

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de
Telecomunicación

Simulador en Python para el cálculo de pérdidas de
propagación según la Rec. ITU-R P.530

Autor: Pablo Bayón Gala

Tutor: Susana Hornillo Mellado

Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Simulador en Python para el cálculo de pérdidas de propagación según la Rec. ITU-R P.530

Autor:

Pablo Bayón Gala

Tutor:

Susana Hornillo Mellado

Profesora Contratada Doctora

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Simulador en Python para el cálculo de pérdidas de propagación según
la Rec. ITU-R P.530

Autor: Pablo Bayón Gala
Tutor: Susana Hornillo Mellado

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis amigos

Agradecimientos

El único límite que hay es el que te pones tú mismo.

Quería agradecer a todas aquellas personas que han formado parte de mí en esta etapa y sin duda sin ellas no habría conseguido llegar hasta aquí.

Mis padres. Mi apoyo incondicional, no solo en estos años, si no en todos los anteriores en los que tuve que alcanzar alguna meta. Por aquellos momentos difíciles en los que siempre creyeron más en mí que yo mismo. Por permitirme que todos mis sueños se vayan cumpliendo poco a poco.

Mis hermanos. Desde siempre, mis dos ejemplos a seguir.

Mi abuela. Brillando desde el cielo e inspirándome en los días complicados.

Félix, Chapi, Toro y Rober. Mis compañeros de piso y de carrera. Mi otra pequeña familia durante este periodo. Cuando a uno le faltaba la fuerza, el otro la sacaba. Siempre juntos en el mismo tren.

Marina Chou. Estando tan lejos y la vez tan cerca, sabiendo sacar lo mejor de mí.

El equipo de fútbol de telecos. Sin aquellos ratos en los que podíamos sentir la libertad por momentos.

Los viajes de cada verano. Ellos me daban la energía necesaria para continuar cada año.

Susana Hornillo. Por compartir sus conocimientos desde el principio hasta fin de Grado y la dedicación puesta en este trabajo.

Pablo Bayón Gala

Sevilla, 2019

Este trabajo de fin de grado aporta al lector los algoritmos y métodos matemáticos empleados para el cálculo de la atenuación debida a lluvia y gases para radioenlaces terrestres basándose en la recomendación ITU-R P.530 [9]. Se propondrá alguna serie de casos y se resolverán de manera analítica con el objetivo de afianzar estos conocimientos.

Una vez aclarados los conceptos teóricos de este tipo de pérdidas, se realiza el programa en Python que implementa todo lo mencionado anteriormente. A continuación, se resolverán de forma simulada los casos expuestos de forma analítica con el fin de verificar el correcto funcionamiento del código. Además, con la ayuda del modo gráfico de Python y las librerías *numpy* y *matplotlib*, se generarán una serie de gráficas para comprobar la influencia de algunos de los parámetros en las pérdidas totales y así obtener unas detalladas conclusiones.

También se realizará un estudio sobre el *software* de radioenlaces existentes actuales. Se podrá observar las ventajas e inconvenientes de utilizar *softwares* de libre distribución o de pago. El propósito de esto es elegir un determinado programa como soporte para generar los parámetros de carácter geográfico necesarios para la implementación en el programa de Python, tales como longitud del trayecto, altitud y latitud. Una vez elegido el *software* que más se ajuste a las necesidades, en este caso será *LinkPlanner* del fabricante *Cambium Networks*, se le dará una idea al lector de cómo generar un nuevo proyecto y crear un radioenlace terrenal pudiendo obtener su perfil de terreno y su correspondiente exportación a una hoja de *Excel*.

Por último, se creará una interfaz gráfica mediante Python y su librería *tkinter* que permitirá a los usuarios obtener las pérdidas por lluvia y gases con solo la introducción de una serie de datos y accionar un botón. Esto hará que todos los métodos matemáticos empleados y código de programa sean transparentes para el usuario y disponga con rapidez de estas atenuaciones tan importantes y presentes siempre en los sistemas de comunicaciones y radioenlaces.

Abstract

This final degree project provides the reader with the algorithms and mathematical methods used to calculate the attenuation due to rain and gases for terrestrial radio links based on the recommendation ITU-R P.530. A series of cases will be proposed and solved in an analytical manner with the aim of consolidating this knowledge.

Once the theoretical concepts of this type of losses have been clarified, the Python program is created, which implements everything mentioned above. Next, the cases exposed in an analytical manner will be resolved simulated in order to verify the correct functioning of the code. In addition, with the help of the Python graphical mode and the *numpy* and *matplotlib* libraries, a series of graphs will be generated to check the influence of some of the parameters on the total losses and thus obtain some detailed conclusions.

There will also be a study on the current existing radio-relay software. You can see the advantages and disadvantages of using free distribution or payment softwares. The purpose of this is to choose a specific program as support to generate the geographic parameters necessary for the implementation in the Python program, such as path length, altitude and latitude. Once the software that best suits the needs has been chosen, in this case it will be *LinkPlanner* from the manufacturer *Cambium Networks*, it will give the reader an idea of how to generate a new project and create an earth radio link to obtain their land profile and its corresponding export to an *Excel* sheet.

Finally, a graphical interface through Python and its *tkinter* library will be created, which will allow users to obtain rain and gas losses with the introduction of a series of data and a button. This will make all the mathematical methods used and program code transparent to the user and quickly dispose of these important attenuations always present in the communications systems and radio links.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxi
1 Introducción	23
1.1 <i>Propagación en presencia de lluvia y otros hidrometeoros</i>	23
1.2 <i>Absorción gaseosa</i>	24
1.3 <i>Lenguaje Python</i>	24
1.3.1 <i>Breve historia</i>	24
1.3.2 <i>Características</i>	25
1.3.3 <i>Ventajas</i>	25
1.3.4 <i>Desventajas</i>	25
1.3.5 <i>Conclusión</i>	25
1.4 <i>Objetivos</i>	25
2 Atenuación debida a Hidrometeoros	27
2.1 <i>Cálculo de la atenuación debido a la lluvia a largo plazo</i>	28
2.1.1 <i>Obtención de la atenuación específica de la lluvia</i>	28
2.1.2 <i>Obtención de la longitud efectiva del trayecto</i>	30
2.1.3 <i>Cálculo de la atenuación por lluvia excedida durante el 0,01% del tiempo</i>	31
2.1.4 <i>Cálculo de la atenuación por lluvia excedida durante un porcentaje de tiempo p</i>	31
2.2 <i>Resolución analítica</i>	32
2.2.1 <i>Caso 1: Cálculo de la atenuación por lluvia excedida durante un 0,01% del tiempo</i>	32
2.2.2 <i>Caso 2: Cálculo de la atenuación por lluvia excedida durante un porcentaje del tiempo comprendido en un margen entre 0,001% y 1%</i>	34
3 Atenuación debida a Gases Atmosféricos	37
3.1 <i>Cálculo de la atenuación debida a los gases atmosféricos</i>	37
3.1.1 <i>Obtención de la atenuación específica debida a gases atmosféricos</i>	37
3.1.2 <i>Obtención de los parámetros: presión del aire seco (p), presión parcial de vapor de agua (e) y temperatura (T)</i>	40
3.1.3 <i>Obtención de la atenuación debida a gases para trayectos terrenales</i>	45
3.2 <i>Resolución analítica</i>	45
3.2.1 <i>Caso 1: Cálculo de la atenuación por gases para un radioenlace con antena transmisora en Valencina de la Concepción y antena receptora en la ETSI de Sevilla</i>	45
3.2.2 <i>Caso 2: Cálculo de la atenuación por gases para un radioenlace con antena transmisora en Fuente de Cantos y antena receptora en Calzadilla de los Barros</i>	49
3.2.3 <i>Diferencias entre el caso 1 y caso 2</i>	52
4 Software para diseño de radioenlaces	53
4.1 <i>Algunos tipos de software para análisis y diseño de radioenlaces</i>	54
4.2 <i>Diseño y análisis de un radioenlace mediante la herramienta LinkPlanner de Cambium Networks</i>	56
4.2.1 <i>Instalación del programa</i>	56
4.2.2 <i>Configuración inicial LinkPlanner</i>	57

4.2.3	Creación de un radioenlace	59
4.2.4	Conexión entre <i>LinkPlanner</i> y Python	63
4.3	Breve introducción sobre <i>HeyWhatsthat</i>	63
5	Programa en Python	65
5.1	Interfaz gráfica: <i>Interfaz.py</i>	65
5.2	Programa principal de atenuación por lluvia: <i>Principal_Lluvia.py</i>	66
5.2.1	lluvia(frecuencia,intensidad_lluvia,polarizacion,porcentaje_tiempo,angulo_elevacion_trayecto,angulo_inclinacion)	66
5.3	Funciones usadas: <i>Funciones_Lluvia.py</i>	67
5.3.1	calcula_atenuacion_especifica(polarizacion,frecuencia,intensidad_lluvia,angulo_elevacion_trayecto,angulo_inclinacion)	67
5.3.2	calcula_longitud_efectiva(distancia,intensidad_lluvia,frecuencia,alfa)	67
5.4	Cálculo de coeficientes de polarización horizontal: <i>Polarizacion_Horizontal.py</i>	67
5.4.1	calcula_coef_k_horizontal(frecuencia)	67
5.4.2	calcula_coef_alfa_horizontal(frecuencia)	67
5.5	Cálculo de coeficientes de polarización vertical: <i>Polarizacion_Vertical.py</i>	68
5.5.1	calcula_coef_k_vertical(frecuencia)	68
5.5.2	calcula_coef_alfa_vertical(frecuencia)	68
5.6	Programa principal de atenuación por gases: <i>Principal_Gases.py</i>	68
5.7	Funciones usadas: <i>Funciones_Gases.py</i>	69
5.7.1	calcula_parametros(altura,respuesta,estacion,atmosfera)	69
5.8	Método de suma raya a raya para el oxígeno: <i>Datos_Oxigeno.py</i>	70
5.8.1	calcula_N_oxigeno(presion,temperatura,presion_parcial_vapor,frecuencia)	70
5.9	Método de suma raya a raya para el vapor de agua: <i>Datos_Vapor.py</i>	70
5.9.1	calcula_N_vapor(presion,temperatura,presion_parcial_vapor,frecuencia)	70
5.10	Obtención de los datos de carácter geográfico de <i>LinkPlanner</i> : <i>Lee_Excel_DistanciayAltitud.py</i>	70
5.10.1	calcula_distancia()	70
5.10.2	calcula_altura()	71
5.11	Obtención de los datos de carácter geográfico de <i>LinkPlanner</i> : <i>Lee_Excel_Latitud.py</i>	71
5.11.1	calcula_latitud()	71
6	Comparación de Resultados y Simulaciones	73
6.1	Atenuación debida a hidrometeoros	73
6.1.1	Comparación de resultados	73
6.1.2	Conclusiones y modo gráfico de Python	76
6.2	Atenuación debida a gases atmosféricos	80
6.2.1	Comparación de resultados	80
6.2.2	Conclusiones y modo gráfico de Python	85
7	Conclusiones y Línea Futura del Trabajo	93
	Referencias	95
	Anexo I	97
	Anexo II	105
	Anexo III	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Intensidad de lluvia excedida para las zonas hidrometeorológicas H y K. [2].....	28
Tabla 2-2. Cálculo de los coeficientes k y α para determinada frecuencia. [3].....	33
Tabla 2-3. Cálculo de los coeficientes k y α para determinada frecuencia [3].....	34
Tabla 4-1. Ventajas e inconvenientes de cada tipo de <i>software</i>	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Atenuación específica a nivel del suelo debido a la absorción gaseosa por el oxígeno y el vapor de agua (densidad de vapor de agua = 7,5 g/m ³ , temperatura = 15 ° C). [1]	24
Figura 2-1. Ángulo de elevación	30
Figura 2-2. Cálculo de atenuación por lluvia en enlace terrenal	32
Figura 3-1. Radioenlace con una determinada altura promedio sobre el nivel mar. [4]	40
Figura 3-2. Radioenlace Valencina - ETSI	46
Figura 3-3. Perfil del terreno Valencina - ETSI	46
Figura 3-4. Coordenadas de las antenas. Enlace Valencina - ETSI	47
Figura 3-5. Enlace terrenal Valencina-ETSI	47
Figura 3-6. Radioenlace Fuente de Cantos – Calzadilla de los Barros	49
Figura 3-7. Perfil del terreno Fuente de Cantos - Calzadilla	50
Figura 3-8. Coordenadas de las antenas. Enlace Fuente de Cantos - Calzadilla	50
Figura 3-9. Enlace terrenal Fuente de Cantos-Calzadilla de los Barros	50
Figura 4-1. Acceso a la web del fabricante <i>Cambium Networks</i>	56
Figura 4-2. Descarga del ejecutable <i>LinkPlanner</i>	57
Figura 4-3. Icono <i>LinkPlanner</i>	57
Figura 4-4. Menú principal <i>LinkPlanner</i>	58
Figura 4-5. Configuración de información personal	58
Figura 4-6. Configuración de unidades	59
Figura 4-7. Configuración de acceso a <i>Google Maps</i>	59
Figura 4-8. Nuevo proyecto	60
Figura 4-9. Ubicación de antena transmisora	60
Figura 4-10. Ubicación de antena receptora	61
Figura 4-11. Creación del enlace	61
Figura 4-12. Perfil del terreno del enlace	62
Figura 4-13. Ventana con datos necesarios para el programa. Distancia y altitud	62
Figura 4-14. Ventana con datos necesarios para el programa. Latitud	63
Figura 4-15. Creación del enlace mediante web <i>HeyWhatssthat</i>	64
Figura 4-16. Perfil del terreno mediante <i>HeyWhatssthat</i>	64
Figura 5-1. Interfaz gráfica Trabajo	65
Figura 5-2. Diagrama de flujo función <i>lluvia</i>	66
Figura 5-3. Diagrama de flujo función <i>gases</i>	69
Figura 6-1. Coeficientes teóricos k y α de polarización horizontal [5]	73
Figura 6-2. Coeficientes simulados k y α de polarización horizontal	74
Figura 6-3. Coeficientes teóricos k y α de polarización vertical [6]	74
Figura 6-4. Coeficientes simulados k y α de polarización vertical	75
Figura 6-5. Ejecución enlace Caso 1	75
Figura 6-6. Ejecución enlace Caso 2	76
Figura 6-7. Atenuación por lluvia frente a frecuencia	77
Figura 6-8. Factor de distancia r frente a frecuencia	78
Figura 6-9. Atenuación frente a frecuencia con distintas intensidades	79
Figura 6-10. Atenuación específica frente a la frecuencia de forma teórica. [7]	80
Figura 6-11. Atenuación específica frente a la frecuencia de forma simulada	81
Figura 6-12. Atenuación específica frente a la frecuencia en las proximidades de 60 GHz de forma teórica. [7]	82
Figura 6-13. Atenuación específica frente a la frecuencia en las proximidades de 60 GHz de forma simulada	83
Figura 6-14. Ejecución enlace Caso 1	84
Figura 6-15. Ejecución enlace Caso 2	84
Figura 6-16. Ciudades con más altitud del mundo. [8]	85

Figura 6-17. Atenuación frente a la frecuencia a diferentes alturas.....	86
Figura 6-18. Temperatura frente a la altura sobre el nivel del mar.....	87
Figura 6-19. Presión frente a la altura sobre el nivel del mar.....	87
Figura 6-20. Atenuación frente a frecuencia para diferentes latitudes y estaciones.....	88
Figura 6-21. Temperatura y presión en función de la latitud y estación.....	89
Figura 6-22. Atenuación específica frente a la frecuencia en un rango de 10-300 GHz.....	90

e	número e
sen	Función seno
\leq	Menor o igual
\geq	Mayor o igual
°	Grados
TX	Transmisor
RX	Receptor
<	Menor
>	Mayor
\	Backslash
\Leftrightarrow	Si y sólo si

1 INTRODUCCIÓN

Cuando Heinrich Hertz realizó sus experimentos para comprobar que las ondas de radio eran radiación electromagnética que se comportaba según la teoría desarrollada por Maxwell, probablemente usó frecuencias entre 50 y 500 MHz. Seleccionó esta frecuencia con el fin de observar los efectos de la propagación, reflexión y refracción dentro de su laboratorio. Oliver Lodge realizó la primera demostración pública de un sistema de comunicaciones usando la frecuencia en el rango de VHF y las señales se propagaron aproximadamente 60 metros en la sala de conferencias. Marconi aumentó el tamaño de las antenas y redujo la frecuencia pudiendo explotar así las propiedades de propagación a larga distancia a frecuencias cada vez más bajas.

El desarrollo de tecnología de radio ha estado influenciado desde el principio por el uso práctico de la propagación de ondas electromagnéticas a largas distancias, junto con la capacidad de modular ondas y, por tanto, transferir información. Esto ha impulsado la necesidad de ampliar el conocimiento del entorno de propagación y de caracterizar la función de transferencia del canal de radio para proporcionar mayores anchos de banda y mayor calidad de servicio.

La propagación en el espacio libre provoca una variabilidad y distorsión de la señal radio y es el gran desafío para el ingeniero. Este busca proporcionar una descripción detallada de la señal y una capacidad de predicción para su uso en el diseño, planificación y operación de sistemas de radio.

1.1 Propagación en presencia de lluvia y otros hidrometeoros

Existe una gran variedad de formas en las que el agua se manifiesta en la atmósfera. De manera global, a todas estas formas se le conoce con el nombre de hidrometeoros.

Los hidrometeoros incluyen partículas tan diversas como gotas de lluvia, nubes, granizo, copos de nieve y hielo. Los efectos que tienen sobre los sistemas de comunicaciones dependen tanto de la frecuencia como del tipo de partícula presente. En algunas ocasiones, más de un tipo de partícula afectará a un enlace dado. Es el caso de los enlaces tierra-espacio, que algunas veces se encuentra con lluvia en la parte baja del enlace y con nieve en las mayores alturas.

Las nubes que no aportan precipitaciones y contienen solo agua líquida no serán muy importante para frecuencias por debajo de los 40 GHz, puesto que el contenido de agua líquida es demasiado bajo para ocasionar una gran absorción de energía. Se puede considerar que la niebla tiene propiedades físicas similares a la nube, excepto que se produce cerca del suelo.

Si una onda se propaga a través de los hidrometeoros a lo largo de una trayectoria de línea de visión, generalmente cambiará su polarización a medida que se desplaza debido a que los hidrometeoros no son esféricos. Esta generación de componente de polarización cruzada puede resultar un problema para los sistemas de comunicación que usan la ortogonalidad para mantener el aislamiento entre los canales. En conclusión, se puede decir que la lluvia provoca un efecto de despolarización de la señal, que se traduce en una degradación de la discriminación por polarización cruzada dando lugar a una interferencia cocanal.

1.2 Absorción gaseosa

Las resonancias moleculares contribuyen significativamente al índice de refracción radioeléctrica en ciertas bandas de frecuencia. Solo el oxígeno y el vapor de agua son relevantes en frecuencias por debajo de 350 GHz. Las líneas de resonancia pueden causar una absorción importante de ondas de radio en frecuencias cerca de las líneas.

La molécula de oxígeno tiene un momento dipolar magnético permanente. Esto da lugar a un grupo de líneas espectrales importantes cerca de los 60 GHz y una sola línea en los 119 GHz.

La molécula de agua tiene un momento dipolar eléctrico permanente y origina líneas espectrales a 22, 183 y 325 GHz.

La figura 1.1 muestra la atenuación específica causada por el oxígeno y vapor de agua. Se puede ver una absorción muy significativa alrededor de la línea de oxígeno a los 60 GHz. A diferencia del oxígeno, la cantidad de vapor de agua en la atmósfera es muy variable y la atenuación cerca de estas líneas puede variar significativamente de un lugar a otro y de un día a otro.

Desde el punto de vista del modelado, cabe destacar que la absorción y la refracción gaseosas se pueden tratar de manera unificada.

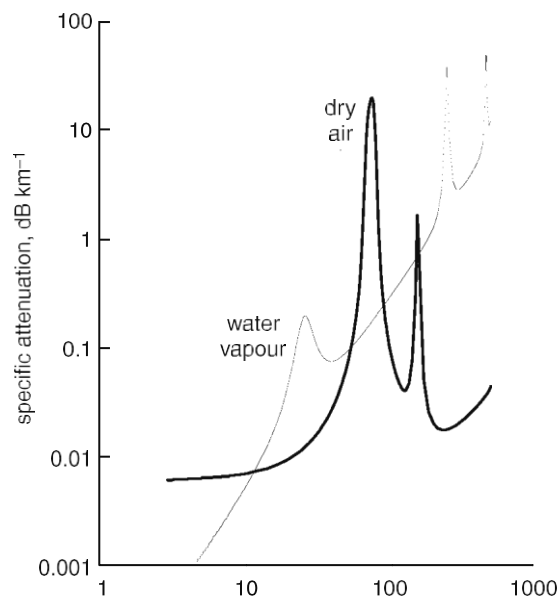


Figura 1-1. Atenuación específica a nivel del suelo debido a la absorción gaseosa por el oxígeno y el vapor de agua (densidad de vapor de agua = 7,5 g/m³, temperatura = 15 °C). [1]

1.3 Lenguaje Python

1.3.1 Breve historia

Hace ya más de una década que un europeo llamado Guido Van Rossum diseñó el lenguaje Python. Su objetivo era cubrir la necesidad de un lenguaje multiparadigma y de uso sencillo que sirviese para tratar diversas tareas dentro de la programación que habitualmente se hacía en Unix usando C.

1.3.2 Características

Características del lenguaje de programación Python:

- Es un lenguaje interpretado (no se compila el código antes de su ejecución) que usa tipado dinámico (los objetos en tiempo de ejecución tienen un tipo), fuertemente tipado (el tipo de valor no cambia repentinamente).
- Es multiplataforma: hace ejecutable su código fuente entre varios sistemas operativos.
- Es multiparadigma: soporta programación estructurada, orientada a objetos, imperativa y funcional, aunque esta última en menor medida.
- Su formato de código es estructural, por ejemplo, la indentación.

1.3.3 Ventajas

A continuación se presentan las ventajas del lenguaje Python. Estas son algunas de las razones por las que el dicho lenguaje se ha hecho tan popular en los últimos años:

- Simplificado y rápido
- Elegante y flexible
- Ordenado y limpio: lo hace muy legible y los módulos están muy bien organizados. Cualquier programador puede leer y trabajar sobre el programa escrito en Python.
- Portable: ya sea en Mac, Windows, Linux, etc.
- Rapidez de desarrollo
- Gran cantidad de librerías, tipos de datos y funciones incorporadas en el propio lenguaje
- Es gratuito, incluso para propósitos empresariales.

1.3.4 Desventajas

La principal desventaja de este lenguaje es:

- La mayoría de los servidores no tienen soporte a Python, y en caso de tener soporte, la configuración es un poco compleja.

1.3.5 Conclusión

Este lenguaje está en movimiento y pleno desarrollo, pero ya es una realidad y una buena opción para realizar todo tipo de programas que se ejecuten en cualquier máquina. El equipo de desarrollo cuenta con una comunidad que está creciendo rápidamente.

1.4 Objetivos

Estos son los objetivos principales de este trabajo de fin de grado:

- Comprender los conocimientos teóricos sobre el cálculo de pérdidas por lluvia y gases y los métodos empleados por la recomendación ITU-R P.530 [9].

- Obtener los conocimientos del lenguaje Python necesarios para llevar a cabo el proyecto, tales como funciones, codificación de operaciones matemáticas complejas, modo gráfico, interfaz gráfica...
- Implementar los métodos y algoritmos matemáticos sobre atenuación debida a lluvia y gases en Python mediante la creación de un programa.
- Comparación de resultados analíticos con simulados.
- Estudio de los *softwares* sobre radioenlaces existentes y elegir el que más se adapte a las necesidades.
- Aprendizaje sobre el programa *LinkPlanner* y su integración con el programa en Python mediante la exportación de ficheros *Excel*.
- Aprendizaje sobre el uso del modo gráfico de Python y así obtener conclusiones sobre la influencia de algunos parámetros sobre la atenuación total.
- Creación de interfaz gráfica que permita englobar todo el proyecto y hacer sencilla la introducción de datos para cualquier usuario.

2 ATENUACIÓN DEBIDA A HIDROMETEOROS

En ocasiones, la recepción de señales se ve afectada por fenómenos atmosféricos como la lluvia, reconocida como una de las principales causas que alteran la propagación de la energía electromagnética interrumpiendo la transmisión.

Para buscar una solución a esta problemática, es importante estudiar el fenómeno apoyándose en modelos estadísticos de lluvia que permiten conocer el efecto de ésta en las comunicaciones. Los modelos se basan en análisis meteorológicos o climáticos, así como también en experimentos donde se pone particular atención al tipo de perturbaciones que este efecto produce sobre los medios de transmisión.

De acuerdo con la recomendación ITU-R P.530 [9], la dispersión y absorción provocadas por hidrometeoros como la lluvia, el granizo, la nieve y la niebla producen una atenuación importante a frecuencias superiores a 5 GHz y se debe incluir en los cálculos de diseño.

El estudio se centrará en el caso de la lluvia. Este modelo permite obtener, para un trayecto determinado, el valor estimado de la atenuación A_p que es excedido durante lapsos acumulados con lluvia que en conjunto representen un % p especificado de un año medio. Para predecir las estadísticas a largo plazo de la atenuación debida a la lluvia es necesario conocer la siguiente información:

- $R_{0,01}$: intensidad de precipitación excedida durante el 0,01% tiempo (mm/h)
- f : frecuencia de trabajo del enlace (GHz)
- d : longitud del trayecto real (Km)
- Tipo de polarización (horizontal, vertical, circular, lineal)
- Porcentaje de tiempo para el que se desea calcular la atenuación (%)
- θ : ángulo de elevación del trayecto (rad) (necesario para el caso de polarización circular o lineal)
- τ : ángulo de inclinación de la polarización respecto a la horizontal (rad) (necesario para el caso de polarización lineal)

Cuando no se dispone de datos fiables sobre la intensidad de lluvia local a largo plazo, se puede recurrir al método de predicción de la intensidad de precipitación descrito en la recomendación ITU-R P.837 [12] basado en mapas de parámetros meteorológicos obtenidos mediante el *Centro Europeo de Previsión Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF)*, como en la figura 1 del Anexo I. Éste proporciona un modelo y unos ficheros con una serie de tablas para obtener la intensidad de precipitación excedida para una probabilidad porcentual y en un determinado emplazamiento.

Se incluye la siguiente tabla para las llamadas zonas H y K. Estas zonas son las que afectan en el caso de España. Así por ejemplo, Madrid se encuentra en la zona H, mientras que Valencia se encuentra en la zona K.

Porcentaje de tiempo p (%)	R (mm/h)	
	Zona H	Zona K
1	2	1,5
0,3	4	4,2
0,1	10	12
0,03	18	23
0,01	32	42
0,003	55	70
0,001	83	100

Tabla 2-1. Intensidad de lluvia excedida para las zonas hidrometeorológicas H y K. [2]

2.1 Cálculo de la atenuación debido a la lluvia a largo plazo

2.1.1 Obtención de la atenuación específica de la lluvia

En primer lugar, se necesita obtener la atenuación específica de la lluvia, γ_R (dB/km), a una determinada frecuencia, polarización e intensidad de precipitación, utilizando la recomendación ITU-R P.838 [13].

$$\gamma_R = kR_p^\alpha \quad (2-1)$$

Siendo:

γ_R : atenuación específica de la lluvia (dB/km)

k y α son coeficientes que dependen de la frecuencia y el tipo de polarización

R_p : intensidad de precipitación excedida un porcentaje de tiempo p (mm/h)

El cálculo de los coeficientes k y α se basa en las siguientes ecuaciones, relacionadas con el ajuste de las curvas a los coeficientes de la ley potencial derivados de cálculos de dispersión:

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

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 \left(a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] \right) + m_\alpha \log_{10}f + c_\alpha \quad (2-3)$$

Donde:

Coefficiente k : puede ser k_H (polarización horizontal) o k_V (polarización vertical)

Coefficiente α : puede ser α_H (polarización horizontal) o α_V (polarización vertical)

f : frecuencia (GHz)

$a_j, b_j, c_j, m_k, c_k, m_\alpha, c_\alpha$: constantes dependientes del tipo de polarización

En el Anexo I se puede encontrar los valores de las constantes con el cuadro 1 para el coeficiente k_H de polarización horizontal, el cuadro 2 para el coeficiente k_V de polarización vertical, el cuadro 3 para el coeficiente α_H de polarización horizontal y el cuadro 4 para el coeficiente α_V de polarización vertical.

En el caso que se tuviera una polarización lineal o circular los coeficientes k y α se calculan mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta \cos 2\tau]/2 \quad (2-4)$$

$$\alpha = [k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta \cos 2\tau]/2k \quad (2-5)$$

Siendo:

θ : ángulo de elevación del trayecto (rad)

τ : ángulo de inclinación de la polarización con respecto a la horizontal (rad)

Para polarización circular $\rightarrow \tau = 45^\circ = \frac{\pi}{4}$ rad

El ángulo de elevación del trayecto se define como el ángulo vertical medido desde el horizontal. Cuando el eje del haz es paralelo al suelo, la elevación es cero. Una rotación de 90 grados apunta el haz hacia el cenit.

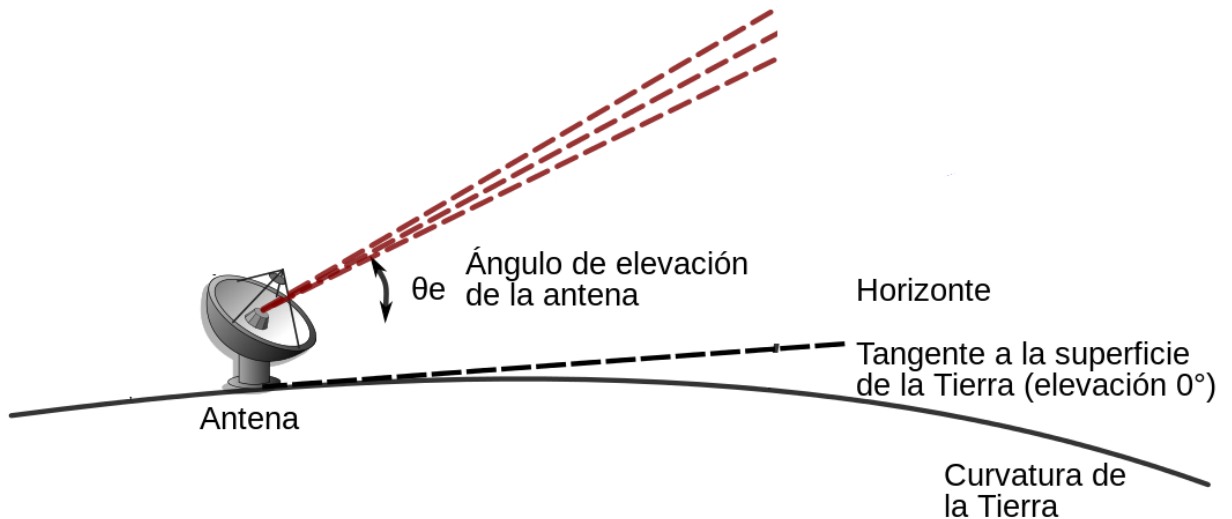


Figura 2-1. Ángulo de elevación

La recomendación proporciona una tabla que se puede encontrar en el Cuadro 5 del Anexo I con los valores de los coeficientes k y α para las polarizaciones horizontal y vertical y trayectos horizontales. Para frecuencias entre los valores proporcionados se usa interpolación, lineal para α y logarítmica para k y la frecuencia.

Además, también se proporcionan gráficas para los coeficientes k y α , tanto para polarización vertical como horizontal.

2.1.2 Obtención de la longitud efectiva del trayecto

Una vez que se obtiene la atenuación específica, se procede a calcular la longitud efectiva del trayecto.

$$L_{ef} = d * r \quad (2-6)$$

L_{ef} : longitud efectiva del trayecto (km)

d : longitud del trayecto real (km)

r : factor de distancia

Estimación del factor de distancia:

$$r = \frac{1}{0,477d^{0,633}R_{0,01}^{0,073\alpha}f^{0,123} - 10,579(1 - \exp(-0,024d))} \quad (2-7)$$

Donde:

f : frecuencia (GHz)

d : longitud del trayecto real (km)

α : coeficiente calculado anteriormente para atenuación específica

$R_{0,01}$: intensidad de precipitación excedida un porcentaje de tiempo 0,01% (mm/h)

Si el valor de r es mayor de 2,5 se aconseja que se tome 2,5 como valor máximo.

2.1.3 Cálculo de la atenuación por lluvia excedida durante el 0,01% del tiempo

Se calcula como:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_{ef} \quad (2-8)$$

Donde:

$A_{0,01}$: atenuación por lluvia excedida durante el 0,01% del tiempo (dB)

γ_R : atenuación específica de la lluvia (dB/km)

L_{ef} : longitud efectiva del trayecto (km)

2.1.4 Cálculo de la atenuación por lluvia excedida durante un porcentaje de tiempo p

Conocido el valor de la atenuación excedida durante el 0,01%, se puede calcular para un valor comprendido entre 0,001% y 1% del tiempo mediante la siguiente ley potencial:

$$A_p = A_{0,01} C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)} \quad (2-9)$$

Donde:

A_p : atenuación por lluvia excedida durante un porcentaje de tiempo p (dB)

$A_{0,01}$: atenuación por lluvia excedida durante el 0,01% del tiempo (dB)

p : porcentaje de tiempo en un margen entre el 0,001% y 1% (%)

C_1 , C_2 y C_3 son coeficientes que se calculan de la siguiente manera:

$$C_1 = (0,07^{C_0}) [0,12^{(1-C_0)}] \quad (2-10)$$

$$C_2 = 0,855C_0 + 0,546(1 - C_0) \quad (2-11)$$

$$C_3 = 0,139C_0 + 0,043(1 - C_0) \quad (2-12)$$

$$C_0 = \begin{cases} 0,12 + 0,4 \left[\log_{10} \left(\frac{f}{10} \right)^{0,8} \right] & f \geq 10 \text{ GHz} \\ 0,12 & f < 10 \text{ GHz} \end{cases} \quad (2-13)$$

2.2 Resolución analítica

2.2.1 Caso 1: Cálculo de la atenuación por lluvia excedida durante un 0,01% del tiempo

En este apartado se va a proceder a la resolución analítica del cálculo de la atenuación por lluvia rebasada durante un 0,01% del tiempo de un enlace terrenal con las siguientes características:

- Frecuencia: 38 GHz
- Intensidad de precipitación excedida durante el 0,01% del tiempo, $R_{0,01}$: 32mm/h
- Longitud del trayecto, d : 5 km
- Tipo de polarización: vertical
- Porcentaje de tiempo que se desea: 0,01%

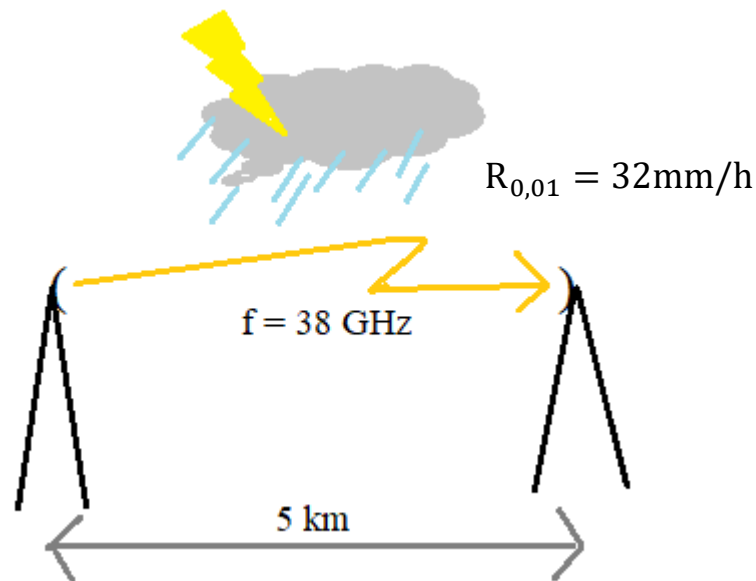


Figura 2-2. Cálculo de atenuación por lluvia en enlace terrenal

Se iniciará la resolución con el cálculo de la atenuación específica de la lluvia.

En primer lugar, se debe obtener los coeficientes k y α , que dependen de la frecuencia y el tipo de polarización. Este valor se obtiene del cuadro 5 del Anexo I proporcionado por la recomendación de la ITU-R P.838 [13]:

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
38	0,4001	0,8816	0,3844	0,8552

Tabla 2-2. Cálculo de los coeficientes k y α para determinada frecuencia. [3]

Se tiene polarización vertical, por lo que solo interesan los coeficientes k_V y α_V .

$$\gamma_R = kR_p^\alpha = 0.3844 * 32^{0.8552} = \mathbf{7.4471 \text{ dB/km}} \quad (2-14)$$

En segundo lugar se obtendrá la longitud efectiva del trayecto. Antes de nada, se necesita conocer el factor de distancia r :

$$r = \frac{1}{0.477 * 5^{0.633} * 32^{0.073 * 0.8552} * 38^{0.123} - 10.579(1 - \exp(-0.024 * 5))} = \mathbf{0.7301} \quad (2-15)$$

La longitud efectiva del trayecto se calcula a continuación:

$$L_{ef} = d * r = 5 * 0.7301 = \mathbf{3.6505 \text{ km}} \quad (2-16)$$

Por último, se obtiene la atenuación por lluvia excedida un 0,01% del tiempo:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_{ef} = 7.4471 * 3.6505 = \mathbf{27.1858 \text{ dB}} \quad (2-17)$$

2.2.2 Caso 2: Cálculo de la atenuación por lluvia excedida durante un porcentaje del tiempo comprendido en un margen entre 0,001% y 1%

En este caso se va a proceder a la resolución analítica del cálculo de la atenuación por lluvia rebasada durante un 0,1% del tiempo de un enlace terrenal con las siguientes características:

- Frecuencia: 52 GHz
- Intensidad de precipitación excedida durante el 0,01% del tiempo, $R_{0,01}$: 30mm/h
- Longitud del trayecto, d : 7.5 km
- Tipo de polarización: horizontal
- Porcentaje de tiempo que se desea: 0,1%

Se procede como en el caso anterior a obtener los coeficientes k y α , que dependen de la frecuencia y el tipo de polarización. Este valor se obtiene del cuadro 5 del Anexo I:

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
52	0,7020	0,7987	0,6901	0,7783

Tabla 2-3. Cálculo de los coeficientes k y α para determinada frecuencia [3]

En este caso se tiene polarización horizontal, por lo que solo interesan los coeficientes k_H y α_H .

$$\gamma_R = kR_p^\alpha = 0.7020 * 30^{0.7987} = \mathbf{10.6197 \text{ dB/km}} \quad (2-18)$$

En segundo lugar se obtendrá la longitud efectiva del trayecto. Se necesita conocer el factor de distancia r :

$$r = \frac{1}{0.477 * 7.5^{0.633} * 30^{0.073 * 0.7987} * 52^{0.123} - 10.579(1 - \exp(-0.024 * 7.5))} = \mathbf{0.6087} \quad (2-20)$$

La longitud efectiva del trayecto:

$$L_{ef} = d * r = 7.5 * 0.6087 = \mathbf{4.5653 \text{ km}} \quad (2-21)$$

Se obtiene la atenuación por lluvia excedida un 0,01% del tiempo:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_{ef} = 10.6197 * 4.5653 = \mathbf{48.4821 \text{ dB}} \quad (2-22)$$

Por último, se calcula la atenuación rebasada un 0,1% del tiempo. Antes se necesita conocer el valor de los coeficientes necesarios:

$$C_0 = 0.12 + 0.4 \left[\log_{10} \left(\frac{52}{10} \right)^{0.8} \right] = \mathbf{0.4262} \quad (2-23)$$

$$C_1 = (0.07^{0.4262}) [0.12^{(1-0.4262)}] = \mathbf{0.0954} \quad (2-24)$$

$$C_2 = 0.855C_0 + 0.546(1 - C_0) = \mathbf{0.6777} \quad (2-25)$$

$$C_3 = 0.139C_0 + 0.043(1 - C_0) = \mathbf{0.0839} \quad (2-26)$$

Finalmente la atenuación queda:

$$A_{0,1} = 48.4821 * 0.0954 * 0.1^{-(0.677+0.0839*\log_{10}(0.1))} = \mathbf{18.1230 \text{ dB}} \quad (2-27)$$

3 ATENUACIÓN DEBIDA A GASES ATMOSFÉRICOS

La atenuación producida por los gases atmosféricos es causada principalmente por la absorción de las moléculas de oxígeno y vapor de agua. Esta atenuación va ganando valor a medida que aumenta la frecuencia, especialmente para ángulos de elevación bajos. Para frecuencias superiores a 10 GHz esta atenuación comienza a ser apreciable.

Resulta ser muy importante para frecuencias cercanas a los picos de resonancia de estas moléculas. El pico de resonancia del vapor de agua se sitúa aproximadamente en 22 GHz y la del oxígeno alrededor de los 60 GHz, pero para frecuencias no tan altas, los valores de atenuación por gases son pequeños. Los gases residuales como CO, NO, NO₂, SO₂, O₃... pueden contribuir significativamente a la atenuación total para frecuencias superiores a 70 GHz.

Se suele considerar que la contribución del oxígeno a la absorción atmosférica es relativamente constante, aunque tenga ligeras variaciones dependiendo de la temperatura. Sin embargo, la atenuación por vapor de agua sufre mayores oscilaciones debido a que los perfiles de humedad son muy variables.

La atenuación por oxígeno y vapor de agua varía principalmente por tres factores:

- Frecuencia
- Temperatura
- Presión atmosférica

La recomendación ITU-R P.676 [10] recomienda que, de manera general, para calcular la atenuación producida por los gases atmosféricos en trayectos terrenales y oblicuos se utilice el cálculo mediante la suma de rayas de absorción individual, válida para la gama de frecuencias entre 1 y 1000 GHz.

3.1 Cálculo de la atenuación debida a los gases atmosféricos

3.1.1 Obtención de la atenuación específica debida a gases atmosféricos

Según la recomendación ITU-R P.676 [10], se utilizará el método de suma raya a raya, válido para la gama de frecuencias entre 1 y 1000 GHz, para el cálculo de la atenuación específica por gases.

Este método consiste en la suma de cada una de las rayas de resonancia debidas al oxígeno y vapor de agua, junto con los pequeños factores adicionales debidos al espectro de oxígeno no resonante de Debye y la atenuación inducida por la presión del nitrógeno.

Se calcula de la siguiente manera:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,1820f(N''_{Oxígeno}(f) + N''_{Vapor\ de\ agua}(f)) \quad (3-1)$$

Siendo:

γ : atenuación específica debida a gases (dB/km)

γ_o : atenuación específica debida al aire seco (dB/km). Esta atenuación es causada por la del oxígeno, la atenuación no resonante de Debye y la del nitrógeno inducida por presión.

γ_w : atenuación específica debida al vapor de agua (dB/km)

f : frecuencia (GHz)

$N''_{Oxígeno}(f)$: parte imaginaria del valor complejo de la refractividad del oxígeno, que es dependiente de la frecuencia.

$N''_{Vapor\ de\ agua}(f)$: parte imaginaria del valor complejo de la refractividad del vapor de agua, que es dependiente de la frecuencia.

Si se desarrollan estos dos últimos términos:

$$N''_{Oxígeno}(f) = \sum_{i(Oxígeno)} S_i F_i + N''_D(f) \quad (3-2)$$

$$N''_{Vapor\ de\ agua}(f) = \sum_{i(Vapor\ de\ agua)} S_i F_i \quad (3-3)$$

Donde:

S_i : valor de la i -ésima raya del oxígeno o vapor de agua

F_i : factor de forma de raya del oxígeno o vapor de agua

$N''_D(f)$: espectro continuo de aire seco debido a la absorción del nitrógeno inducida por presión y al espectro de Debye

Dichas sumas se extienden a todas las rayas de los cuadros 1 y 2 del Anexo II. Estos cuadros proporcionan los datos espectroscópicos para el oxígeno y vapor de agua, respectivamente.

➤ **Cálculo de S_i : valor de la i -ésima raya del oxígeno o vapor de agua**

$$S_i = \begin{cases} a_1 \cdot 10^{-7} \cdot p \cdot \theta^3 \cdot \exp[a_2(1 - \theta)] & \text{para el oxígeno} \\ b_1 \cdot 10^{-1} \cdot e \cdot \theta^{3,5} \cdot \exp[b_2(1 - \theta)] & \text{para el vapor de agua} \end{cases} \quad (3-4)$$

Siendo:

p : presión del aire seco (hPa)

e : presión parcial del vapor de agua (hPa)

$\theta = 300/T$

T : temperatura (K)

➤ **Cálculo de F_i : factor de forma de raya del oxígeno o vapor de agua**

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left[\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + \Delta f^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + \Delta f^2} \right] \quad (3-5)$$

Donde:

f_i : frecuencia de raya del oxígeno o vapor de agua (GHz)

Δf : anchura de la raya

δ : factor de corrección que tiene en cuenta los efectos de interferencia en las rayas del oxígeno

La anchura de la raya se calcula como:

$$\Delta f = \begin{cases} a_3 \cdot 10^{-4} (p \cdot \theta^{(0,8-a_4)} + 1,1 \cdot e \cdot \theta) & \text{para el oxígeno} \\ b_3 \cdot 10^{-4} (p \cdot \theta^{b_4} + b_5 \cdot e \cdot \theta^{b_6}) & \text{para el vapor de agua} \end{cases} \quad (3-6)$$

Posteriormente 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:

$$\Delta f = \begin{cases} \sqrt{\Delta f^2 + 2,25 \cdot 10^{-6}} & \text{para el oxígeno} \\ 0,535\Delta f + \sqrt{0,217\Delta f^2 + \frac{2,1316 \cdot 10^{-12} \cdot f_i^2}{\theta}} & \text{para el vapor de agua} \end{cases} \quad (3-7)$$

El factor de corrección se calcula como:

$$\delta = \begin{cases} (a_5 + a_6 \cdot \theta) \cdot 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8} & \text{para el oxígeno} \\ 0 & \text{para el vapor de agua} \end{cases} \quad (3-8)$$

➤ **Cálculo de $N_D''(f)$: espectro continuo de aire seco**

$$N_D''(f) = f \cdot p \cdot \theta^2 \left[\frac{6,14 \cdot 10^{-5}}{d \left[1 + \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right]} \right] + \frac{1,4 \cdot 10^{-12} \cdot p \cdot \theta^{1,5}}{1 + 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot f^{1,5}} \quad (3-9)$$

Siendo d el parámetro de anchura de banda del espectro de Debye:

$$d = 5,6 \cdot 10^{-4}(p + e)\theta^{0,8} \quad (3-10)$$

3.1.2 Obtención de los parámetros: presión del aire seco (p), presión parcial de vapor de agua (e) y temperatura (T)

El cálculo de la atenuación específica debida a gases se basa en los siguientes parámetros:

- Frecuencia
- Temperatura
- Presión atmosférica

Para la obtención de los parámetros de temperatura y presión atmosférica se utilizará una atmósfera normal de referencia descrita por la recomendación ITU-R P.835 [11].

Existen dos formas de calcular estos parámetros: una es mediante la atmósfera de referencia mundial anual media, cuando no se disponen de datos sobre latitud, y la otra forma es mediante atmósfera de referencia anual dependiendo de la latitud a la que se encuentre.

▪ **Forma 1: Atmósfera de referencia mundial anual media**

Cuando no se disponga de datos sobre latitud se usará el modelo de referencia mundial anual media, la cual refleja los perfiles medios anuales de temperatura y presión en relación con la altura cuando se promedian en todo el mundo.

La recomendación proporciona diferentes ecuaciones de temperatura y presión para enlaces Tierra-espacio en función de distintos rangos de altura sobre el nivel del mar. Al estar en el caso de radioenlaces terrenales se usará solamente la ecuación del rango adecuado, sabiendo que en enlaces terrenales nunca se excederá los 10 kilómetros de altura sobre el nivel del mar.

A continuación se representa una gráfica con un determinado radioenlace y una cota geográfica o altura sobre el nivel del mar en un punto del mismo:

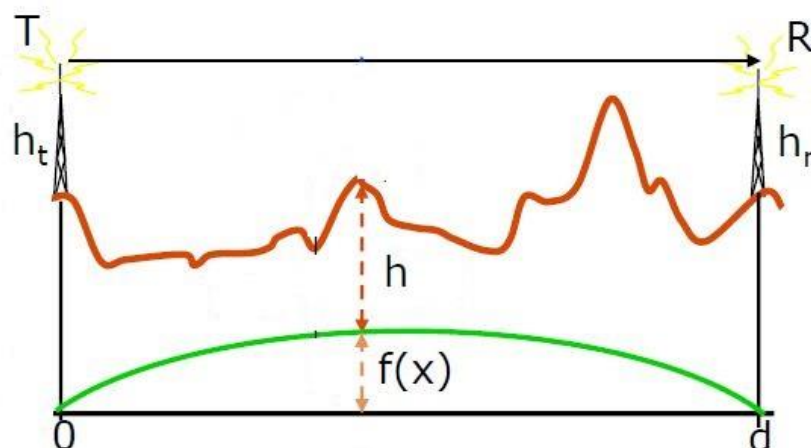


Figura 3-1. Radioenlace con una determinada altura promedio sobre el nivel mar. [4]

Siendo:

$f(x)$: flecha o protuberancia de la Tierra en un punto.

$$f(x) = \frac{x(d-x)}{2R_0} \quad (3-11)$$

$R_0=6370$ km. Es el radio de la Tierra.

Distancias x y d en kilómetros.

h : altura sobre el nivel del mar.

Se procederá al cálculo de la temperatura, presión del aire seco y presión parcial del vapor de agua en función de la altura promedio sobre el nivel del mar.

➤ **Temperatura**

$$T(h) = 288,15 - 6,5h \quad \text{para } 0 \leq h \leq 11 \quad (3-12)$$

Donde:

T : temperatura (K)

h : altura promedio sobre el nivel del mar (km)

➤ **Presión del aire seco**

$$P(h) = 1013,25 \left[\frac{288,15}{288,15 - 6,5h} \right]^{-34,1632/6,5} \quad \text{para } 0 \leq h \leq 11 \quad (3-13)$$

Siendo:

$P(h)$: presión del aire seco (hPa)

h : altura promedio sobre el nivel del mar (km)

➤ **Presión parcial del vapor de agua**

$$e(h) = \frac{\rho(h)T(h)}{216,7} \quad (3-14)$$

Donde:

$e(h)$: presión parcial del vapor de agua (hPa)

$\rho(h)$: densidad del vapor de agua (g/m^3)

$T(h)$: temperatura (K)

La densidad del vapor de agua se obtiene con:

$$\rho(h) = \rho_0 \exp(-h/h_0) \quad (3-15)$$

Siendo:

$\rho_0 = 7,5 g/m^3$. Densidad normal del vapor de agua a nivel del suelo (g/m^3)

h : altura promedio sobre el nivel del mar (km)

$h_0 = \begin{cases} 2 \text{ km para atmósfera normal} \\ 6 \text{ km para atmósfera seca} \end{cases}$. Se le conoce como altura de escala (km)

▪ **Forma 2: Atmósfera de referencia anual para latitudes bajas, medias o altas**

Cuando se disponga de datos sobre latitud se usará el modelo de referencia anual para latitudes bajas, medias o altas, la cual refleja los perfiles medios anuales de temperatura y presión en relación con la altura según la latitud.

La recomendación proporciona diferentes ecuaciones de temperatura y presión para enlaces Tierra-espacio en función de distintos rangos de altura sobre el nivel del mar. Al estar en el caso de radioenlaces terrenales se usará solamente la ecuación del rango adecuado, sabiendo que en enlaces terrenales nunca se excederá los 10 kilómetros de altura sobre el nivel del mar.

○ **Para latitudes bajas: inferiores a 22 grados.**

En este caso, las variaciones estacionales no son importantes.

➤ **Temperatura**

$$T(h) = 300,4222 - 6,3533h + 0,005886h^2 \quad \text{para } 0 \leq h \leq 17 \quad (3-16)$$

Donde:

T : temperatura (K)

h : altura promedio sobre el nivel del mar (km)

➤ **Presión del aire seco**

$$P(h) = 1012,0306 - 109,0338h + 3,6316h^2 \quad \text{para } 0 \leq h \leq 10 \quad (3-17)$$

Siendo:

$P(h)$: presión del aire seco (hPa)

h : altura promedio sobre el nivel del mar (km)

➤ **Presión parcial del vapor de agua**

Se usa la ecuación (3-13). La densidad del vapor de agua se obtiene con:

$$\rho(h) = 19,6542 \exp[-0,2313h - 0,1122h^2 + 0,01351h^3 - 0,0005953h^4] \quad \text{para } 0 \leq h \leq 15 \quad (3-18)$$

Siendo:

h : altura promedio sobre el nivel del mar (km)

○ **Para latitudes medias: entre 22 y 45 grados.**

En este caso, las variaciones estacionales sí son importantes.

• **Latitud media en verano**

➤ **Temperatura**

$$T(h) = 294,9838 - 5,2159h - 0,07109h^2 \quad \text{para } 0 \leq h < 13 \quad (3-19)$$

➤ **Presión del aire seco**

$$P(h) = 1012,8186 - 111,5569h + 3,8646h^2 \quad \text{para } 0 \leq h \leq 10 \quad (3-20)$$

➤ **Presión parcial del vapor de agua**

Se usa la ecuación (3-13). La densidad del vapor de agua se obtiene con:

$$\rho(h) = 14,3542 \exp[-0,4174h - 0,02290h^2 + 0,001007h^3] \quad \text{para } 0 \leq h \leq 15 \quad (3-21)$$

• **Latitud media en invierno**

➤ **Temperatura**

$$T(h) = 272,7241 - 3,6217h - 0,1759h^2 \quad \text{para } 0 \leq h < 10 \quad (3-22)$$

➤ **Presión del aire seco**

$$P(h) = 1018,8627 - 124,2954h + 4,8307h^2 \quad \text{para } 0 \leq h \leq 10 \quad (3-23)$$

➤ **Presión parcial del vapor de agua**

Se usa la ecuación (3-13). La densidad del vapor de agua se obtiene con:

$$\rho(h) = 3,4742 \exp[-0,2697h - 0,03604h^2 + 0,0004489h^3] \quad \text{para } 0 \leq h \leq 10 \quad (3-24)$$

○ **Para latitudes altas: superiores a 45 grados.**

En este caso, las variaciones estacionales sí son importantes.

• **Latitud alta en verano**

➤ **Temperatura**

$$T(h) = 286,8374 - 4,7805h - 0,1402h^2 \quad \text{para } 0 \leq h < 10 \quad (3-25)$$

➤ **Presión del aire seco**

$$P(h) = 1008,0278 - 113,2494h + 3,9408h^2 \quad \text{para } 0 \leq h \leq 10 \quad (3-26)$$

➤ **Presión parcial del vapor de agua**

Se usa la ecuación (3-13). La densidad del vapor de agua se obtiene con:

$$\rho(h) = 8,988 \exp[-0,3614h - 0,005402h^2 - 0,001955h^3] \quad \text{para } 0 \leq h \leq 15 \quad (3-27)$$

• **Latitud alta en invierno**

➤ **Temperatura**

$$T(h) = 257,4345 + 2,3474h - 1,5479h^2 + 0,08473h^3 \quad \text{para } 0 \leq h < 8,5 \quad (3-28)$$

➤ **Presión del aire seco**

$$P(h) = 1010,8828 - 122,2411h + 4,554h^2 \quad \text{para } 0 \leq h \leq 10 \quad (3-29)$$

➤ Presión parcial del vapor de agua

Se usa la ecuación (3-13). La densidad del vapor de agua se obtiene con:

$$\rho(h) = 1,2319 \exp[0,07481h - 0,0981h^2 + 0,00281h^3] \text{ para } 0 \leq h \leq 10 \quad (3-30)$$

3.1.3 Obtención de la atenuación debida a gases para trayectos terrenales

Para trayectos terrenales y los ligeramente inclinados cercanos al suelo:

$$A = \gamma \cdot r_0 \quad (3-31)$$

Donde:

A: atenuación debida a gases (dB)

γ : atenuación específica debida a gases (dB/km)

r_0 : longitud del trayecto (km)

3.2 Resolución analítica

3.2.1 Caso 1: Cálculo de la atenuación por gases para un radioenlace con antena transmisora en Valencina de la Concepción y antena receptora en la ETSI de Sevilla

En este apartado se va a proceder a la resolución analítica del cálculo de la atenuación por gases de un enlace terrenal con las siguientes características:

- Frecuencia: 38 GHz
- Estación del año: verano
- Tipo de atmósfera (normal o seca): normal
- Ubicación antena transmisora: Valencina de la Concepción (Axión)
- Ubicación de la antena receptora: ETSI de Sevilla

En primer lugar, se obtendrán los parámetros de carácter geográfico mediante el *software LinkPlanner*, que se analizará con más detalle en el *capítulo 4*.

El primer paso es crear el enlace:

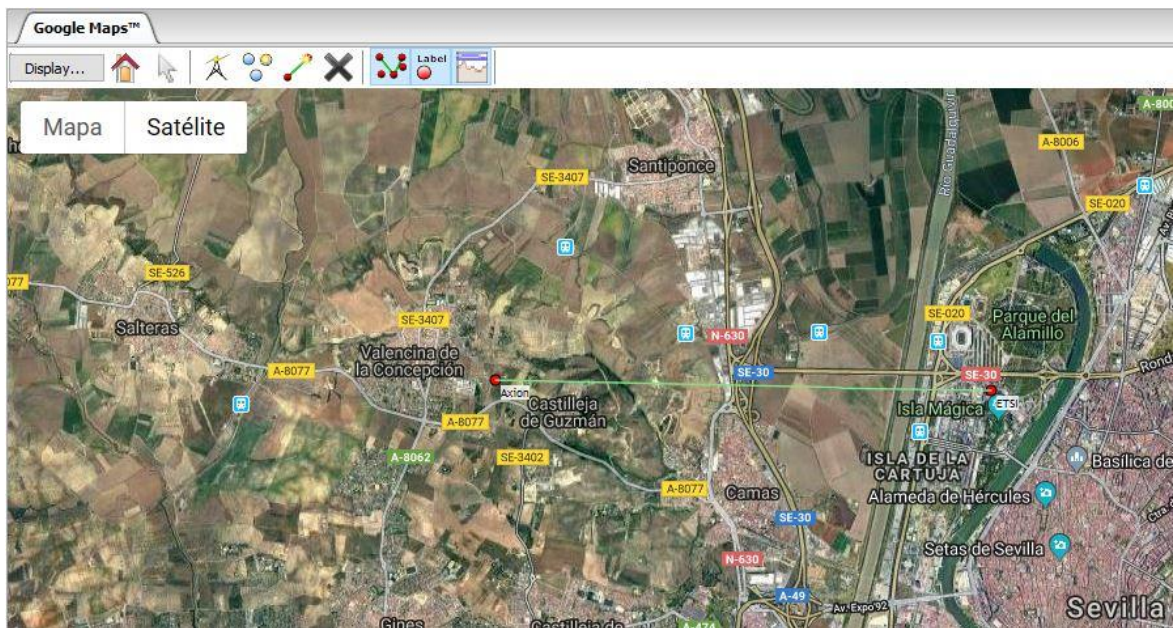


Figura 3-2. Radioenlace Valencina - ETSI

A continuación, se halla el perfil de dicho terreno:

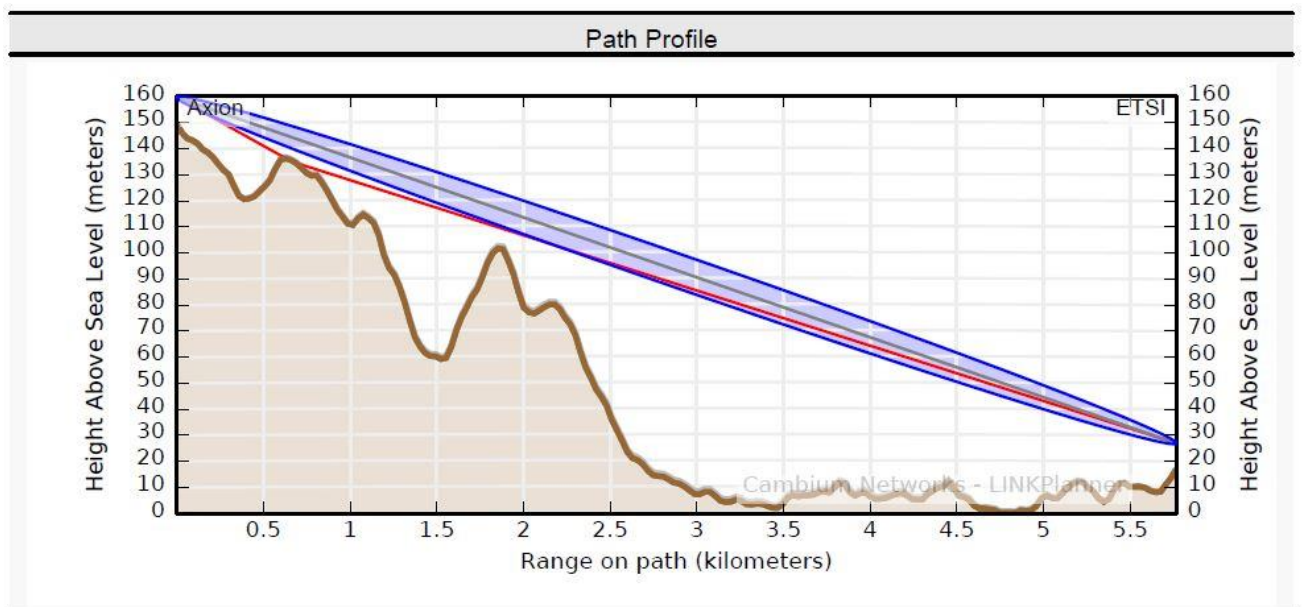


Figura 3-3. Perfil del terreno Valencina - ETSI

Como se aprecia en la figura anterior, mediante el perfil del terreno se puede obtener la distancia de trayecto y la altura sobre el nivel del mar. Si se hace doble clic sobre el perfil en el programa *LinkPlanner* se abre una pantalla llamada *Profile Editor* con una gran número de puntos sobre el terreno. El último punto será la distancia total del trayecto expresada en kilómetros. Para obtener la altura sobre el nivel del mar se realizará un promedio de todos esos puntos y el resultado será la altitud final.

En este caso se obtiene:

- Longitud del trayecto, d : 5,765 km
- Altura promedio sobre el nivel del mar, h : 48 metros

Más tarde, se obtiene las coordenadas de las antenas transmisora y receptora. En concreto la latitud, que es el parámetro que interesa. *LinkPlanner* lo facilita de manera sencilla:

Name	Latitude	Longitude	Maximum Height (m)
Axion	37:24:46.0N	006:03:56.9W	10
ETSI	37:24:42.1N	006:00:02.5W	10

Figura 3-4. Coordenadas de las antenas. Enlace Valencina - ETSI

Una vez obtenidos estos parámetros, así quedaría el enlace:

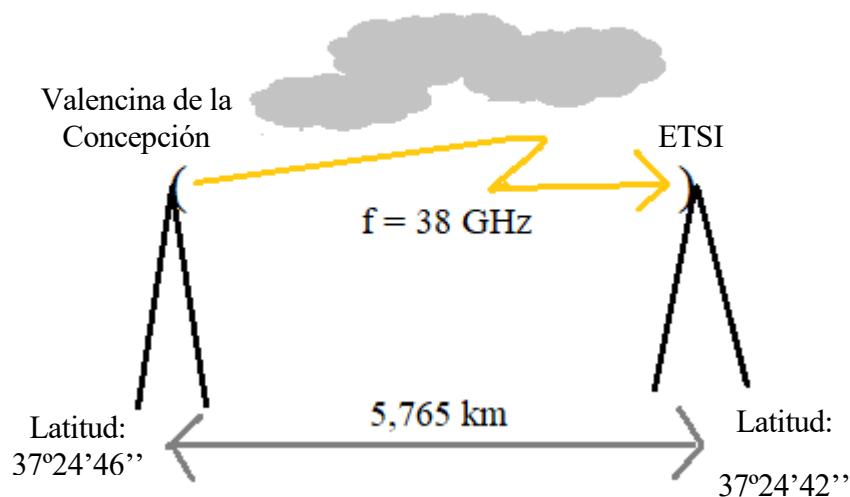


Figura 3-5. Enlace terrenal Valencina-ETSI

En segundo lugar, se iniciará la resolución con el cálculo de los parámetros de temperatura, presión de aire seco y presión de vapor de agua, los cuales todos ellos dependen de la altura sobre el nivel del mar.

En este problema se conoce la latitud, que es aproximadamente de 37 grados. Se está en el caso de latitud media en verano.

➤ Temperatura:

$$T(h) = 294,9838 - 5,2159 * 0,048 - 0,07109 * 0,048^2 = \mathbf{294,7333 K} \quad (3-32)$$

➤ Presión del aire seco:

$$P(h) = 1012,8186 - 111,5569 * 0,048 + 3,8646 * 0,048^2 = \mathbf{1007,4728 hPa} \quad (3-33)$$

➤ Presión parcial del vapor de agua:

La densidad del vapor de agua se obtiene con:

$$\begin{aligned} \rho(h) &= 14,3542 \exp[-0,4174 * 0,048 - 0,02290 * 0,048^2 + 0,001007 * 0,048^3] \\ &= 14,0687 \text{ g/m}^3 \end{aligned} \quad (3-34)$$

$$e(h) = \frac{14,0687 * 294,7333}{216,7} = \mathbf{19,1348 hPa} \quad (3-35)$$

En segundo lugar, se calcula la atenuación específica debida a gases. Esto hay que realizarlo computacionalmente porque los sumatorios se extienden a todas las rayas de los cuadros con los datos espectroscópicos de oxígeno y vapor de agua.

Por ejemplo, se realiza un *script* de *Matlab* que obtenga dichos sumatorios para posteriormente compararlos con el programa en Python.

El resultado es el siguiente:

$$\sum_{i(\text{Oxígeno})} S_i F_i = \mathbf{0,00698} \quad (3-36)$$

$$N''_{\text{Vapor de agua}}(f) = \sum_{i(\text{Vapor de agua})} S_i F_i = \mathbf{0,0211678} \quad (3-37)$$

Ahora se puede calcular el parámetro de anchura de banda del espectro de Debye:

$$d = 5,6 \cdot 10^{-4} (1007,4728 + 19,1348) * \left(\frac{300}{294,7333} \right)^{0,8} = 0,5831 \quad (3-38)$$

Para a continuación obtener el espectro continuo de aire seco:

$$N_D''(f) = 38 \cdot 1007,4728 \cdot \left(\frac{300}{294,7333}\right)^2 \left[\frac{6,14 \cdot 10^{-5}}{0,5831 \left[1 + \left(\frac{38}{0,5831}\right)^2\right]} \right] + \frac{1,4 \cdot 10^{-12} \cdot 1007,4728 \cdot \left(\frac{300}{294,7333}\right)^{1,5}}{1 + 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot 38^{1,5}} \quad (3-39)$$

$$= 0,0009832$$

Con todos estos datos, ya se puede realizar el cálculo de la atenuación específica:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,1820 \cdot 38 \cdot (0,00698 + 0,0009832 + 0,0211678) \quad (3-40)$$

$$= 0,2015 \text{ dB/km}$$

El último paso es obtener la atenuación debida a gases:

$$A = 0,2015 \cdot 5,765 = 1,1616 \text{ dB} \quad (3-41)$$

3.2.2 Caso 2: Cálculo de la atenuación por gases para un radioenlace con antena transmisora en Fuente de Cantos y antena receptora en Calzadilla de los Barros

En este apartado se va a proceder a la resolución analítica del cálculo de la atenuación por gases de un enlace terrenal con las siguientes características:

- Frecuencia: 60 GHz
- Estación del año: invierno
- Tipo de atmósfera (normal o seca): normal
- Ubicación antena transmisora: Fuente de Cantos
- Ubicación antena receptora: Calzadilla de los Barros

En primer lugar, se obtienen los parámetros de carácter geográfico mediante *LinkPlanner*, que como se dijo anteriormente se estudiará en profundidad en el próximo capítulo. Se crea el enlace:

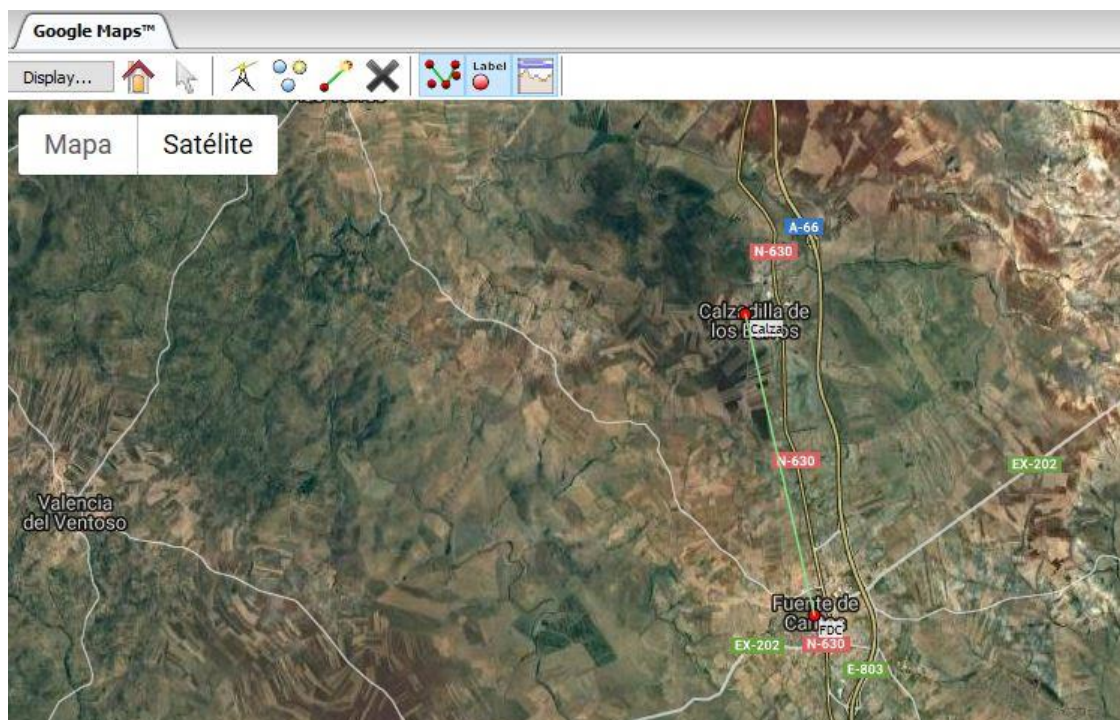


Figura 3-6. Radioenlace Fuente de Cantos – Calzadilla de los Barros

A continuación, se halla el perfil del terreno:

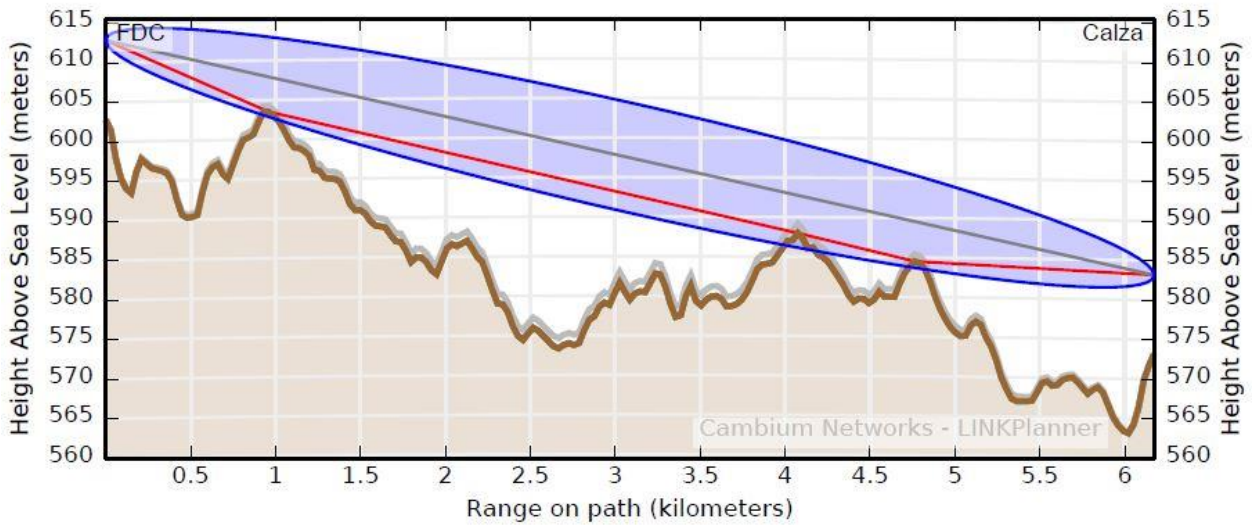


Figura 3-7. Perfil del terreno Fuente de Cantos - Calzadilla

Del perfil anterior se pueden obtener los siguientes datos procediendo como en el caso 1:

- Longitud del trayecto, d : 6,172 km
- Altura promedio sobre el nivel del mar, h : 583 metros

Más tarde, se extrae la latitud de las antenas transmisora y receptora:

Name	Latitude	Longitude
Calza	38:18:05.3N	006:19:10.7W
FDC	38:14:50.2N	006:18:13.8W

Figura 3-8. Coordenadas de las antenas. Enlace Fuente de Cantos - Calzadilla

El enlace quedaría con las siguientes características:

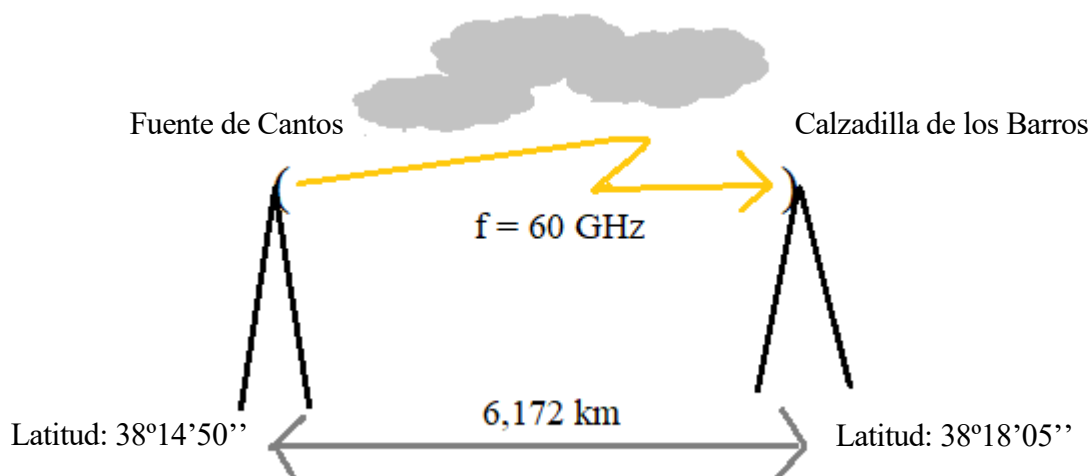


Figura 3-9. Enlace terrenal Fuente de Cantos-Calzadilla de los Barros

En segundo lugar, se calculan los parámetros de temperatura, presión de aire seco y presión de vapor de agua.

Esta vez se conoce la latitud, que es aproximadamente de 38 grados. Se está en el caso de latitud media en invierno.

➤ Temperatura:

$$T(h) = 272,7241 - 3,6217 \cdot 0,583 - 0,1759 \cdot 0,583^2 = \mathbf{270,553K} \quad (3-42)$$

➤ Presión del aire seco:

$$P(h) = 1018,8627 - 124,2954 \cdot 0,583 + 4,8307 \cdot 0,583^2 = \mathbf{948,04 hPa} \quad (3-43)$$

➤ Presión parcial del vapor de agua:

La densidad del vapor de agua se obtiene con:

$$\rho(h) = 3,4742 \exp[-0,2697 \cdot 0,583 - 0,03604 \cdot 0,583^2 + 0,0004489 \cdot 0,583^3] = 2,9328 \text{ g/m}^3 \quad (3-44)$$

$$e(h) = \frac{2,9328 \cdot 270,553}{216,7} = \mathbf{3,6616 hPa} \quad (3-45)$$

A continuación, se halla la atenuación específica debida a gases. Computacionalmente se obtiene:

$$\sum_{i(\text{Oxígeno})} S_i F_i = \mathbf{1,4421} \quad (3-46)$$

$$N''_{\text{Vapor de agua}}(f) = \sum_{i(\text{Vapor de agua})} S_i F_i = \mathbf{0,005758} \quad (3-47)$$

Ahora se puede calcular el parámetro de anchura de banda del espectro de Debye:

$$d = 5,6 \cdot 10^{-4} (948,04 + 3,6616) * \left(\frac{300}{270,553} \right)^{0,8} = 0,5789 \quad (3-48)$$

Para a continuación obtener el espectro continuo de aire seco:

$$N''_b(f) = 60 \cdot 948,04 \cdot \left(\frac{300}{270,553} \right)^2 \left[\frac{6,14 \cdot 10^{-5}}{0,5789 \left[1 + \left(\frac{60}{0,5789} \right)^2 \right]} \right] + \frac{1,4 \cdot 10^{-12} \cdot 948,04 \cdot \left(\frac{300}{270,553} \right)^{1,5}}{1 + 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot 60^{1,5}} = \mathbf{0,0006905} \quad (3-49)$$

Con todos estos datos, ya se puede realizar el cálculo de la atenuación específica:

$$\begin{aligned}\gamma &= \gamma_o + \gamma_w = 0,1820 \cdot 60 \cdot (1,4421 + 0,0006905 + 0,005758) \\ &= \mathbf{15,8181 \text{ dB/km}}\end{aligned}\quad (3-50)$$

El último paso es obtener la atenuación debida a gases:

$$A = 15,8181 \cdot 6,172 = \mathbf{97,63 \text{ dB}}\quad (3-51)$$

3.2.3 Diferencias entre el caso 1 y caso 2

Como se puede observar, la principal diferencia entre el primer y segundo caso es la atenuación tan dispar que se obtiene para cada uno de ellos. Mientras que para el primer caso se da una atenuación de aproximadamente 1 decibelio, para el segundo caso se obtiene una atenuación aproximada de 98 decibelios.

En el anexo 2 de la recomendación ITU-R P.676 [10], en el que en vez de usar el método de raya por raya, se calcula la atenuación específica mediante un procedimiento simplificado en la gama de frecuencias entre 1-350 GHz se da una gráfica que muestra la atenuación específica de aire seco, la atenuación causada por el vapor de agua con una densidad de $7,5 \text{ g/m}^3$ y la atenuación total de 1 a 350 GHz a nivel del mar para la atmósfera de referencia mundial anual media. Dicha gráfica se puede encontrar en la figura 1 del Anexo II.

Se puede concluir que la gran diferencia entre el caso 1 y el caso 2 es debido a la frecuencia utilizada. Para el primer caso, se usa una frecuencia de 38 GHz. Si se observa la gráfica anterior para esta frecuencia se obtiene una atenuación específica de aproximadamente **0,12 dB/km**. Sin embargo, para el segundo caso, se utiliza una frecuencia de 60 GHz. En la gráfica se puede ver cómo existe un máximo para este valor de frecuencia. Debido a esto, la atenuación específica se dispara a un valor aproximado de **15 dB/km**. Estos valores son los que posteriormente se multiplican por la distancia del trayecto para obtener la atenuación debida a gases para trayectos terrenales.

A modo de resumen, se puede afirmar que la divergencia de atenuación obtenida entre los dos casos se basa en la frecuencia utilizada para cada enlace.

4 SOFTWARE PARA DISEÑO DE RADIOENLACES

Con el objetivo de facilitar al usuario la introducción de parámetros del radioenlace necesarios, y a su vez, insertar el mínimo número de parámetros se ha decidido realizar un pequeño estudio del *software* actual para diseño de radioenlaces y así obtener valores básicos de variables de carácter geográfico como la altitud, latitud, distancia del trayecto, perfil del terreno, etc.

Para nuestro trabajo se necesitarán muy pocos parámetros de carácter geográfico. Aun así estos serán imprescindibles en el estudio.

Para el cálculo de la atenuación por lluvia será necesario el siguiente parámetro:

- Distancia del trayecto, d , en Km

Para la obtención de la atenuación por gases serán necesarios los siguientes:

- Distancia del trayecto, d , en Km
- Altitud, h , en metros
- Latitud en grados

Esto se realizará usando un *software*, que con la introducción del lugar geográfico de las antenas transmisora y receptora, te devuelva de alguna forma dichos parámetros para posteriormente trabajar con ellos en el programa de Python.

En una primera instancia, parámetros como la distancia del trayecto o la altura sobre el nivel del mar eran introducidos por línea de comandos en el programa de Python. Más tarde, se decidió que no era muy útil dejar estos parámetros en manos del usuario, puesto que tendría que realizar una búsqueda de información ajena al programa para su posterior incorporación. Finalmente, se pensó que lo más viable era que el usuario solo introdujera parámetros útiles relacionados con las antenas, que es realmente el objetivo del diseñador de un radioenlace, y dejar la tarea de información de carácter geográfico a un *software* externo al programa para su posterior agregación a Python.

4.1 Algunos tipos de *software* para análisis y diseño de radioenlaces

Se van a estudiar las ventajas y desventajas de algunos tipos de *software* con el fin de elegir uno que se adecue más para calcular los parámetros necesarios de carácter geográfico y su incorporación al programa de Python.

Aquí se presentan algunos de ellos:

- *ICS Telecom de ATDI*: *software* de pago profesional sobre planificación radio que permite modelar un sistema de radiocomunicaciones. Proporciona herramientas muy útiles en cualquier etapa de planificación de red, incluyendo aspectos técnicos y de regulación. Incorpora un sistema de información geográfica (*GIS*) que permite trabajar con mapas de alta resolución. Cada información asociada a un proyecto está distribuida en capas que se superponen. Existen mapas de cartografía, de elementos de red, de mapas de cobertura, etc.
- *Radio Mobile*: *software* de libre distribución sobre simulación de radioenlaces. Permite analizar y planificar el funcionamiento de un sistema de radiocomunicaciones fijo o móvil dentro de un rango de frecuencias determinado y para longitudes de trayecto entre 1 y 2000 km. Para esto utiliza perfiles geográficos combinados con la información de los equipos como potencia, sensibilidad, pérdidas, características de antenas, etc. Este programa trabaja con mapas satelitales tridimensionales de las zonas en las cuales se realizarán los radioenlaces.
- *LinkPlanner*: *software* de libre distribución y de fácil aplicación. Basa sus cálculos en las recomendaciones de la ITU-R. Herramienta que pone el fabricante *Cambium Networks* a disposición de todos los usuarios interesados en sus equipos con el objetivo de que pueda evaluar qué equipo es el mejor según condiciones del tipo de aplicación, distancia, altura, frecuencias, zona de Fresnel, etc.
- *Xirio Online*: herramienta de simulación que permite realizar de forma rápida y económica simulaciones profesionales de cobertura radioeléctrica tanto en entornos rurales como urbanos basado en cartografía de alta resolución. Al ser online no hay que descargar ningún tipo de *software*, simplemente realizar un registro de usuario en la web. Ofrece a los usuarios la posibilidad de elegir entre una simulación de baja resolución pero gratuita o una simulación profesional de alta resolución a coste razonable.
- *HeyWhatsThat*: aplicación que permite realizar perfiles de terreno en línea con sólo indicar dos puntos sobre *Google Maps*. A partir de un lugar determinado, se puede observar los contornos de montañas y valles hasta perderse en la curvatura del horizonte. Utiliza la base de datos realizada a partir de la misión *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, realizada por la *Agencia Geológica de Estados Unidos*, la *NASA* y el *Observatorio Naval de los Estados Unidos*. Dicha base de datos es la que usa *Google Earth* o *softwares* como *LinkPlanner*. A diferencia de los anteriores, solo permite obtener el perfil del terreno entre dos puntos.

	Ventajas	Inconvenientes	Ejemplos
Software de libre distribución	<ul style="list-style-type: none"> - Es gratuito. - Simulaciones aproximadas a valores reales. - Suelen ser sencillos de manejar. - Algunos son aplicaciones en línea (no hay que descargar nada). 	<ul style="list-style-type: none"> - El rango de frecuencias a usar suele estar limitado. - Los equipos con los que permiten trabajar suelen ser los del fabricante. - La mayoría no realiza diagramas de cobertura. - Algunas simulaciones y resultados son demasiado básicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Radio Mobile</i> - <i>LinkPlanner</i> - <i>HeyWhatsThat</i> - <i>Xirio Online</i>
Software de pago	<ul style="list-style-type: none"> - Proporciona herramientas muy útiles. - Cartografía de alta resolución. - Muy completos. - Simulaciones profesionales. 	<ul style="list-style-type: none"> - El precio puede resultar excesivo. - Puede ser un poco complejo para algunas tareas. 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>ICS Telecom de ATDI</i> - <i>EDX Signal Pro</i>

Tabla 4-1. Ventajas e inconvenientes de cada tipo de *software*

Para llevar a cabo este trabajo, se ha decidido utilizar el *software LinkPlanner* de *Cambium Networks* debido principalmente a lo siguiente:

- Es de libre distribución.
- Es más completo que *Radio Mobile*.
- Se puede exportar los datos del radioenlace como ficheros con extensión *CSV* o *Excel*.
- Con el objetivo de aprender a manejar otro *software* de diseño de radioenlaces diferente, puesto que durante el Grado se aprendió sobre *ICS Telecom de ATDI* y *Radio Mobile*.

4.2 Diseño y análisis de un radioenlace mediante la herramienta *LinkPlanner* de *Cambium Networks*

4.2.1 Instalación del programa

El proceso de instalación es el siguiente:

1. Se accede a la página web del fabricante *Cambium Networks* y desde allí se puede descargar el programa gratuitamente:

<http://www.cambiumnetworks.com>

2. Se pincha en la zona de *Software and Document Downloads*, que se encuentra en la pestaña *Support*:

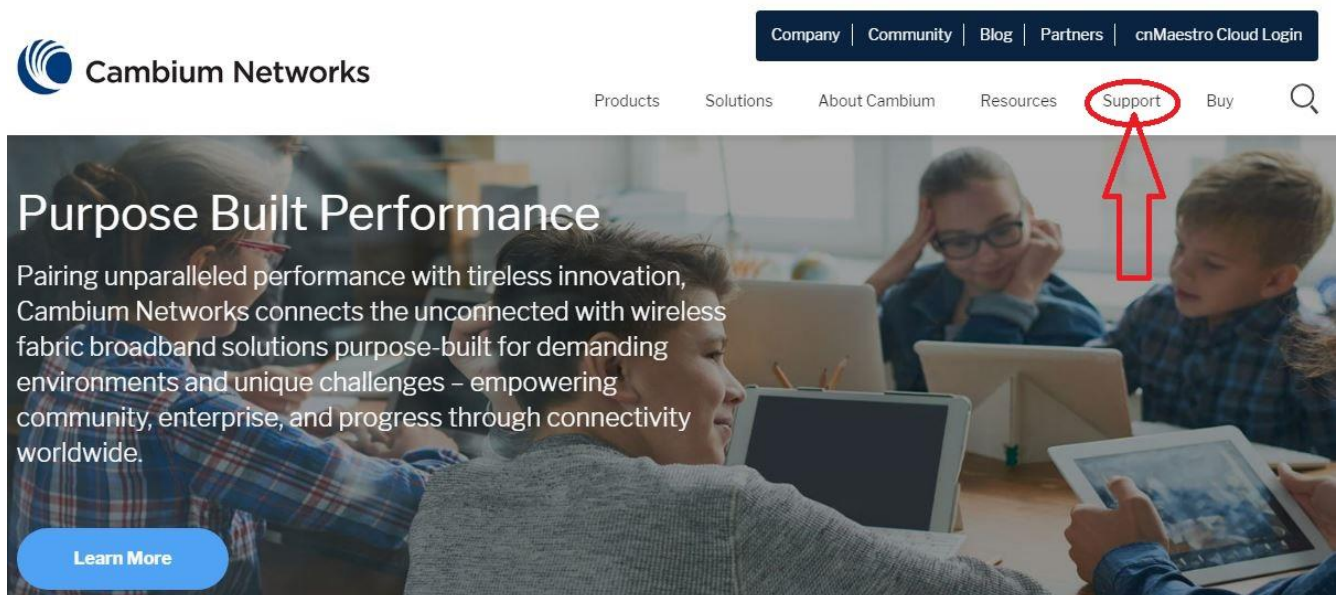


Figura 4-1. Acceso a la web del fabricante *Cambium Networks*

3. Se hace clic en *LINKPlanner* dentro de la ventana *Planning Tools*. Allí se podrá descargar el ejecutable del programa. Existe una versión para *Windows* y otra para *Macs*, además de una amplia guía para el manejo del *software*.

LINKPlanner

Cambium LINKPlanner allows you to easily and quickly design networks for optimal deployment and cost-effectiveness.

We'd love to hear about your usage of LINKPlanner. Whether you have complaints, praise, suggestions, instances where the predictions were way off (hopefully not), or spot on, let us know over at the [Cambium LINKPlanner Community Forum](#).

An online version of the [user guide](#) is now available.

Path Profile Requests

To receive path profiles you will need to **register with the path profile service**. After registration, you will be sent an access token which you should paste into the *Access Token* field in the *Path Profile* section of the *Options* dialog.

For further details, please see the *Obtaining Link Profiles* section of the LINKPlanner User Guide and the knowledge base article *How to Obtain Path Profiles*.

4.9.1 / 09-Apr-19		
Release Notes	647.8 kB	Download
User Guide (PDF)	8.0 MB	Download
Windows Installer	33.3 MB	Download
This software is for Windows only		
MAC OSX Disk Image	110.0 MB	Download
This software is for Intel Macs only		

Figura 4-2. Descarga del ejecutable *LinkPlanner*

- Una vez instalado, este será el icono que identifica al programa:



Figura 4-3. Icono *LinkPlanner*

4.2.2 Configuración inicial *LinkPlanner*

En el menú principal del *software* habría que dirigirse a la pestaña *Tools* → *Options* para realizar la configuración inicial:

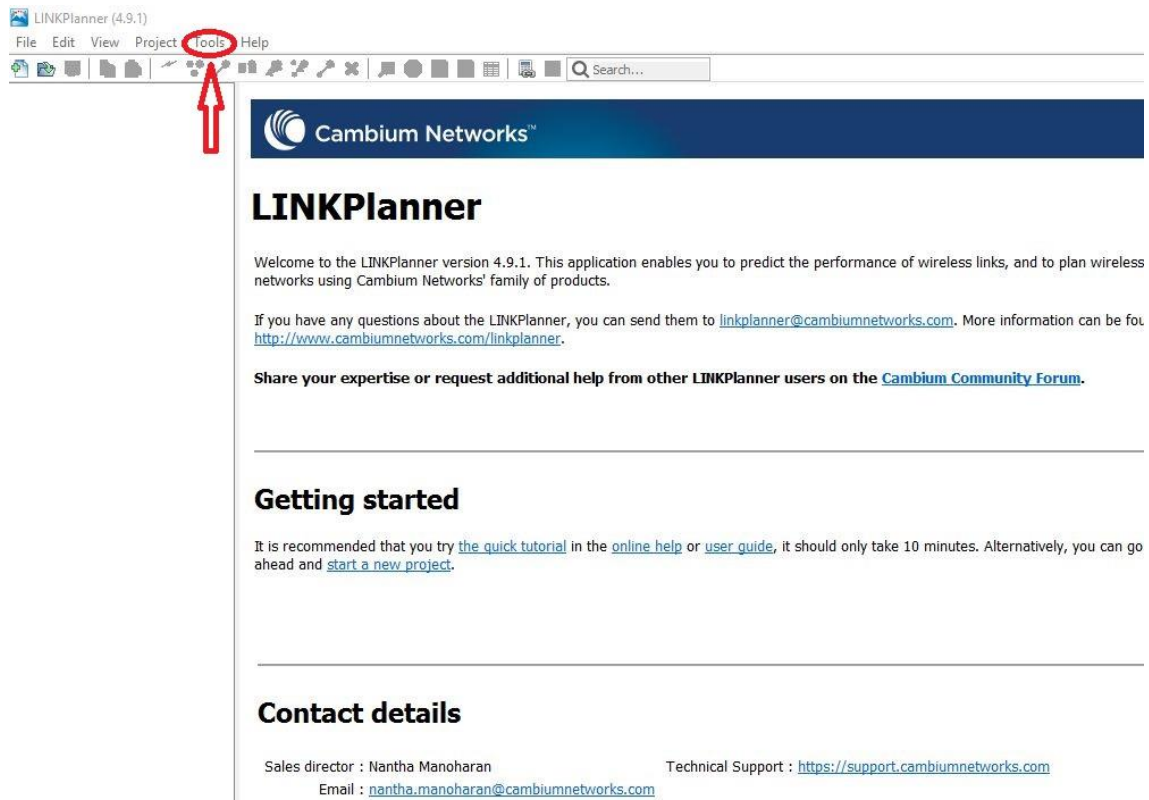


Figura 4-4. Menú principal *LinkPlanner*

En la pestaña *Personal Information* se agrega los datos de información personal para que a la hora de exportar el proyecto en PDF aparezca la información del diseñador:

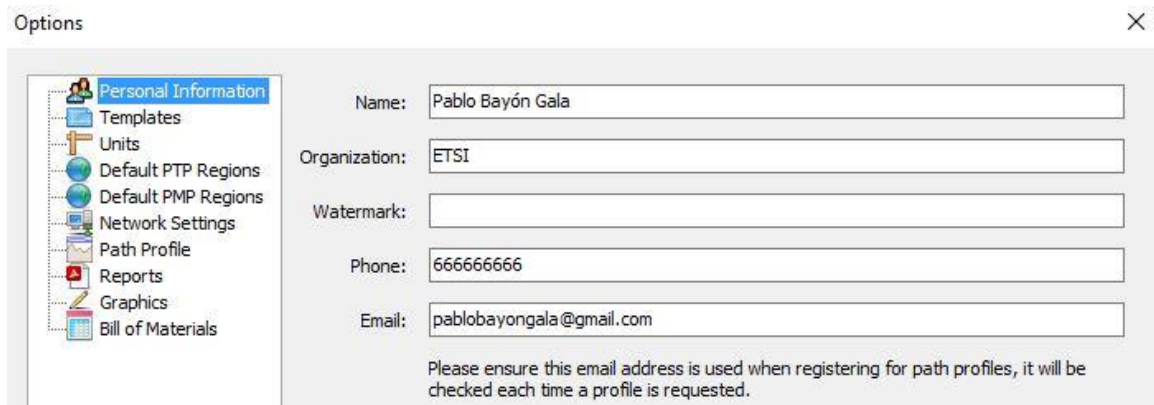


Figura 4-5. Configuración de información personal

Para configurar la forma en la que se desea que se presenten los datos se hará clic en la pestaña *Units*:

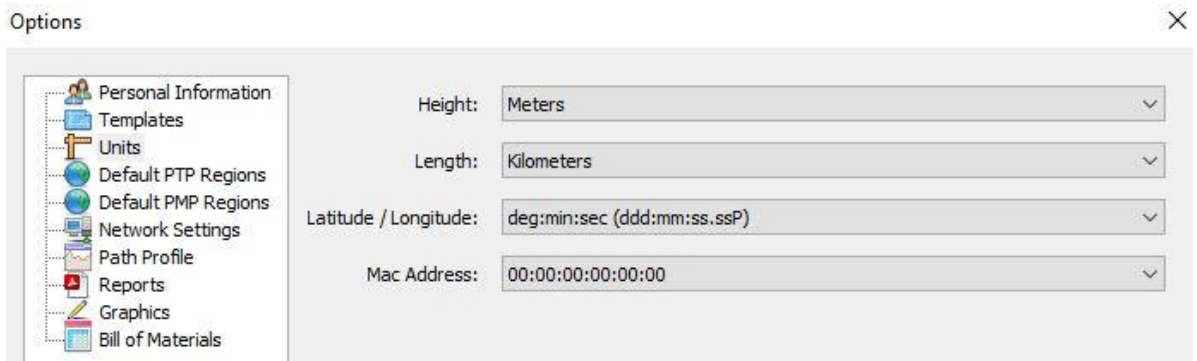


Figura 4-6. Configuración de unidades

La pestaña *Path Profile* será el paso de configuración inicial más importante. Solicitará un token de acceso con el objetivo de poder visualizar las imágenes geográficas de *Google Maps* y obtener el perfil del terreno. Se pinchará en *Request a new access token* y se nos proporcionará una especie de contraseña que servirá para tener acceso a *Google Maps* desde el programa *LinkPlanner*:

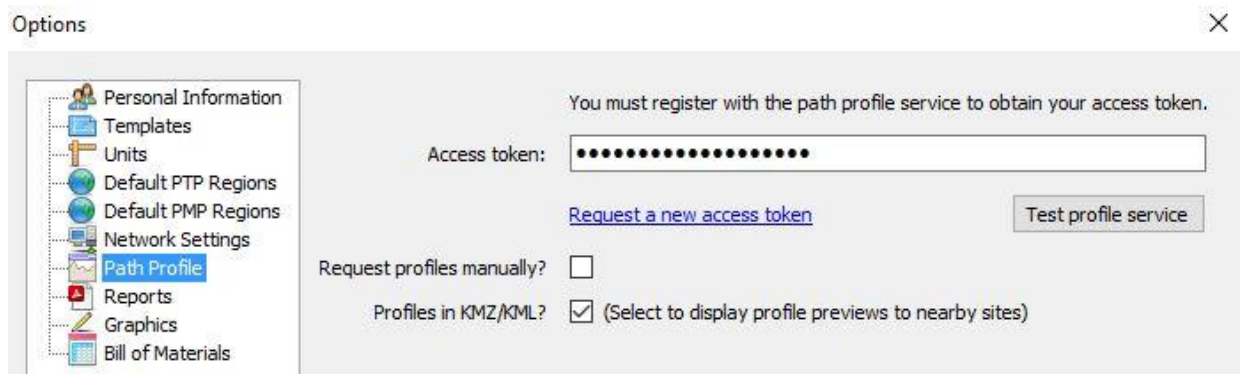


Figura 4-7. Configuración de acceso a *Google Maps*

4.2.3 Creación de un radioenlace

1. Se hará clic sobre la ventana *File* → *New Project* y aparecerá la siguiente vista:

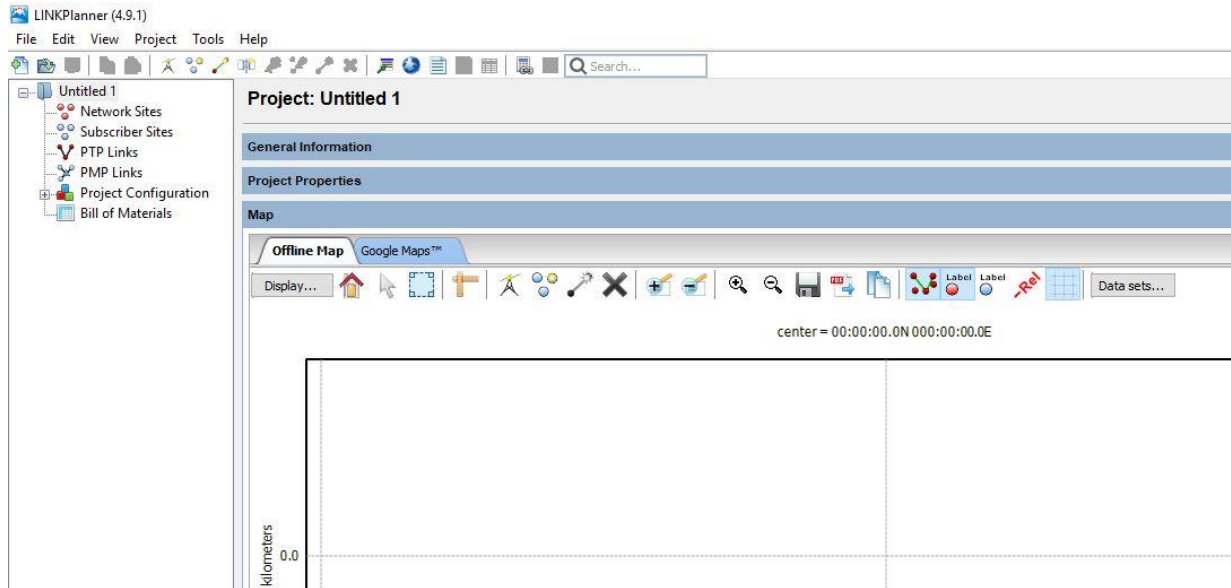


Figura 4-8. Nuevo proyecto

Existen dos formas de ver los mapas donde se va a trabajar: *Offline Map* y *Google Maps*.

También existen dos formas de introducir los datos. Una es introducir las coordenadas de las antenas transmisoras y receptoras si se saben de antemano para la posterior creación del radioenlace punto a punto. Otra es mediante las búsquedas de las ubicaciones para agregar las antenas mediante *Google Maps*.

2. Se posicionará la primera antena a través de la opción de *Google Maps*. Su ubicación será la ETSI de Sevilla. En primer lugar, se busca el lugar adecuado y a continuación se hace clic en el icono *New Network Site*:

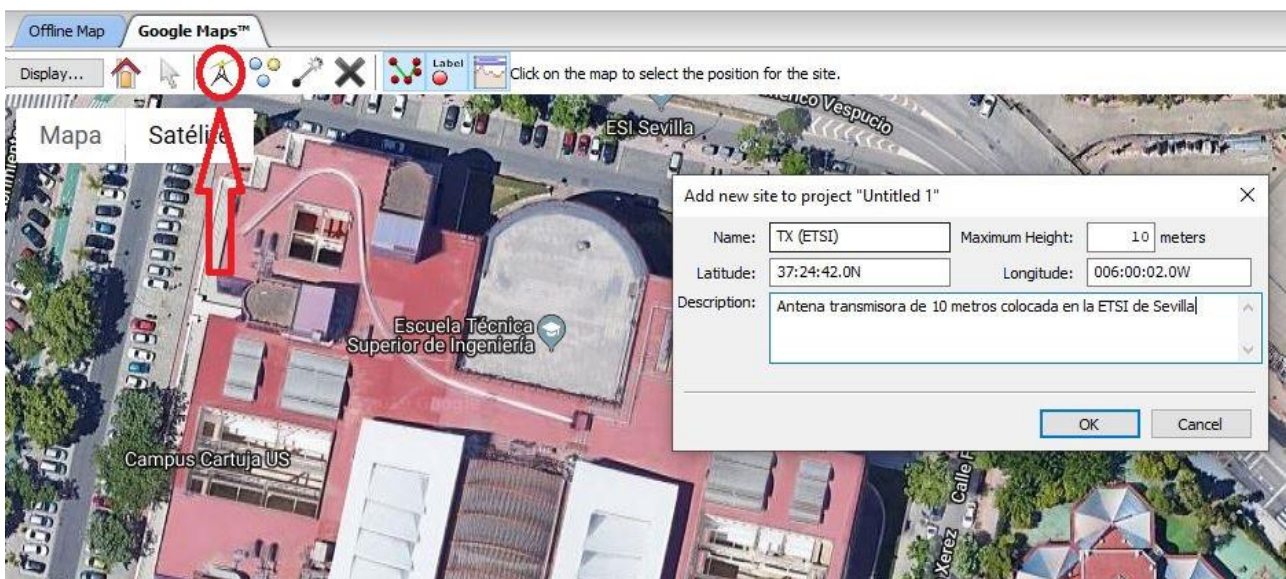


Figura 4-9. Ubicación de antena transmisora

Se puede observar cómo te da la información sobre las coordenadas (latitud y longitud) del punto ubicado.

3. Se ubicará la segunda antena en Valencina de la Concepción de la misma forma que en el paso 2:

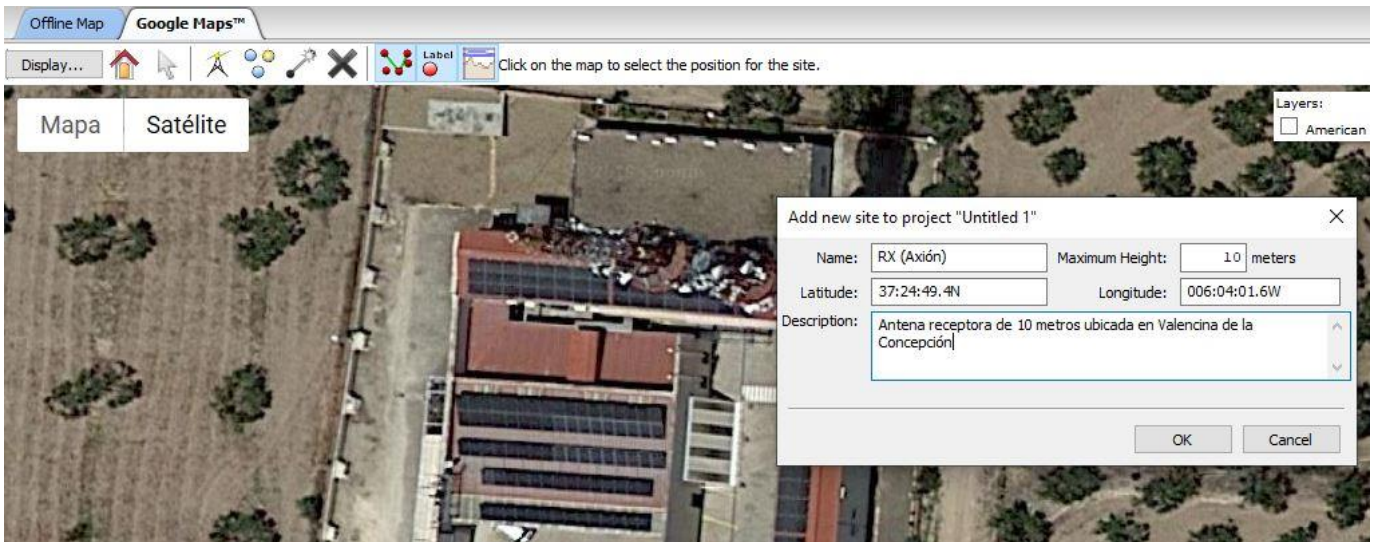


Figura 4-10. Ubicación de antena receptora

4. Una vez ubicadas las antenas transmisora y receptora ya se puede crear el enlace haciendo clic en el icono *New Link*:

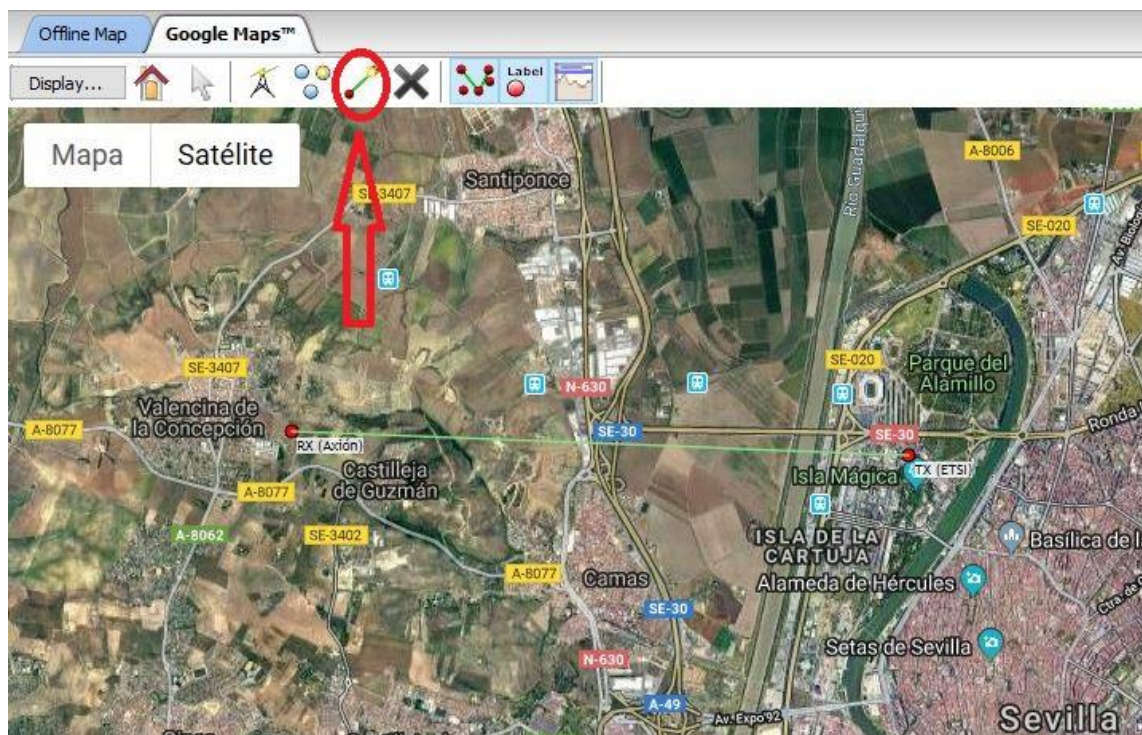


Figura 4-11. Creación del enlace

5. Ahora se puede obtener el perfil del radioenlace haciendo clic en *PTP Links*:

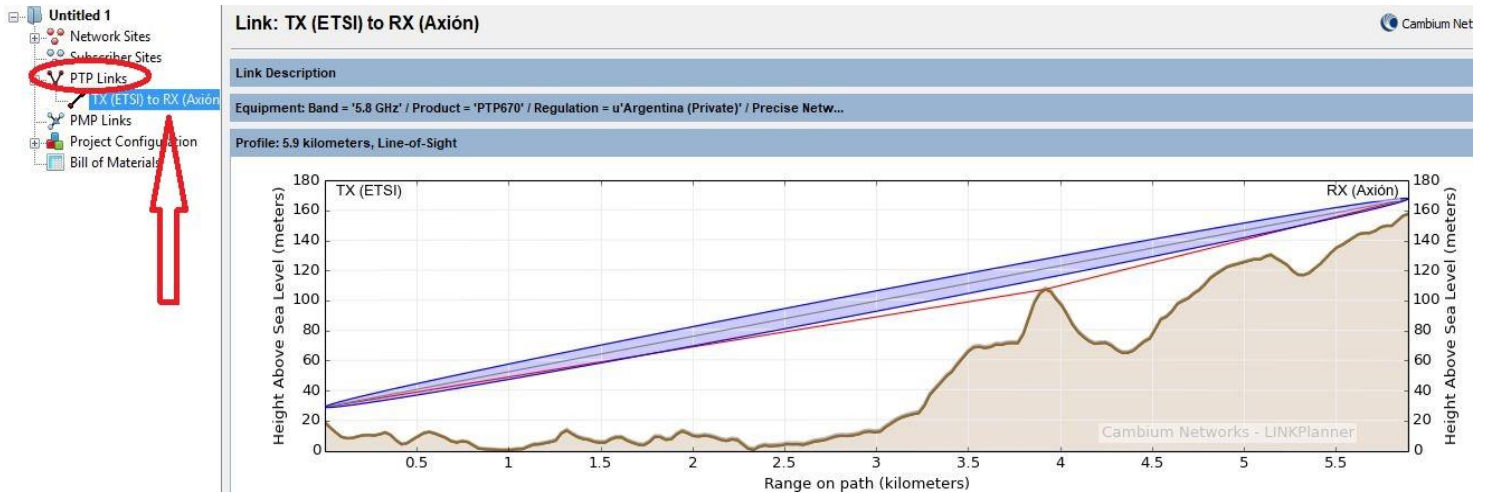


Figura 4-12. Perfil del terreno del enlace

Se puede ver en la figura que este perfil proporcionaría dos de los parámetros necesarios para el programa de Python. La distancia del trayecto se puede obtener del eje x de la gráfica expresada en kilómetros, y la altura sobre el nivel del mar del eje y expresada en metros.

6. Si se hace doble clic sobre el perfil del terreno se abre una ventana denominada *Profile Editor* que muestra la siguiente información para diferentes puntos del trayecto:
- Distancia del trayecto en km
 - Altura sobre el nivel del mar en metros
 - Obstrucción por obstáculo en metros

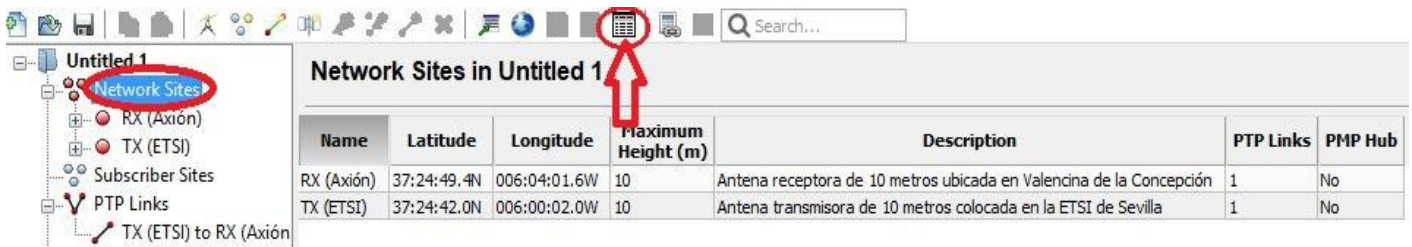
De estos datos sólo serán necesarios los dos primeros. El objetivo es guardarlos en un fichero *Excel* externo para que el programa en Python lea dicho fichero y obtenga los parámetros de distancia y altura. Esto se realiza haciendo clic sobre el siguiente icono:

Range (km)	Terrain height (m)	Obstruction height (m)
0.239	10.3	0.0
0.269	10.0	0.0
0.299	10.7	0.0
0.329	12.0	0.0
0.359	10.2	0.0
0.389	6.6	0.0
0.419	4.0	0.0
0.449	4.8	0.0
0.479	7.2	0.0
0.509	9.3	0.0
0.539	11.5	0.0
0.569	12.2	0.0
0.598	11.2	0.0
0.628	9.8	0.0
0.658	8.3	0.0
0.688	6.0	0.0
0.718	5.2	0.0
0.748	6.1	0.0
0.778	5.4	0.0
0.808	3.3	0.0
0.838	1.1	0.0
0.868	0.7	0.0

Figura 4-13. Ventana con datos necesarios para el programa. Distancia y altitud

A continuación se abre el programa *Excel* con dichos datos. Se debe guardar el fichero con extensión *xlsx* (es la extensión de hoja de cálculo de *Excel*), puesto que el programa en Python está preparado para leer archivos con esta extensión y no otra.

7. Si se pincha sobre *Network Sites* se accede a información relacionada con la ubicación y alturas de las antenas. Para este trabajo sólo se necesita la latitud. Haciendo clic sobre *View in Spreadsheet* se abrirá otra hoja de *Excel* que se deberá guardar de la misma forma que en el paso 6 para el posterior uso en el programa de Python.



Name	Latitude	Longitude	Maximum Height (m)	Description	PTP Links	PMP Hub
RX (Axión)	37:24:49.4N	006:04:01.6W	10	Antena receptora de 10 metros ubicada en Valencina de la Concepción	1	No
TX (ETSI)	37:24:42.0N	006:00:02.0W	10	Antena transmisora de 10 metros colocada en la ETSI de Sevilla	1	No

Figura 4-14. Ventana con datos necesarios para el programa. Latitud

8. Una vez obtenidos todos los parámetros necesarios para el programa en Python se puede guardar el proyecto. Para esto se hace clic en *File* → *Save as...* y se guardará con extensión *ptpproj* (extensión propia del *software LinkPlanner*) en la carpeta que se desee.

4.2.4 Conexión entre *LinkPlanner* y Python

Como se explicó anteriormente, el objetivo de usar el *software LinkPlanner* es obtener parámetros necesarios de carácter geográfico para el cálculo de la atenuación debida a lluvia y a gases atmosféricos.

En primer lugar, se ubican las antenas transmisora y receptora. A continuación se crea el enlace entre ellas y se obtiene el perfil del terreno, que proporcionará los datos de distancia de trayecto y altitud. Dichos datos se guardarán como una hoja de *Excel* en un archivo externo en el mismo directorio del programa en Python.

En segundo lugar, Python leerá este archivo *Excel* y extraerá los datos necesarios para utilizarlos posteriormente en el cálculo de pérdidas por lluvia y gases.

4.3 Breve introducción sobre *HeyWhatsthat*

Con el fin de tener una ligera idea sobre esta sencilla web basada en el cálculo de perfiles de terreno se hará una resumida explicación. Esta web se puede utilizar en el caso de que no se quiera realizar ninguna descarga de *software* con el objetivo de extraer los parámetros necesarios de carácter geográfico como la distancia del trayecto, la altitud y la latitud.

Para la generación del perfil se seguirán los siguientes pasos:

1. El usuario accederá a la página web <https://www.heywhatsthat.com/>, la cual permite obtener el perfil entre dos puntos situados por el usuario mediante *Google Maps*. Se creará un enlace con estación transmisora en la ETSI de Sevilla y estación receptora en Valencina de la Concepción:

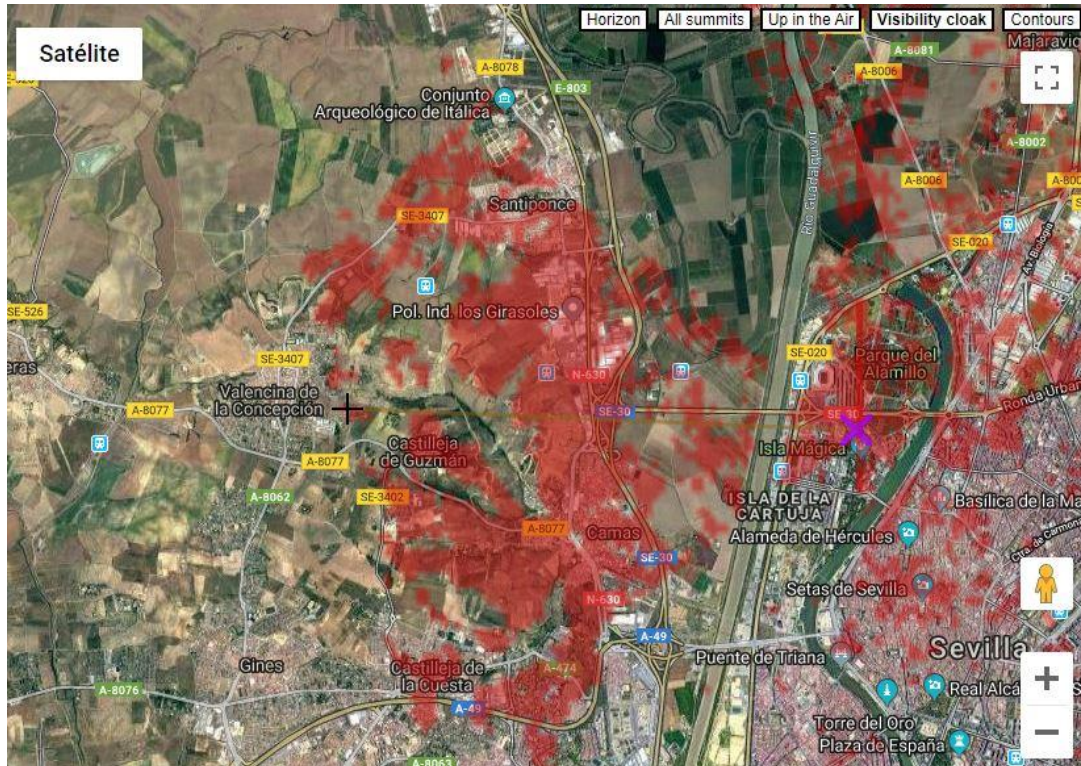


Figura 4-15. Creación del enlace mediante web *HeyWhatsthat*

2. Una vez creado el enlace ya se dispone del perfil de terreno con el que se puede extraer los parámetros de distancia de trayecto, que se puede ver en el eje x de la siguiente figura expresado en kilómetros, y la altitud en eje y expresado en metros:

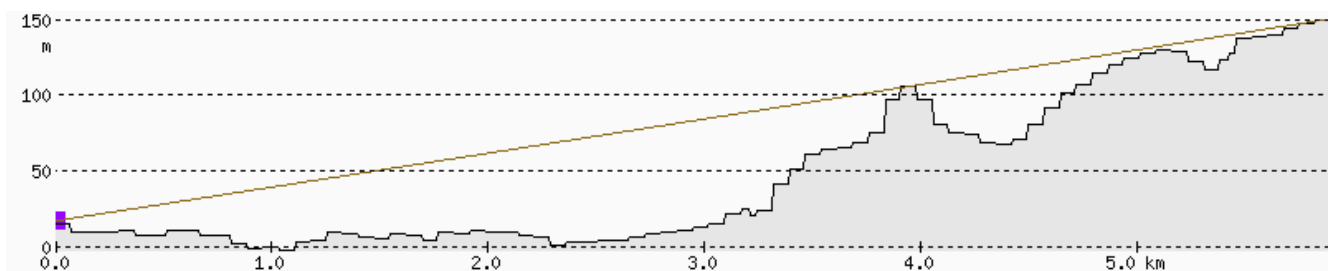


Figura 4-16. Perfil del terreno mediante *HeyWhatsthat*

5 PROGRAMA EN PYTHON

Python es un lenguaje de programación que destaca por presentar una sintaxis sencilla y limpia. Es ideal para construir código en el que se puedan implementar el gran número de fórmulas y algoritmos matemáticos vistos con anterioridad y así obtener una gran precisión en los resultados. Cabe destacar su potente herramienta de diseño gráfico y su interfaz gráfica que también serán empleadas en este trabajo.

5.1 Interfaz gráfica: Interfaz.py

El objetivo de este fichero es la creación de una interfaz gráfica que permita la unión entre la atenuación debida a lluvia y a gases. Mediante el uso de imágenes y objetos gráficos se representará la información y acciones disponibles en la interfaz. El usuario introducirá una serie de parámetros necesarios y posteriormente, con pulsar un botón, obtendrá tanto la atenuación por lluvia como la atenuación por gases, siendo transparente para él todo el código, fórmulas y métodos matemáticos utilizados.

El fin de una interfaz gráfica consiste en proporcionar un entorno visual sencillo al usuario para permitir la comunicación con el programa.

A continuación se mostrará una imagen de la interfaz, con sus dos respectivas partes: lluvia y gases. Se solicitará al usuario que introduzca una serie de información como si se tratase de un formulario y al hacer clic sobre un botón con el nombre *Calcular atenuación* saltará una ventana emergente con su valor calculado.

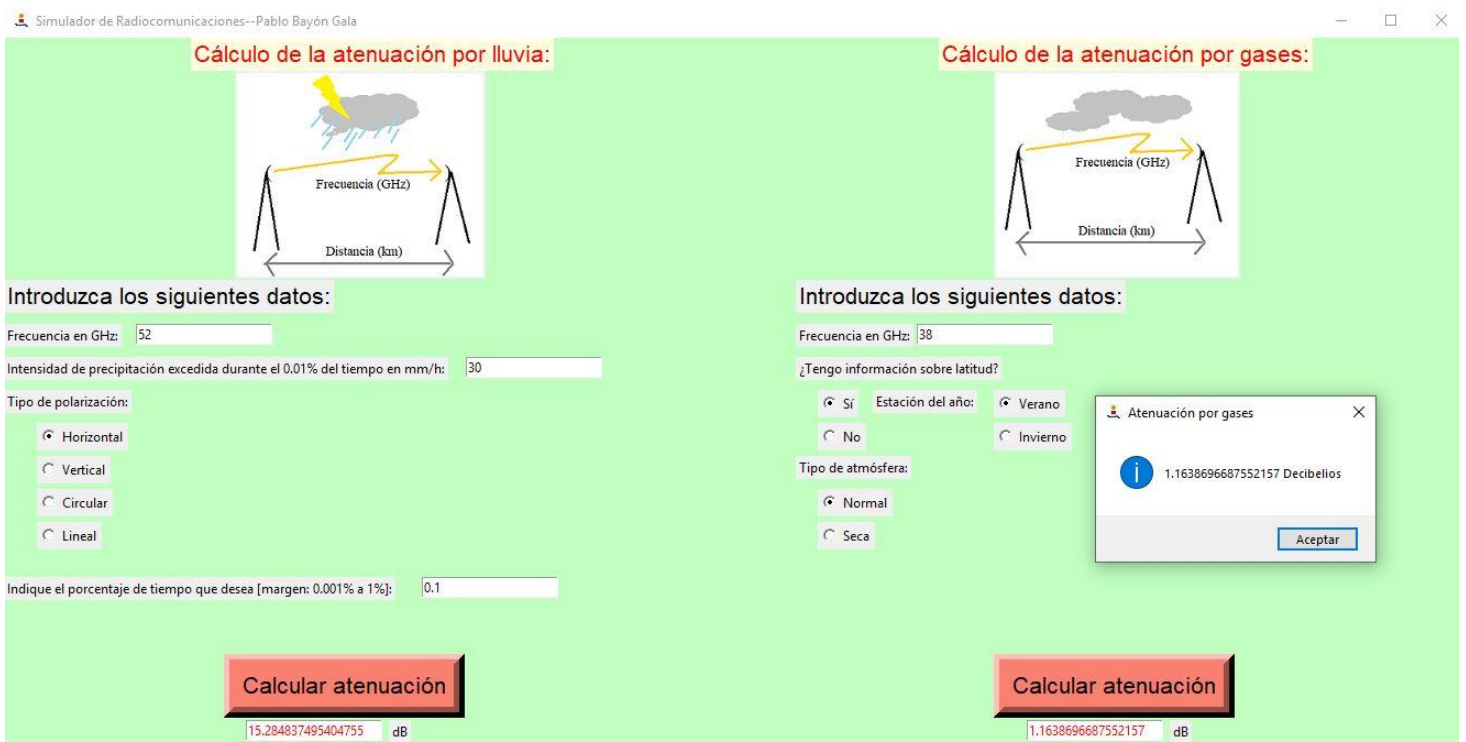


Figura 5-1. Interfaz gráfica Trabajo

5.2 Programa principal de atenuación por lluvia: `Principal_Lluvia.py`

Este fichero contiene la función principal, la cual recibe como parámetros los introducidos por el usuario mediante la interfaz y devuelve directamente el valor de la atenuación debida a lluvia.

5.2.1 `lluvia(frecuencia,intensidad_lluvia,polarizacion,porcentaje_tiempo,angulo_elevacion_trayecto,angulo_inclinacion)`

Se realizan los siguientes pasos en esta función:

- 1) Llamada a la función `calcula_distancia` que se encarga de obtener la longitud del radioenlace en kilómetros.
- 2) En el caso de que la atenuación no sea despreciable por el hecho de tener una frecuencia menor de 5 GHz, realiza una llamada a la función `calcula_atenuacion_especifica`, encargada de calcular la atenuación específica de la lluvia.
- 3) A continuación se calcula la longitud efectiva del trayecto mediante la llamada a la función `calcula_longitud_efectiva`.
- 4) Obtiene la atenuación de la lluvia excedida durante el 0,01% del tiempo.
- 5) Se calcula la atenuación debida a lluvia para el porcentaje de tiempo introducido por el usuario. Este valor será el que devuelva esta función `lluvia`.

A continuación se mostrará un diagrama de flujo que aclare el funcionamiento del programa:



Figura 5-2. Diagrama de flujo función `lluvia`

5.3 Funciones usadas: Funciones_Lluvia.py

Este fichero contiene las funciones encargadas de calcular la atenuación específica debido a lluvia y la longitud efectiva del trayecto.

5.3.1 `calcula_atenuacion_especifica(polarizacion,frecuencia,intensidad_lluvia,angulo_elevacion_trayecto,angulo_inclinacion)`

El objetivo de esta función es realizar una llamada a las funciones que se encargan de calcular los coeficientes k y α según el tipo de polarización elegida, que se le pasa como parámetro a dicha función. En caso de ser polarización circular o lineal también requiere de datos como el ángulo de elevación del trayecto y el ángulo de inclinación de polarización con respecto a la horizontal. Después de esto, se utilizan estos coeficientes junto con la intensidad de lluvia pasada como parámetro para obtener y devolver la atenuación específica por lluvia.

5.3.2 `calcula_longitud_efectiva(distancia,intensidad_lluvia,frecuencia,alfa)`

Esta función se encarga de calcular y devolver la longitud efectiva del trayecto, que es dependiente de la distancia del radioenlace, la intensidad de precipitación excedida durante el 0,01% del tiempo, la frecuencia y el coeficiente de polarización alfa.

5.4 Cálculo de coeficientes de polarización horizontal: Polarizacion_Horizontal.py

Este fichero contendrá dos diccionarios (conocidos así en Python) con las constantes dependientes de polarización, en este caso será horizontal, de los cuadros 1 y 3 del anexo I. Estas constantes son necesarias para obtener los coeficientes k y α horizontales.

Además de estos diccionarios, dispondrá de las dos funciones que obtienen el valor de estos coeficientes.

5.4.1 `calcula_coef_k_horizontal(frecuencia)`

La función recibe como parámetro la frecuencia y va iterando mediante un bucle *while* hasta completar el sumatorio con todos los valores del diccionario. Finalmente, devuelve el logaritmo en base 10 del coeficiente k horizontal.

5.4.2 `calcula_coef_alfa_horizontal(frecuencia)`

La función recibe como parámetro la frecuencia y va iterando mediante un bucle *while* hasta completar el sumatorio con todos los valores del diccionario. Finalmente, devuelve el valor del coeficiente alfa horizontal.

5.5 Cálculo de coeficientes de polarización vertical: `Polarizacion_Vertical.py`

Este fichero contiene dos diccionarios con las constantes dependientes de polarización vertical de los cuadros 2 y 4 del anexo I. Estas constantes son necesarias para obtener los coeficientes k y α verticales.

Además de estos diccionarios, dispondrá de las dos funciones que obtienen el valor de estos coeficientes.

5.5.1 `calcula_coef_k_vertical(frecuencia)`

La función recibe como parámetro la frecuencia y va iterando mediante un bucle `while` hasta completar el sumatorio con todos los valores del diccionario. Finalmente, devuelve el logaritmo en base 10 del coeficiente k vertical.

5.5.2 `calcula_coef_alfa_vertical(frecuencia)`

La función recibe como parámetro la frecuencia y va iterando mediante un bucle `while` hasta completar el sumatorio con todos los valores del diccionario. Finalmente, devuelve el valor del coeficiente alfa vertical.

5.6 Programa principal de atenuación por gases: `Principal_Gases.py`

El fichero contiene la función principal, la cual recibe como parámetros los introducidos por el usuario mediante la interfaz y devuelve directamente el valor de la atenuación debida a gases.

5.6.1 `gases(frecuencia,respuesta,estacion,atmosfera)`

Esta función realiza los siguientes pasos:

- 1) Llamada a la función `calcula_altura` que obtiene la altura promedia sobre el nivel del mar necesaria para calcular los parámetros de temperatura y presión.
- 2) Llamada a la función `calcula_distancia` que devolverá la longitud del radioenlace en kilómetros.
- 3) En caso de que la frecuencia utilizada en el enlace sea mayor de 10 GHz y la atenuación no sea despreciable, se realizará una llamada a la función encargada de calcular los parámetros de temperatura, presión de aire seco y presión parcial de vapor de agua en función de la altura promedia sobre el nivel del mar.
- 4) Calcula la parte imaginaria del valor complejo de la refractividad del oxígeno ($N''_{Oxigeno}$) mediante el método de suma raya a raya consistente en sumar cada una de las rayas de resonancia debidas al oxígeno.
- 5) Calcula la parte imaginaria del valor complejo de la refractividad del vapor de agua ($N''_{Vapor\ de\ agua}$) mediante el método de suma raya a raya consistente en sumar cada una de las rayas de resonancia debidas al vapor de agua.
- 6) Obtiene la atenuación específica de gases.
- 7) Halla la atenuación total de gases y devuelve su valor.

Se mostrará un diagrama de flujo para aclarar el funcionamiento:

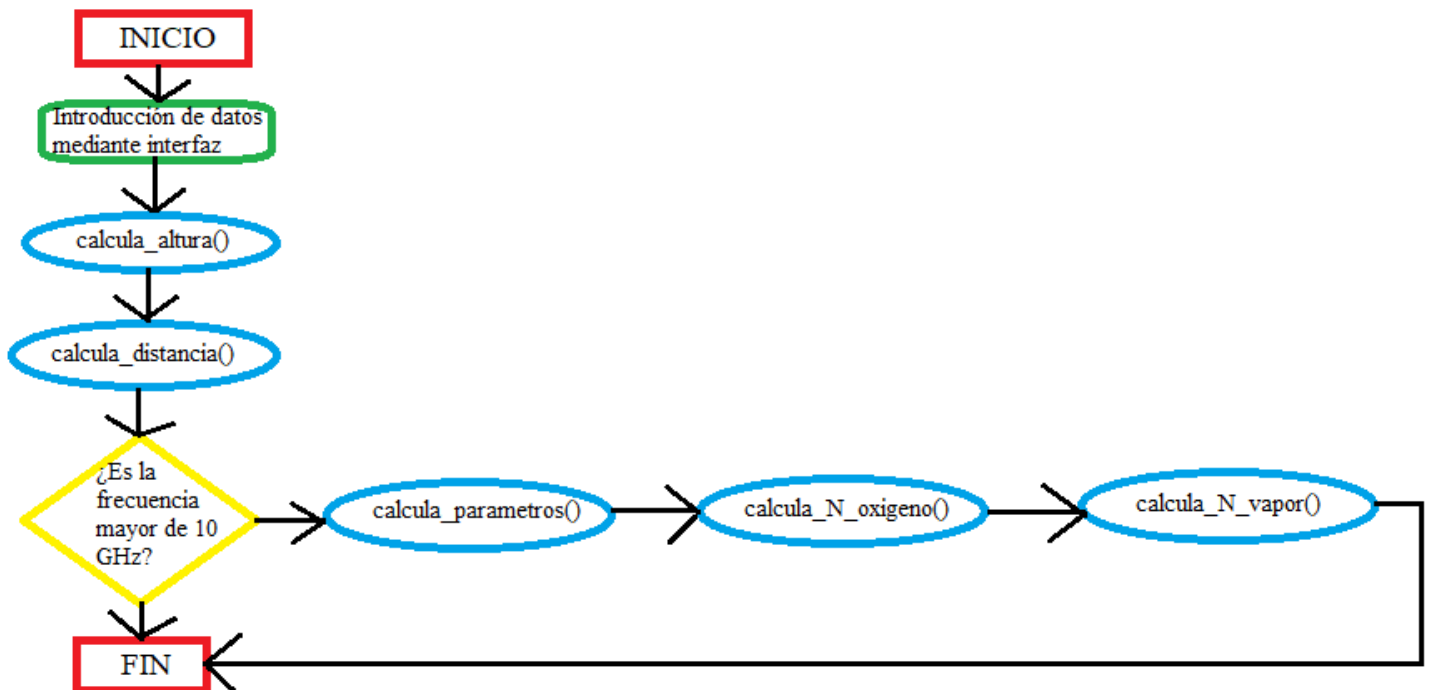


Figura 5-3. Diagrama de flujo función *gases*

5.7 Funciones usadas: `Funciones_Gases.py`

Este fichero contiene la función necesaria para obtener los parámetros de temperatura y presión que posteriormente son imprescindibles para el cálculo de la atenuación específica debida a gases.

5.7.1 `calcula_parametros(altura,respuesta,estacion,atmosfera)`

La función en primer lugar emplea el parámetro `respuesta` para saber si se tiene información sobre latitud o no.

En caso de tener información sobre latitud, utiliza la atmósfera de referencia sobre latitudes bajas, medias o altas de la recomendación ITU-R P.835 [11]. También se tendrá que tener información sobre la estación del año en caso de latitudes medias o altas, que es pasada con el parámetro `estacion`.

En caso de no tenerla, se usará la atmósfera de referencia mundial anual media de la recomendación ITU-R P.835 [11].

A continuación se calcula la temperatura, presión de aire seco y presión parcial de vapor de agua en función de la altura sobre el nivel del mar. Para la obtención de la presión parcial de vapor de agua es necesario conocer si la atmósfera que se requiere es normal o seca, que dicha información es pasada también como parámetro a la función. Estos tres parámetros son devueltos por la función `calcula_parametros`.

5.8 Método de suma raya a raya para el oxígeno: Datos_Oxigeno.py

Este fichero contiene un diccionario con los datos espectroscópicos del oxígeno y una función que se encarga de calcular el valor complejo de la refractividad del oxígeno sin contar con el efecto Debye.

5.8.1 calcula_N_oxigeno(presion,temperatura,presion_parcial_vapor,frecuencia)

La función realiza un sumatorio mediante un bucle `while` con todas las rayas del oxígeno para un rango de frecuencias entre 0 y 1000 GHz, obteniendo en cada iteración el valor de la *i*-ésima raya y su factor de forma. Estos valores de raya y factores de forma son dependientes de la temperatura, presión y datos espectroscópicos para cada frecuencia. El valor devuelto por la función es el sumatorio del valor complejo de la refractividad del oxígeno.

5.9 Método de suma raya a raya para el vapor de agua: Datos_Vapor.py

Al igual que el fichero anterior contiene un diccionario con los datos espectroscópicos del vapor de agua y una función que se encarga de calcular el valor complejo de la refractividad del vapor de agua.

5.9.1 calcula_N_vapor(presion,temperatura,presion_parcial_vapor,frecuencia)

La función realiza un sumatorio mediante un bucle `while` con todas las rayas del vapor de agua para un rango de frecuencias entre 0 y 1000 GHz, obteniendo en cada iteración el valor de la *i*-ésima raya y su factor de forma. Estos valores de raya y factores de forma son dependientes de la temperatura, presión y datos espectroscópicos para cada frecuencia. El valor devuelto por la función es el valor complejo de la refractividad del vapor de agua.

5.10 Obtención de los datos de carácter geográfico de LinkPlanner: Lee_Excel_DistanciayAltitud.py

El fichero se encarga de leer una hoja de *Excel* y extraer los datos necesarios como son la longitud del radioenlace y la altura sobre el nivel del mar mediante un par de funciones.

El archivo *Excel* contendrá únicamente una columna y cada fila dispondrá de la siguiente información con este formato: “*distancia (km), altura_terreno (m), altura_obstrucción (m)*”.

5.10.1 calcula_distancia()

La función va iterando cada fila de la hoja de *Excel* con el método `iter_rows()`. Se guardará la última fila en una variable tipo `string`, puesto que es la que contiene la longitud final del enlace. Como esta variable tendrá el formato “*distancia (km), altura_terreno (m), altura_obstrucción (m)*” se usará el método `split()` para separar la cadena por comas. De esta forma, se obtendrá una tabla con tres elementos tipo `string`, la cual sólo nos interesa el primer elemento que corresponderá con la distancia del radioenlace en kilómetros. Por último, se convierte de `string` a `float` y se devuelve dicho valor.

5.10.2 calcula_altura()

Esta función itera cada fila de la hoja de *Excel* con el método *iter_rows()* mientras va guardando los valores correspondientes a la altitud del terreno en una tabla de tipo *string* que contendrá todas las muestras. Posteriormente, se convierte a tipo *float* y se realiza el promedio mediante un sumatorio de las muestras para luego dividir entre el número de muestras total. El valor devuelto será la altura promedia sobre el nivel del mar en metros.

5.11 Obtención de los datos de carácter geográfico de *LinkPlanner*: Lee_Excel_Latitud.py

Al igual que el fichero anterior, se encarga de leer una hoja de *Excel* y extraer los datos necesarios para la latitud del radioenlace.

El archivo *Excel* contendrá siete columnas de las cuales solo interesará la segunda, que corresponde con la latitud. Cada fila de dicha columna dispondrá de la siguiente información con este formato: “*grados:minutos:segundos*”.

5.11.1 calcula_latitud()

La función va iterando cada fila de la hoja de *Excel* con el método *iter_rows()*. Se guardará la última fila en una variable tipo *string*, puesto que es la que contiene la latitud del enlace. Como esta variable tendrá el formato “*grados:minutos:segundos*” se usará el método *split()* para separar la cadena por “:”. De esta forma, se obtendrá una tabla con tres elementos tipo *string*, la cual sólo nos interesa el primer elemento que corresponderá con la latitud del radioenlace en grados. Por último, se convierte de *string* a *float* y se devuelve dicho valor.

6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y SIMULACIONES

En este capítulo se van a realizar una serie de pruebas con el fin de verificar el correcto funcionamiento del programa realizado en Python. En primer lugar, se comprobará el cálculo de las pérdidas por lluvia. Se llevará a cabo una comparación entre las gráficas teóricas de las recomendaciones de la ITU-R y las gráficas simuladas en Python. A continuación, se ejecutarán casos de radioenlaces con las mismas características que el apartado (2.2) de *Resolución analítica* y se comparará los resultados obtenidos. Más tarde, se obtendrán una serie de conclusiones que merecen la pena destacar con el objetivo de que el lector consiga una visión más amplia del estudio mediante la ayuda del modo gráfico de Python. Por último, de la misma manera se realizará todo lo expuesto anteriormente para las pérdidas debidas a gases.

6.1 Atenuación debida a hidrometeoros

6.1.1 Comparación de resultados

6.1.1.1 Cálculo de los coeficientes k y α para la obtención de la atenuación específica

Se procede a la comparación de los coeficientes k y α entre las gráficas teóricas proporcionadas por la recomendación P.838 [13] y el resultado del cálculo de los coeficientes en la simulación.

➤ Polarización Horizontal

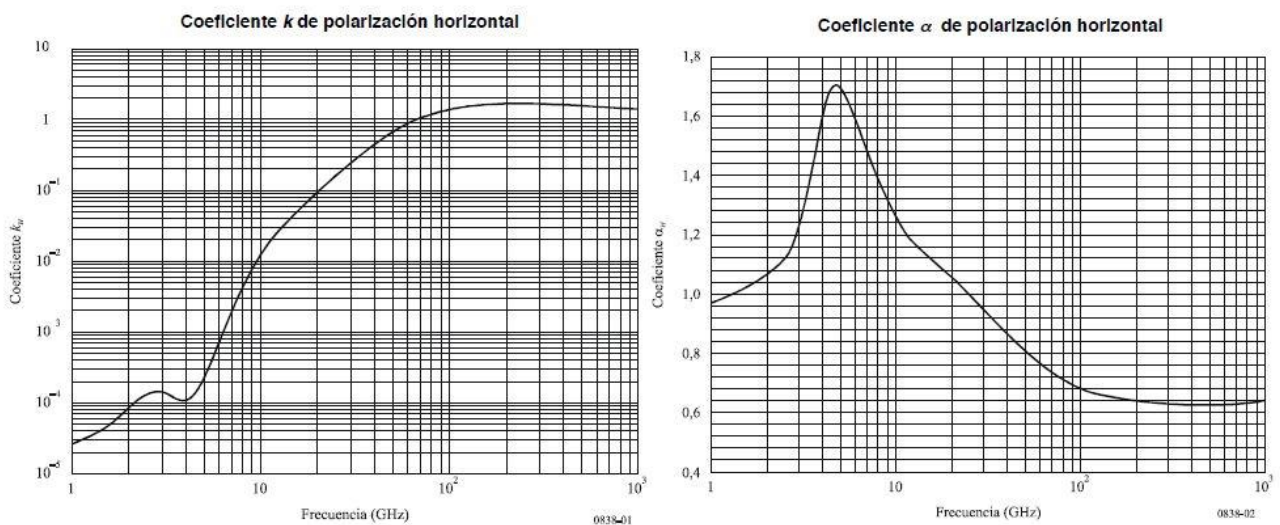


Figura 6-1. Coeficientes teóricos k y α de polarización horizontal [5]

Siendo ésta la gráfica teórica. En Python, se ha trabajado con un barrido de frecuencias entre 1 y 1000 GHz, y se ha obtenido todos los valores de los coeficientes k y α horizontales a dichas frecuencias. Este es el resultado:

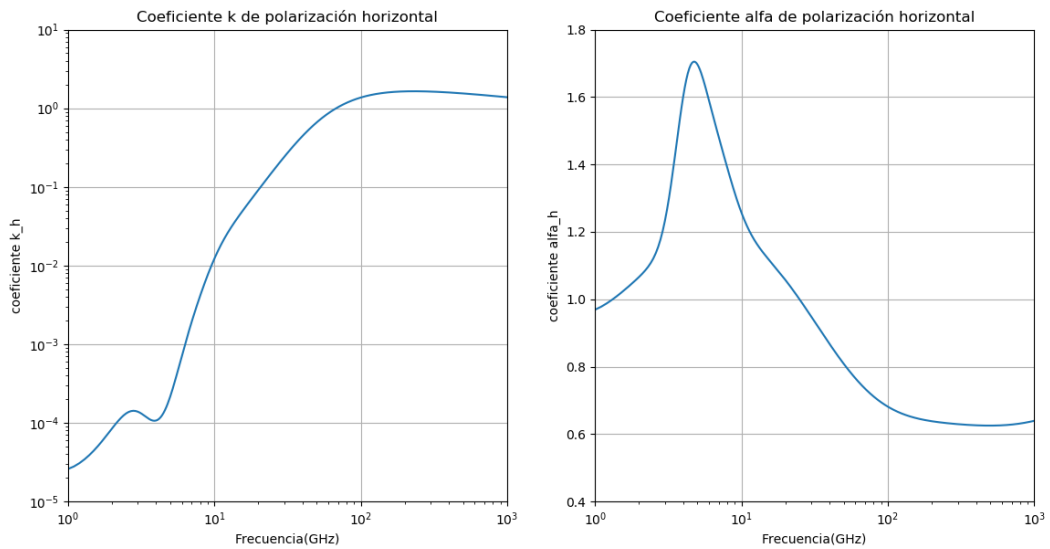


Figura 6-2. Coeficientes simulados k y α de polarización horizontal

Tras las gráficas obtenidas se puede comprobar que los resultados son muy aproximados, con lo que se puede decir que el método de cálculo de los coeficientes es adecuado.

➤ Polarización Vertical

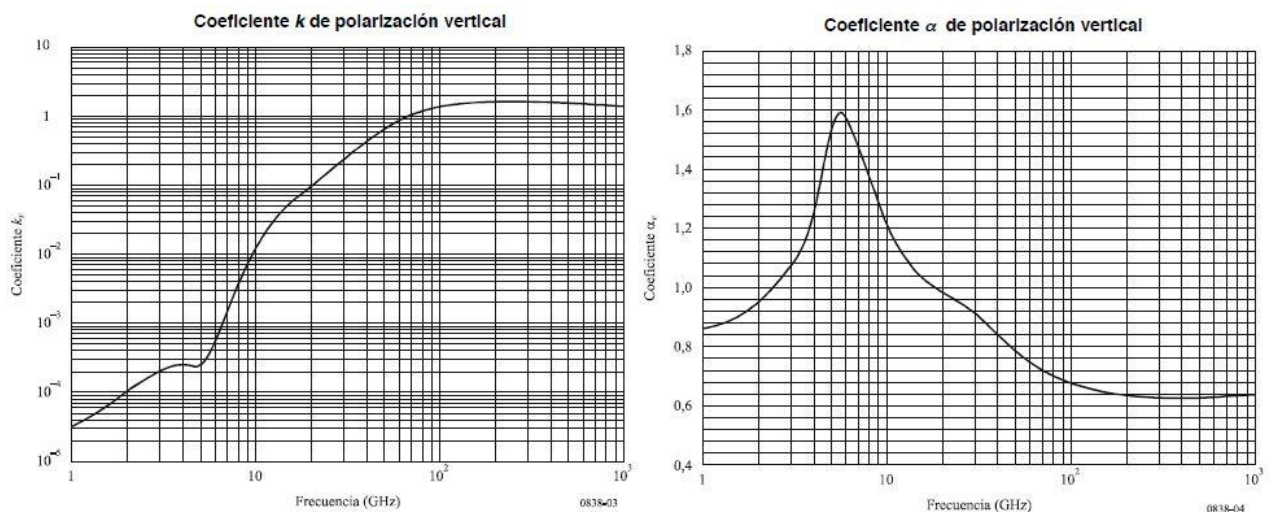


Figura 6-3. Coeficientes teóricos k y α de polarización vertical [6]

Se procede al igual que en el caso anterior, pero ahora para polarización vertical:

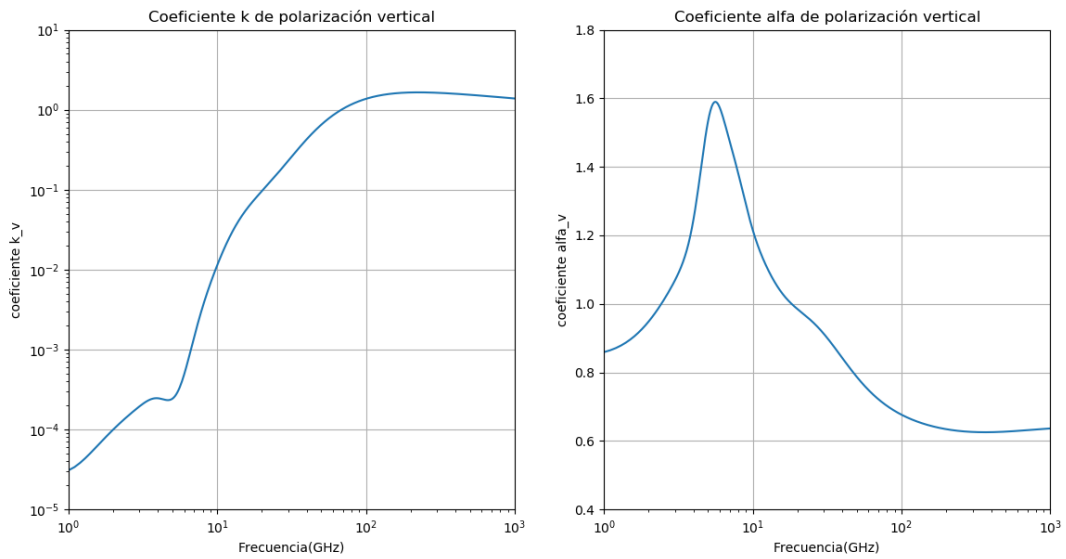


Figura 6-4. Coeficientes simulados k y α de polarización vertical

Se puede apreciar, que como en el caso anterior, se tiene un buen método de cálculo.

6.1.1.2 Caso 1: Cálculo de la atenuación por lluvia excedida durante un 0,01% del tiempo

Programando en Python todos los métodos matemáticos y fórmulas anteriormente presentadas de forma teórica e introduciendo por línea de comandos una serie de datos necesarios para el radioenlace del caso 1 del apartado (2.2.1), como son la frecuencia, intensidad de lluvia, tipo de polarización y porcentaje de tiempo se puede obtener la atenuación total debido a lluvia.

Ejecutando el código:

```
Simulador de radiocomunicaciones. Cálculo de la atenuación por lluvia.
Se necesitan los siguientes datos para el estudio:
Frecuencia en GHz: 38
Intensidad de precipitación excedida durante el 0.01% del tiempo en mm/h: 32
Longitud del trayecto en Km: 5
Tipo de polarización (horizontal:h,vertical:v,circular:c o lineal:l): v
Indique el porcentaje de tiempo que desea [margen: 0.001% a 1%]: 0.01
La atenuación por lluvia durante un porcentaje de tiempo del 0.01% es: 27.187640235464198 dB

***Repl Closed***
```

Figura 6-5. Ejecución enlace Caso 1

Se verifica que el resultado que se obtiene como respuesta es correcto y similar a cuando se resolvió analíticamente.

6.1.1.3 Caso 2: Cálculo de la atenuación por lluvia excedida durante un porcentaje del tiempo comprendido en un margen entre 0,001% y 1%

Esta vez se realizará para el enlace del caso 2 del apartado (2.2.2). Ejecutando el código:

```

Simulador de radiocomunicaciones. Cálculo de la atenuación por lluvia.
Se necesitan los siguientes datos para el estudio:
Frecuencia en GHz: 52
Intensidad de precipitación excedida durante el 0.01% del tiempo en mm/h: 30
Longitud del trayecto en Km: 7.5
Tipo de polarización (horizontal:h,vertical:v,circular:c o lineal:l): h
Indique el porcentaje de tiempo que desea [margen: 0.001% a 1%]: 0.1
La atenuación de lluvia durante un porcentaje de tiempo del 0.1 % es: 18.1459631880903 dB

***Repl Closed***

```

Figura 6-6. Ejecución enlace Caso 2

Se comprueba nuevamente que el resultado que se obtiene es correcto y aproximadamente igual a cuando se resolvió de forma teórica.

Se puede concluir que el programa creado en Python para el cálculo de la atenuación debida a precipitaciones funciona correctamente.

6.1.2 Conclusiones y modo gráfico de Python

En este apartado se van a proponer una serie de casos prácticos. Mediante la ejecución del programa en Python y la ayuda de las librerías *numpy* y *matplotlib* para el modo gráfico de dicho lenguaje, se obtendrán una serie de figuras. Esto aportará al lector una visión más completa de cómo influyen unos parámetros con otros en el cálculo de las pérdidas por lluvia en un radioenlace.

6.1.2.1 Caso 1: Cálculo de la atenuación por lluvia excedida durante un 0,01% del tiempo, con distancia del trayecto constante y en la zona hidrometeorológica de Madrid

En este caso se va a proceder a la resolución simulada del cálculo de la atenuación por lluvia rebasada durante un 0,01% del tiempo de un enlace terrenal con las siguientes características:

- Zona hidrometeorológica: Madrid
- Intensidad de precipitación excedida durante el 0,01% del tiempo en dicha zona, $R_{0,01}$: 32 mm/h
- Longitud del trayecto, d : 5 km
- Tipo de polarización: horizontal y vertical
- Porcentaje de tiempo que se desea: 0,01%

Se va a realizar la simulación gráfica de la atenuación por lluvia con un enlace de estas características asignando un barrido de frecuencias en el margen entre 5 y 1000 GHz, puesto que a frecuencias menores que 5 GHz las pérdidas por precipitaciones no son relevantes.

El objetivo de esta simulación es conocer el efecto que la frecuencia produce en la atenuación por lluvia a una distancia constante. Lógicamente, mientras mayor sea la distancia del trayecto que separa la antena transmisora y receptora mayores serán las pérdidas.

Un segundo objetivo, aunque menos prioritario, es conocer la diferencia en atenuación entre usar polarización horizontal o polarización vertical y ver el efecto que tienen.

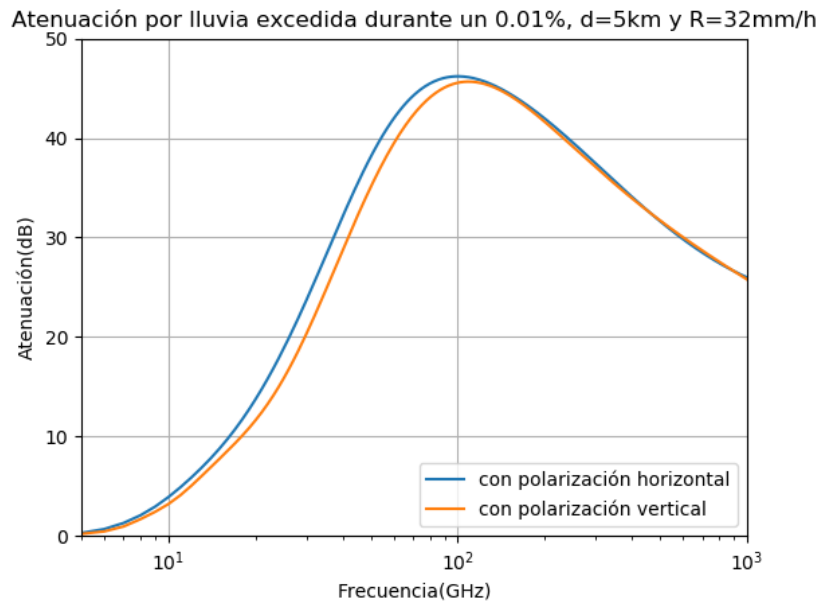


Figura 6-7. Atenuación por lluvia frente a frecuencia

Por un lado, sería lógico pensar que a mayor frecuencia, mayores son las pérdidas. Pero si se observa la gráfica se puede comprobar que a la frecuencia aproximada de 100 GHz se encuentra un máximo de la función, y para valores posteriores de frecuencias las pérdidas se hacen más pequeñas.

Los coeficientes que dependen de la frecuencia son k y α , y el factor de distancia r . Si se observa las gráficas de los coeficientes k y α se puede observar que el valor de estos coeficientes comprendidos entre las frecuencias 100 y 1000 GHz son aproximadamente constantes, por lo que éstos no jugarán un papel fundamental en el decremento de la atenuación a partir de los 100 GHz. Sin embargo, sí lo hará el factor de distancia r , que como se puede ver en (2-7), decrece a medida que aumenta la frecuencia. Como se muestra en la siguiente gráfica:

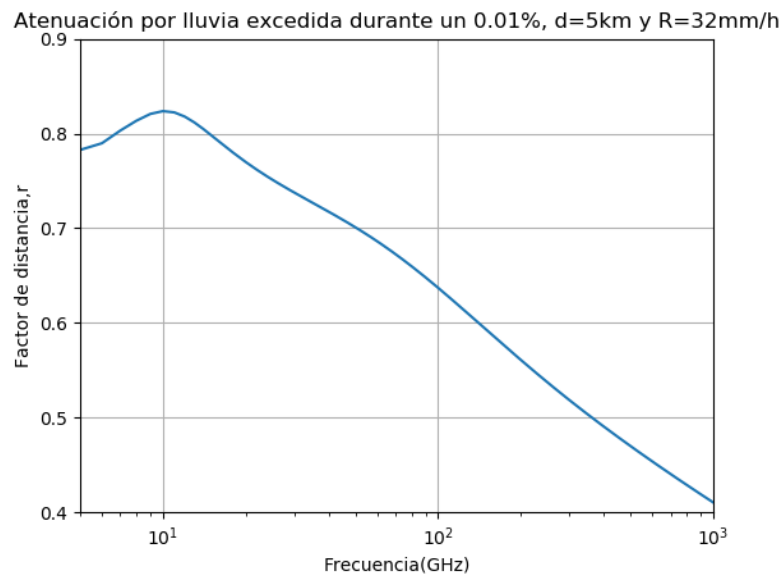


Figura 6-8. Factor de distancia r frente a frecuencia

Luego, este decrecimiento del factor r con la frecuencia, junto con la constancia del valor de los coeficientes k y α entre las frecuencias de 100 a 1000 GHz, hace que las pérdidas por lluvia decrezcan entre dicho rango de frecuencias.

Por otro lado, en la figura 6.7 se puede observar que la atenuación por lluvia con polarización vertical es un poco más baja que con la polarización horizontal.

6.1.2.2 Caso 2: Cálculo de la atenuación por lluvia excedida durante un 0,01% del tiempo, con distancia del trayecto constante y para distintas intensidades de precipitaciones

En este segundo caso se va a proceder a la resolución simulada del cálculo de la atenuación por lluvia rebasada durante un 0,01% del tiempo de un enlace terrenal con las siguientes características:

- Intensidad de precipitación excedida durante el 0,01% del tiempo en dicha zona, $R_{0,01}$: 25 mm/h, 50 mm/h, 75 mm/h y 100 mm/h
- Longitud del trayecto, d : 5 km
- Tipo de polarización: horizontal
- Porcentaje de tiempo que se desea: 0,01%

Se realizará una simulación gráfica representando la atenuación por precipitaciones frente a la frecuencia, en un margen comprendido entre 5 y 1000 GHz. Se representará distintas gráficas para diferentes intensidades de precipitaciones.

El objetivo de esta simulación es ver cómo afecta la intensidad de precipitación $R_{0,01}$ a la frecuencia.

Atenuación por lluvia excedida durante un 0.01%, d=5km y pol.horizontal

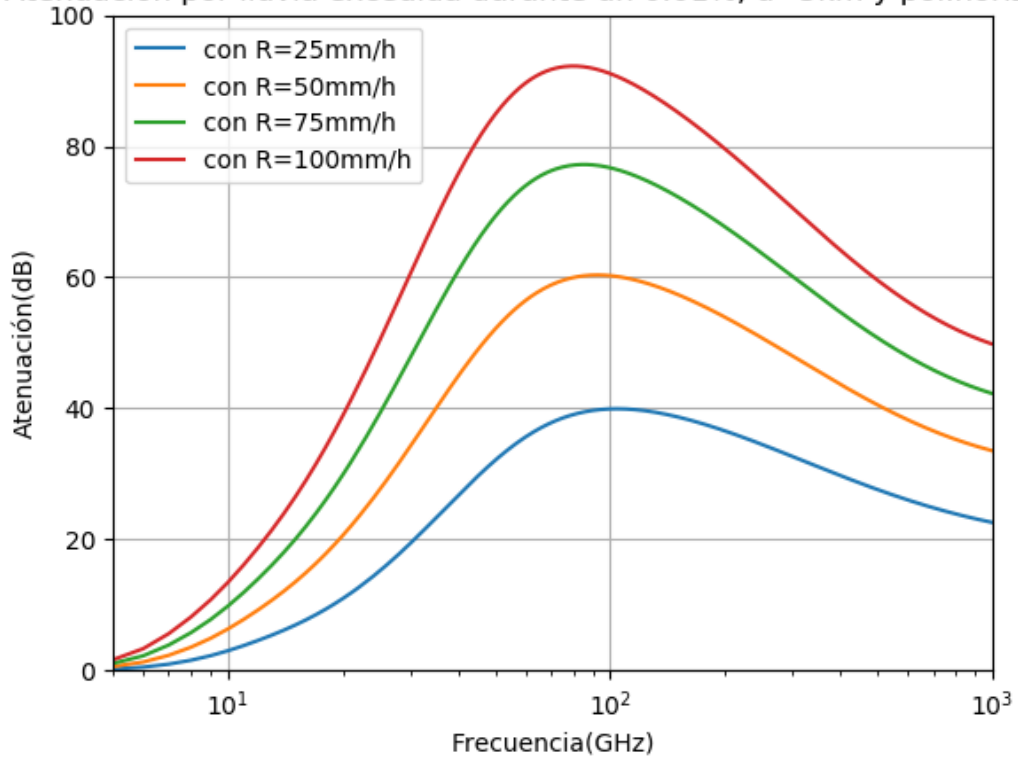


Figura 6-9. Atenuación frente a frecuencia con distintas intensidades

De forma lógica, se puede concluir de la ecuación (2-1) que mientras mayor sea la intensidad de precipitación, mayor será la atenuación específica y a su vez las pérdidas por lluvia. En la gráfica se puede observar cómo van aumentando las pérdidas a medida que se aumenta la intensidad por precipitaciones.

6.2 Atenuación debida a gases atmosféricos

6.2.1 Comparación de resultados

6.2.1.1 Cálculo de la atenuación específica para atmósfera normal

Se procede a la comparación de la atenuación específica debida a gases para un rango entre 0 y 1000 GHz, para una altura sobre el nivel del mar de 0 kilómetros, que equivale a una presión de 1013,25 hPa y una temperatura de 15°C, para el caso de atmósfera normal (vapor de agua de $7,5 \text{ g/m}^3$) (gráfica roja). Posteriormente se comparará con el resultado del programa en Python con estas mismas características.

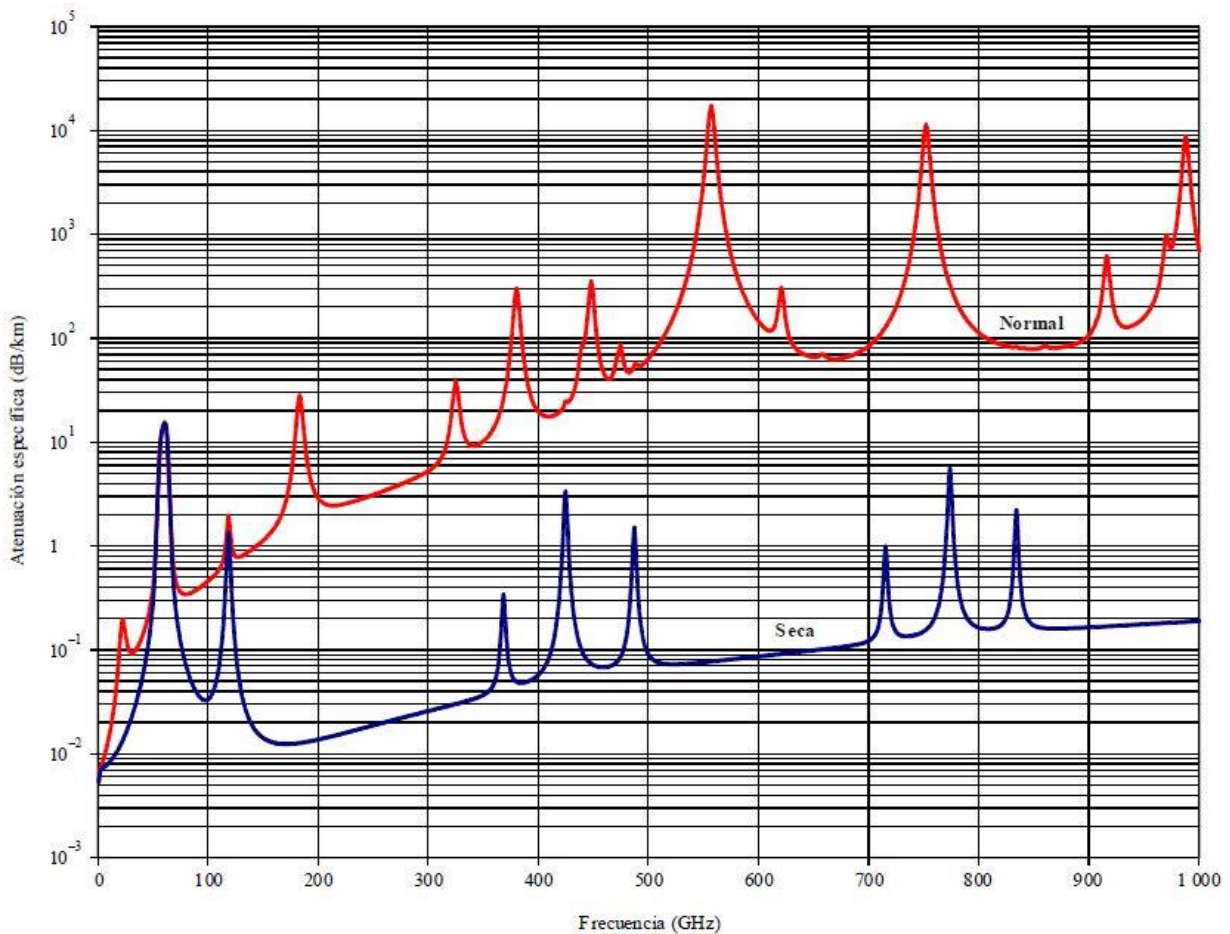


Figura 6-10. Atenuación específica frente a la frecuencia de forma teórica. [7]

Siendo ésta la gráfica teórica proporcionada por la recomendación ITU-R P.676 [10]. En Python, se ha trabajado con un barrido de frecuencias entre 1 y 1000 GHz, y se ha obtenido todos los valores de atenuación específica a dichas frecuencias. Este es el resultado:

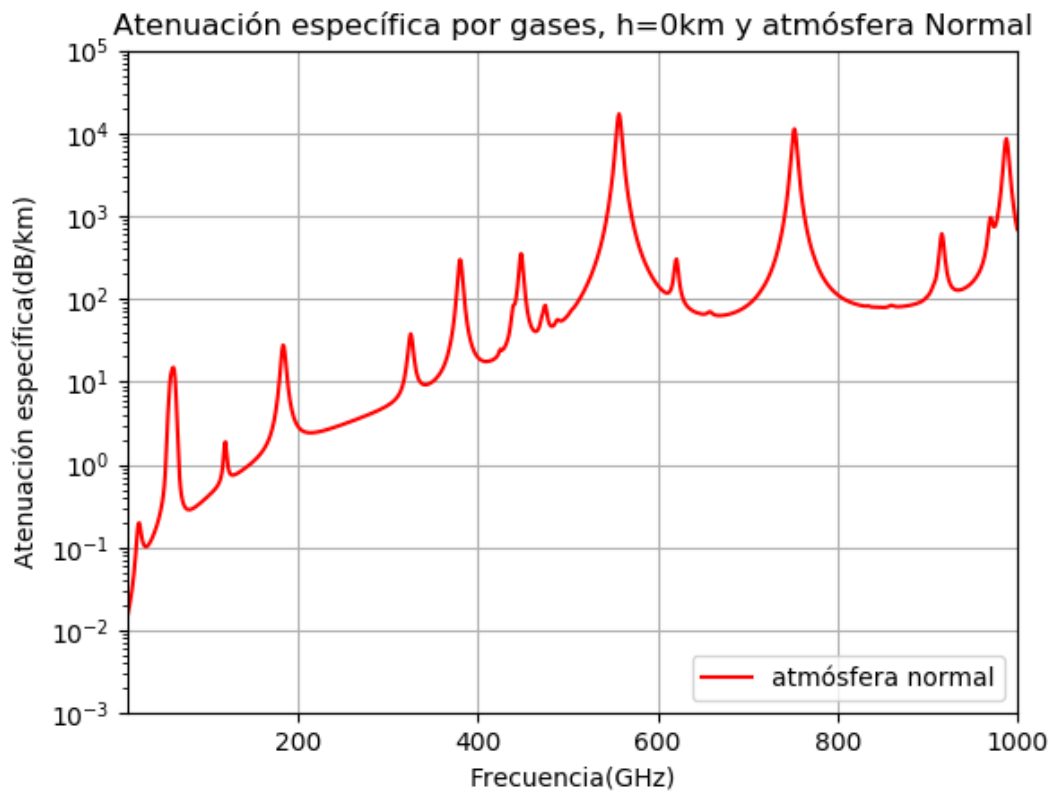


Figura 6-11. Atenuación específica frente a la frecuencia de forma simulada

Tras las gráficas obtenidas se puede comprobar que los resultados son muy aproximados, con lo que se puede decir que el método de cálculo raya por raya de la atenuación específica es adecuado.

6.2.1.2 Cálculo de la atenuación específica en las proximidades de los 60 GHz para distintas alturas sobre el nivel del mar

Se procede a la comparación de la atenuación específica debida a gases para un rango entre 50 y 70 GHz a las alturas de 0, 5, 10, 15 y 20 km para el caso de atmósfera normal. A continuación se comparará con el resultado del programa en Python con estas mismas características.

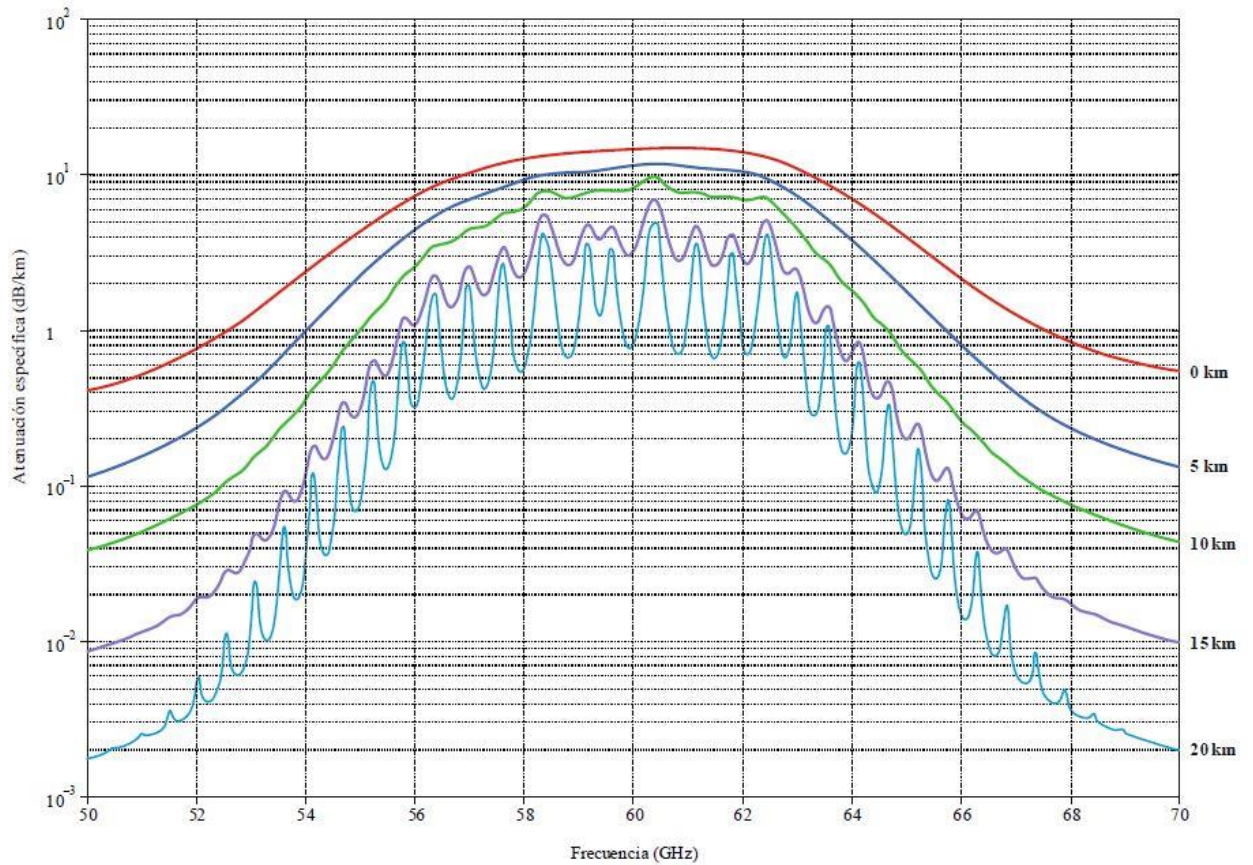


Figura 6-12. Atenuación específica frente a la frecuencia en las proximidades de 60 GHz de forma teórica. [7]

Esta es la gráfica teórica proporcionada por la recomendación ITU-R P.676 [10]. En Python, se ha trabajado con un barrido de frecuencias entre 1 y 1000 GHz, y se ha obtenido todos los valores de atenuación específica a dichas frecuencias. Este es el resultado:

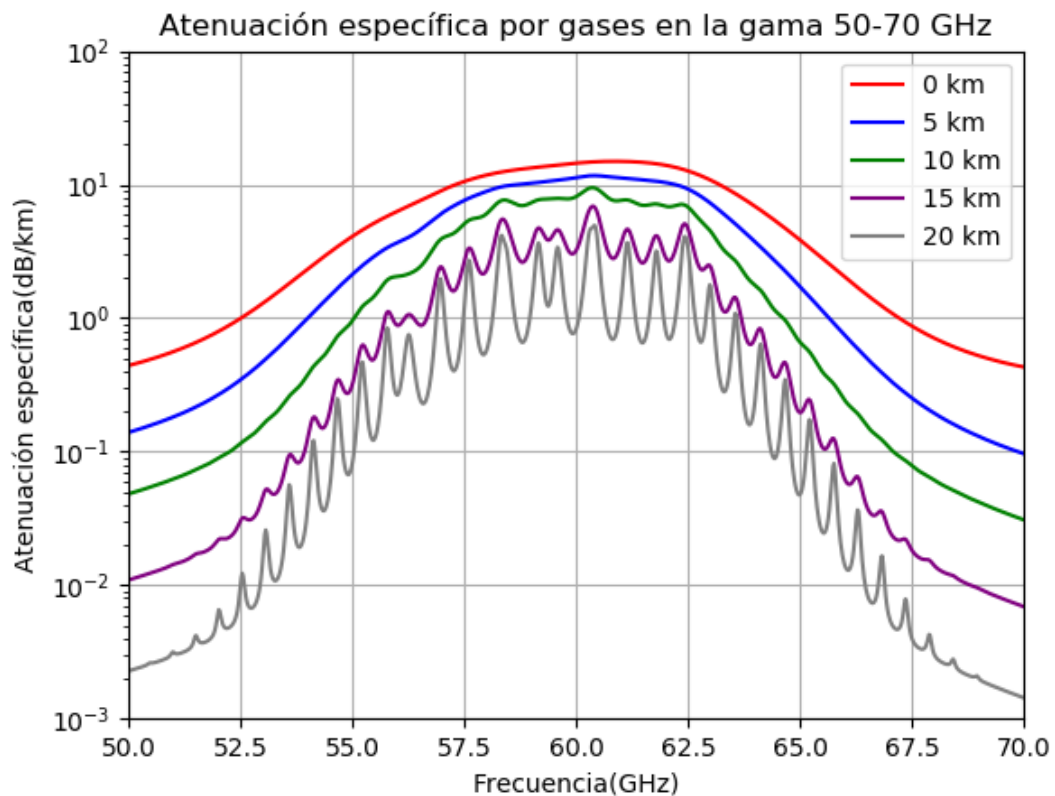


Figura 6-13. Atenuación específica frente a la frecuencia en las proximidades de 60 GHz de forma simulada

Se puede observar que la simulación es prácticamente igual a la gráfica teórica proporcionada por la recomendación de la ITU-R. Para apreciar todos los máximos y mínimos de la gráfica simulada se ha tenido que muestrear en pasos de 1000 entre la gama de frecuencias 50-70 GHz. Esta tarea se ha conseguido mediante la función *linspace* de la librería *NumPy* de Python.

6.2.1.3 Caso 1: Cálculo de la atenuación por gases para un radioenlace con antena transmisora en Valencina de la Concepción y antena receptora en la ETSI de Sevilla

Programando en Python todos los métodos matemáticos y fórmulas anteriormente presentadas de forma teórica e introduciendo por línea de comandos una serie de datos necesarios para el radioenlace del caso 1 del apartado (3.2.1), como son la frecuencia, estación del año, tipo de atmósfera se puede obtener la atenuación total debido a gases.

Ejecutando el código:

```

Simulador de radiocomunicaciones. Cálculo de la atenuación debida a gases.
Se necesitan los siguientes datos para el estudio
Frecuencia en GHz: 38
La altura promedia sobre el nivel del mar en metros es de: 47.971649484536094 m
La longitud del trayecto en Km es de: 5.765 km
¿Tengo información sobre latitud? (sí:s,no:n): s
La latitud es de 37.0 grados
Estación del año (verano:v o invierno:i): v
La temperatura es de: 294.73342107551855 K
La presión del aire seco es de: 1007.4759250190381 hPa
¿La atmósfera es normal o seca? n/s: n
La presión parcial de vapor de agua es de: 19.135093583675236 hPa
El sumatorio de la contribución de todas las rayas de oxígeno es: 0.006982827923705801
El espectro continuo de aire seco debido a nitrógeno y efecto Debye es: 0.001040411835460779
La refractividad del oxígeno es de: 0.00802323975916658
La refractividad del vapor de agua es de: 0.021167832911047617
La atenuación específica es de: 0.20188545858720136 dB/km
La atenuación total debida a gases es de: 1.1638696687552157 dB

***Repl Closed***

```

Figura 6-14. Ejecución enlace Caso 1

Se verifica que el resultado que se obtiene como respuesta es correcto y similar a cuando se resolvió analíticamente.

6.2.1.4 Caso 2: Cálculo de la atenuación por gases para un radioenlace con antena transmisora en Fuente de Cantos y antena receptora en Calzadilla de los Barros

Esta vez se realizará para el enlace del caso 2 del apartado (3.2.2). Ejecutando el código:

```

Simulador de radiocomunicaciones. Cálculo de la atenuación debida a gases.
Se necesitan los siguientes datos para el estudio
Frecuencia en GHz: 60
La altura promedia sobre el nivel del mar en metros es de: 582.9159420289858 m
La longitud del trayecto en Km es de: 6.172 km
¿Tengo información sobre latitud? (sí:s,no:n): s
La latitud es de 38.0 grados
Estación del año (verano:v o invierno:i): i
La temperatura es de: 270.5531840966502 K
La presión del aire seco es de: 948.0503581809548 hPa
¿La atmósfera es normal o seca? n/s: n
La presión parcial de vapor de agua es de: 3.661780254673189 hPa
El sumatorio de la contribución de todas las rayas de oxígeno es: 1.4420982755945537
El espectro continuo de aire seco debido a nitrógeno y efecto Debye es: 0.0007978920625638881
La refractividad del oxígeno es de: 1.4428961676571177
La refractividad del vapor de agua es de: 0.005757889311618379
La atenuación específica es de: 15.819302302098597 dB/km
La atenuación total debida a gases es de: 97.63673380855253 dB

***Repl Closed***

```

Figura 6-15. Ejecución enlace Caso 2

Se comprueba nuevamente que el resultado que se obtiene es correcto y aproximadamente igual a cuando se resolvió de forma teórica.

Se puede concluir que el programa creado en Python para el cálculo de la atenuación debida a precipitaciones funciona correctamente.

6.2.2 Conclusiones y modo gráfico de Python

Al igual que en el apartado (6.1.2) para lluvia, se van a proponer una serie de casos prácticos. Mediante la ejecución del programa en Python y la ayuda de las librerías *numpy* y *matplotlib* para el modo gráfico de dicho lenguaje, se obtendrán una serie de figuras. Esto aportará al lector una visión más completa de cómo influyen unos parámetros con otros en el cálculo de las pérdidas por gases en un radioenlace.

6.2.2.1 Caso 1: Cálculo de la atenuación por gases para una distancia de trayecto constante y a distintas alturas promedias sobre el nivel del mar

En este caso se va a proceder a la resolución simulada del cálculo de la atenuación debida a gases para un enlace terrenal con las siguientes características:

- Longitud del trayecto, d : 15 km
- Tipo de atmósfera (normal o seca): normal
- Uso de atmósfera de referencia mundial anual media para calcular los parámetros de temperatura, presión de aire seco y presión de vapor de agua, según recomendación ITU-R P.835 [11]

Se va a realizar la simulación gráfica de la atenuación por gases con un enlace de estas características asignando un barrido de frecuencias entre 10 y 1000 GHz, puesto que a frecuencias menores de 10 GHz la atenuación debida a gases es irrelevante. Se escogerán distintas alturas promedias sobre el nivel del mar entre 0 y 5 km, puesto que para enlaces terrenales es difícil encontrar lugares habitables con más altura de esta. Si se hace una búsqueda de las ciudades con más altitud del mundo se tiene:

Altitud ↕	Nombre ↕	País ↕
5300 m	La Rinconada	 Perú
5019 m	Wenquan	 China
4735 m	Lungring	 China
4659 m	Ukdungle	 India
4595 m	Korzok	 India
4587 m	Komic	 India
4587 m	Tanggulashan	 China
4572 m	Pagri	 China

Figura 6-16. Ciudades con más altitud del mundo. [8]

El resultado de la simulación es el siguiente:

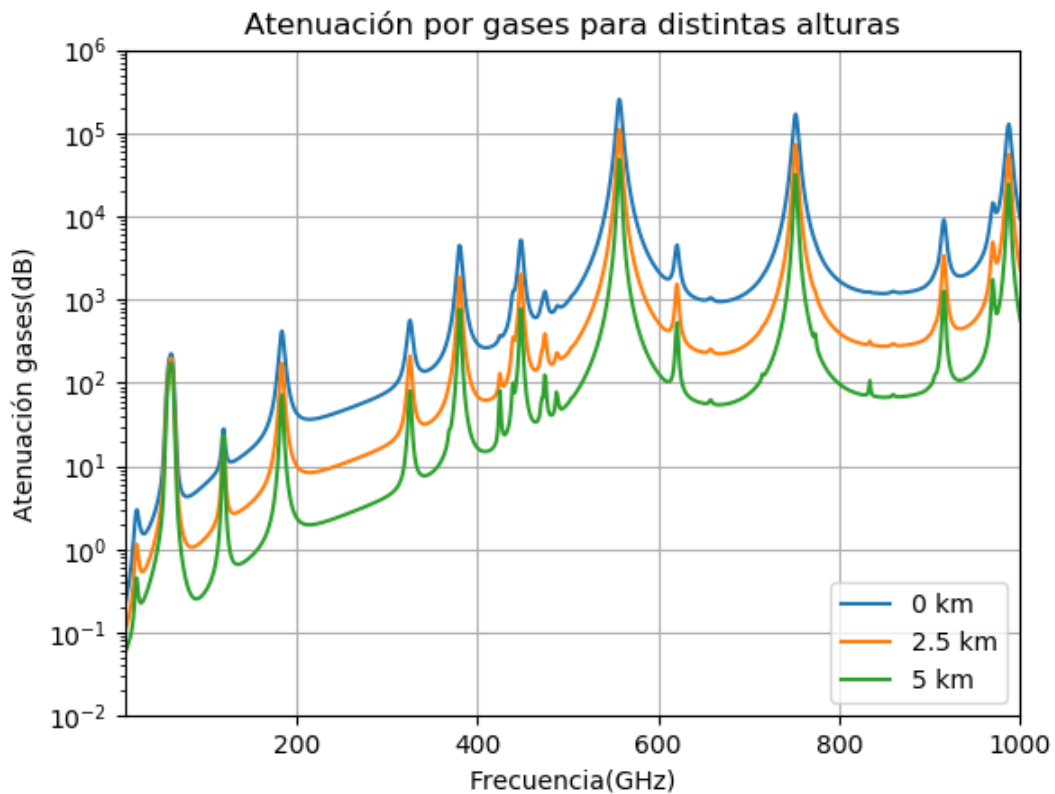


Figura 6-17. Atenuación frente a la frecuencia a diferentes alturas

El objetivo de esta simulación es conocer el efecto que la altura promedio sobre el nivel del mar produce en la atenuación por gases a una distancia fija. Lógicamente, mientras mayor sea la distancia del trayecto que separa la antena transmisora y receptora mayores serán las pérdidas.

Se puede observar en la gráfica que a mayor altura promedio sobre el nivel del mar menor atenuación por gases provoca. Esto es debido a que a mayor altitud se obtiene una menor temperatura como se puede ver en la siguiente simulación:

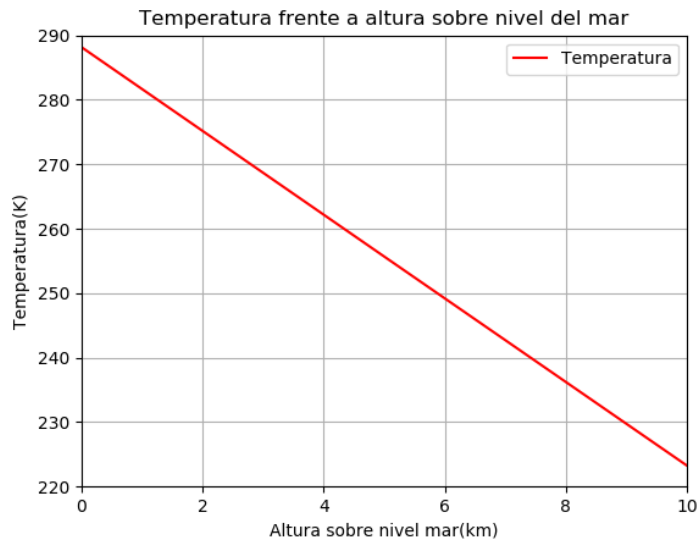


Figura 6-18. Temperatura frente a la altura sobre el nivel del mar

Se obtiene una gráfica lineal realizando un barrido de altitud entre 0 y 10 kilómetros. De la misma manera afecta la presión de aire seco y presión parcial de vapor de agua frente a la altura promedio sobre el nivel del mar:

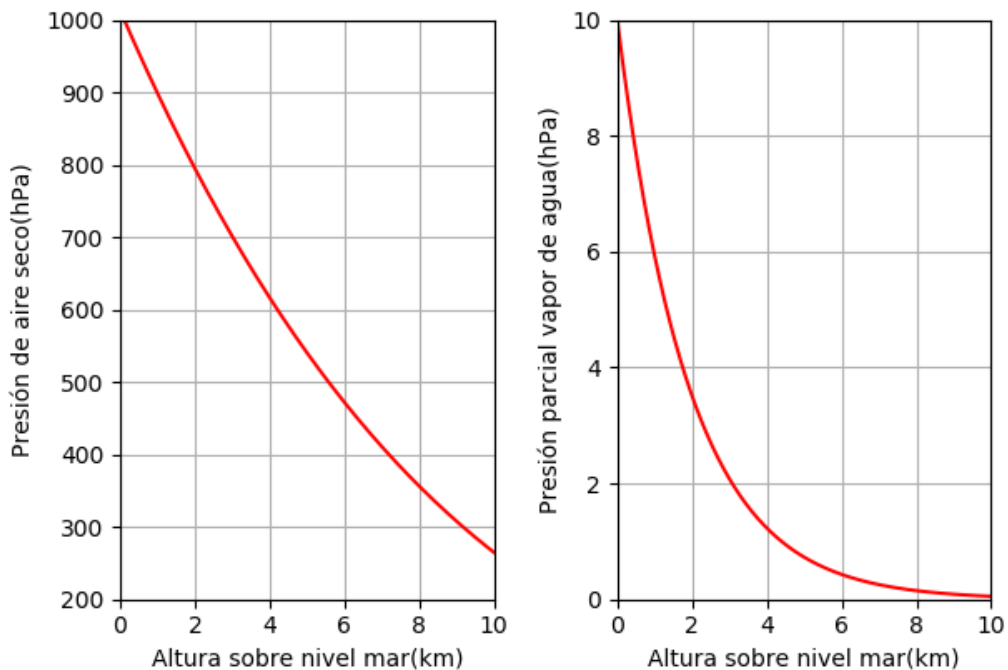


Figura 6-19. Presión frente a la altura sobre el nivel del mar

Se puede concluir pues, que a mayor altitud, menores serán los parámetros de temperatura, presión de aire seco y presión parcial de vapor de agua y, por consiguiente, menor será la atenuación específica de oxígeno y vapor de agua obtenida. Lo que dará como resultado que la atenuación total debida a gases decrezca con el aumento de la altitud.

6.2.2.2 Caso 2: Cálculo de la atenuación por gases para una distancia de trayecto y altitud constantes y diferentes latitudes y estaciones

Para este apartado se realizará la resolución simulada del cálculo de la atenuación debida a gases para un enlace terrenal con las siguientes características:

- Longitud del trayecto, d : 7 km
- Altura promedia sobre el nivel del mar, h : 0,5 km
- Tipo de atmósfera (normal o seca): normal
- Uso de atmósfera de referencia anual para latitudes bajas, medias y altas con el objetivo de calcular los parámetros de temperatura, presión de aire seco y presión de vapor de agua, según recomendación ITU-R P.835 [11]

Se obtendrá una simulación gráfica de la atenuación por gases con un enlace de estas características asignando un barrido de frecuencias entre 10 y 1000 GHz, puesto que a frecuencias menores de 10 GHz la atenuación debida a gases es irrelevante. Se realizará para las siguientes latitudes y variaciones estacionales:

- Latitud baja: Venezuela ($8^{\circ}0'0''$ N)
- Latitud media verano: Japón ($36^{\circ}0'0''$ N)
- Latitud media invierno: Japón ($36^{\circ}0'0''$ N)
- Latitud alta verano: Islandia ($65^{\circ}0'0''$ N)
- Latitud alta invierno: Islandia ($65^{\circ}0'0''$ N)

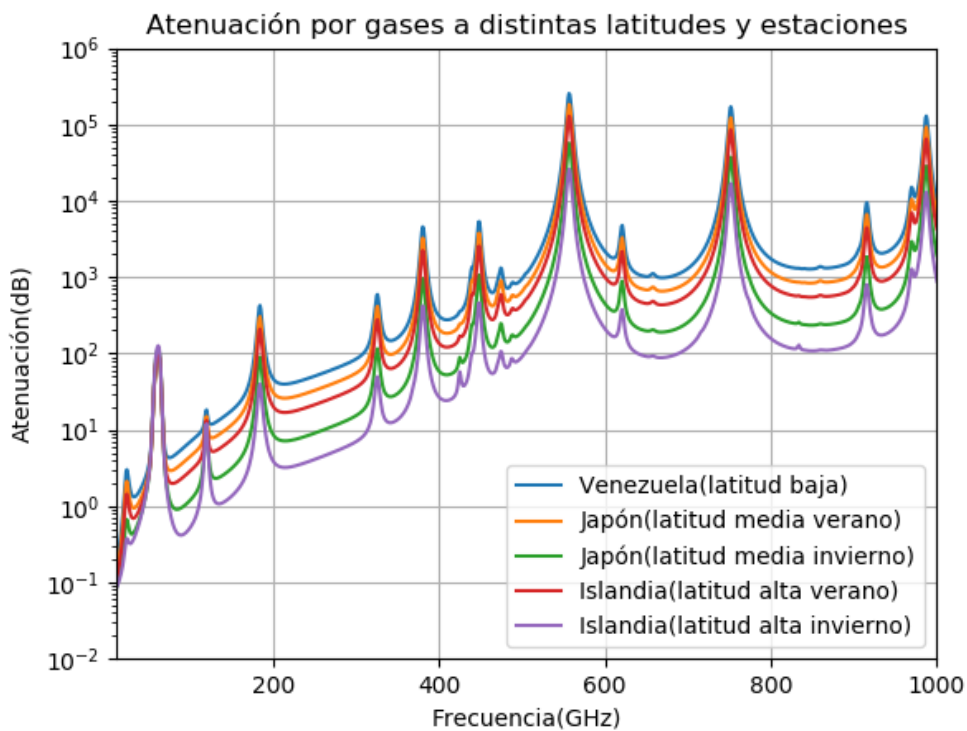


Figura 6-20. Atenuación frente a frecuencia para diferentes latitudes y estaciones

El objetivo principal de la simulación es observar cómo afecta la latitud y las variaciones estacionales a la atenuación total debida a gases para un enlace terrenal con distancia de trayecto y altitud constantes, en un amplio rango de frecuencias.

Se puede comprobar de la gráfica anterior que a mayor latitud, menor es la pérdida total por gases. Por otra parte se puede ver que en la estación de invierno hay una menor atenuación que en la de verano.

Esto se debe a que a medida que aumenta la latitud, los parámetros de temperatura, presión de aire seco y presión parcial de vapor de agua decrecen, como se puede comprobar en la figura 6.21. Al disminuir el valor de estos tres parámetros, se obtiene una atenuación específica tanto de oxígeno como de vapor de agua menor. Finalmente, al multiplicar esta atenuación específica con las distancia de trayecto se logra una atenuación total debida a gases más pequeña.

```

VENEZUELA: latitud baja
La temperatura es de: 297.24702149999996 K
La presión del aire seco es de: 958.4216000000001 hPa
La presión parcial de vapor de agua es de: 23.38962139805291 hPa

JAPÓN: latitud media en verano
La temperatura es de: 292.3580775 K
La presión del aire seco es de: 958.0062999999999 hPa
La presión parcial de vapor de agua es de: 15.630261775418319 hPa

JAPÓN: latitud media en invierno
La temperatura es de: 270.869275 K
La presión del aire seco es de: 957.922675 hPa
La presión parcial de vapor de agua es de: 3.7609920476686836 hPa

ISLANDIA: latitud alta en verano
La temperatura es de: 284.4121 K
La presión del aire seco es de: 952.3883 hPa
La presión parcial de vapor de agua es de: 9.830657446054062 hPa

ISLANDIA: latitud alta en invierno
La temperatura es de: 258.23181625 K
La presión del aire seco es de: 950.90075 hPa
La presión parcial de vapor de agua es de: 1.4875533577359807 hPa

***Repl Closed***
```

Figura 6-21. Temperatura y presión en función de la latitud y estación

6.2.2.3 Caso 3: Cálculo de la atenuación específica por gases para una altitud fija y un determinado rango de frecuencias

Para este apartado se realizará la resolución simulada del cálculo de la atenuación específica debida a gases para un enlace terrenal con las siguientes características:

- Altura promedio sobre el nivel del mar, h : 0 km
- Tipo de atmósfera (normal o seca): normal
- Uso de atmósfera de referencia mundial anual media con el objetivo de calcular los parámetros de temperatura, presión de aire seco y presión de vapor de agua, según recomendación ITU-R P.835 [11]

Se procederá a la simulación gráfica de la atenuación específica por gases debida al aire seco y al vapor de agua. También se obtendrá la total, como resultado de la suma de las dos anteriores, asignando para ello un barrido de frecuencias entre 10 y 300 GHz, puesto que a frecuencias menores de 10 GHz la atenuación debida a gases es irrelevante. La altura promedio sobre el nivel del mar de 0 kilómetros obtiene unos parámetros de:

- Temperatura = 288,15 K (15°C)
- Presión de aire seco = 1013,25 hPa
- Densidad de vapor de agua = 7,5 g/m³
- Presión parcial de vapor de agua = 9,97 hPa

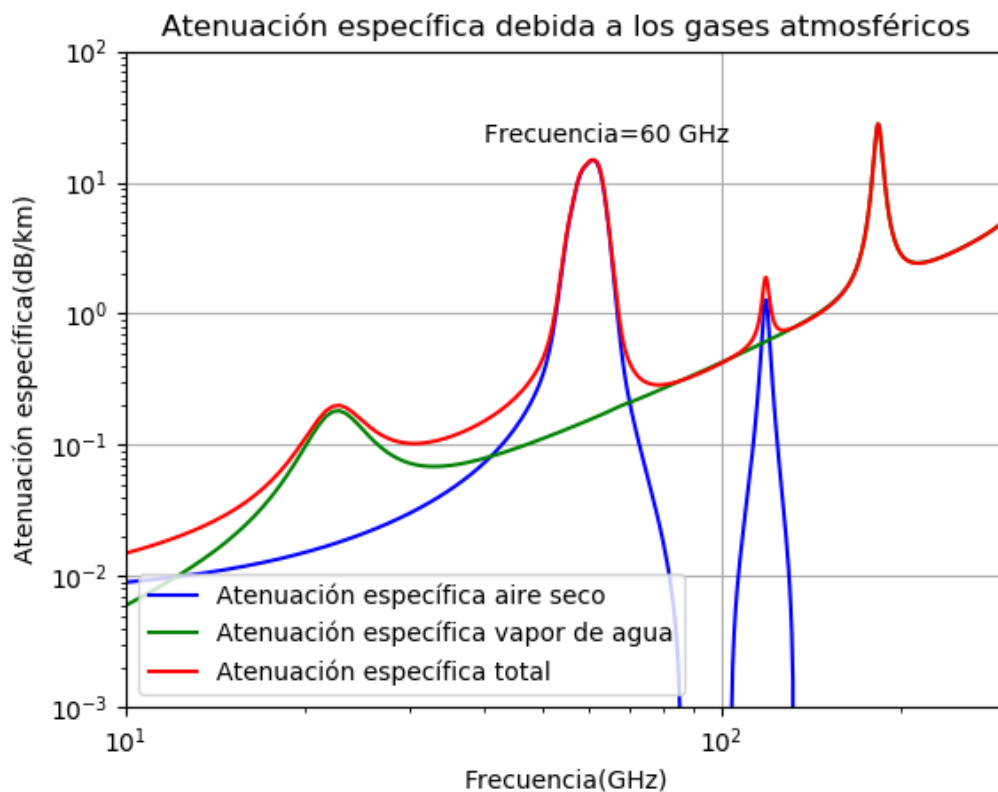


Figura 6-22. Atenuación específica frente a la frecuencia en un rango de 10-300 GHz

El objetivo de esta simulación es la observación de los máximos de atenuación, que corresponden con las frecuencias de resonancia molecular, tanto con el aire seco como con el vapor de agua.

La atenuación debida a los gases atmosféricos es causada principalmente por la absorción de moléculas de oxígeno y vapor de agua. Su importancia aumenta a medida que va creciendo la frecuencia. Los gases residuales como CO, NO, NO₂, SO₂, O₃... pueden contribuir a la atenuación total en frecuencias superiores a 70 GHz.

Se puede observar que la atenuación es elevada para frecuencias cercanas a los picos de resonancia de estas moléculas. Por ejemplo, la resonancia del vapor de agua se localiza en los 22 GHz y la del oxígeno en una amplia banda alrededor de los 60 GHz.

La molécula de oxígeno tiene un momento dipolar magnético, que interacciona con el campo magnético de la onda incidente dando como resultado una absorción de energía. Esta absorción se produce principalmente en determinadas líneas espectrales. Existe un rango de líneas de absorción centradas en los 60 GHz y una línea aislada situada aproximadamente en los 118 GHz.

La molécula de vapor de agua posee un momento eléctrico dipolar permanente muy intenso. La absorción se produce también en específicas líneas espectrales, como la considerada línea débil de 22 GHz y otra línea más intensa que ronda los 183 GHz.

Se suele considerar que la contribución del oxígeno a la absorción atmosférica es relativamente constante, aunque tenga ligeras variaciones dependiendo de la temperatura. Sin embargo, la atenuación por vapor de agua sufre mayores oscilaciones debido a que los perfiles de humedad son muy variables.

Entre estos picos de resonancia de las moléculas aparecen ventanas espectrales dentro de las cuales se usan las frecuencias en los radioenlaces del servicio fijo. Estas absorciones por tanto dependen de la frecuencia a la que se esté emitiendo la señal, produciendo que en ciertas bandas de frecuencia sea imposible la transmisión a largas distancias. Aunque es cierto que cuando se desea realizar una radiocomunicación local de corto alcance, se puede efectuar en las frecuencias de los máximos de atenuación, con el objetivo de evitar que la señal se propague lejos y ocasione interferencias no deseadas.

7 CONCLUSIONES Y LÍNEA FUTURA DEL TRABAJO

Este trabajo ha supuesto poner en práctica muchos de los conocimientos aprendidos durante el Grado. Para mí, ha sido una conexión entre las intensificaciones de Sistemas de Telecomunicación y Telemática. Poniendo a prueba las bases sobre sistemas de radiocomunicación y programación. Además de utilizar todo el aprendizaje del Grado he expandido mis conocimientos sobre estas dos áreas, superando así los objetivos del proyecto.

Durante la realización me han ido surgiendo problemas que he sabido resolver. Al principio, suponía alguna dificultad entender perfectamente las recomendaciones de la ITU-R, puesto que algunas partes no están explicadas con detalle. Este problema fue resuelto mediante la búsqueda de otras fuentes de información y libros especializados en el tema. Otro problema más importante, fue la integración de parámetros esenciales de carácter cartográfico (como la altitud, distancia y latitud) en el programa principal de Python. Esto se debía a que la mayoría de *softwares* que permiten este tipo de cosas suelen ser de pagos. Realizando una búsqueda exhaustiva sobre programas en análisis y diseño de radioenlaces encontré uno gratuito que se ajustaba a las necesidades de mi código porque permitía la exportación de ficheros con los datos sobre el enlace creado.

Este trabajo también me ha servido como entrenamiento para el mundo laboral. Esto se debe a la importancia de búsqueda de información en fuentes fiables y sobre todo lo esencial que es documentar cada tarea realizada para que cualquier persona con cierto nivel de conocimiento pueda seguir trabajando sobre tu proyecto posteriormente.

Cabe destacar el enfrentamiento con un lenguaje de programación nuevo para mí. Esto me suponía un reto que desde un principio supe afrontarlo. En este sentido, tenía bastante motivación porque creo que Python es un lenguaje en auge y que seguro en un futuro tendré que volverlo a utilizar.

Con vistas hacia el futuro, voy a citar una serie de áreas en las que mi trabajo puede expandirse para así resolver algunos temas surgidos durante la realización del mismo:

- Este trabajo puede servir como base para la creación de un simulador de radiocomunicaciones completo basado en las recomendaciones de la ITU-R, que es el verdadero objetivo del proyecto. Este simulador completo se ha basado en la idea “*Divide y vencerás*”, puesto que la creación de un simulador íntegro supera con creces las expectativas de un trabajo de fin de grado.
- Creación de mapas cartográficos que permitan la integración de parámetros de carácter geográfico en el programa de Python sin necesidad de recurrir a *software* externos.
- Ampliar para enlaces Tierra-espacio. Por ejemplo, introduciendo el método de cálculo de la atenuación específica de gases para trayectos oblicuos como recomienda la norma ITU-R P.676. Como existen diferentes rangos de altura en el enlace, el método consiste en dividir la

atmósfera en capas y cada una tendrá diferentes valores de temperatura y presión, con lo que cada una tendrá una diferente atenuación específica. Dicha atenuación específica final sería el sumatorio de todas ellas.

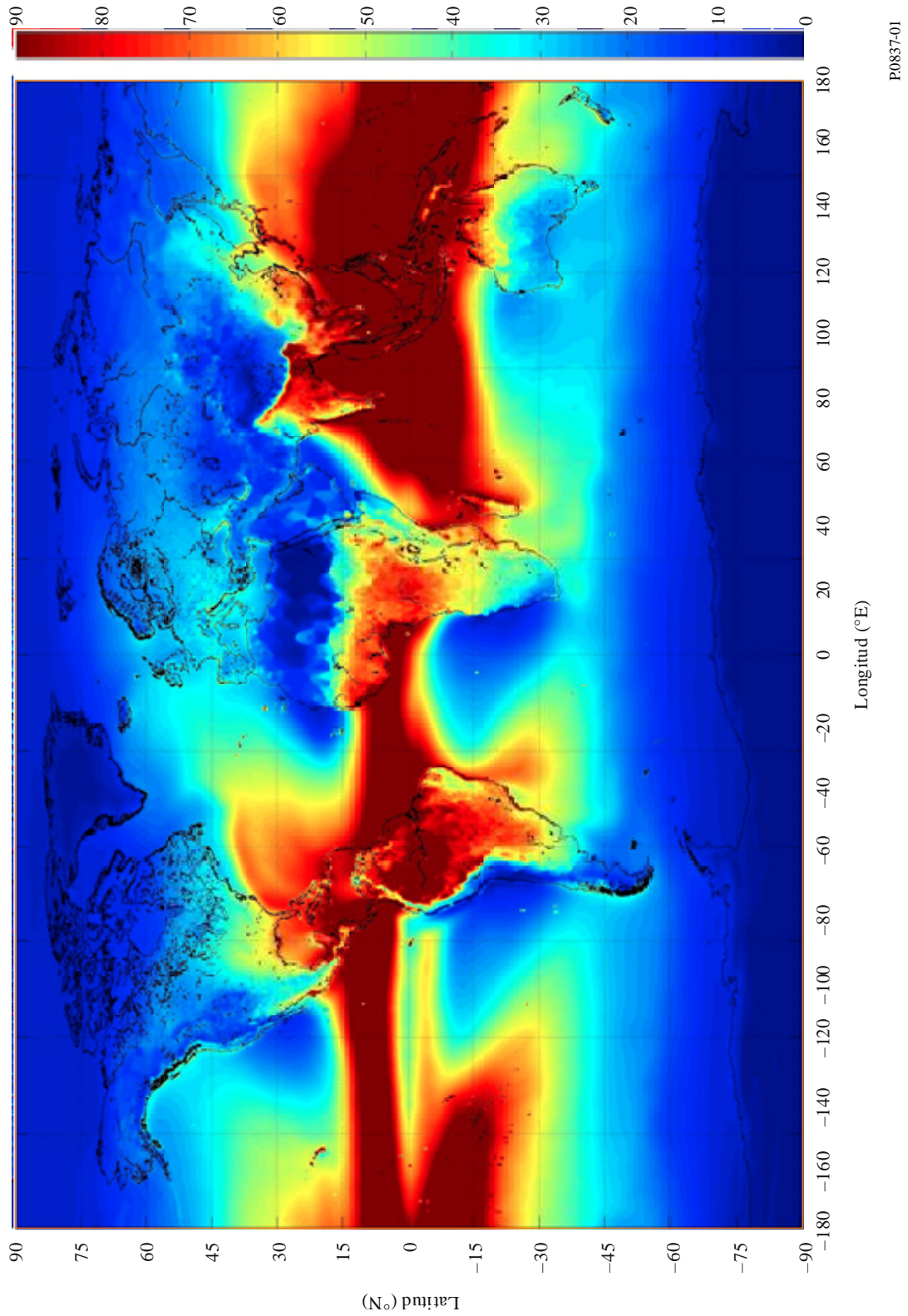
- Añadir el método combinado para lluvia y nieve húmeda de la recomendación ITU-R P.530 [9].

REFERENCIAS

- [1] Les Barclay, «Propagation of Radiowaves», 2nd Edition, 2003.
- [2] Ramos, «P. Revista Gigatronic», nº12.
- [3] Radiocommunication Sector of ITU, «TABLE 5 (Rec. ITU-R P.838-3)», 2005.
- [4] Crespo Carlos, Madero María José, «Radiopropagación, Fundamentos de Radiocomunicación», 2017.
- [5] Radiocommunication Sector of ITU, «FIGURE 1, FIGURE 2 (Rec. ITU-R P.838-3)», 2005.
- [6] Radiocommunication Sector of ITU, «FIGURE 3, FIGURE 4 (Rec. ITU-R P.838-3)», 2005.
- [7] Radiocommunication Sector of ITU, «FIGURE 1, FIGURE 2 (Rec. ITU-R P.676-11)», 2016.
- [8] 2009. [En línea]. Available: https://www.lareserva.com/las_7_cuidades_mas_altas_del_planeta.
- [9] Radiocommunication Sector of ITU, «Rec. ITU-R P.530-17. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems», 2017.
- [10] Radiocommunication Sector of ITU, «Rec. ITU-R P.676-11. Attenuation by atmospheric gases», 2016.
- [11] Radiocommunication Sector of ITU, «Rec. ITU-R P.835-6. Reference standard atmospheres», 2017.
- [12] Radiocommunication Sector of ITU, «Rec. ITU-R P.837-7. Characteristics of precipitation for propagation modelling», 2017.
- [13] Radiocommunication Sector of ITU, «Rec. ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods», 2005.
- [14] Covantec R.L., 2018. [En línea]. Available: <https://entrenamiento-python-basico.readthedocs.io/es/latest/leccion1/>
- [15] Álvarez Miguel Ángel, 2003. [En línea]. Available: <https://desarrolloweb.com/articulos/1325.php>
- [16] 2014. [En línea]. Available: <http://qbnz.com/highlighter/demo.php>.
- [17] K.Kalyana Srinivas. «Int. Journal of Engineering Research and Applications», Vol 5, Issue 4, Part 1, 2015, p. 20-23.
- [18] Python ORG. [En línea]. Available: <https://www.python.org/>
- [19] Manual modo gráfico de Python, 2016. [En línea]. Available: <https://claudiovz.github.io/scipy-lecture-notes-ES/intro/matplotlib/matplotlib.html>
- [20] Manual software *LINKPlanner*, 2019. [En línea]. Available: <https://support.cambiumnetworks.com/files/linkplanner/>

FIGURA 1

Intensidad de lluvia rebasada durante el 0,01% de un año medio



CUADRO 1
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		

CUADRO 2
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		

CUADRO 3
Coeficientes para α_H

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
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		

CUADRO 4
Coeficientes para α_V

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
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		

FIGURA 2

Coefficiente k de polarización horizontal

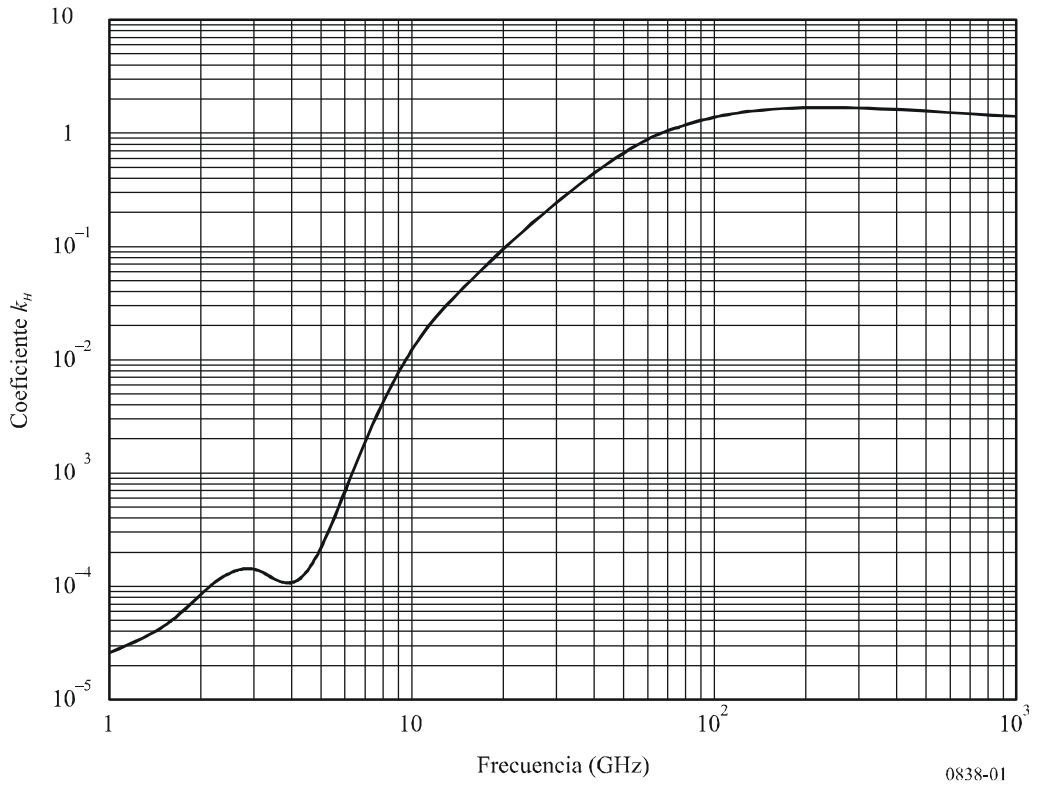


FIGURA 3

Coefficiente α de polarización horizontal

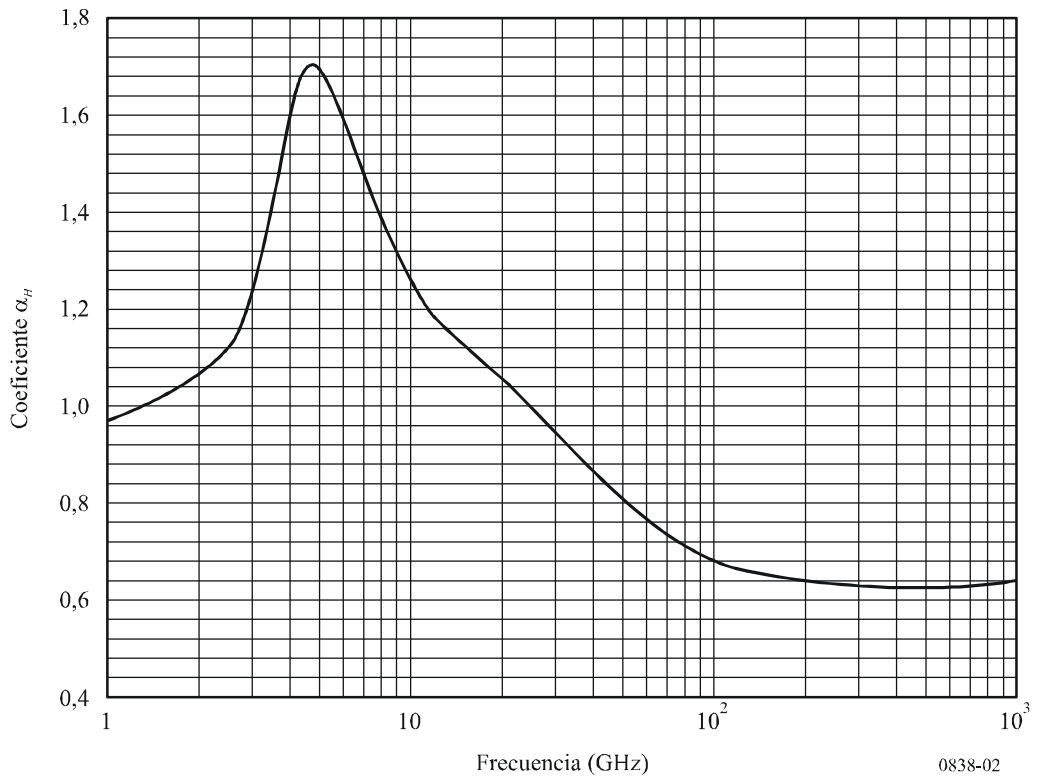


FIGURA 4
Coeficiente k de polarización vertical

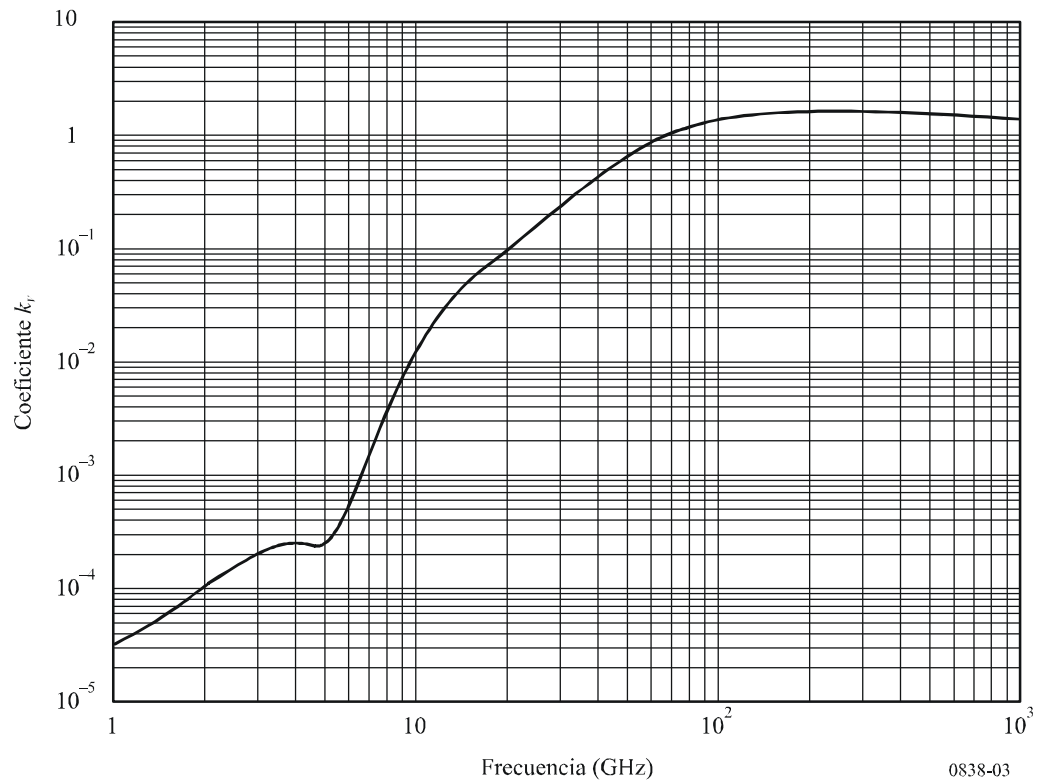
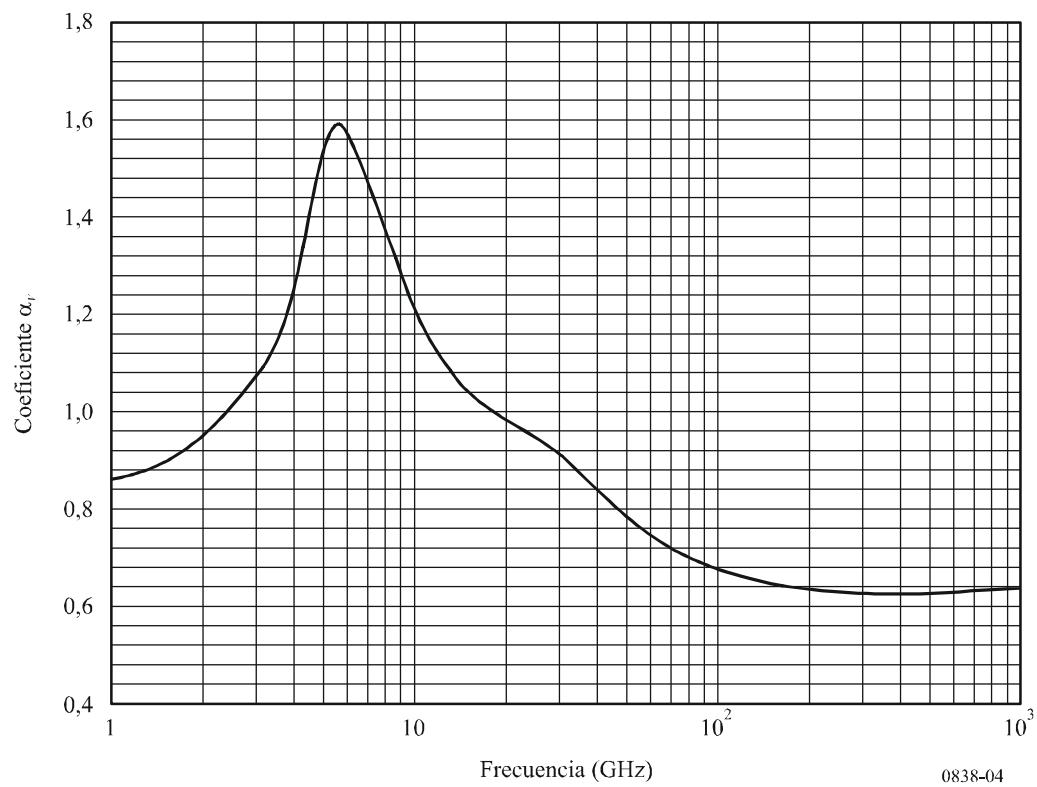


FIGURA 5
Coeficiente α de polarización vertical



CUADRO 5

Coefficientes que dependen de la frecuencia para estimar la atenuación específica debida a la lluvia utilizando las ecuaciones (4), (5) y (1)

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_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
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

CUADRO 5 (Continuación)

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
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
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

CUADRO 5 (Continuación)

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
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
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

CUADRO 5 (Continuación)

Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
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

CUADRO 1

Datos 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

CUADRO 1 (continuación)

f_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
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
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

CUADRO 2

Datos espectroscópicos para la atenuación del vapor de agua

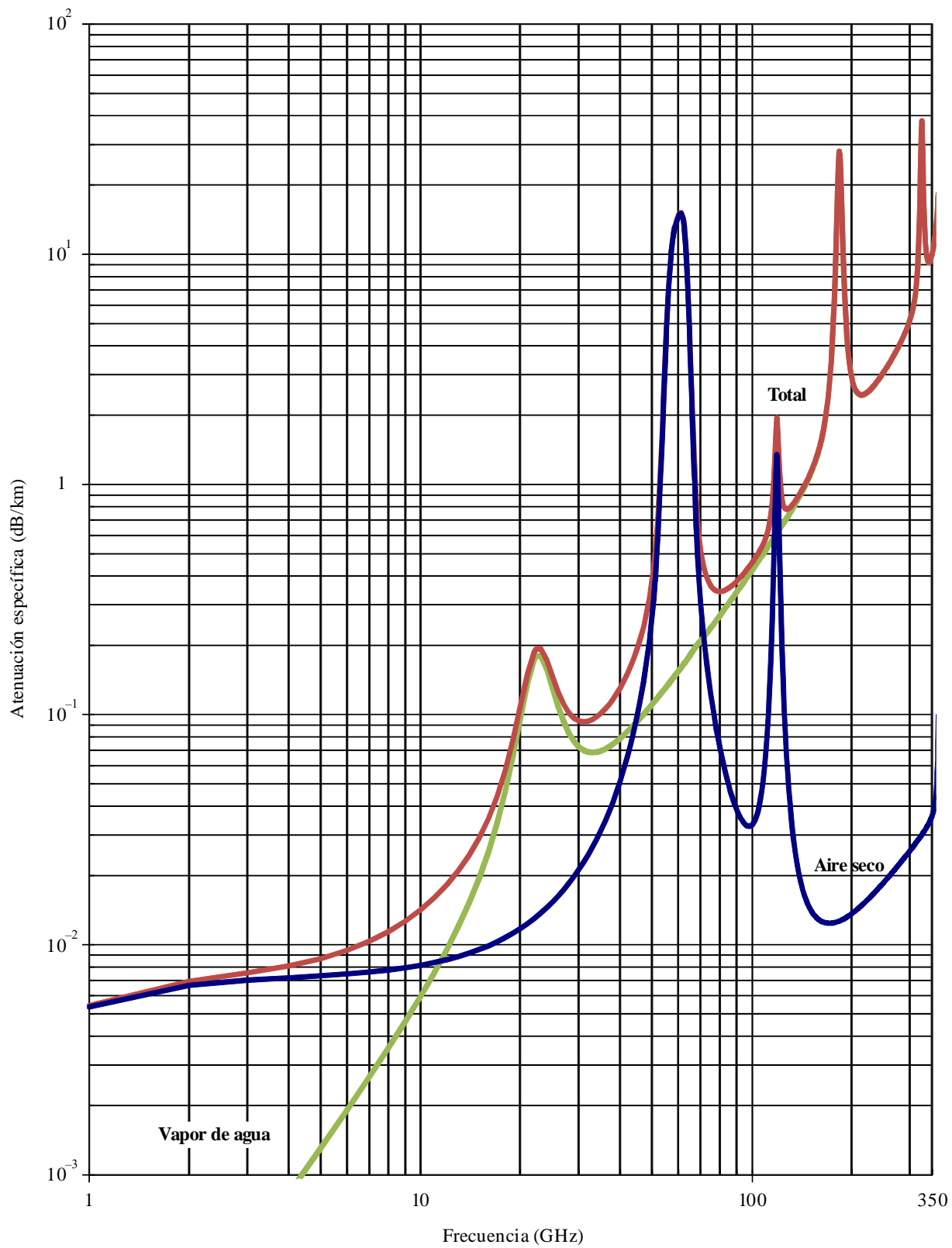
f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
*22,235080	0,1079	2,144	26,38	0,76	5,087	1,00
67,803960	0,0011	8,732	28,58	0,69	4,930	0,82
119,995940	0,0007	8,353	29,48	0,70	4,780	0,79
*183,310087	2,273	0,668	29,06	0,77	5,022	0,85
*321,225630	0,0470	6,179	24,04	0,67	4,398	0,54
*325,152888	1,514	1,541	28,23	0,64	4,893	0,74
336,227764	0,0010	9,825	26,93	0,69	4,740	0,61
*380,197353	11,67	1,048	28,11	0,54	5,063	0,89
390,134508	0,0045	7,347	21,52	0,63	4,810	0,55
437,346667	0,0632	5,048	18,45	0,60	4,230	0,48
439,150807	0,9098	3,595	20,07	0,63	4,483	0,52
443,018343	0,1920	5,048	15,55	0,60	5,083	0,50
*448,001085	10,41	1,405	25,64	0,66	5,028	0,67
470,888999	0,3254	3,597	21,34	0,66	4,506	0,65
474,689092	1,260	2,379	23,20	0,65	4,804	0,64
488,490108	0,2529	2,852	25,86	0,69	5,201	0,72
503,568532	0,0372	6,731	16,12	0,61	3,980	0,43
504,482692	0,0124	6,731	16,12	0,61	4,010	0,45
547,676440	0,9785	0,158	26,00	0,70	4,500	1,00
552,020960	0,1840	0,158	26,00	0,70	4,500	1,00
*556,935985	497,0	0,159	30,86	0,69	4,552	1,00
620,700807	5,015	2,391	24,38	0,71	4,856	0,68

CUADRO 2 (continuación)

f_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
645,766085	0,0067	8,633	18,00	0,60	4,000	0,50
658,005280	0,2732	7,816	32,10	0,69	4,140	1,00
*752,033113	243,4	0,396	30,86	0,68	4,352	0,84
841,051732	0,0134	8,177	15,90	0,33	5,760	0,45
859,965698	0,1325	8,055	30,60	0,68	4,090	0,84
899,303175	0,0547	7,914	29,85	0,68	4,530	0,90
902,611085	0,0386	8,429	28,65	0,70	5,100	0,95
906,205957	0,1836	5,110	24,08	0,70	4,700	0,53
916,171582	8,400	1,441	26,73	0,70	5,150	0,78
923,112692	0,0079	10,293	29,00	0,70	5,000	0,80
970,315022	9,009	1,919	25,50	0,64	4,940	0,67
987,926764	134,6	0,257	29,85	0,68	4,550	0,90
*1 780,000000	17506	0,952	196,3	2,00	24,15	5,00

FIGURA 1

Atenuación específica debida a los gases
(Presión=1 013,25 hPa; Temperatura = 15°C; Densidad de vapor de agua = 7,5 g/m³)



Interfaz.py

```
from tkinter import * #Librería para interfaz gráfica
from Principal_Lluvia import *
from Principal_Gases import *
from tkinter import messagebox #Librería para ventanas emergentes

raiz=Tk() #Creo la raíz
raiz.title("Simulador de Radiocomunicaciones--Pablo Bayón Gala") #Título de la
interfaz
raiz.iconbitmap("Figuras/etsi.ico") #Icono de la interfaz
raiz.geometry("1330x660") #Tamaño de la interfaz
raiz.config(bg="DarkSeaGreen1") #Color de la interfaz

'''-----LLUVIA-----'''

#VARIABLES
mi_frecuencia=StringVar()
mi_intensidad_lluvia=StringVar()
varOpcion=IntVar()
mi_porcentaje_tiempo=StringVar()
mi_atenuacion_lluvia=IntVar()
mi_angulo_elevacion_trayecto=StringVar()
mi_angulo_elevacion_trayecto2=StringVar()
mi_angulo_inclinacion=StringVar()

#FUNCIONES
def polarizacion_circular():
    Label(raiz, text="Introduzca el ángulo de elevación del trayecto en
grados:").place(x=100,y=412)
    Entry(raiz,textvariable=mi_angulo_elevacion_trayecto).place(x=410,y=412)

def polarizacion_lineal():
    Label(raiz, text="Introduzca el ángulo de elevación del trayecto en
grados:").place(x=100,y=442)
    Entry(raiz,textvariable=mi_angulo_elevacion_trayecto2).place(x=410,y=442
)
    Label(raiz, text="Ángulo de inclinación de la polarización con respecto
a la horizontal en grados:").place(x=100,y=462)
    Entry(raiz,textvariable=mi_angulo_inclinacion).place(x=530,y=462)

def calcula_atenuacion_lluvia():
    angulo_elevacion_trayecto=0.0
    angulo_inclinacion=0.0

    frecuencia=float(mi_frecuencia.get()) #Se obtiene el valor
introducido en el cuadro de texto mi_frecuencia
    intensidad_lluvia=float(mi_intensidad_lluvia.get())
    if(varOpcion.get()==1):
        polarizacion="h"
    elif(varOpcion.get()==2):
        polarizacion="v"
    elif(varOpcion.get()==3):
        polarizacion="c"
        angulo_elevacion_trayecto=float(mi_angulo_elevacion_trayecto.get
```

```

    ())
        else:
            polarizacion="1"
            angulo_elevacion_trayecto=float(mi_angulo_elevacion_trayecto2.ge
t())
            angulo_inclinacion=float(mi_angulo_inclinacion.get())
            porcentaje_tiempo=float(mi_porcentaje_tiempo.get())
            atenuacion_lluvia=lluvia(frecuencia,intensidad_lluvia,polarizacion,porce
ntaje_tiempo,angulo_elevacion_trayecto,angulo_inclinacion)
            mi_atenuacion_lluvia.set(atenuacion_lluvia) #Pone el valor de la
atenuación en el cuadro de texto mi_atenuacion_lluvia
            messagebox.showinfo("Atenuación por lluvia",str(atenuacion_lluvia)+"
Decibelios") #Ventana emergente con el valor de la atenuación

Label(raiz, text="Cálculo de la atenuación por
lluvia", font="12", fg="red", bg="light yellow").place(x=170,y=0)
imagen_lluvia=PhotoImage(file="Figuras/lluvia.png")
Label(raiz, image=imagen_lluvia).place(x=210,y=30)
Label(raiz, text="Introduzca los siguientes datos:", font="8").place(x=0,y=220)
Label(raiz, text="Frecuencia en GHz:").place(x=0,y=260)
Entry(raiz,textvariable=mi_frecuencia).place(x=120,y=260) #Con textvariable se
consigue que este cuadro de texto esté asociado al valor de la variable
mifrecuencia
Label(raiz, text="Intensidad de precipitación excedida durante el 0.01% del
tiempo en mm/h:").place(x=0,y=290)
Entry(raiz,textvariable=mi_intensidad_lluvia).place(x=420,y=290)
Label(raiz, text="Tipo de polarización:").place(x=0,y=320)
Radiobutton(raiz, text="Horizontal", variable=varOpcion, value=1).place(x=30,y=350)
Radiobutton(raiz, text="Vertical", variable=varOpcion, value=2).place(x=30,y=380)
Radiobutton(raiz, text="Circular", variable=varOpcion, value=3, command=polarizacio
n_circular).place(x=30,y=410)
Radiobutton(raiz, text="Lineal", variable=varOpcion, value=4, command=polarizacion_
lineal).place(x=30,y=440)
Label(raiz, text="Indique el porcentaje de tiempo que desea [margen: 0.001% a
1%]:").place(x=0,y=490)
Entry(raiz,textvariable=mi_porcentaje_tiempo).place(x=380,y=490)
Button(raiz, text="Calcular
atenuación", font="8", bg="salmon", bd="10", command=calcula_atenuacion_lluvia).pla
ce(x=200,y=560) #Cuando se pulsa el botón se ejecuta el código de la
función asignada en command
Entry(raiz,textvariable=mi_atenuacion_lluvia, fg="red").place(x=220,y=620)
Label(raiz, text="dB").place(x=350,y=620)

'''-----GASES-----'''

#VARIABLES
mi_frecuencia2=StringVar()
varOpcion2=IntVar()
varOpcion3=IntVar()
varOpcion4=IntVar()
mi_atenuacion_gases=StringVar()

#FUNCIONES
def estacion():
    Label(raiz, text="Estación del año:").place(x=790,y=320)
    Radiobutton(raiz, text="Verano", variable=varOpcion3, value=1).place(x=900,
y=320)
    Radiobutton(raiz, text="Invierno", variable=varOpcion3, value=2).place(x=90

```

```

0,y=350)

def calcula_atenuacion_gases():
    estacion="v"

    frecuencia=float(mi_frecuencia2.get()) #Se obtiene el valor
    introducido en el cuadro de texto mi_frecuencia2
    if(varOpcion2.get()==1):
        respuesta="s"
    else:
        respuesta="n"
    if(varOpcion3.get()==1):
        estacion="v"
    else:
        estacion="i"
    if(varOpcion4.get()==1):
        atmosfera="n"
    else:
        atmosfera="s"
    atenuacion_gases=gases(frecuencia,respuesta,estacion,atmosfera)
    mi_atenuacion_gases.set(atenuacion_gases) #Pone el valor de la
    atenuación en el cuadro de texto mi_atenuacion_gases
    messagebox.showinfo("Atenuación por gases",str(atenuacion_gases)+"
    Decibelios") #Ventana emergente con el valor de la atenuación

Label(raiz, text="Cálculo de la atenuación por
gases", font="12", fg="red", bg="light yellow").place(x=850,y=0)
imagen_gases=PhotoImage(file="Figuras/gases.png")
Label(raiz, image=imagen_gases).place(x=900,y=30)
Label(raiz, text="Introduzca los siguientes
datos:", font="8").place(x=720,y=220)
Label(raiz, text="Frecuencia en GHz:").place(x=720,y=260)
Entry(raiz,textvariable=mi_frecuencia2).place(x=830,y=260)
Label(raiz, text="¿Tengo información sobre latitud?").place(x=720,y=290)
Radiobutton(raiz,text="Sí",variable=varOpcion2,value=1,command=estacion).place(x
=740,y=320)
Radiobutton(raiz,text="No",variable=varOpcion2,value=2).place(x=740,y=350)
Label(raiz, text="Tipo de atmósfera:").place(x=720,y=380)
Radiobutton(raiz,text="Normal",variable=varOpcion4,value=1).place(x=740,y=410)
Radiobutton(raiz,text="Seca",variable=varOpcion4,value=2).place(x=740,y=440)
Button(raiz, text="Calcular
atenuación", font="8", bg="salmon", bd="10", command=calcula_atenuacion_gases).plac
e(x=900,y=560) #Cuando se pulsa el botón se ejecuta el código de la
función asignada en command
Entry(raiz,textvariable=mi_atenuacion_gases,fg="red").place(x=930,y=620)
Label(raiz, text="dB").place(x=1060,y=620)

raiz.mainloop() #Para estar a la escucha de los eventos que ocurran

```

Principal_Lluvia.py

```

import math
from Funciones_Lluvia import *
from Lee_Excel_DistanciayAltitud import *

def lluvia(frecuencia,intensidad_lluvia,polarizacion,porcentaje_tiempo,angulo_elevacion_trayecto,angulo_inclinacion):
    #Llamada a la función que calcula la longitud del trayecto en km
    distancia=calcula_distancia()
    print("La longitud del trayecto en Km es de: ",distancia,"km")

    if(frecuencia<5):
        atenuacion_lluvia=0
        print("La atenuación debido a lluvia es de", atenuacion_lluvia, "dB")

    else:
        #Llamada a la función que calcula la atenuación específica
        (atenuacion_especifica,alfa)=calcula_atenuacion_especifica(polarizacion,frecuencia,intensidad_lluvia,angulo_elevacion_trayecto,angulo_inclinacion)
        print("La atenuación específica es de ",atenuacion_especifica,"dB/km")

        #Llamada a la función que calcula la longitud efectiva del trayecto
        longitud_efectiva=calcula_longitud_efectiva(distancia,intensidad_lluvia,frecuencia,alfa)
        print("La longitud efectiva del trayecto es de",longitud_efectiva," km")

        #Cálculo de la atenuación de lluvia excedida durante el 0,01%' del tiempo
        atenuacion_lluvia=atenuacion_especifica*longitud_efectiva

        #Cálculo de la atenuación de lluvia para el porcentaje de tiempo indicado
        if(porcentaje_tiempo==0.01):
            print("La atenuación por lluvia durante un porcentaje de tiempo del 0.01% es: ",atenuacion_lluvia, " dB")
        else:
            if(frecuencia>=10):
                C0=0.12+0.4*(math.log10(frecuencia/10)**0.8)
            elif(frecuencia<10):
                C0=0.12
            C1=(0.07**C0)*(0.12**(1-C0))
            C2=0.855*C0+0.546*(1-C0)
            C3=0.139*C0+0.043*(1-C0)
            atenuacion_lluvia=atenuacion_lluvia*C1*porcentaje_tiempo**(- (C2+C3*math.log10(porcentaje_tiempo)))
            print("La atenuación de lluvia durante un porcentaje de tiempo del ",porcentaje_tiempo, "% es: ",atenuacion_lluvia, "dB")

    return atenuacion_lluvia

```


Funciones_Lluvia.py

```
import math
from Polarizacion_Horizontal import *
from Polarizacion_Vertical import *

def calcula_atenuacion_especifica(polarizacion, frecuencia, intensidad_lluvia, angulo_elevacion_trayecto, angulo_inclinacion):

    #Cálculo de la atenuación específica de lluvia
    if(polarizacion=="h"):
        log10_k=calcula_coef_k_horizontal(frecuencia)
        k=10**log10_k
        alfa=calcula_coef_alfa_horizontal(frecuencia)
    elif(polarizacion=="v"):
        log10_k=calcula_coef_k_vertical(frecuencia)
        k=10**log10_k
        alfa=calcula_coef_alfa_vertical(frecuencia)
    elif(polarizacion=="c" or polarizacion=="l"):
        log10_k_horizontal=calcula_coef_k_horizontal(frecuencia)
        k_horizontal=10**log10_k_horizontal
        alfa_horizontal=calcula_coef_alfa_horizontal(frecuencia)
        log10_k_vertical=calcula_coef_k_vertical(frecuencia)
        k_vertical=10**log10_k_vertical
        alfa_vertical=calcula_coef_alfa_vertical(frecuencia)
        #Pasamos el ángulo a radianes
        angulo_elevacion_trayecto=(angulo_elevacion_trayecto*math.pi)/180

        if(polarizacion=="c"):
            angulo_inclinacion=math.pi/4
        elif(polarizacion=="l"):
            #Pasamos el ángulo a radianes
            angulo_inclinacion=(angulo_inclinacion*math.pi)/180
        k=(k_horizontal+k_vertical+(k_horizontal-
k_vertical)*math.cos(angulo_elevacion_trayecto)**2*math.cos(2*angulo_inclinacion))/2
        alfa=(k_horizontal*alfa_horizontal+k_vertical*alfa_vertical+(k_horizontal*alfa_horizontal-
k_vertical*alfa_vertical)*math.cos(angulo_elevacion_trayecto)**2*math.cos(2*angulo_inclinacion))/(2*k)

        atenuacion_especifica=k*intensidad_lluvia**alfa

    return (atenuacion_especifica, alfa)

def calcula_longitud_efectiva(distancia, intensidad_lluvia, frecuencia, alfa):

    #Cálculo de la longitud efectiva del trayecto
    r=1/(0.477*(distancia**0.633)*(intensidad_lluvia**(0.073*alfa))*(frecuencia**0.123)-10.579*(1-math.exp(-0.024*distancia)))
    if(r>2.5):
        r=2.5
    print("r= ", r)
    longitud_efectiva=distancia*r

    return longitud_efectiva
```

Polarizacion_Horizontal.py

```

import math

k_horizontal={1: [-5.33980, -0.10008, 1.13098, -0.18961, 0.71147],
2: [-0.35351, 1.26970, 0.45400, -0.18961, 0.71147],
3: [-0.23789, 0.86036, 0.15354, -0.18961, 0.71147],
4: [-0.94158, 0.64552, 0.16817, -0.18961, 0.71147]}

alfa_horizontal={1: [-0.14318, 1.82442, -0.55187, 0.67849, -1.95537],
2: [0.29591, 0.77564, 0.19822, 0.67849, -1.95537],
3: [0.32177, 0.63773, 0.13164, 0.67849, -1.95537],
4: [-5.37610, -0.96230, 1.47828, 0.67849, -1.95537],
5: [16.1721, -3.29980, 3.43990, 0.67849, -1.95537]}

def calcula_coef_k_horizontal(frecuencia):

    i=1
    sumatorio=0.0

    while i<=len(k_horizontal):
        expresion=k_horizontal[i][0]*math.exp(-
((math.log10(frecuencia)-k_horizontal[i][1])/k_horizontal[i][2])**2)
        sumatorio=sumatorio+expresion
        i=i+1

    log10_k=sumatorio+(k_horizontal[1][3]*math.log10(frecuencia)+k_horizonta
l[1][4])
    return log10_k

def calcula_coef_alfa_horizontal(frecuencia):

    i=1
    sumatorio=0.0

    while i<=len(alfa_horizontal):
        expresion=alfa_horizontal[i][0]*math.exp(-
((math.log10(frecuencia)-alfa_horizontal[i][1])/alfa_horizontal[i][2])**2)
        sumatorio=sumatorio+expresion
        i=i+1

    alfa=sumatorio+alfa_horizontal[1][3]*math.log10(frecuencia)+alfa_horizon
tal[1][4]
    return alfa

```

Polarizacion_Vertical.py

```
import math

k_vertical={1: [-3.80595, 0.56934, 0.81061],
2: [-3.44965, -0.22911, 0.51059],
3: [-0.39902, 0.73042, 0.11899],
4: [0.50167, 1.07319, 0.27195]}

m_k=-0.16398
c_k=0.63297

alfa_vertical={1: [-0.07771, 2.33840, -0.76284],
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]}

m_alfa=-0.053739
c_alfa=0.83433

def calcula_coef_k_vertical(frecuencia):

    i=1
    sumatorio=0.0

    while i<=len(k_vertical):
        expresion=k_vertical[i][0]*math.exp(-((math.log10(frecuencia)-
k_vertical[i][1])/k_vertical[i][2])**2)
        sumatorio=sumatorio+expresion
        i=i+1

    log10_k=sumatorio+(m_k*math.log10(frecuencia)+c_k)
    return log10_k

def calcula_coef_alfa_vertical(frecuencia):

    i=1
    sumatorio=0.0

    while i<=len(alfa_vertical):
        expresion=alfa_vertical[i][0]*math.exp(-
((math.log10(frecuencia)-alfa_vertical[i][1])/alfa_vertical[i][2])**2)
        sumatorio=sumatorio+expresion
        i=i+1

    alfa=sumatorio+(m_alfa*math.log10(frecuencia)+c_alfa)
    return alfa
```

Principal_Gases.py

```

import math
from Funciones_Gases import *
from Datos_Oxigeno import *
from Datos_Vapor import *
from Lee_Excel_DistanciayAltitud import *

def gases(frecuencia, respuesta, estacion, atmosfera):

    #Llamada a la función que calcula la altura promedia sobre el nivel del
    mar en metros
    altura=calcula_altura()
    print("La altura promedia sobre el nivel del mar en metros es de:
", altura, "m")
    #Paso de metros a kilómetros
    altura=altura*(10**(-3))
    #Llamada a la función que calcula la longitud del trayecto en km
    distancia=calcula_distancia()
    print("La longitud del trayecto en Km es de: ", distancia, "km")

    if(frecuencia<10):
        atenuacion_gases=0
        print("La atenuación debida a gases es
de", atenuacion_gases, "dB")

    else:
        #Llamada a la función que obtiene el valor de los parámetros de
        temperatura, presión de aire seco y presión parcial de vapor de agua
        #en función de la altura promedia sobre el nivel del mar
        (temperatura, presion, presion_parcial_vapor, respuesta)=calcula_pa
        rametros(altura, respuesta, estacion, atmosfera)
        #Una vez obtenidos los parámetros de T, e y p en función de la
        altura promedia sobre el nivel del mar
        #Cálculo del sumatorio de la contribución de todas las rayas de
        oxígeno
        sumatorio_SixFi=calcula_N_oxigeno(presion, temperatura, presion_pa
        rcial_vapor, frecuencia)
        print("El sumatorio de la contribución de todas las rayas de
        oxígeno es: ", sumatorio_SixFi)
        #Cálculo del espectro continuo de aire seco debido a nitrógeno y
        efecto Debye
        anchura_debye=5.6*(10**(-
        4))*(presion+presion_parcial_vapor)*(300/temperatura)**0.8
        N_debye=frecuencia*presion*((300/temperatura)**2)*(((6.14*(10**(-
        5)))/(anchura_debye*(1+(frecuencia/anchura_debye)**2)))+(1.4*(10**(-
        12))*presion*((300/temperatura)**1.5))/(1+1.9*(10**(-5))*(frecuencia**1.5)))
        print("El espectro continuo de aire seco debido a nitrógeno y
        efecto Debye es: ", N_debye)
        #Cálculo de la parte imaginaria del valor complejo de la
        refractividad del oxígeno
        N_oxigeno=sumatorio_SixFi+N_debye
        print("La refractividad del oxígeno es de: ", N_oxigeno)
        #Cálculo del sumatorio de la contribución de todas las rayas de
        vapor de agua
        N_vapor_agua=calcula_N_vapor(presion, temperatura, presion_parcial
        _vapor, frecuencia)
        if(atmosfera=="s"):
            N_vapor_agua=0
        print("La refractividad del vapor de agua es de: ", N_vapor_agua)
        #Cálculo de la atenuación específica

```

```
    atenuacion_especifica=0.1820*frecuencia*(N_oxigeno+N_vapor_agua)
    if(atenuacion_especifica<0):
        atenuacion_especifica=0
    print("La atenuación específica es de:
",atenuacion_especifica,"dB/km")
    #Cálculo de la atenuación por gases total
    atenuacion_gases=atenuacion_especifica*distancia
    print("La atenuación total debida a gases es de:
",atenuacion_gases,"dB")

    return atenuacion_gases
```



```

17)*0.008128)
elif(47<=altura<53):
    temperatura=275
elif(53<=altura<80):
    temperatura=275+(1-math.exp((altura-
53)*0.06))*20
elif(80<=altura<=100):
    temperatura=175
print("La temperatura es de: ",temperatura,"K")
#Calculo la presión de aire seco
if(0<=altura<=10):
    presion=1012.8186-
111.5569*altura+3.8646*altura**2
elif(10<altura<=72):
    presion_10=1012.8186-
111.5569*10+3.8646*10**2
    presion=presion_10*math.exp(-
0.147*(altura-10))
elif(72<altura<=100):
    presion_10=1012.8186-
111.5569*10+3.8646*10**2
    presion_72=presion_10*math.exp(-
0.147*(72-10))
    presion=presion_72*math.exp(-
0.165*(altura-72))
print("La presión del aire seco es de:
",presion,"hPa")
#Calculo la densidad de vapor de agua
if(0<=altura<=15):
    densidad_vapor=14.3542*math.exp(-
0.4174*altura-0.02290*altura**2+0.001007*altura**3)
elif(altura>15):
    densidad_vapor=0

elif(estacion=="i"):
    #Calculo la temperatura
    if(0<=altura<10):
        temperatura=272.7241-3.6217*altura-
0.1759*altura**2
    elif(10<=altura<33):
        temperatura=218
    elif(33<=altura<47):
        temperatura=218+(altura-33)*3.3571
    elif(47<=altura<53):
        temperatura=265
    elif(53<=altura<80):
        temperatura=265-(altura-53)*2.0370
    elif(80<=altura<=100):
        temperatura=210
print("La temperatura es de: ",temperatura,"K")
#Calculo la presión de aire seco
if(0<=altura<=10):
    presion=1018.8627-
124.2954*altura+4.8307*altura**2
elif(10<altura<=72):
    presion_10=1018.8627-
124.2954*10+4.8307*10**2
    presion=presion_10*math.exp(-
0.147*(altura-10))
elif(72<altura<=100):
    presion_10=1018.8627-
124.2954*10+4.8307*10**2
    presion_72=presion_10*math.exp(-

```



```

        temperatura=217.5
elif (30<=altura<50):
    temperatura=217.5+(altura-30)*2.125
elif (50<=altura<54):
    temperatura=260
elif (54<=altura<=100):
    temperatura=260-(altura-54)*1.667
print("La temperatura es de: ",temperatura,"K")
#Calculo la presión de aire seco
if (0<=altura<=10):
    presion=1010.8828-
122.2411*altura+4.554*altura**2
elif (10<altura<=72):
    presion_10=1010.8828-
122.2411*10+4.554*10**2
    presion=presion_10*math.exp(-
0.147*(altura-10))
elif (72<altura<=100):
    presion_10=1010.8828-
122.2411*10+4.554*10**2
    presion_72=presion_10*math.exp(-
0.147*(72-10))
    presion=presion_72*math.exp(-
0.150*(altura-72))
print("La presión del aire seco es de:
",presion,"hPa")
#Calculo la densidad de vapor de agua
if (0<=altura<=10):
    densidad_vapor=1.2319*math.exp(0.07481*a
ltura-0.0981*altura**2+0.00281*altura**3)
elif (altura>10):
    densidad_vapor=0

#Cálculo de la presión parcial de vapor de agua
if (atmosfera=="n"):
    altura_escala=2
elif (atmosfera=="s"):
    altura_escala=6

presion_parcial_vapor=(densidad_vapor*temperatura)/(216.7)
print("La presión parcial de vapor de agua es de:
",presion_parcial_vapor,"hPa")

#En caso de no tener información sobre latitud uso la atmósfera de
referencia mundial anual media
elif (respuesta=="n"):
    altura_geopotencial=(6356.766*altura)/(6356.766+altura)
print("La altura geopotencial es de:
",altura_geopotencial, "km")
#Cálculo de la temperatura
if (0<=altura_geopotencial<=11):
    temperatura=288.15-6.5*altura_geopotencial
elif (11<altura_geopotencial<=20):
    temperatura=216.65
elif (20<altura_geopotencial<=32):
    temperatura=216.65+(altura_geopotencial-20)
elif (32<altura_geopotencial<=47):
    temperatura=228.65+2.8*(altura_geopotencial-32)
elif (47<altura_geopotencial<=51):
    temperatura=270.65
elif (51<altura_geopotencial<=71):
    temperatura=270.65-2.8*(altura_geopotencial-51)
elif (71<altura_geopotencial<=84.852):

```

```

        temperatura=214.65-2.0*(altura_geopotencial-71)
    else:
        if(86<=altura<=91):
            temperatura=186.8673
        elif(91<altura<=100):
            temperatura=263.1905-76.3232*((1-(((altura-
91)/19.9429))**2))**0.5
        print("La temperatura es de: ",temperatura,"K")
        #Cálculo la presión del aire seco
        if(0<=altura_geopotencial<=11):
            presion=1013.25*(((288.15)/(288.15-
6.5*altura_geopotencial))**((-34.1632)/(6.5)))
        elif(11<altura_geopotencial<=20):
            presion=226.3226*math.exp(-34.1632*(altura_geopotencial-
11)/216.65)
        elif(20<altura_geopotencial<=32):
            presion=54.74980*(((216.65)/(216.65+(altura_geopotencial
-20))))**34.1632
        elif(32<altura_geopotencial<=47):
            presion=8.680422*(((228.65)/(228.65+2.8*(altura_geopoten
cial-32))))** (34.1632/2.8)
        elif(47<altura_geopotencial<=51):
            presion=1.109106*math.exp(-34.1632*(altura_geopotencial-
47)/270.65)
        elif(51<altura_geopotencial<=71):
            presion=0.6694167*(((270.65)/(270.65-
2.8*(altura_geopotencial-51))))**(-34.1632/2.8)
        elif(71<altura_geopotencial<=84.852):
            presion=0.03956649*(((214.65)/(214.65-
2.0*(altura_geopotencial-71))))**(-34.1632/2.0)
        else:
            if(86<=altura<=100):
                presion=math.exp(95.571899-
4.011801*altura+0.06424731*altura**2+(-4.789660*(10**(-
4))) *altura**3+(1.340543*(10**(-6))) *altura**4)
            print("La presión del aire seco es de: ",presion,"hPa")
            #Cálculo de la presión parcial de vapor de agua
            if(atmosfera=="n"):
                altura_escal=2
            elif(atmosfera=="s"):
                altura_escal=6

            densidad_vapor=7.5*math.exp(-altura/altura_escal)
            presion_parcial_vapor=(densidad_vapor*temperatura)/(216.7)
            print("La presión parcial de vapor de agua es de:
",presion_parcial_vapor,"hPa")
        return (temperatura, presion, presion_parcial_vapor,respuesta)

```

Datos_Oxigeno.py

```
import math

cuadro1={1:[50.474214,0.975,9.651,6.690,0.0,2.566,6.850],
2:[50.987745,2.529,8.653,7.170,0.0,2.246,6.800],
3:[51.503360,6.193,7.709,7.640,0.0,1.947,6.729],
4:[52.021429,14.320,6.819,8.110,0.0,1.667,6.640],
5:[52.542418,31.240,5.983,8.580,0.0,1.388,6.526],
6:[53.066934,64.290,5.201,9.060,0.0,1.349,6.206],
7:[53.595775,124.600,4.474,9.550,0.0,2.227,5.085],
8:[54.130025,227.300,3.800,9.960,0.0,3.170,3.750],
9:[54.671180,389.700,3.182,10.370,0.0,3.558,2.654],
10:[55.221384,627.100,2.618,10.890,0.0,2.560,2.952],
11:[55.783815,945.300,2.109,11.340,0.0,-1.172,6.135],
12:[56.264774,543.400,0.014,17.030,0.0,3.525,-0.978],
13:[56.363399,1331,800,1.654,11.890,0.0,-2.378,6.547],
14:[56.968211,1746.600,1.255,12.230,0.0,-3.545,6.451],
15:[57.612486,2120.100,0.910,12.620,0.0,-5.416,6.056],
16:[58.323877,2363.700,0.621,12.950,0.0,-1.932,0.436],
17:[58.446588,1442.100,0.083,14.910,0.0,6.768,-1.273],
18:[59.164204,2379.900,0.387,13.530,0.0,-6.561,2.309],
19:[59.590983,2090.700,0.207,14.080,0.0,6.957,-0.776],
20:[60.306056,2103.400,0.207,14.150,0.0,-6.395,0.699],
21:[60.434778,2438.000,0.386,13.390,0.0,6.342,-2.825],
22:[61.150562,2479.500,0.621,12.920,0.0,1.014,-0.584],
23:[61.800158,2275.900,0.910,12.630,0.0,5.014,-6.619],
24:[62.411220,1915.400,1.255,12.170,0.0,3.029,-6.759],
25:[62.486253,1503.000,0.083,15.130,0.0,-4.499,0.844],
26:[62.997984,1490.200,1.654,11.740,0.0,1.856,-6.675],
27:[63.568526,1078.000,2.108,11.340,0.0,0.658,-6.139],
28:[64.127775,728.700,2.617,10.880,0.0,-3.036,-2.895],
29:[64.678910,461.300,3.181,10.380,0.0,-3.968,-2.590],
30:[65.224078,274.000,3.800,9.960,0.0,-3.528,-3.680],
31:[65.764779,153.000,4.473,9.550,0.0,-2.548,-5.002],
32:[66.302096,80.400,5.200,9.060,0.0,-1.660,-6.091],
33:[66.836834,39.800,5.982,8.580,0.0,-1.680,-6.393],
34:[67.369601,18.560,6.818,8.110,0.0,-1.956,-6.475],
35:[67.900868,8.172,7.708,7.640,0.0,-2.216,-6.545],
36:[68.431006,3.397,8.652,7.170,0.0,-2.492,-6.600],
37:[68.960312,1.334,9.650,6.690,0.0,-2.773,-6.650],
38:[118.750334,940.300,0.010,16.640,0.0,-0.439,0.079],
39:[368.498246,67.400,0.048,16.400,0.0,0.000,0.000],
40:[424.763020,637.700,0.044,16.400,0.0,0.000,0.000],
41:[487.249273,237.400,0.049,16.000,0.0,0.000,0.000],
42:[715.392902,98.100,0.145,16.000,0.0,0.000,0.000],
43:[773.839490,572.300,0.141,16.200,0.0,0.000,0.000],
44:[834.145546,183.100,0.145,14.700,0.0,0.000,0.000]}

def calcula_N_oxigeno(presion,temperatura,presion_parcial_vapor,frecuencia):

    i=1
    sumatorio_SixFi=0.0

    while i<=len(cuadro1):
        #Calculo el valor de la i-ésima raya del oxígeno
        S_i=(cuadro1[i][1])*(10**(-
7))*presion*((300/temperatura)**3)*math.exp((cuadro1[i][2])*(1-
(300/temperatura)))
        #Calculo el factor de forma de la raya i-ésima del oxígeno
        anchura_raya=cuadro1[i][3]*(10**(-
```

```
4))* (presion*(300/temperatura)**(0.8-
cuadrol[i][4])+1.1*presion_parcial_vapor*(300/temperatura))
    anchura_raya=math.sqrt((anchura_raya**2)+(2.25*(10**(-6))))
    factor_interferencia=(cuadrol[i][5]+cuadrol[i][6]*(300/temperatu
ra))*10**(-4)*(presion+presion_parcial_vapor)*(300/temperatura)**0.8
    F_i=(frecuencia/cuadrol[i][0])*(((anchura_raya-
factor_interferencia*(cuadrol[i][0]-frecuencia))/(((cuadrol[i][0]-
frecuencia)**2)+anchura_raya**2))+((anchura_raya-
factor_interferencia*(cuadrol[i][0]+frecuencia))/(((cuadrol[i][0]+frecuencia)**2
)+anchura_raya**2)))
    SixFi=S_i*F_i
    sumatorio_SixFi=sumatorio_SixFi+SixFi
    i=i+1

return sumatorio_SixFi
```

Datos_Vapor.py

```
import math

cuadro2={1:[22.235080,0.1079,2.144,26.38,0.76,5.087,1.00],
2:[67.803960,0.0011,8.732,28.58,0.69,4.930,0.82],
3:[119.995940,0.0007,8.353,29.48,0.70,4.780,0.79],
4:[183.310087,2.273,0.668,29.06,0.77,5.022,0.85],
5:[321.225630,0.0470,6.179,24.04,0.67,4.398,0.54],
6:[325.152888,1.514,1.541,28.23,0.64,4.893,0.74],
7:[336.227764,0.0010,9.825,26.93,0.69,4.740,0.61],
8:[380.197353,11.67,1.048,28.11,0.54,5.063,0.89],
9:[390.134508,0.0045,7.347,21.52,0.63,4.810,0.55],
10:[437.346667,0.0632,5.048,18.45,0.60,4.230,0.48],
11:[439.150807,0.9098,3.595,20.07,0.63,4.483,0.52],
12:[443.018343,0.1920,5.048,15.55,0.60,5.083,0.50],
13:[448.001085,10.41,1.405,25.64,0.66,5.028,0.67],
14:[470.888999,0.3254,3.597,21.34,0.66,4.506,0.65],
15:[474.689092,1.260,2.379,23.20,0.65,4.804,0.64],
16:[488.490108,0.2529,2.852,25.86,0.69,5.201,0.72],
17:[503.568532,0.0372,6.731,16.12,0.61,3.980,0.43],
18:[504.482692,0.0124,6.731,16.12,0.61,4.010,0.45],
19:[547.676440,0.9785,0.158,26.00,0.70,4.500,1.00],
20:[552.020960,0.1840,0.158,26.00,0.70,4.500,1.00],
21:[556.935985,497.0,0.159,30.86,0.69,4.552,1.00],
22:[620.700807,5.015,2.391,24.38,0.71,4.856,0.68],
23:[645.766085,0.0067,8.633,18.00,0.60,4.000,0.50],
24:[658.005280,0.2732,7.816,32.10,0.69,4.140,1.00],
25:[752.033113,243.4,0.396,30.86,0.68,4.352,0.84],
26:[841.051732,0.0134,8.177,15.90,0.33,5.760,0.45],
27:[859.965698,0.1325,8.055,30.60,0.68,4.090,0.84],
28:[899.303175,0.0547,7.914,29.85,0.68,4.530,0.90],
29:[902.611085,0.0386,8.429,28.65,0.70,5.100,0.95],
30:[906.205957,0.1836,5.110,24.08,0.70,4.700,0.53],
31:[916.171582,8.400,1.441,26.73,0.70,5.150,0.78],
32:[923.112692,0.0079,10.293,29.00,0.70,5.000,0.80],
33:[970.315022,9.009,1.919,25.50,0.64,4.940,0.67],
34:[987.926764,134.6,0.257,29.85,0.68,4.550,0.90],
35:[1780.000000,17506,0.952,196.3,2.00,24.15,5.00]}

def calcula_N_vapor(presion,temperatura,presion_parcial_vapor,frecuencia):

    i=1
    sumatorio_SixFi=0.0

    while i<=len(cuadro2):
        #Cálculo del valor de i-ésima raya de vapor
        S_i=(cuadro2[i][1])*(10**(-
1))*presion_parcial_vapor*((300/temperatura)**3.5)*math.exp((cuadro2[i][2])*(1-
(300/temperatura)))
        #Cálculo del factor de forma de la raya i-ésima de vapor
        anchura_raya=cuadro2[i][3]*(10**(-
4))*(presion*(300/temperatura)**(cuadro2[i][4])+cuadro2[i][5]*presion_parcial_va
por*(300/temperatura)**(cuadro2[i][6]))
        anchura_raya=(0.535*anchura_raya+math.sqrt(0.217*(anchura_raya*
*2)+((2.1316*(10**(-12))*cuadro2[i][0]**2))/(300/temperatura)))
        factor_interferencia=0
        F_i=(frecuencia/cuadro2[i][0])*(((anchura_raya-
factor_interferencia*(cuadro2[i][0]-frecuencia))/(((cuadro2[i][0]-
frecuencia)**2)+anchura_raya**2))+((anchura_raya-
factor_interferencia*(cuadro2[i][0]+frecuencia))/(((cuadro2[i][0]+frecuencia)**2
```

```
) +anchura_raya**2))
    SixFi=S_i*F_i
    sumatorio_SixFi=sumatorio_SixFi+SixFi
    i=i+1

return sumatorio_SixFi
```

Lee_Excel_DistanciayAltitud.py

```
from openpyxl import load_workbook #Librería para trabajar con archivos
Excel

FILE_PATH = 'Excel/prueba2.xlsx' #Ruta donde se encuentra la hoja de
cálculo con respecto a la ruta donde se encuentra este archivo python
SHEET = 'tmpke4yap' #Es el nombre de la hoja de cálculo con la que se va
a trabajar

workbook = load_workbook(FILE_PATH, read_only=True) #Solo se va a usar el
modo lectura
sheet = workbook[SHEET]

def calcula_distancia():
    '''Va iterando cada fila de la columna 0 (solo existe una columna). La
última fila del fichero Excel, que es la que interesa porque contiene
la distancia total del trayecto, la guardamos en una variable tipo
string'''
    for row in sheet.iter_rows():
        ultima_fila=row[0].value

    '''La variable ultima_fila nos proporciona el valor de la distancia del
trayecto real, un valor de la altura sobre el nivel del mar y
un valor de la altura de la obstrucción con el siguiente formato de
string: "distancia(km),altura_terreno(m),altura_obstruccion(m)'''
    #Se va a separar cada elemento del string y se van a guardar los
3 parámetros en una tabla
    tabla_parametros=ultima_fila.split(',')
    #Se obtienen los parámetros necesarios para nuestro estudio
    distancia=tabla_parametros[0]
    #Se pasa de tipo string a tipo float
    distancia=float(distancia)

    return distancia

def calcula_altura():

    altura_nivel_mar=[] #Tabla que almacena la altura del terreno sobre
el nivel del mar para un determinado número de muestras
    i=0
    for row in sheet.iter_rows():
        fila=row[0].value
        tabla=fila.split(',')
        altura_nivel_mar.insert(i,tabla[1])
        i+=1

    #Se elimina el primer elemento de la tabla porque contiene
"Terrain height(m)", que no interesa para el cálculo
    altura_nivel_mar.pop(0)
    sumatorio_altura_nivel_mar=0.0 #Almacena el resultado de la suma de
todas las muestras de la altura del terreno sobre el nivel del mar en
metros
    i=0
    while i<len(altura_nivel_mar):
        #Se pasa de string a float para poder operar
        altura_nivel_mar[i]=float(altura_nivel_mar[i])
```

```
        sumatorio_altura_nivel_mar=altura_nivel_mar[i]+sumatorio_altura_
nivel_mar
        i+=1

    #Se calcula la altura media del terreno sobre el nivel del mar en
metros dividiendo el sumatorio entre el número de muestras
    altura_media_nivel_mar=sumatorio_altura_nivel_mar/len(altura_nivel_mar)

    return altura_media_nivel_mar
```


Lee_Excel_Latitud.py

```
from openpyxl import load_workbook #Librería para trabajar con archivos
Excel

FILE_PATH = 'Excel/prueba_latitud.xlsx' #Ruta donde se encuentra la hoja de
cálculo con respecto a la ruta donde se encuentra este archivo python
SHEET = 'tmp67g327' #Es el nombre de la hoja de cálculo con la que se va
a trabajar

workbook = load_workbook(FILE_PATH, read_only=True) #Solo se va a usar el
modo lectura
sheet = workbook[SHEET]

def calcula_latitud():
    '''Va iterando cada fila de la columna 1 (que es la que nos interesa).
    La última fila del fichero Excel, que es la que interesa porque contiene
    la latitud de una de las estaciones terrenas, la guardamos en una
    variable tipo string'''
    for row in sheet.iter_rows():
        ultima_fila=row[1].value

        '''La variable ultima_fila nos proporciona la latitud de una de las
        estaciones terrenas
        con el siguiente formato de string: "grados:minutos:segundos'''
        #Se va a separar cada elemento del string y se van a guardar los
        3 parámetros en una tabla
        tabla_parametros=ultima_fila.split(':')
        #Se obtienen el parámetro necesario para nuestro estudio
        latitud=tabla_parametros[0]
        #Se pasa de tipo string a tipo float
        latitud=float(latitud)

    return latitud
```