado y sus parámetros [22].

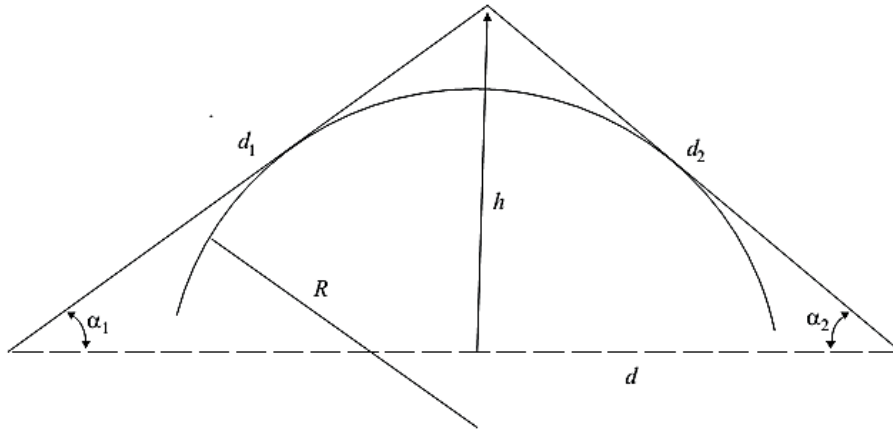


Figura. 2.6. Radio de curvatura [22].

El procedimiento de estimación de la atenuación específica es el siguiente [22], [35]:

$$r(Km) = \frac{d - d_{ht} - d_{hr}}{\theta} \quad (2.56)$$

$$\theta(mrad) = \frac{z_{ht} - z(0)}{d_{ht}} + \frac{z_{hr} - z(d)}{d_{hr}} \quad (2.57)$$

$$h = x_p \left( \frac{z_{ht} - z(0)}{d_{ht}} + \frac{z(d) - z(0)}{d} \right) \quad (2.58)$$

Parámetros radioeléctricos [22], [35]:

$$m = 0,45708 \cdot \frac{d_{ht} + d_{hr}}{d_{ht} \cdot d_{hr}} \cdot \sqrt[3]{r^2} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{f}} \quad (2.59)$$

$$n = (4,787 \cdot 10^{-3}) \cdot h \cdot \sqrt[3]{f^2} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{r}} \quad (2.60)$$

La atenuación por difracción de un obstáculo redondeado será [22], [35]:

$$A = L_D(v) + T(m, n) \quad (2.61)$$

$T(m, n)$  Viene dada por:

Cuando  $m \cdot n \leq 4$

$$T(m, n) = 7,2 \cdot \sqrt[2]{m} - (2 - 12,5n)m + 3,6\sqrt[2]{m^3} - 0,8m^2 \quad (2.62)$$

Cuando  $m \cdot n > 4$

$$T(m, n) = 6 - 20 \log(mn) + 7,2 \cdot \sqrt[2]{m} - (2 - 17n)m + 3,6\sqrt[2]{m^3} - 0,8m^2 \quad (2.63)$$

#### 2.6.4 Difracción sobre tierra esférica

El rayo discurre por encima de un terreno liso o muy poco ondulado (llanuras, mar, lagos), con despejamiento insuficiente o incluso algunas obstrucciones por la redondez de la Tierra.

La atenuación por difracción se formula como la suma (en dB) de un término que depende de la distancia, de las características del terreno y de la polarización de la onda, y otros dos que son función, respectivamente, de las alturas  $h_t$  y  $h_r$  del transmisor y receptor [22].

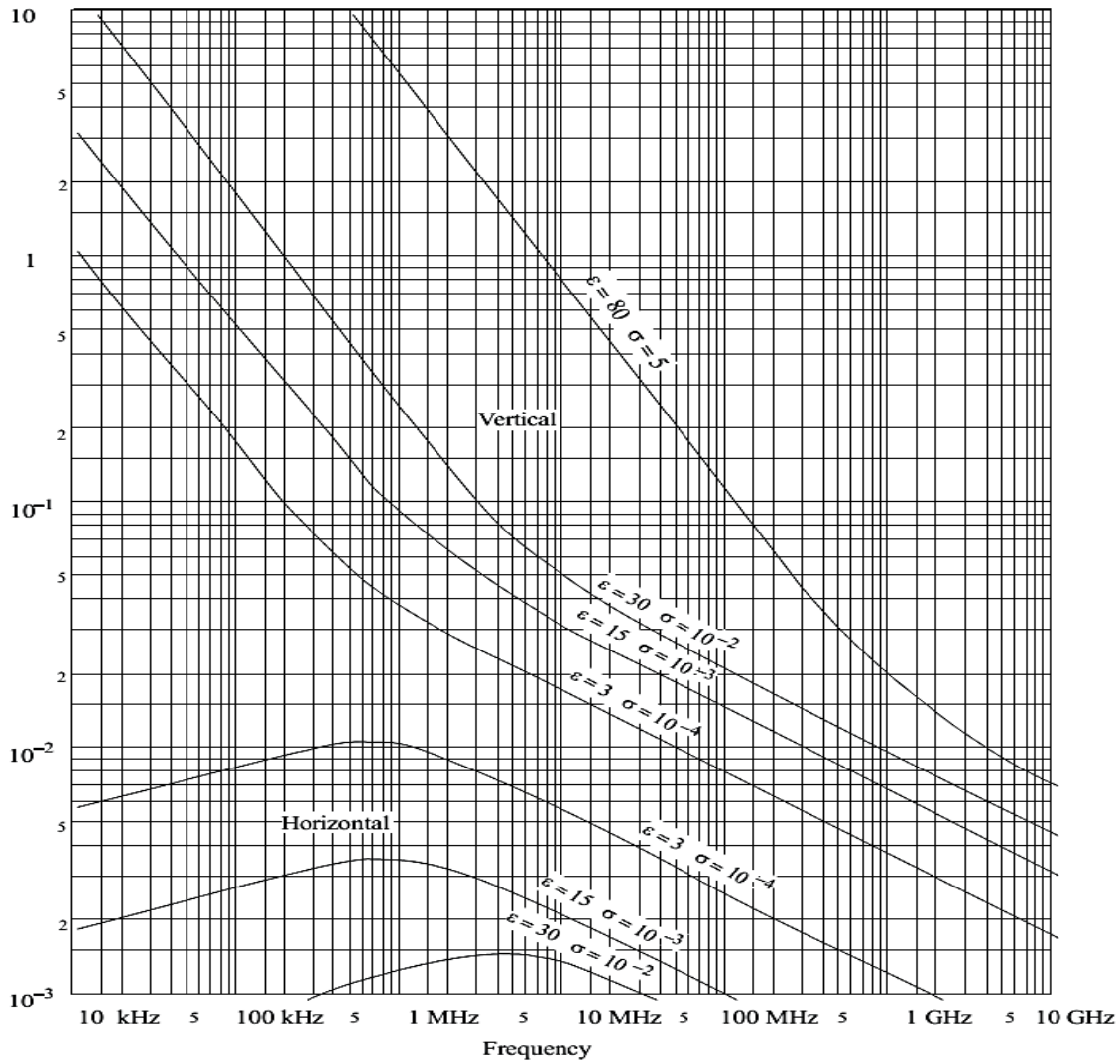
Factor normalizado de admitancia de la superficie K:

Polarización Horizontal [22], [35]:

$$K_H = 0,36 \sqrt[3]{R \cdot f} \cdot \left[ (\epsilon_r - 1)^2 + \left( \frac{18000 \cdot \sigma}{f} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (2.64)$$

Polarización vertical:

$$K_V = K_H \cdot \sqrt[2]{\epsilon_r^2 + \left( \frac{18000 \cdot \sigma}{f} \right)^2} \quad (2.65)$$



**Figura 2.7.** Cálculo de K en las distintas polarizaciones [22].

Intensidad de campo [22], [35]:

$$20 \log \frac{E}{E_0} = F(X) + G(Y_1) + G(Y_2) \quad (2.66)$$

Longitud normalizada del trayecto X:

$$X = 2,2 \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{f} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{R^2}} \cdot d \quad (2.67)$$

Alturas normalizadas de las antenas  $Y_1, Y_2$ :

$$Y = 9,6 \cdot 10^{-3} \cdot \beta \cdot \sqrt[3]{F^2} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{R}} \cdot h \quad (2.69)$$

$\beta$  Tiene en cuenta la naturaleza del suelo y la polarización de la onda. Se calcula de la siguiente forma [22], [35]:

$$\beta = \frac{1+1,6K^2+0,75K^4}{1+4,5K^2+1,35K^4} \quad (2.70)$$

Con polarización horizontal en todas las frecuencias y con polarización vertical por encima de 20 MHz sobre tierra o de 300 MHz sobre el mar, se puede considerar que  $\beta$  es igual a uno.

Con polarización vertical por debajo de 20 MHz sobre tierra o de 300 MHz sobre el mar, hay que calcular  $\beta$  en función de  $K$ . En cambio, cabe entonces prescindir de  $\varepsilon$  y escribir [22]:

$$K^2 \approx 6,89 \frac{\sigma}{k^{2/3} \cdot f^{5/3}} \quad (2.71)$$

El término relativo a la distancia es [22], [35]:

$$F(X) = 10 \log \left( 4\pi X + \frac{2^{4/3}}{X} + \frac{1}{X^2} \right) - 17,6 \cdot X \quad \text{Para } X \leq 1,2 \quad (2.72)$$

$$F(X) = 11 + 10 \log(X) - 17,6 \cdot X \quad \text{Para } X > 1,2 \quad (2.73)$$

El término relativo a la altura es [22], [35]:

$$G(Y) = 17,6 \cdot \sqrt[2]{Y - 1,1} - 5 \log(Y - 1,1) - 8 \quad Y > 2 \quad (2.74)$$

$$G(Y) = 20 \log(Y + 0,1 \cdot Y^3) \quad 10K < Y < 2 \quad (2.75)$$

$$G(Y) = 2 + 20 \log(K) + 9 \log\left(\frac{Y}{K}\right) \cdot \left[ \log\left(\frac{Y}{K}\right) + 1 \right] \quad \frac{K}{10} < Y < 10K \quad (2.76)$$

$$G(Y) = 2 + 20 \log K \quad Y < \frac{K}{10} \quad (2.77)$$

## CAPITULO 3: RESULTADOS Y DISCUSION.

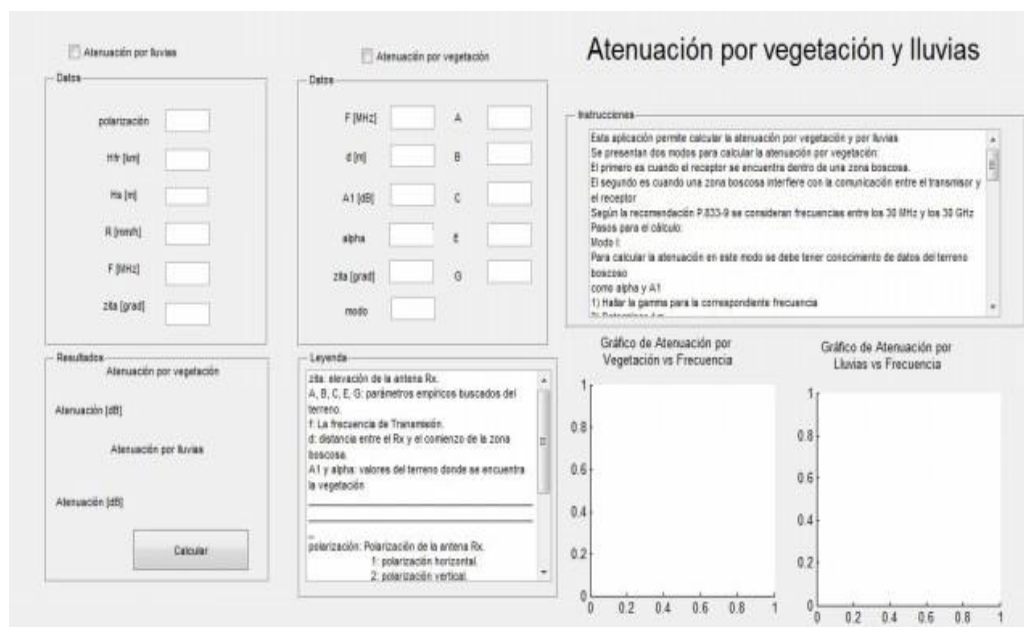
### 3.1 Introducción del capítulo

En este capítulo se hace referencia a la herramienta creada en *MatLab* para la evaluación de las pérdidas bajo diferentes condiciones de propagación. Se realiza una descripción de los diferentes entornos de trabajo y luego, mediante ejemplos, se comprueba el funcionamiento del mismo.

### 3.2 Descripción del Software

El software “**Herramienta para el cálculo de propagación troposférica**” fue creado en *MatLab* 2016 aprovechando las opciones de programación gráfica que posee esta herramienta de programación. En él se desarrollan los modelos de cálculo de atenuación expuestos en el capítulo anterior.

El software consta de tres espacios de trabajo bien definidos. El primero acomete las cuestiones relativas a la atenuación por vegetación y por lluvia como se aprecia en la figura 3.1.



**Figura 3.1.** Interfaz para el cálculo de la atenuación por vegetación y lluvias.

En este apartado se especifican todos los parámetros necesarios para realizar el cálculo de dicha atenuación. Además, se ofrece al estudiante la metodología de cálculo para realizar las comprobaciones de forma manual en el aula o como estudio independiente.

Cuenta con accesos a las recomendaciones vigentes de la temática para realizar cualquier tipo de consulta y aclaración de los parámetros involucrados, lo que convierte este espacio de trabajo en una plataforma completa para realizar actividades prácticas en la asignatura Radiopropagación referente a la atenuación por vegetación y por lluvia.

El segundo acomete las cuestiones relativas a la atenuación por gases y vapores atmosféricos como se aprecia en la figura 3.2.

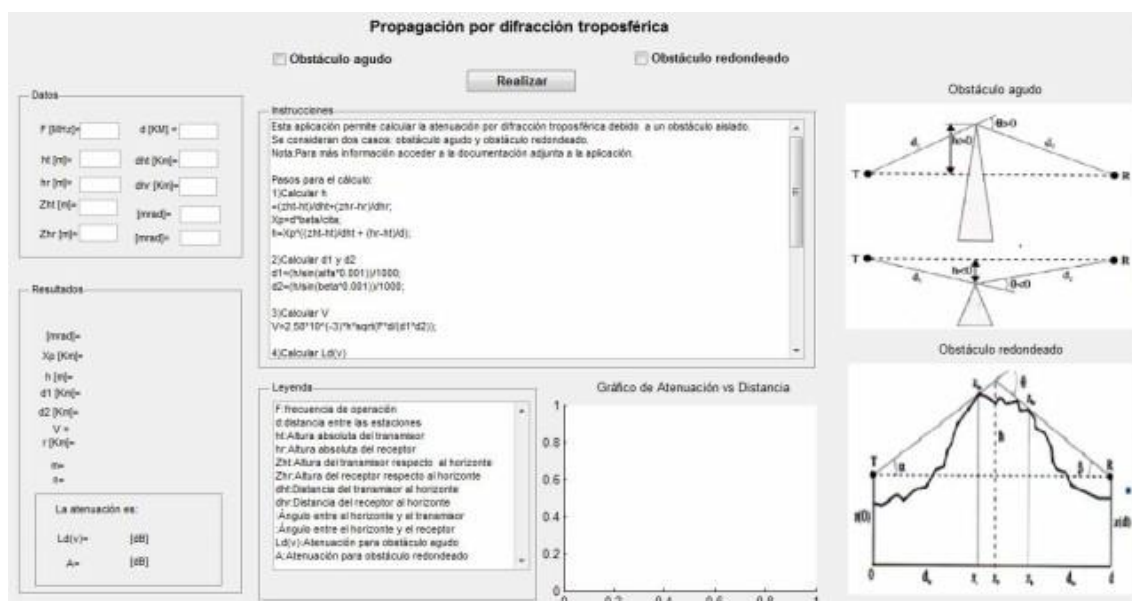
En este apartado se especifican todos los parámetros necesarios para realizar el cálculo de dicha atenuación. Además, se ofrece al estudiante la metodología de cálculo para realizar las comprobaciones de forma manual en el aula o como estudio independiente.

Cuenta con accesos a las recomendaciones vigentes de la temática para realizar cualquier tipo de consulta y aclaración de los parámetros involucrados, lo que convierte este espacio de trabajo en una plataforma completa para realizar actividades prácticas en la asignatura Radiopropagación referente a la atenuación por gases y vapores atmosféricos.



**Figura 3.2.** Interfaz para el cálculo de la atenuación mediante los gases y vapores atmosféricos.

El tercero acomete las cuestiones relativas a la atenuación difracción como se aprecia en la figura 3.3.



**Figura3.3.** Interfaz para el cálculo de la atenuación por difracción.

En este apartado se especifican todos los parámetros necesarios para realizar el cálculo de dicha atenuación. Además, se ofrece al estudiante la metodología de cálculo para realizar las comprobaciones de forma manual en el aula o como estudio independiente.

Cuenta con accesos a las recomendaciones vigentes de la temática para realizar cualquier tipo de consulta y aclaración de los parámetros involucrados, lo que convierte este espacio de trabajo en una plataforma completa para realizar actividades prácticas en la asignatura Radiopropagación referente a la atenuación por difracción.

### 3.3 Ejemplos resueltos

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos mediante la solución de algunos ejercicios docentes, aplicando el software para calcular la atenuación por ondas troposféricas para distintos escenarios de propagación. Se analizan las potencialidades de la herramienta para la comprensión de los elementos impartidos en la asignatura ya que permite visualizar los resultados de manera gráfica. Ello posibilita desarrollar habilidades prácticas en los estudiantes y comprender desde una perspectiva real, los fenómenos que se describen en dichos experimentos.

### Efecto de la Difracción:

Para comprobar la efectividad del software, se diseñan escenarios que aparecen en las actividades docentes de la asignatura Radiopropagación. Para el caso de la propagación por difracción se diseña un escenario como el que se muestra en la figura 3.4. Este escenario se refiere a un caso de difracción por obstáculo redondeado. Se escoge este caso pues incluye el cálculo de las pérdidas por difracción en obstáculo agudo.

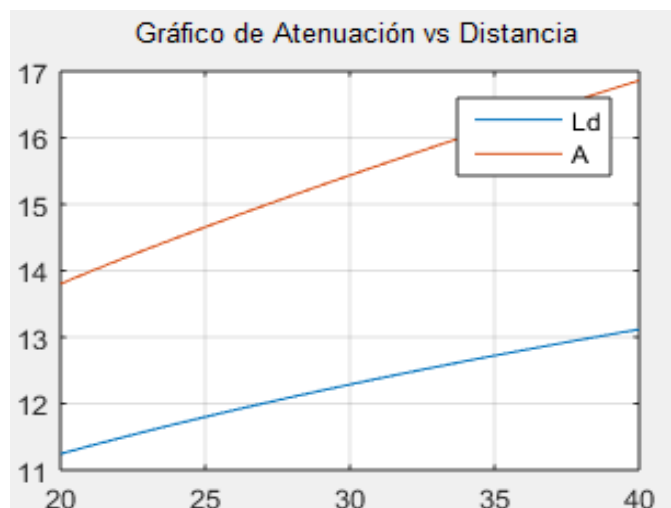
| Datos    |     |                  |      |
|----------|-----|------------------|------|
| F [MHz]= | 900 | d [KM] =         | 30   |
| ht [m]=  | 950 | dht [Km]=        | 9.3  |
| hr [m]=  | 965 | dhr [Km]=        | 14   |
| Zht [m]= | 974 | $\alpha$ [mrad]= | 2    |
| Zhr [m]= | 980 | $\beta$ [mrad]=  | 1.61 |

**Figura 3.4.** Sección para introducir los datos.

| Resultados        |              |
|-------------------|--------------|
| $\theta$ [mrad]=  | 3.65207      |
| $X_p$ [Km]=       | 13.2254      |
| $h$ [m]=          | 40.7426      |
| $d_1$ [Km]=       | 20.3713      |
| $d_2$ [Km]=       | 25.306       |
| $V$ =             | 0.760728     |
| $r$ [Km]=         | 1.83457      |
| $m$ =             | 0.012696     |
| $n$ =             | 14.8512      |
| La atenuación es: |              |
| $L_d(v)$ =        | 12.287 [dB]  |
| $A$ =             | 15.4348 [dB] |

**Figura 3.5.** Sección que muestra los resultados.

En la figura 3.5 se muestran los resultados numéricos obtenidos.  $L_d(v)$  corresponde a las pérdidas por obstáculo agudo y el valor de  $A$  corresponde a las pérdidas totales, las cuales incluyen la función  $T(m, n)$  que está relacionada con la curvatura del obstáculo.



**Figura 3.6.** Comportamiento de la atenuación vs distancia.

La herramienta incorpora la funcionalidad de brindar las curvas correspondientes a los valores obtenidos. Cabe destacar la importancia didáctica que esto refiere. Brinda al estudiante una visión objetiva del fenómeno y asocia conceptos empíricos a criterios prácticos. Ello se puede apreciar en la figura 3.6 donde se demuestra que, en las pérdidas por difracción en obstáculo aislado y redondeado, predominan las pérdidas asociadas a obstáculo agudo. El factor asociado a la curvatura del obstáculo contribuye en menor medida al valor final de la atenuación.

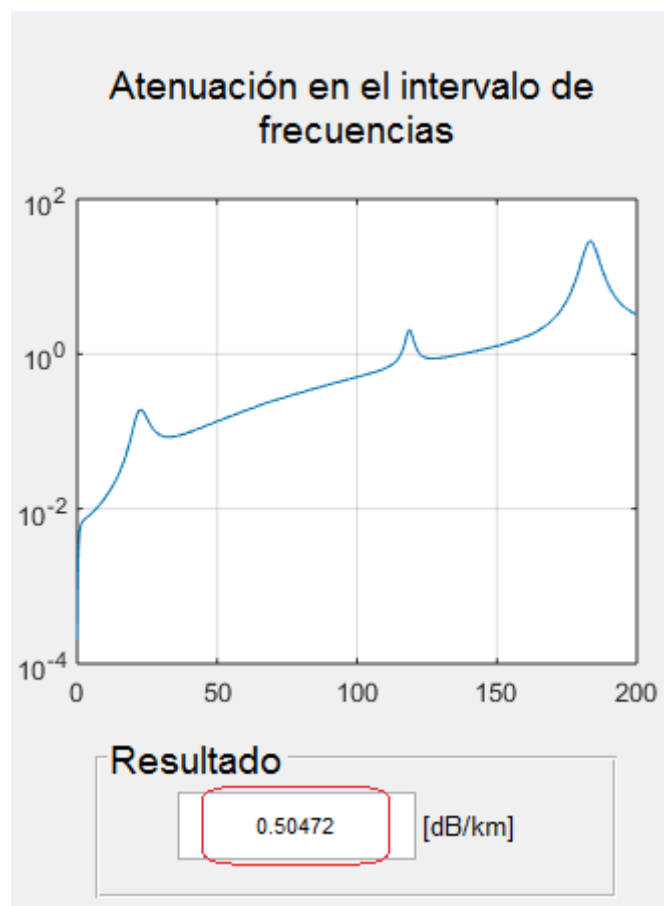
#### **Efecto de los gases y vapores atmosféricos (Método de las Rayas):**

En esta fase de la aplicación se comprueba el efecto de los gases y vapores atmosféricos en la banda de SHF (*Super High Frequency*). Es conocido que las frecuencias de resonancia del  $O_2$  y el vapor de agua están en el orden de las decenas y cientos de *Gigahertz*. Para ello es necesario conocer la frecuencia de operación y las características del medio como presión atmosférica, presión del vapor de agua y la temperatura absoluta de grados Kelvin. En la figura 3.7 se muestra un ejemplo típico, similar a lo que se tratan en las actividades docentes.

**Datos**

|                          |      |
|--------------------------|------|
| f [GHz] =                | 100  |
| BW [GHz] =               | 200  |
| T [K] =                  | 288  |
| P [hPa] =                | 1013 |
| ro [g/m <sup>3</sup> ] = | 7.5  |

**Figura 3.7.** Sección para introducir de los datos.



**Figura 3.8.** Resultado y comportamiento de la atenuación para el ancho de banda especificado.

En la figura 3.8 se observa la distribución de la atenuación para el caso de atmósfera húmeda. Este resultado se corresponde con lo obtenido en la recomendación de la UIT-

REC-R P.676-11 en la cual a los 22 GHz aproximadamente existe una raya de atenuación debido al vapor de agua.

### Efecto de la vegetación

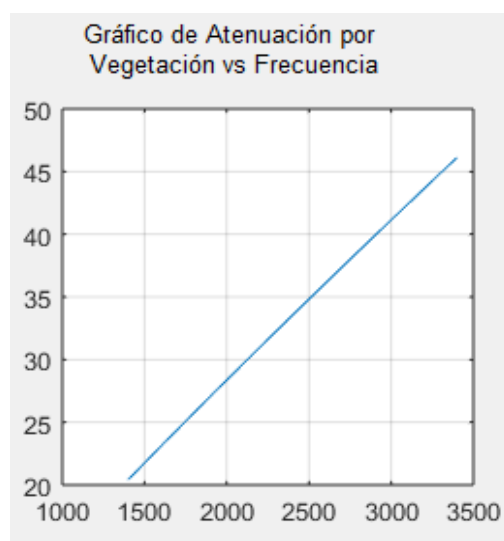
☒ Atenuación por vegetación

Datos

|             |       |   |   |
|-------------|-------|---|---|
| F [MHz]     | 2400  | A | 0 |
| d [m]       | 100   | B | 0 |
| A1 [dB]     | 0.18  | C | 0 |
| alpha       | 0.752 | E | 0 |
| zita [grad] | 0     | G | 0 |
| modo        | 1     |   |   |

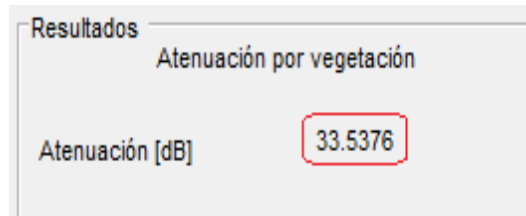
**Figura3.9.** Sección para introducir los datos.

De igual forma que en los casos anteriores, la atenuación por vegetación a una frecuencia determinada, puede ser obtenida aplicando el método que describe la recomendación de la UIT. En este caso (figura 3.9) solo se introducen los datos relacionados a la atenuación por vegetación correspondiente a un receptor dentro de una zona boscosa.



**Figura 3.10.** Comportamiento de la atenuación por vegetación vs la frecuencia.

La curva de atenuación que se muestra en la figura 3.10 pertenece a la atenuación obtenida para el caso de una frecuencia de radioenlace de 2.4 GHz. Se escogió esta frecuencia por lo recurrente que es el uso de las redes WiFi en esta banda de trabajo y así poder obtener una estimación de la afectación producida a un radioenlace a esta frecuencia y bajo estas condiciones de propagación. En la figura 3.11 se observa el valor numérico de dicha atenuación.



**Figura 3.11.** Valor numérico de la atenuación.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones:

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo es posible llegar a las siguientes conclusiones:

1. La propagación por onda troposférica es un tema medular dentro de la asignatura Radiopropagación. Es el tema más extenso y lleva al alumno las condiciones más realistas en cuanto a propagación de ondas electromagnéticas. La característica fundamental de la propagación de las ondas electromagnéticas es la curvatura del rayo a partir de la variación del índice de refracción con la altura.
2. Las recomendaciones de la UIT, constituyen una herramienta didáctica, científica y profesional dentro de la bibliografía de la asignatura Radiopropagación. El tema de onda troposférica se rige estrictamente por lo que está regulado en dichas recomendaciones. Ello brinda un carácter actualizado y riguroso a las temáticas que se imparten. Las recomendaciones contienen los métodos para determinar las atenuaciones específicas en las diferentes condiciones de propagación que se analizan dentro de la asignatura Radiopropagación.
3. A partir de la solución de ejemplos prácticos de propagación por onda troposférica se pudo comprobar el correcto funcionamiento de software. en el caso de la atenuación por gases y vapores las curvas y resultados obtenidos se corresponden con los que se obtienen en la recomendación de la UIT. Para el caso de la atenuación por difracción se comprueba que las pérdidas por obstáculo agudo (valor numérico) predominan con respecto a la contribución que realiza la curvatura el obstáculo a la atenuación total.
4. La estimación de la atenuación para las ondas troposféricas es un tema relevante dentro de la asignatura Radiopropagación. El desarrollo de un software que sea

capaz de realizar dicho cálculo sin restricciones de frecuencias, condiciones de propagación o métodos es un avance significativo. El software desarrollado realiza el cálculo de la atenuación para diferentes condiciones de propagación de las ondas troposféricas constituyendo un apoyo vital en el aprendizaje de los estudiantes.

**Recomendaciones:**

1. Continuar en el perfeccionamiento de dicha herramienta con la incorporación de nuevos métodos acordes a condiciones de propagación más diversas y complejas.
2. Aplicar la herramienta de forma inmediata en la asignatura Radiopropagación.
3. Perfeccionar los materiales de apoyo y la ayuda de la herramienta para brindar el estudiante toda la información posible sobre la materia que se estudia

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Naval, C. Sádaba, y X. Bringué, «Impacto de las Tecnologías de la Información y de la Comunicación (TIC) en las relaciones sociales de los jóvenes navarros», 2003.
- [2] O. L. Carreras Martínez, «Ondas electromagnéticas y sistemas radiantes sobre la plataforma moodle», Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería ..., 2017.
- [3] R. Carneiro, J. C. Toscano, y T. Díaz, «Los desafíos de las TIC para el cambio educativo», 2009.
- [4] J. C. C. Romaní, «El concepto de tecnologías de la información. Benchmarking sobre las definiciones de las TIC en la sociedad del conocimiento.», *Zer Rev. Estud. Comun.*, vol. 14, n.º 27, 2009.
- [5] J. I. Castañeda López, «Curso de Electrodinámica y Radiopropagación del plan de estudio E sobre la plataforma Moodle», Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería ..., 2018.
- [6] A. Alvarez Machado, «Publicación de la asignatura antenas en la plataforma interactiva Moodle», Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas, 2011.
- [7] J. L. Bravo, «Propuesta de un sistema para la gestión de servicios de Tecnologías de la Información en CUVENPETROL S.A., basado en las referencias ITIL», UCLV, 2012.
- [8] «Marco conceptual de Nuevas Tecnologías Aplicadas a la Educación». [En línea]. Disponible en: <https://previa.uclm.es/profesorado/ricardo/DefinicionesNNTT.html>. [Accedido: 04-jun-2019].
- [9] C. Almenara, J. Barroso Osuna, R. Romero Tena, M. Llorente Cejudo, y P. Román Gravan, *Definición de Nuevas Tecnologías [en línea] OCW de la Universidad de Sevilla, Facultad de Ciencias de la Educación. España. 2007.*
- [10] V. P. Díaz *et al.*, «Impacto de las tecnologías de la información y las comunicaciones en la educación y nuevos paradigmas del enfoque educativo», *Rev. Cuba. Educ. Médica Super.*, vol. 25, n.º 1, pp. 95–102, 2011.
- [11] A. Ortiz Colón, «Interacción y" TIC" en la docencia universitaria», *Pixel-Bit Rev. Medios Educ.* 26 27-38, 2005.

- [12] G. Sunkel, *Las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en la educación en América Latina: una exploración de indicadores*. United Nations Publications, 2006.
- [13] C. Sigalés, «Formación universitaria y TIC: nuevos usos y nuevos roles», *RUSC Univ. Knowl. Soc. J.*, vol. 1, n.º 1, 2004.
- [14] J. Salinas Ibañez *et al.*, *Innovación educativa y uso de las TIC*. Universidad Internacional de Andalucía, 2008.
- [15] G. Sánchez Capote, «Correcciones a vídeos destinados a la enseñanza de la Electrónica Analógica», Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2010.
- [16] Solís Olivera Rafael Alejandro, «Comunicaciones móviles como parte de la diversificación de las asignaturas de la disciplina Sistemas de Radiocomunicaciones», Thesis, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, 2011.
- [17] R. Lezcano Sánchez, «Diseño y montaje de una página en Moodle para la Electrónica Analógica 3», Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2012.
- [18] J. M. S. Ibáñez, «Enseñanza flexible, aprendizaje abierto. Las redes como herramienta para la formación», *EduTec Rev. Electrónica Tecnol. Educ.*, n.º 10, pp. a010–a010, 1999.
- [19] G. Sánchez Capote, «Correcciones a vídeos destinados a la enseñanza de la Electrónica Analógica», Thesis, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, 2010.
- [20] N. Blanco y O. Alfonso, «Publicación del curso de Mediciones Electrónicas en la plataforma Moodle2», Thesis, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2013.
- [21] <https://www.areatecnologia.com>, «ondas electromagneticas». [En línea]. Disponible en: <https://www.areatecnologia.com/ondas-electromagneticas.htm>. [Accedido: 04-jun-2019].
- [22] J. M. H. Rábanos, L. M. Tomas, y J. M. R. Salis, *Transmisión por radio*. Editorial Universitaria Ramón Areces, 2013.
- [23] M. P. Dolujanov, *Propagación de las ondas de radio*. Editorial Félix Varela, 2009.
- [24] M. Dolujanov, «Propagation of radio waves», *Moscou YPCC Transl. Boris Kuznetsov*, 1995.
- [25] E. C. Jordan y K. G. Balmain, *Ondas electromagnéticas y sistemas radiantes*. Paraninfo, 1978.
- [26] M. León, *Diccionario de Informatica, Telecomunicaciones y Ciencias Afines/Dictionary of Computing, Telecommunications, and Related Sciences: Ingles-Espanol/Spanish-English*. Ediciones Díaz de Santos, 2004.
- [27] «Ondas: Atenuacion suave - luz-wiki». [En línea]. Disponible en: [https://luz.izt.uam.mx/wiki/index.php/Ondas:\\_Atenuacion\\_suave](https://luz.izt.uam.mx/wiki/index.php/Ondas:_Atenuacion_suave). [Accedido: 04-jun-2019].

- [28] C. P. Vega y A. C. López, *Sistemas de telecomunicación*, vol. 7. Ed. Universidad de Cantabria, 2007.
- [29] «Propagación por dispección troposférica». [En línea]. Disponible en: <https://ea4nz.ure.es/tropo/tropo.html>. [Accedido: 04-jun-2019].
- [30] I. R. Sector, «Recommendation ITU-R P. 676–10, Attenuation by atmospheric gases», *Int. Telecommun. Union*, 2013.
- [31] «P.835 : Atmósferas normalizadas de referencia». [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.835/es>. [Accedido: 04-jun-2019].
- [32] «P.833 : Atenuación debida a la vegetación». [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.833-9-201609-I/es>. [Accedido: 04-jun-2019].
- [33] «P.838 : Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción». [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-3-200503-I/es>. [Accedido: 04-jun-2019].
- [34] «P.834 : Efectos de la refracción troposférica sobre la propagación de las ondas radioeléctricas». [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.834-9-201712-I/es>. [Accedido: 04-jun-2019].
- [35] «P.526 : Propagación por difracción». [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526-14-201801-I/es>. [Accedido: 04-jun-2019].

**ANEXOS****Anexo 1: Coeficientes para calcular k en polarizaciones horizontal y vertical.****Coeficientes para  $k_H$** 

| $j$ | $a_j$    | $b_j$    | $c_j$   | $m_k$    | $c_k$   |
|-----|----------|----------|---------|----------|---------|
| 1   | -5,33980 | -0,10008 | 1,13098 | -0,18961 | 0,71147 |
| 2   | -0,35351 | 1,26970  | 0,45400 |          |         |
| 3   | -0,23789 | 0,86036  | 0,15354 |          |         |
| 4   | -0,94158 | 0,64552  | 0,16817 |          |         |

**Coeficientes para  $k_V$** 

| $j$ | $a_j$    | $b_j$    | $c_j$   | $m_k$    | $c_k$   |
|-----|----------|----------|---------|----------|---------|
| 1   | -3,80595 | 0,56934  | 0,81061 | -0,16398 | 0,63297 |
| 2   | -3,44965 | -0,22911 | 0,51059 |          |         |
| 3   | -0,39902 | 0,73042  | 0,11899 |          |         |
| 4   | 0,50167  | 1,07319  | 0,27195 |          |         |

**Anexo 2: Coeficientes para calcular  $\alpha$  en polarizaciones horizontal y vertical.****Coeficientes para  $\alpha_H$** 

| $j$ | $a_j$    | $b_j$    | $c_j$    | $m_\alpha$ | $c_\alpha$ |
|-----|----------|----------|----------|------------|------------|
| 1   | -0,14318 | 1,82442  | -0,55187 | 0,67849    | -1,95537   |
| 2   | 0,29591  | 0,77564  | 0,19822  |            |            |
| 3   | 0,32177  | 0,63773  | 0,13164  |            |            |
| 4   | -5,37610 | -0,96230 | 1,47828  |            |            |
| 5   | 16,1721  | -3,29980 | 3,43990  |            |            |

**Coeficientes para  $\alpha_V$** 

| $j$ | $a_j$    | $b_j$    | $c_j$    | $m_\alpha$ | $c_\alpha$ |
|-----|----------|----------|----------|------------|------------|
| 1   | -0,07771 | 2,33840  | -0,76284 | -0,053739  | 0,83433    |
| 2   | 0,56727  | 0,95545  | 0,54039  |            |            |
| 3   | -0,20238 | 1,14520  | 0,26809  |            |            |
| 4   | -48,2991 | 0,791669 | 0,116226 |            |            |
| 5   | 48,5833  | 0,791459 | 0,116479 |            |            |

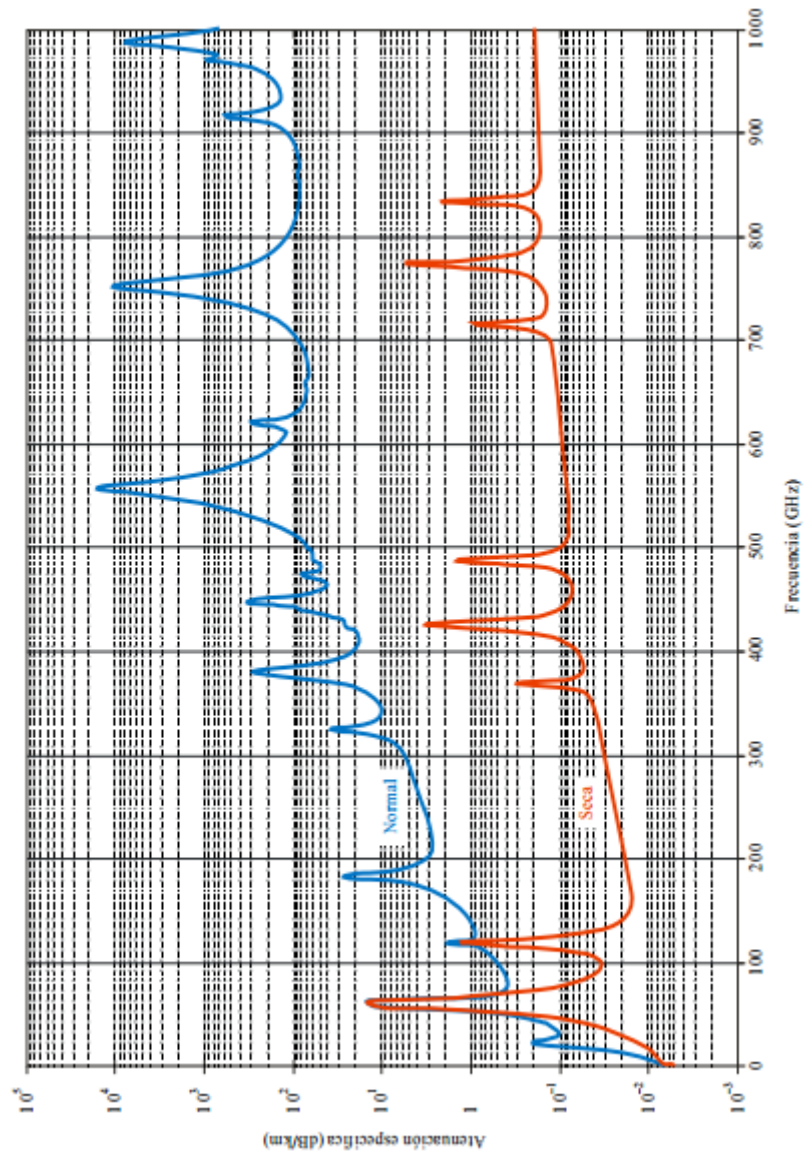
**Anexo 3: Coeficientes que dependen de la frecuencia para estimar la atenuación debida a la lluvia.**

| Frecuencia<br>(GHz) | $k_H$     | $\alpha_H$ | $k_V$     | $\alpha_V$ |
|---------------------|-----------|------------|-----------|------------|
| 1                   | 0,0000259 | 0,9691     | 0,0000308 | 0,8592     |
| 1,5                 | 0,0000443 | 1,0185     | 0,0000574 | 0,8957     |
| 2                   | 0,0000847 | 1,0664     | 0,0000998 | 0,9490     |
| 2,5                 | 0,0001321 | 1,1209     | 0,0001464 | 1,0085     |
| 3                   | 0,0001390 | 1,2322     | 0,0001942 | 1,0688     |
| 3,5                 | 0,0001155 | 1,4189     | 0,0002346 | 1,1387     |
| 4                   | 0,0001071 | 1,6009     | 0,0002461 | 1,2476     |
| 4,5                 | 0,0001340 | 1,6948     | 0,0002347 | 1,3987     |
| 5                   | 0,0002162 | 1,6969     | 0,0002428 | 1,5317     |
| 5,5                 | 0,0003909 | 1,6499     | 0,0003115 | 1,5882     |
| 6                   | 0,0007056 | 1,5900     | 0,0004878 | 1,5728     |
| 7                   | 0,001915  | 1,4810     | 0,001425  | 1,4745     |
| 8                   | 0,004115  | 1,3905     | 0,003450  | 1,3797     |
| 9                   | 0,007535  | 1,3155     | 0,006691  | 1,2895     |

| Frecuencia<br>(GHz) | $k_H$   | $\alpha_H$ | $k_V$   | $\alpha_V$ |
|---------------------|---------|------------|---------|------------|
| 10                  | 0,01217 | 1,2571     | 0,01129 | 1,2156     |
| 11                  | 0,01772 | 1,2140     | 0,01731 | 1,1617     |
| 12                  | 0,02386 | 1,1825     | 0,02455 | 1,1216     |
| 13                  | 0,03041 | 1,1586     | 0,03266 | 1,0901     |
| 14                  | 0,03738 | 1,1396     | 0,04126 | 1,0646     |
| 15                  | 0,04481 | 1,1233     | 0,05008 | 1,0440     |
| 16                  | 0,05282 | 1,1086     | 0,05899 | 1,0273     |
| 17                  | 0,06146 | 1,0949     | 0,06797 | 1,0137     |
| 18                  | 0,07078 | 1,0818     | 0,07708 | 1,0025     |
| 19                  | 0,08084 | 1,0691     | 0,08642 | 0,9930     |
| 20                  | 0,09164 | 1,0568     | 0,09611 | 0,9847     |
| 21                  | 0,1032  | 1,0447     | 0,1063  | 0,9771     |
| 22                  | 0,1155  | 1,0329     | 0,1170  | 0,9700     |
| 23                  | 0,1286  | 1,0214     | 0,1284  | 0,9630     |
| 24                  | 0,1425  | 1,0101     | 0,1404  | 0,9561     |
| 25                  | 0,1571  | 0,9991     | 0,1533  | 0,9491     |
| 26                  | 0,1724  | 0,9884     | 0,1669  | 0,9421     |
| 27                  | 0,1884  | 0,9780     | 0,1813  | 0,9349     |
| 28                  | 0,2051  | 0,9679     | 0,1964  | 0,9277     |
| 29                  | 0,2224  | 0,9580     | 0,2124  | 0,9203     |
| 30                  | 0,2403  | 0,9485     | 0,2291  | 0,9129     |
| 31                  | 0,2588  | 0,9392     | 0,2465  | 0,9055     |
| 32                  | 0,2778  | 0,9302     | 0,2646  | 0,8981     |
| 33                  | 0,2972  | 0,9214     | 0,2833  | 0,8907     |
| 34                  | 0,3171  | 0,9129     | 0,3026  | 0,8834     |
| 35                  | 0,3374  | 0,9047     | 0,3224  | 0,8761     |
| 36                  | 0,3580  | 0,8967     | 0,3427  | 0,8690     |
| 37                  | 0,3789  | 0,8890     | 0,3633  | 0,8621     |
| 38                  | 0,4001  | 0,8816     | 0,3844  | 0,8552     |
| 39                  | 0,4215  | 0,8743     | 0,4058  | 0,8486     |
| 40                  | 0,4431  | 0,8673     | 0,4274  | 0,8421     |
| 41                  | 0,4647  | 0,8605     | 0,4492  | 0,8357     |
| 42                  | 0,4865  | 0,8539     | 0,4712  | 0,8296     |
| 43                  | 0,5084  | 0,8476     | 0,4932  | 0,8236     |
| 44                  | 0,5302  | 0,8414     | 0,5153  | 0,8179     |
| 45                  | 0,5521  | 0,8355     | 0,5375  | 0,8123     |
| 46                  | 0,5738  | 0,8297     | 0,5596  | 0,8069     |
| 47                  | 0,5956  | 0,8241     | 0,5817  | 0,8017     |

| Frecuencia<br>(GHz) | $k_H$  | $\alpha_H$ | $k_V$  | $\alpha_V$ |
|---------------------|--------|------------|--------|------------|
| 48                  | 0,6172 | 0,8187     | 0,6037 | 0,7967     |
| 49                  | 0,6386 | 0,8134     | 0,6255 | 0,7918     |
| 50                  | 0,6600 | 0,8084     | 0,6472 | 0,7871     |
| 51                  | 0,6811 | 0,8034     | 0,6687 | 0,7826     |
| 52                  | 0,7020 | 0,7987     | 0,6901 | 0,7783     |
| 53                  | 0,7228 | 0,7941     | 0,7112 | 0,7741     |
| 54                  | 0,7433 | 0,7896     | 0,7321 | 0,7700     |
| 55                  | 0,7635 | 0,7853     | 0,7527 | 0,7661     |
| 56                  | 0,7835 | 0,7811     | 0,7730 | 0,7623     |
| 57                  | 0,8032 | 0,7771     | 0,7931 | 0,7587     |
| 58                  | 0,8226 | 0,7731     | 0,8129 | 0,7552     |
| 59                  | 0,8418 | 0,7693     | 0,8324 | 0,7518     |
| 60                  | 0,8606 | 0,7656     | 0,8515 | 0,7486     |
| 61                  | 0,8791 | 0,7621     | 0,8704 | 0,7454     |
| 62                  | 0,8974 | 0,7586     | 0,8889 | 0,7424     |
| 63                  | 0,9153 | 0,7552     | 0,9071 | 0,7395     |
| 64                  | 0,9328 | 0,7520     | 0,9250 | 0,7366     |
| 65                  | 0,9501 | 0,7488     | 0,9425 | 0,7339     |
| 66                  | 0,9670 | 0,7458     | 0,9598 | 0,7313     |
| 67                  | 0,9836 | 0,7428     | 0,9767 | 0,7287     |
| 68                  | 0,9999 | 0,7400     | 0,9932 | 0,7262     |
| 69                  | 1,0159 | 0,7372     | 1,0094 | 0,7238     |
| 70                  | 1,0315 | 0,7345     | 1,0253 | 0,7215     |
| 71                  | 1,0468 | 0,7318     | 1,0409 | 0,7193     |
| 72                  | 1,0618 | 0,7293     | 1,0561 | 0,7171     |
| 73                  | 1,0764 | 0,7268     | 1,0711 | 0,7150     |
| 74                  | 1,0908 | 0,7244     | 1,0857 | 0,7130     |
| 75                  | 1,1048 | 0,7221     | 1,1000 | 0,7110     |
| 76                  | 1,1185 | 0,7199     | 1,1139 | 0,7091     |
| 77                  | 1,1320 | 0,7177     | 1,1276 | 0,7073     |
| 78                  | 1,1451 | 0,7156     | 1,1410 | 0,7055     |
| 79                  | 1,1579 | 0,7135     | 1,1541 | 0,7038     |
| 80                  | 1,1704 | 0,7115     | 1,1668 | 0,7021     |
| 81                  | 1,1827 | 0,7096     | 1,1793 | 0,7004     |
| 82                  | 1,1946 | 0,7077     | 1,1915 | 0,6988     |
| 83                  | 1,2063 | 0,7058     | 1,2034 | 0,6973     |
| 84                  | 1,2177 | 0,7040     | 1,2151 | 0,6958     |
| 85                  | 1,2289 | 0,7023     | 1,2265 | 0,6943     |

| Frecuencia<br>(GHz) | $k_H$  | $\alpha_H$ | $k_V$  | $\alpha_V$ |
|---------------------|--------|------------|--------|------------|
| 86                  | 1,2398 | 0,7006     | 1,2376 | 0,6929     |
| 87                  | 1,2504 | 0,6990     | 1,2484 | 0,6915     |
| 88                  | 1,2607 | 0,6974     | 1,2590 | 0,6902     |
| 89                  | 1,2708 | 0,6959     | 1,2694 | 0,6889     |
| 90                  | 1,2807 | 0,6944     | 1,2795 | 0,6876     |
| 91                  | 1,2903 | 0,6929     | 1,2893 | 0,6864     |
| 92                  | 1,2997 | 0,6915     | 1,2989 | 0,6852     |
| 93                  | 1,3089 | 0,6901     | 1,3083 | 0,6840     |
| 94                  | 1,3179 | 0,6888     | 1,3175 | 0,6828     |
| 95                  | 1,3266 | 0,6875     | 1,3265 | 0,6817     |
| 96                  | 1,3351 | 0,6862     | 1,3352 | 0,6806     |
| 97                  | 1,3434 | 0,6850     | 1,3437 | 0,6796     |
| 98                  | 1,3515 | 0,6838     | 1,3520 | 0,6785     |
| 99                  | 1,3594 | 0,6826     | 1,3601 | 0,6775     |
| 100                 | 1,3671 | 0,6815     | 1,3680 | 0,6765     |
| 120                 | 1,4866 | 0,6640     | 1,4911 | 0,6609     |
| 150                 | 1,5823 | 0,6494     | 1,5896 | 0,6466     |
| 200                 | 1,6378 | 0,6382     | 1,6443 | 0,6343     |
| 300                 | 1,6286 | 0,6296     | 1,6286 | 0,6262     |
| 400                 | 1,5860 | 0,6262     | 1,5820 | 0,6256     |
| 500                 | 1,5418 | 0,6253     | 1,5366 | 0,6272     |
| 600                 | 1,5013 | 0,6262     | 1,4967 | 0,6293     |
| 700                 | 1,4654 | 0,6284     | 1,4622 | 0,6315     |
| 800                 | 1,4335 | 0,6315     | 1,4321 | 0,6334     |
| 900                 | 1,4050 | 0,6353     | 1,4056 | 0,6351     |
| 1 000               | 1,3795 | 0,6396     | 1,3822 | 0,6365     |

**Anexo 4: Atenuación específica debido a los gases atmosféricos.**

**Anexo 5: Coeficientes espectroscópicos para la atenuación del oxígeno.**

| $f_0$      | $a_1$    | $a_2$ | $a_3$  | $a_4$ | $a_5$  | $a_6$  |
|------------|----------|-------|--------|-------|--------|--------|
| 50,474214  | 0,975    | 9,651 | 6,690  | 0,0   | 2,566  | 6,850  |
| 50,987745  | 2,529    | 8,653 | 7,170  | 0,0   | 2,246  | 6,800  |
| 51,503360  | 6,193    | 7,709 | 7,640  | 0,0   | 1,947  | 6,729  |
| 52,021429  | 14,320   | 6,819 | 8,110  | 0,0   | 1,667  | 6,640  |
| 52,542418  | 31,240   | 5,983 | 8,580  | 0,0   | 1,388  | 6,526  |
| 53,066934  | 64,290   | 5,201 | 9,060  | 0,0   | 1,349  | 6,206  |
| 53,595775  | 124,600  | 4,474 | 9,550  | 0,0   | 2,227  | 5,085  |
| 54,130025  | 227,300  | 3,800 | 9,960  | 0,0   | 3,170  | 3,750  |
| 54,671180  | 389,700  | 3,182 | 10,370 | 0,0   | 3,558  | 2,654  |
| 55,221384  | 627,100  | 2,618 | 10,890 | 0,0   | 2,560  | 2,952  |
| 55,783815  | 945,300  | 2,109 | 11,340 | 0,0   | -1,172 | 6,135  |
| 56,264774  | 543,400  | 0,014 | 17,030 | 0,0   | 3,525  | -0,978 |
| 56,363399  | 1331,800 | 1,654 | 11,890 | 0,0   | -2,378 | 6,547  |
| 56,968211  | 1746,600 | 1,255 | 12,230 | 0,0   | -3,545 | 6,451  |
| 57,612486  | 2120,100 | 0,910 | 12,620 | 0,0   | -5,416 | 6,056  |
| 58,323877  | 2363,700 | 0,621 | 12,950 | 0,0   | -1,932 | 0,436  |
| 58,446588  | 1442,100 | 0,083 | 14,910 | 0,0   | 6,768  | -1,273 |
| 59,164204  | 2379,900 | 0,387 | 13,530 | 0,0   | -6,561 | 2,309  |
| 59,590983  | 2090,700 | 0,207 | 14,080 | 0,0   | 6,957  | -0,776 |
| 60,306056  | 2103,400 | 0,207 | 14,150 | 0,0   | -6,395 | 0,699  |
| 60,434778  | 2438,000 | 0,386 | 13,390 | 0,0   | 6,342  | -2,825 |
| 61,150562  | 2479,500 | 0,621 | 12,920 | 0,0   | 1,014  | -0,584 |
| 61,800158  | 2275,900 | 0,910 | 12,630 | 0,0   | 5,014  | -6,619 |
| 62,411220  | 1915,400 | 1,255 | 12,170 | 0,0   | 3,029  | -6,759 |
| 62,486253  | 1503,000 | 0,083 | 15,130 | 0,0   | -4,499 | 0,844  |
| 62,997984  | 1490,200 | 1,654 | 11,740 | 0,0   | 1,856  | -6,675 |
| 63,568526  | 1078,000 | 2,108 | 11,340 | 0,0   | 0,658  | -6,139 |
| 64,127775  | 728,700  | 2,617 | 10,880 | 0,0   | -3,036 | -2,895 |
| 64,678910  | 461,300  | 3,181 | 10,380 | 0,0   | -3,968 | -2,590 |
| 65,224078  | 274,000  | 3,800 | 9,960  | 0,0   | -3,528 | -3,680 |
| 65,764779  | 153,000  | 4,473 | 9,550  | 0,0   | -2,548 | -5,002 |
| 66,302096  | 80,400   | 5,200 | 9,060  | 0,0   | -1,660 | -6,091 |
| 66,836834  | 39,800   | 5,982 | 8,580  | 0,0   | -1,680 | -6,393 |
| 67,369601  | 18,560   | 6,818 | 8,110  | 0,0   | -1,956 | -6,475 |
| 67,900868  | 8,172    | 7,708 | 7,640  | 0,0   | -2,216 | -6,545 |
| 68,431006  | 3,397    | 8,652 | 7,170  | 0,0   | -2,492 | -6,600 |
| 68,960312  | 1,334    | 9,650 | 6,690  | 0,0   | -2,773 | -6,650 |
| 118,750334 | 940,300  | 0,010 | 16,640 | 0,0   | -0,439 | 0,079  |

| $f_0$      | $a_1$   | $a_2$ | $a_3$  | $a_4$ | $a_5$ | $a_6$ |
|------------|---------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 368,498246 | 67,400  | 0,048 | 16,400 | 0,0   | 0,000 | 0,000 |
| 424,763020 | 637,700 | 0,044 | 16,400 | 0,0   | 0,000 | 0,000 |
| 487,249273 | 237,400 | 0,049 | 16,000 | 0,0   | 0,000 | 0,000 |
| 715,392902 | 98,100  | 0,145 | 16,000 | 0,0   | 0,000 | 0,000 |
| 773,839490 | 572,300 | 0,141 | 16,200 | 0,0   | 0,000 | 0,000 |
| 834,145546 | 183,100 | 0,145 | 14,700 | 0,0   | 0,000 | 0,000 |

**Anexo 6: Coeficientes espectroscópicos para la atenuación del vapor de agua.**

| $f_6$      | $b_1$    | $b_2$ | $b_3$ | $b_4$ | $b_5$ | $b_6$ |
|------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 22,235080  | 0,1130   | 2,143 | 28,11 | 0,69  | 4,800 | 1,00  |
| 67,803960  | 0,0012   | 8,735 | 28,58 | 0,69  | 4,930 | 0,82  |
| 119,995940 | 0,0008   | 8,356 | 29,48 | 0,70  | 4,780 | 0,79  |
| 183,310091 | 2,4200   | 0,668 | 30,50 | 0,64  | 5,300 | 0,85  |
| 321,225644 | 0,0483   | 6,181 | 23,03 | 0,67  | 4,690 | 0,54  |
| 325,152919 | 1,4990   | 1,540 | 27,83 | 0,68  | 4,850 | 0,74  |
| 336,222601 | 0,0011   | 9,829 | 26,93 | 0,69  | 4,740 | 0,61  |
| 380,197372 | 11,5200  | 1,048 | 28,73 | 0,54  | 5,380 | 0,89  |
| 390,134508 | 0,0046   | 7,350 | 21,52 | 0,63  | 4,810 | 0,55  |
| 437,346667 | 0,0650   | 5,050 | 18,45 | 0,60  | 4,230 | 0,48  |
| 439,150812 | 0,9218   | 3,596 | 21,00 | 0,63  | 4,290 | 0,52  |
| 443,018295 | 0,1976   | 5,050 | 18,60 | 0,60  | 4,230 | 0,50  |
| 448,001075 | 10,3200  | 1,405 | 26,32 | 0,66  | 4,840 | 0,67  |
| 470,888947 | 0,3297   | 3,599 | 21,52 | 0,66  | 4,570 | 0,65  |
| 474,689127 | 1,2620   | 2,381 | 23,55 | 0,65  | 4,650 | 0,64  |
| 488,491133 | 0,2520   | 2,853 | 26,02 | 0,69  | 5,040 | 0,72  |
| 503,568532 | 0,0390   | 6,733 | 16,12 | 0,61  | 3,980 | 0,43  |
| 504,482692 | 0,0130   | 6,733 | 16,12 | 0,61  | 4,010 | 0,45  |
| 547,676440 | 9,7010   | 0,114 | 26,00 | 0,70  | 4,500 | 1,00  |
| 552,020960 | 14,7700  | 0,114 | 26,00 | 0,70  | 4,500 | 1,00  |
| 556,936002 | 487,4000 | 0,159 | 32,10 | 0,69  | 4,110 | 1,00  |
| 620,700807 | 5,0120   | 2,200 | 24,38 | 0,71  | 4,680 | 0,68  |
| 645,866155 | 0,0713   | 8,580 | 18,00 | 0,60  | 4,000 | 0,50  |
| 658,005280 | 0,3022   | 7,820 | 32,10 | 0,69  | 4,140 | 1,00  |
| 752,033227 | 239,6000 | 0,396 | 30,60 | 0,68  | 4,090 | 0,84  |
| 841,053973 | 0,0140   | 8,180 | 15,90 | 0,33  | 5,760 | 0,45  |
| 859,962313 | 0,1472   | 7,989 | 30,60 | 0,68  | 4,090 | 0,84  |

| $f_0$        | $b_1$       | $b_2$  | $b_3$  | $b_4$ | $b_5$  | $b_6$ |
|--------------|-------------|--------|--------|-------|--------|-------|
| 899,306675   | 0,0605      | 7,917  | 29,85  | 0,68  | 4,530  | 0,90  |
| 902,616173   | 0,0426      | 8,432  | 28,65  | 0,70  | 5,100  | 0,95  |
| 906,207325   | 0,1876      | 5,111  | 24,08  | 0,70  | 4,700  | 0,53  |
| 916,171582   | 8,3400      | 1,442  | 26,70  | 0,70  | 4,780  | 0,78  |
| 923,118427   | 0,0869      | 10,220 | 29,00  | 0,70  | 5,000  | 0,80  |
| 970,315022   | 8,9720      | 1,920  | 25,50  | 0,64  | 4,940  | 0,67  |
| 987,926764   | 132,1000    | 0,258  | 29,85  | 0,68  | 4,550  | 0,90  |
| 1 780,000000 | 22 300,0000 | 0,952  | 176,20 | 0,50  | 30,500 | 5,00  |