



TELECOMUNICACIÓN

Campus Sur
POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: Influencia de la altura de lluvia en la atenuación por precipitación en comunicaciones por satélite

AUTOR: Raquel Barrio Velasco

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación.

TUTOR (o Director en su caso): Pedro García del Pino

DEPARTAMENTO: Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

VºBº

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: Carmen Ortiz Martínez

VOCAL: Pedro García del Pino

SECRETARIO: Florentino Jiménez Muñoz

Fecha de lectura:

Calificación:

El secretario,

Me gustaría dedicar este proyecto a mi familia por todo el apoyo que me han dado a lo largo de la carrera, en especial a mi madre por estar pendiente de cada examen y a mi padre por inculcarme la necesidad de mejorar siempre día a día. También a Abraham por estar a mi lado en los buenos y en los malos momentos, en definitiva, por ser mi compañero de viaje.

Quisiera agradecerle a mi tutor, Pedro García del Pino, la oportunidad que me ha dado para realizar este proyecto y darle las gracias por estar disponible siempre cuando lo he necesitado.

Resumen

El objetivo principal de este Proyecto Fin de Grado es el estudio experimental de la atenuación, producida por las precipitaciones, en los enlaces Tierra – satélite en banda Ka. En particular, se ha realizado el estudio para una frecuencia de 19,701 GHz, que corresponde con la frecuencia de una de las balizas del satélite Hot Bird 13 de Eutelsat. Para la realización del estudio se dispone de datos experimentales recogidos por sondeos realizados en la estación meteorológica de Madrid - Barajas y de datos sinópticos.

La primera parte del proyecto comienza con una descripción de los fundamentos teóricos de los distintos fenómenos que afectan a la propagación en un enlace por satélite, y se enumeran los distintos modelos de predicción más importantes. Posteriormente se describen en más detalle algunos modelos de predicción propuestos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

En la segunda parte del mismo se explica en detalle el proceso necesario para el procesado de los datos experimentales, con el fin de poder manejarlos de forma más sencilla a la hora de presentar los resultados pertinentes.

En una tercera parte se recogen los resultados experimentales obtenidos para el caso de la altura de la isoterma a 0°C y de la atenuación por lluvia.

El capítulo dedicado al estudio de la altura de la isoterma a 0°C se centra en obtener dicho dato a partir de los datos experimentales de los sondeos, que fueron procesados con anterioridad. Así mismo, se realizará una comparativa de estos datos experimentales con los proporcionados por la UIT en la Recomendación 839.

En el capítulo dedicado al estudio de la atenuación producida por la lluvia se compararán los resultados obtenidos de forma experimental con los datos proporcionados por la UIT en la Recomendación 618.

Por último se recoge en un capítulo las conclusiones obtenidas con la realización de este PFG y las líneas futuras de investigación.

Abstract

The main aim of this Final Degree Project is the experimental study of attenuation by precipitation, in links Earth – Ka band satellite. In particular, the study was performed at a frequency of 19.701 GHz, which corresponds to the frequency of one of the beacons of the satellite Hot Bird 13 (Eutelsat). There is experimental data and synoptic data provided, which was collected from surveys in the Madrid- Barajas weather station.

The first part of the project outlines some theoretical foundations regarding different phenomena which affect propagation in a satellite link and includes the most important prediction models. Additionally, some prediction models proposed by the International Telecommunication Union (ITU) are outlined in detail.

In the second part, the process for the processing of the experimental data is explained in detail. This process is necessary in order to be able to utilize the data more easily when presenting the results of this project.

In the third part, the experimental results obtained in the study are presented for both cases: isotherm height at 0°C and rain attenuation.

The chapter dedicated to the study of the isotherm height at 0°C focuses on obtaining the real isotherm height at 0°C from the experimental data processed previously. Furthermore, a comparison will be made between the experimental results and data proposed by ITU in Recommendation 839.

The chapter dedicated to the study of rain attenuation focuses on making a comparison between the results from the experimental data and data proposed by ITU in Recommendation 618.

Finally, there is a chapter which revises all the conclusions obtained throughout this project and provides recommendations for future research.

Índice de contenido

1	CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN	15
1.1	CONTEXTO HISTÓRICO	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.3	ESTRUCTURA DEL PROYECTO	16
2	CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
2.1	INTRODUCCIÓN	17
2.2	INFLUENCIA DE LA ATMÓSFERA EN LAS TELECOMUNICACIONES	17
2.3	ATENUACIÓN POR GASES	18
2.3.1	<i>Modelos de predicción de atenuación</i>	20
2.4	ATENUACIÓN POR NUBES	20
2.4.1	<i>Modelos de predicción de atenuación</i>	20
2.5	ATENUACIÓN POR ARENA Y POLVO	20
2.6	ATENUACIÓN POR HIDROMETEOROS	21
2.6.1	<i>Tipos de lluvia</i>	21
2.6.2	<i>Altura de la lluvia, h_R</i>	22
2.6.3	<i>Atenuación específica por lluvia</i>	23
2.6.4	<i>Modelos de predicción de atenuación por lluvia</i>	26
2.7	DESPOLARIZACIÓN POR HIDROMETEOROS	30
2.7.1	<i>Modelos de predicción de despolarización</i>	31
2.8	CENTELLEO TROPOSFÉRICO	31
2.9	CÁLCULO DE LA ATENUACIÓN TOTAL	31
3	CAPÍTULO 3 – PROCESADO DE DATOS	33
3.1	INTRODUCCIÓN	33
3.2	BASES DE DATOS METEOROLÓGICAS	33
3.2.1	<i>Sondeos de Madrid-Barajas</i>	33
3.2.2	<i>Datos SYNOP</i>	34
3.3	PROCESADO DE DATOS	35
3.3.1	<i>Sondeos de Madrid-Barajas</i>	36
3.3.2	<i>Datos SYNOP</i>	37
3.3.3	<i>Verificación de los datos</i>	38
4	CAPÍTULO 4 – COMPARACIÓN RECOMENDACIÓN 839	45
4.1	INTRODUCCIÓN	45
4.2	RECOMENDACIÓN 839	45
4.3	MEDIDAS EXPERIMENTALES	45
4.3.1	<i>Realización de las medias</i>	46
5	CAPÍTULO 5 – COMPARACIÓN RECOMENDACIÓN 618	57
5.1	INTRODUCCIÓN	57
5.2	CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE LLUVIA, $R_{0.01}$	57
5.3	CÁLCULOS RECOMENDACIÓN P.618	59
5.3.1	<i>Tablas de atenuaciones</i>	59
6	CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	65
6.1	INTRODUCCIÓN	65
6.2	CONCLUSIONES PARA LA ALTURA ISOCERO	65
6.3	CONCLUSIONES PARA LA ATENUACIÓN	66

Índice de contenido

6.4	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	66
7	BIBLIOGRAFÍA	67

Índice de figuras

FIG. 2.1 CAPAS DE LA ATMÓSFERA. PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA.....	18
FIG. 2.2 ATENUACIÓN ESPECÍFICA DEBIDA A LOS GASES ATMOSFÉRICOS SEGÚN UIT-R P.676-10 (09/2013)	19
FIG. 2.3 MEDIA ANUAL DE LA ISOTERMA A 0°C POR ENCIMA DEL NIVEL DEL MAR (KM).....	22
FIG. 2.4 MEDIA ANUAL DE LA ALTURA DE LA LLUVIA POR ENCIMA DEL NIVEL DEL MAR (KM).....	23
FIG. 2.5 COEFICIENTE K DE POLARIZACIÓN HORIZONTAL.....	25
FIG. 2.6 COEFICIENTE A DE POLARIZACIÓN HORIZONTAL.....	25
FIG. 2.7 COEFICIENTE K DE POLARIZACIÓN VERTICAL.....	25
FIG. 2.8 COEFICIENTE A DE POLARIZACIÓN VERTICAL.....	26
FIG. 2.9 PARÁMETROS DEL TRAYECTO INCLINADO. MODELO UIT-R-P.618-12.....	27
FIG. 2.10 ÍNDICE DE PLUVIOSIDAD (MM/H) SOBREPASADO EL 0.01% SOBRE EL AÑO MEDIO SEGÚN LA ITU-R P.837-6.....	29
FIG. 2.11 FORMATO DE LA CÉLULA DE LLUVIA PARA EL MODELO EXCELL.....	30
FIG. 3.1 EJEMPLO DE LOS DATOS DE SONDEOS MADRID-BARAJAS DESCARGADOS.....	34
FIG. 3.2 PÁGINA WEB DE OGIMET DE DONDE SE DESCARGAN LOS DATOS.....	35
FIG. 3.3 MATRIZ DE LOS DATOS DE LOS SONDEOS DE MADRID-BARAJAS CON EL DATO ISOCERO INCLUIDO.	37
FIG. 3.4 MATRIZ DE LOS DATOS DE LOS SONDEOS DE MADRID-BARAJAS CON LOS DATOS LLUVIA E INTERPRETACIÓN INCLUIDOS.....	38
FIG. 3.5 HISTOGRAMAS AÑO 2000.....	38
FIG. 3.6 HISTOGRAMA AÑO 2001.....	39
FIG. 3.7 HISTOGRAMA AÑO 2002.....	39
FIG. 3.8 HISTOGRAMA AÑO 2003.....	39
FIG. 3.9 HISTOGRAMA AÑO 2004.....	40
FIG. 3.10 HISTOGRAMA AÑO 2005.....	40
FIG. 3.11 HISTOGRAMA AÑO 2006.....	40
FIG. 3.12 HISTOGRAMA AÑO 2007.....	41
FIG. 3.13 HISTOGRAMA AÑO 2008.....	41
FIG. 3.14 HISTOGRAMA AÑO 2009.....	41
FIG. 3.15 HISTOGRAMA AÑO 2010.....	42
FIG. 3.16 HISTOGRAMA AÑO 2011.....	42
FIG. 3.17 HISTOGRAMA AÑO 2012.....	42
FIG. 3.18 HISTOGRAMA AÑO 2013.....	43
FIG. 3.19 NÚMERO DE NIVELES DE LOS SONDEOS.....	43
FIG. 3.20 ISOCEROS DESPUÉS DEL FILTRADO.....	44
FIG. 4.1 MEDIA ISOCERO MENSUAL.....	53
FIG. 4.2 MEDIA ISOCERO ANNUAL.....	54
FIG. 5.1 INTENSIDAD DE LLUVIA SEGÚN EL PORCENTAJE DE TIEMPO.....	58
FIG. 5.2 ATENUACIÓN CON ISOCERO RECOMENDADA EN CAPÍTULO 4.....	61
FIG. 5.3 ATENUACIÓN DE AÑOS EXTREMOS (H _R CON LLUVIA).....	63
FIG. 5.4 ATENUACIÓN DE AÑOS EXTREMOS (H _R SIN LLUVIA).....	64
FIG. 5.5 ATENUACIÓN DE AÑOS EXTREMOS (H _R EN TODAS CONDICIONES).....	64

Índice de tablas

TABLA 4.1 MEDIA ISOCERO DE ENERO	46
TABLA 4.2 MEDIA ISOCERO DE FEBRERO	47
TABLA 4.3 MEDIA ISOCERO DE MARZO	47
TABLA 4.4 MEDIA ISOCERO DE ABRIL	48
TABLA 4.5 MEDIA ISOCERO DE MAYO	48
TABLA 4.6 MEDIA ISOCERO DE JUNIO	49
TABLA 4.7 MEDIA ISOCERO DE JULIO	49
TABLA 4.8 MEDIA ISOCERO DE AGOSTO	50
TABLA 4.9 MEDIA ISOCERO DE SEPTIEMBRE	50
TABLA 4.10 MEDIA ISOCERO DE OCTUBRE	51
TABLA 4.11 MEDIA ISOCERO DE NOVIEMBRE	51
TABLA 4.12 MEDIA ISOCERO DE DICIEMBRE	52
TABLA 4.13 MEDIA ISOCERO ANUAL	53
TABLA 4.14 DATOS ISOCERO RECOMENDADOS	55
TABLA 5.1 INTENSIDAD DE LLUVIA REBASADA DURANTE EL P% DEL TIEMPO DE UN AÑO MEDIO	58
TABLA 5.2 ATENUACIÓN CON DATOS RECOMENDACIÓN 839	60
TABLA 5.3 ATENUACIÓN CON ISOCERO RECOMENDADA EN CAPÍTULO 4	61
TABLA 5.4 ATENUACIÓN AÑO 2004	62
TABLA 5.5 ATENUACIÓN AÑO 2007	62
TABLA 6.1 ISOCEROS RECOMENDADAS	66

Listado de acrónimos

APC	<i>Adaptive Power Control</i>
CEPMPM	Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio
EXCELL	<i>Exponential Cell Model</i>
FMT	<i>Fade Mitigation Techniques</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PFC	Proyecto Fin de Carrera
PFG	Proyecto Fin de Grado
SYNOP	<i>Surface Synoptic Observations</i>
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UIT-R	Sector de Radiocomunicaciones de la UIT
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
XPD	Discriminación de la Polarización Cruzada

1 Capítulo 1 – Introducción

1.1 Contexto histórico

El presente Proyecto se ha realizado en un contexto de auge de las tecnologías de comunicación por satélite, en las que se crea una necesidad de explorar bandas de frecuencias superiores con el fin de obtener mayores anchos de banda. Existe un inconveniente de esta tendencia, ya que hay una relación directa entre la frecuencia de las ondas radioeléctricas y la atenuación que produce la atmósfera sobre ellas, lo que hace que sea imprescindible realizar estudios sobre cómo mitigar estos efectos de las atenuaciones.

En los años anteriores a los años 70 la atenuación producida por la atmósfera pasaba desapercibida, ya que la longitud de onda de las ondas utilizadas hasta el momento no interactuaba de forma significativa con la atmósfera. Pero con la aparición de las tecnologías por satélite, sobre todo para televisión y telefonía, se empezaron a explotar bandas de longitudes de ondas centimétricas, donde los efectos de la atenuación por lluvia se convirtieron en una de las mayores preocupaciones para el diseño de enlaces radio.

Surge entonces la necesidad de realizar medidas experimentales a través de pluviómetros y relacionarlas con datos de experimentos de propagación realizados por satélites en banda Ku (11 – 14 GHz) con el fin de valorar el impacto de la precipitación en la propagación de las ondas. Así se establecieron las primeras bases de datos meteorológicos y los primeros modelos de predicción de atenuación, bastante imprecisos debido a la escasez de recursos del momento.

No fue hasta los años 90 hasta que se empezaron a desarrollar nuevas aplicaciones en las telecomunicaciones relacionadas con el comienzo de la era digital, estas nuevas aplicaciones necesitaban utilizar otras bandas de frecuencia, por tanto, es cuando se empieza a estudiar las bandas Ka (20 – 30 GHz) y Q/V (40 – 50 GHz) con el fin de dar servicio a estas nuevas aplicaciones y por tanto los experimentos antes realizados sólo para la banda Ku se extienden a estas nuevas bandas.

Actualmente, y de cara al futuro, la presión del sector de las telecomunicaciones en materia del aumento del ancho de banda para dar cabida a los nuevos servicios, requiere abrirse camino hacia bandas de frecuencia milimétricas. Esto implica realizar experimentos con mayor cantidad de datos meteorológicos que darán como resultados modelos de predicción más precisos.

1.2 Objetivos

Este Proyecto Fin de Grado tiene como objetivo el estudio de la atenuación por precipitación en comunicaciones por satélite. Se procederá al manejo y organización de los datos proporcionados por los sondeos mediante la herramienta Matlab. Posteriormente se realizarán una serie de cálculos y comparaciones con las Recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y Proyectos Fin de Carrera anteriores.

Para ello se han utilizado las siguientes bases de datos y herramientas:

- Recomendaciones UIT
- Medidas de los sondeos lanzados desde el aeropuerto de Barajas para el periodo 1990-2013: medidas anuales, mensuales, distribuciones acumuladas...
- Datos sinópticos (SYNOP) de Madrid-Barajas para el periodo 2000-2013, ya procesados.
- Software Matlab

Será necesario procesar los datos para posteriormente realizar los cálculos y las comparaciones de interés.

La primera tarea a desarrollar será determinar la altura isocero para Madrid a partir de datos proporcionados por los sondeos realizados en el aeropuerto de Barajas. Seguidamente se realizará una comparación de los resultados obtenidos con la Rec. P.839 y una evaluación del efecto que tiene un cambio de la altura de lluvia para la atenuación predicha para un enlace Tierra-Satélite a 20 GHz utilizando el modelo de la recomendación P.618. Por último se generaran los scripts en Matlab que permitan repetir el estudio para otras fuentes de datos.

Todos los resultados servirán para determinar si el dato proporcionado por la recomendación P.839 resulta óptimo, o por el contrario si comete errores significativos.

1.3 Estructura del Proyecto

El proyecto se ha estructurado en 6 capítulos diferentes, siguiendo un orden lógico que permite seguir una lectura comprensible del mismo.

- En el capítulo 1 se ofrece una visión general sobre el proyecto, donde se explica el contexto histórico en el que se encuentra el proyecto y los distintos objetivos del mismo.
- En el capítulo 2 se exponen los fundamentos teóricos previos necesarios para la perfecta comprensión del proyecto. En este capítulo se explicarán a grandes rasgos los diferentes parámetros atmosféricos que influyen en la atenuación de las ondas.
- En el capítulo 3 se explica el procedimiento que se ha seguido para procesar los datos de los que se han partido. Se parte de dos grandes bases de datos, para terminar consiguiendo una fusión de ambas que permita trabajar y obtener resultados de manera mucho más fácil y cómoda.
- En el capítulo 4 se realiza la comparativa entre los datos experimentales que se han procesado en el capítulo 3 con los datos proporcionados por la Recomendación 839. Finalmente se verá si es acertado considerar los datos de la UIT o por el contrario se cometen errores significativos.
- En el capítulo 5 se realiza la comparativa entre los datos obtenidos en el capítulo 4 con la Recomendación 618.
- Por último, en el capítulo 6 se van a presentar las distintas conclusiones sacadas de los capítulos 4 y 5, así como algunas líneas de investigación futuras.

2 Capítulo 2 – Fundamentos teóricos

2.1 Introducción

En este capítulo se describirán, de forma sintética, los principales fundamentos teóricos necesarios para la realización del proyecto. No se pretende hacer un estudio en profundidad por lo que se aportará la bibliografía necesaria para que el lector pueda realizar una consulta más profunda si lo cree necesario [1] [2] [3]. Se definirán los distintos fenómenos atmosféricos que afectan a un enlace de comunicación vía satélite y posteriormente se especificarán los modelos de predicción de la atenuación que producen. Dentro de estos fenómenos se dará una especial importancia a la atenuación debida a la lluvia, ya que como veremos más adelante, es el factor que predomina.

También se hablará de algunas recomendaciones del UIT-R que es necesario conocer para el perfecto análisis de este proyecto. En particular se dedicará más extensión a la Recomendación P. 618 que recoge como calcular la atenuación por intensidad de lluvia.

Cabe destacar que los fundamentos teóricos expuestos son aplicables para cualquier tipo de sistema de radiocomunicaciones en los que la atmósfera esté involucrada.

El capítulo está estructurado en diferentes apartados: En primer lugar se va a dar una visión general de la influencia de la atmósfera en las telecomunicaciones (apartado 2.2) y posteriormente se analizarán más en profundidad los diferentes fenómenos atmosféricos que están implicados en la atenuación [4]:

- Atenuación por gases (apartado 2.3)
- Atenuación por nubes (apartado 2.4)
- Atenuación por arena y polvo (apartado 2.5)
- Atenuación por hidrometeoros (apartado 2.6)
- Despolarización por hidrometeoros (apartado 2.7)
- Centelleo troposférico (apartado 2.8)

Por último, se realiza un estudio de cómo calcular la estimación de la atenuación total debida a la combinación de todos los efectos enumerados anteriormente (apartado 2.9).

2.2 Influencia de la atmósfera en las telecomunicaciones

Como en todas las comunicaciones, la onda que se propaga necesita un medio por el que propagarse y este medio tiene una gran influencia en dicha comunicación. En este caso la onda que se propaga es una onda radioeléctrica y se propaga por la atmósfera, por tanto, se puede asegurar que la atmósfera tiene un papel importante en las telecomunicaciones.

Se entiende como atmósfera, la capa de gas que rodea un cuerpo celeste, en este caso la Tierra. A su vez, la atmósfera, está formada por diferentes capas, que son las siguientes ordenadas de la más cercana a la más lejana a la superficie terrestre: troposfera, estratosfera, mesosfera, ionosfera y exosfera.

En la Fig. 2.1 se pueden apreciar las distintas capas de la atmósfera y la variación de la temperatura con la distancia a la que nos encontremos de la superficie terrestre.

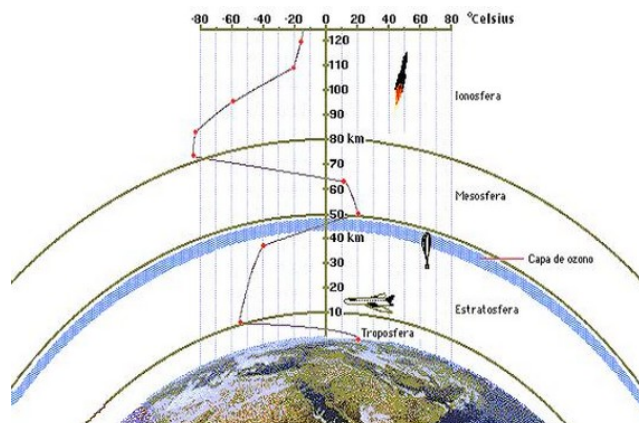


Fig. 2.1 Capas de la atmósfera. Perfil vertical de temperatura.

En las comunicaciones por satélite la capa que más importancia tiene es la troposfera, ya que es la capa en la que se desarrollan los fenómenos meteorológicos, que como veremos más adelante están muy relacionados con las atenuaciones que sufre la onda radioeléctrica.

Se puede definir la troposfera como la capa de la atmósfera que está en contacto con la superficie terrestre, y que tiene un espesor aproximado de 8 km en los polos y de 20 km en el ecuador. En esta capa es donde se concentra el 99% de oxígeno y de vapor de agua, cabe destacar también que la temperatura disminuye unos 6,5 °C por kilómetro.

Otra capa que influye en las telecomunicaciones es la ionosfera o termosfera para frecuencias inferiores a 1 GHz, en las comunicaciones por satélite se suelen utilizar frecuencias más altas de 1 GHz, por tanto, vamos a ignorar el efecto de la ionosfera en dichas comunicaciones.

2.3 Atenuación por gases

La atmósfera está compuesta por dos tipos de gases: variables y permanentes.

Los gases variables son aquellos que varían su concentración en la atmósfera respecto a la posición y la altura a la que se midan dichos gases, algunos de estos gases conocidos son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el ozono y los aerosoles, siendo el vapor de agua el más importante ya que juega un papel primordial en el desarrollo de los fenómenos meteorológicos. Dicho gas tiene un 5% en volumen de aire cerca del suelo en las regiones ecuatoriales, hasta casi desaparecer por encima de los 12 km.

Se conocen como gases permanentes el oxígeno, el nitrógeno y el argón, todos ellos aparecen en la atmósfera en proporciones más o menos constantes dentro de la zona de estudio (la troposfera).

La atenuación debida a los gases se centra en torno al oxígeno y al vapor de agua, dicha atenuación es más visible para ondas milimétricas y microondas, basada principalmente en la absorción de la energía. Su importancia depende de la frecuencia, el ángulo de elevación, la altura sobre el nivel del mar y la densidad del vapor de agua o humedad absoluta.

Se ha llegado a una serie de pautas que controlan la importancia de esta atenuación dentro de una comunicación, y así se sabe que, su importancia aumenta con la frecuencia (siendo despreciable para frecuencias menores a 10 GHz y teniendo picos de atenuación para determinadas frecuencias), aumenta para ángulos de elevación bajos (inferiores a 10°) y aumenta con el incremento de la temperatura.

En la Fig. 2.2 se puede observar la atenuación específica para el O₂ y el H₂O en función de la frecuencia según la UIT-R P.676-10 [5].

Como podemos observar la atenuación debida a la absorción se concentra en determinadas líneas espectrales. Se puede ver, en cuanto a la atenuación del aire seco, que hay un conjunto de líneas de absorción bastante importante alrededor de 60 GHz y un pico aislado alrededor de 118,74 GHz, para otras frecuencias podemos decir que la atenuación del oxígeno no es demasiado importante.

En cuanto al vapor de agua, se puede observar que produce mayor atenuación que el oxígeno y que tiene unas líneas de absorción en 22,3 GHz, 183,3 GHz y 323,8 GHz.

Para aire seco la atenuación es prácticamente constante en el tiempo y en localización debido a que se trata de un gas permanente y varía poco su concentración en la atmósfera. Por otro lado, el vapor de agua al tratarse de un gas variable tiene una mayor variabilidad con el tiempo.

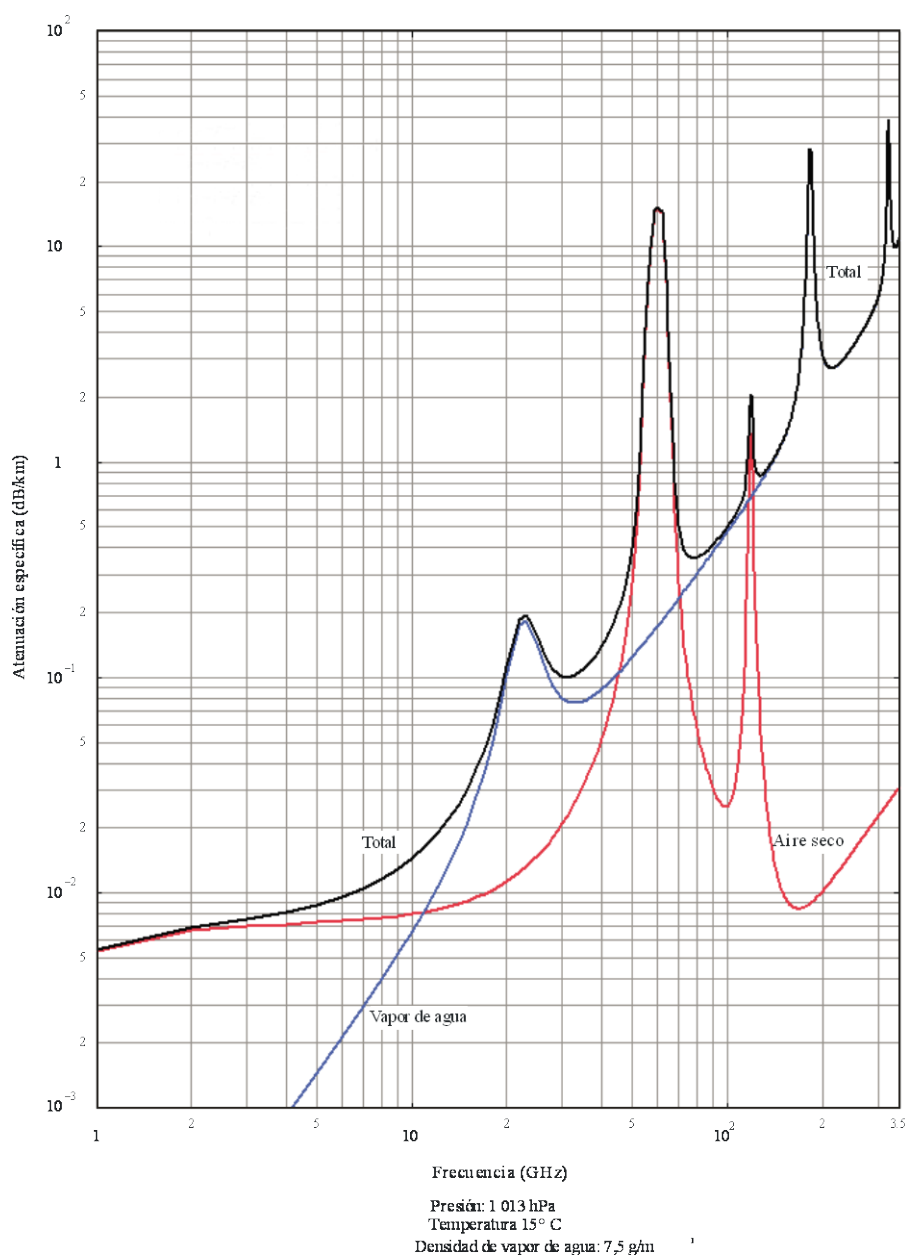


Fig. 2.2 Atenuación específica debida a los gases atmosféricos según UIT-R P.676-10 (09/2013)

2.3.1 Modelos de predicción de atenuación

La atenuación producida por los gases atmosféricos se puede calcular principalmente de tres formas distintas descritas brevemente a continuación.

El modelo de Liebe [6] es una aproximación física basada en los cálculos de la refractividad del aire para frecuencias comprendidas entre 1 y 100 GHz. Este modelo necesita de datos verticales de parámetros meteorológicos que tienen que ser muy precisos. Además, este modelo se suele usar como método de referencia para verificación de otros modelos.

Los modelos del UIT-R y Salonen [7] predicen la atenuación producida por gases atmosféricos para la banda Ku y superiores, usando para ellos los datos proporcionados por los mapas radio-climáticos del UIT-R. La Recomendación UIT-R P.676-10 (09/2013) [5] también incluye el modelo línea a línea, basado en el modelo de Liebe.

2.4 Atenuación por nubes

Las nubes y la niebla están formadas por partículas de agua de entre 1 y 100 μm de diámetro [8]. Las nubes pueden afectar, sobre todo, a frecuencias de onda milimétrica. Suele ser importante en frecuencias a partir de 20 - 30 GHz. Por otro lado, las nubes de hielo no suelen ser importantes en cuanto a atenuación pero pueden ocasionar casos de despolarización.

La atenuación debida a las gotas de agua (con un diámetro menor a 100 μm) se puede estimar mediante el modelo Rayleigh de *scattering* electromagnético, este procedimiento requiere de los datos verticales de las nubes, datos que se pueden recoger fácilmente mediante una radiosonda (método utilizado para la realización de este proyecto). No obstante, su aplicación no es del todo directa debido a la complejidad física de las nubes, ya que la correcta caracterización depende de varios parámetros, tales como el contenido de agua líquida o el espesor de las nubes, que son difíciles de definir. Además, su fiabilidad depende de la calidad de los datos tomados por la radiosonda.

Se prefiere realizar los cálculos a partir del contenido de agua líquida en una columna vertical, este procedimiento es el incluido en la Recomendación UIT-R P.840-6 (09/2013) [8].

En cuanto a la niebla, está compuesta por aire saturado de vapor de agua, del cual parte del agua ha precipitado en forma de gotas, el tamaño de estas gotas suele ser relativamente menor que el de las nubes (menores a 0,1 μm de diámetro). Esto implica que solo afecte a frecuencias superiores a 100 GHz. Su atenuación específica se calcula en función de la densidad de agua líquida, que toma valores entre 0,05 g/m^3 y 0,5 g/m^3 .

2.4.1 Modelos de predicción de atenuación

Para el cálculo de dicha atenuación podemos distinguir tres grupos de modelos descritos a continuación.

- El modelo Salonen y Uppala [7] requiere de los datos proporcionados por perfiles verticales de parámetros meteorológicos además de la frecuencia y el ángulo de elevación.
- En cuanto al modelo Rayleigh [6], únicamente necesitamos como parámetros de entrada la frecuencia, temperatura, humedad y tipo de nube.
- El modelo UIT-R P.840-6 [8] necesita de la frecuencia, elevación, cantidad de agua reducida a 0°C e información de los tipos de nubes, así como el modelo Dissanayake, Allnut y Haidara [10].

2.5 Atenuación por arena y polvo

Las partículas de polvo afectan a las ondas electromagnéticas de una forma muy parecida a los hidrometeoros. Normalmente, cuando se habla de atenuación por arena y polvo se suele centrar

el estudio en tempestades de arena compuestas por nubes densas de partículas de polvo en suspensión.

Para este tipo de atenuación, se utiliza la teoría de la dispersión de Rayleigh y la teoría de Mie en longitudes de onda cortas. Las partículas de polvo pueden tener unas dimensiones típicas de entre 0,05 μm y 0,08 μm . En cuanto a la concentración de partículas, se puede relacionar de forma empírica con la visibilidad óptica, que es inversamente proporcional a la atenuación.

En todo caso, la atenuación es importante sólo para altas concentraciones de partículas o humedad elevada, y esto sólo se da en zonas tropicales desérticas o semidesérticas, por lo tanto no quedan dentro de este estudio.

2.6 Atenuación por hidrometeoros

La atenuación producida por hidrometeoros, causada por *scattering* y absorción por parte de las precipitaciones, es una de las limitaciones más importantes en las comunicaciones. Hay que tener en cuenta los efectos de la lluvia a partir de frecuencias superiores a varios GHz. Esto significa que en bandas Ku y C (en torno a 8 GHz) ya podemos tener problemas, pero sobre todo la atenuación comienza a tener cierta importancia en las bandas Ka y V, aumentando considerablemente hasta los 200 GHz, donde la atenuación específica disminuye notablemente. Cuando hablamos de la banda Ku y C este tipo de desvanecimiento es muy pequeño y puede ser compensado incluyendo un pequeño margen en el enlace, para mantener el rendimiento requerido.

Este tipo de margen, como solución a los desvanecimientos, no resulta efectivo para la banda Ka, ya que, para poder proporcionar un rendimiento igual al de frecuencias más bajas, sería necesario incluir un margen fijo demasiado elevado en el balance de enlace. Teniendo en cuenta que dicho margen sólo es necesario ocasionalmente, no resulta rentable para esta banda.

Para evitar estos problemas y compensar los desvanecimientos se han desarrollado técnicas alternativas conocidas como Técnicas de Mitigación de Desvanecimientos (FMT), una de estas técnicas es el Control de Potencia Adaptativo (*Adaptive Power Control, APC*) que compensa la atenuación producida por los hidrometeoros, incrementando la potencia.

2.6.1 Tipos de lluvia

Las precipitaciones por lluvia se clasifican en cuatro tipos principalmente [11]:

- Precipitación estratiforme: corresponde a regiones extensas de lluvias de baja intensidad (hasta 25 mm/h) y de gran duración (más de 1 hora) o lo que es lo mismo, la precipitación está horizontalmente estratificada con lluvia hasta la altitud de la banda brillante (región de alta reflectividad estrecha de unos 300 m situada alrededor de la isoterma 0°C).
- Precipitación convectiva: corresponde a zonas localizadas (extensiones horizontales de varios kilómetros) de precipitación relativamente intensa y de corta duración. Se trata de fuertes corrientes ascendentes y descendentes que se extienden a través de una región profunda de la troposfera. En el radar se visualizan como regiones en forma de columnas casi verticales de mayor reflectividad.
- Lluvias monzónicas: son combinaciones de bandas de precipitación convectiva intensa seguidas de lluvia estratiforme. Suelen tener una extensión de unos 50 km y centenares de km de largo con una duración de varias horas.
- Tormentas tropicales: parecidas a las anteriores, aunque estas son más extensas, de unos cientos de km, y las bandas están dispuestas en forma de espiral.

Para un clima templado como el de la Península Ibérica, sólo hay que tener en cuenta los primeros dos tipos de lluvia, puesto que los otros dos raramente se dan. Normalmente las lluvias

estratiformes son típicas de final de otoño, invierno y comienzo de primavera, mientras que las convectivas, a su vez, son más típicas de primavera hasta comienzos de otoño.

2.6.2 Altura de la lluvia, h_R

La altura de la lluvia es muy importante en las comunicaciones por satélite ya que, como hemos dicho anteriormente, la lluvia provoca una gran atenuación de la señal y por tanto la altura de dicha lluvia supone uno de los factores que limita el enlace vertical Tierra-Satélite. La altura de la lluvia y la isoterma a 0°C están directamente relacionadas.

Hay modelos que consideran la altura de la isoterma a 0°C (también llamada isocero) como la máxima altura de la lluvia para precipitaciones estratiformes, ya que por encima de esta altura se supone que las precipitaciones son en forma de hielo y nieve, las cuales no afectan de manera significativa a la atenuación para frecuencias inferiores a 60 GHz. La isocero es fácil de medir mediante radiosondas y depende de factores tales como la latitud, la longitud, el tipo de clima, la época del año...

La recomendación UIT-R P.839-4 [12] propone unos mapas mundiales estacionales para el cálculo de la isoterma a 0°C para áreas del mundo donde no hay información específica disponible. Dichos mapas ofrecen un valor medio anual de la altura de la lluvia sobre el nivel del mar para cada emplazamiento. La media anual de la altura de la lluvia por encima del nivel del mar (h_R) puede ser aproximado a partir de la isoterma a -2°C por encima del nivel del mar, para tener en cuenta el impacto de la capa de fusión y puede ser obtenida a partir de la isoterma a 0°C como:

$$h_R = h_{-2} = h_0 + 0,36 \text{ km} \quad (2.1)$$

Esta altura de la lluvia es menos precisa para precipitaciones convectivas, debido a que se forman por movimientos de aire verticales, con lo que puede existir lluvia en estado líquido por encima de la isocero.

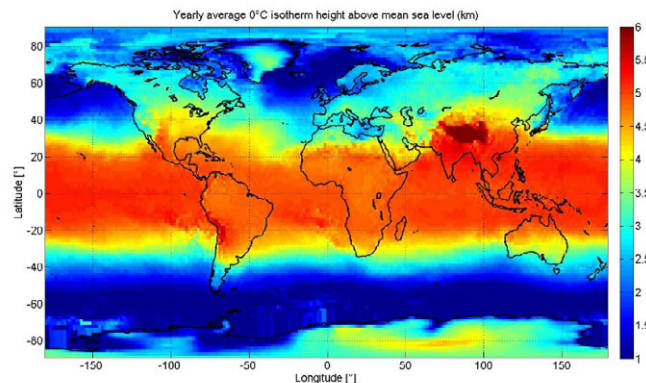


Fig. 2.3 Media anual de la isoterma a 0°C por encima del nivel del mar (km)

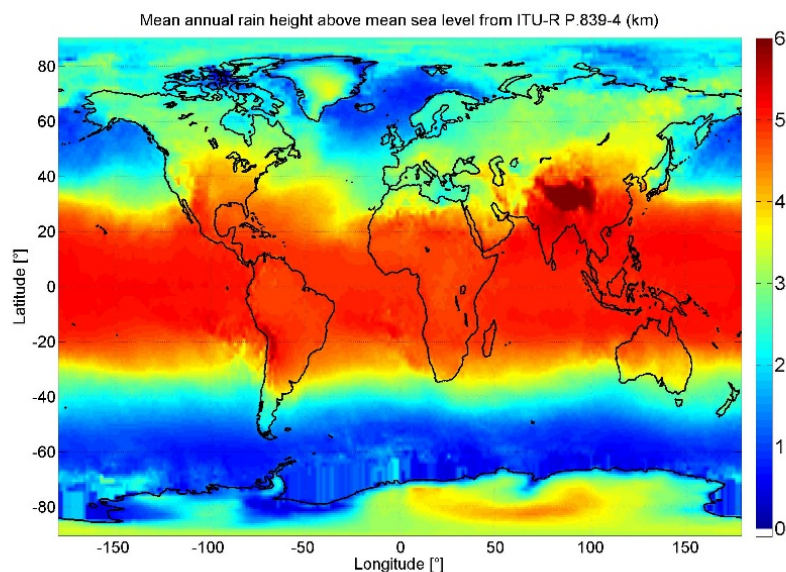


Fig. 2.4 Media anual de la altura de la lluvia por encima del nivel del mar (km)

2.6.3 Atenuación específica por lluvia

A la hora de calcular la atenuación producida por la lluvia hay que tener en cuenta diferentes aspectos, tales como el tamaño de las gotas de agua, como caen, su velocidad...

A continuación se van a explicar brevemente dichas características y seguidamente se calculará la atenuación.

Efecto del tamaño de las gotas

La forma de las gotas de lluvia está determinada por las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre ellas a medida que caen hacia la tierra. Cuanto mayor sean estas gotas se distorsionarán con mayor facilidad de su forma esférica.

Este cambio de forma afecta directamente a la atenuación, ya que en casos de polarización lineal la atenuación será dependiente de la orientación relativa del vector eléctrico y el eje principal de la gota distorsionada.

Efecto de la velocidad de caída

La velocidad a la que caen las gotas de lluvia determina la intensidad de la lluvia, por tanto es un dato a tener en cuenta.

Para ello se puede utilizar el modelo de Gunn y Kinzer [13], que relaciona la velocidad terminal de las gotas con su tamaño, con el aire en calma. Este modelo dice que la velocidad terminal aumenta con el radio de la gota hasta un máximo de 9 m/s cuando mide 2,5 mm aproximadamente.

Efecto de la distribución

Cuanto más se aproxime el tamaño de la gota a la longitud de onda, mayor será la atenuación producida por la gota. Por debajo de 10 GHz el efecto de gotas pequeñas es despreciable, cosa que no ocurre a partir de esta frecuencia, y por tanto para la frecuencia de nuestro estudio (19,7 GHz). Se puede suponer que la distribución del tamaño de las gotas es relativamente constante, variando fundamentalmente con la intensidad de la precipitación.

Efecto de la temperatura

La temperatura de las gotas al caer generalmente se aproxima a la del aire circundante. Esta temperatura influye en la parte compleja del índice de refracción del agua, que es máxima para

frecuencias entre 10 y 100 GHz. El pico de índice de refracción de la parte imaginaria asciende si la temperatura se incrementa.

Este efecto solo es importante para frecuencias menores a 20 GHz, pudiendo ser causa de divergencias de hasta un 20% en la atenuación específica.

Cálculo de la atenuación específica por lluvia

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

$$\gamma_R = k \cdot R^\alpha \quad (\text{dB/km}) \quad (2.2)$$

Donde los coeficientes k y α se determinan a partir de la frecuencia en GHz y de la polarización a partir de las siguientes fórmulas:

$$\log_{10}k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_i} \right)^2 \right] + m_k \log_{10}f + c_k \quad (2.3)$$

$$a = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_i} \right)^2 \right] + m_a \log_{10}f + c_a \quad (2.4)$$

$$\log_{10}k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_i} \right)^2 \right] + m_k \log_{10}f + c_k \quad (2.5)$$

$$a = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_i} \right)^2 \right] + m_a \log_{10}f + c_a \quad (2.6)$$

La Recomendación también ofrece unas gráficas para facilitar la consulta de los coeficientes así como un cuadro con frecuencias entre 1 y 1000 GHz con los valores numéricos asociados. De esta manera no sería necesario utilizar las ecuaciones anteriores que resultan especialmente tediosas. Para el correcto uso de estos valores para todas las frecuencias, se debe realizar una interpolación con escala logarítmica para la frecuencia y para k , y una escala lineal para α .

Capítulo 2 – Fundamentos teóricos

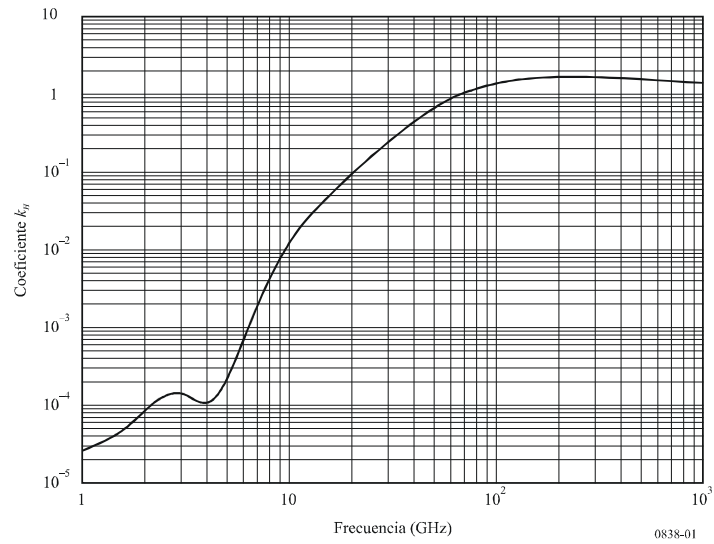


Fig. 2.5 Coeficiente k de polarización horizontal

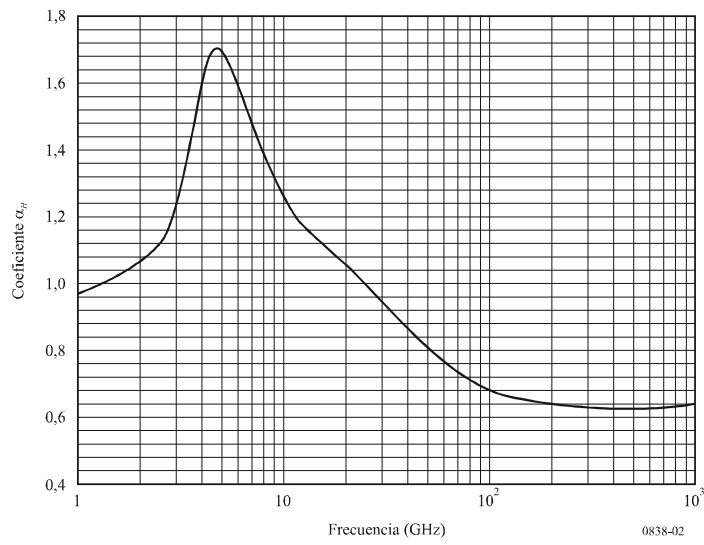


Fig. 2.6 Coeficiente α de polarización horizontal

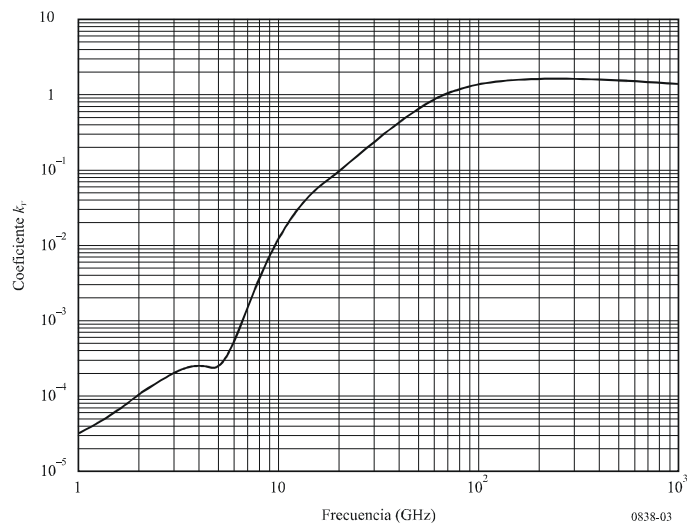


Fig. 2.7 Coeficiente k de polarización vertical

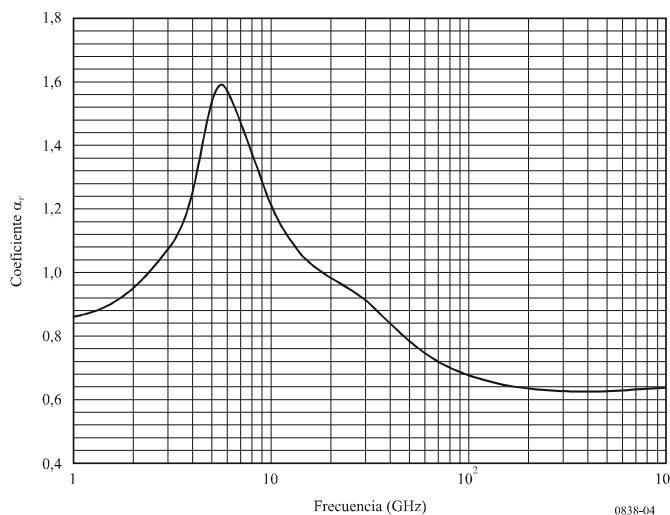


Fig. 2.8 Coeficiente α de polarización vertical

Cabe destacar que los coeficientes k y α anteriormente dados son sólo para polarizaciones verticales u horizontales, pero si se quiere calcular para casos con una polarización distinta, podemos calcular k y α para cualquier tipo de geometría con las expresiones que adjunta la Recomendación P.838

2.6.4 Modelos de predicción de atenuación por lluvia

Como consecuencia de la gran importancia de la atenuación producida por la lluvia, a lo largo de los años se han elaborado numerosos modelos de predicción de la atenuación que se basan en la intensidad de lluvia, que se pueden clasificar en tres categorías:

1. **Modelos físicos:** Definen la física del fenómeno y modulan la estructura horizontal y vertical de la lluvia. Se basan en medidas de radares meteorológicos sobre las que se han extraído parámetros como la altura de la lluvia, la extensión horizontal y vertical de las precipitaciones o la distribución de intensidades en una célula de lluvia.
2. **Modelos empíricos:** se ajustan a medidas experimentales como pueden ser los diversos climas, los ángulos de elevación, las frecuencias...
3. **Modelos semiempíricos:** Obtenidos a partir del ajuste a medidas experimentales de atenuación en varios emplazamientos, frecuencias y ángulos de elevación. Cuenta con una base física subyacente y requieren de parámetros estadísticos.

Normalmente los modelos físicos son los más utilizados, ya que es difícil realizar estudios y por tanto la información acerca de muchos parámetros necesarios para obtener resultados viables a partir de modelos empíricos son escasos. Por eso, durante los últimos años también han sido muy utilizados los modelos semiempíricos.

Los modelos semiempíricos requieren unos datos de entrada muy simples y fáciles de encontrar (latitud y longitud geográfica, frecuencia...) o información meteorológica.

A continuación se va a realizar un estudio exhaustivo de la Recomendación P. 618-12 [4] para sistemas de telecomunicaciones Tierra-Espacio, y posteriormente se comentaran otros modelos superficialmente.

Modelo Recomendación UIT.R-P.618-12

Se trata de un modelo semiempírico, por lo que se basa en un modelo físico de la lluvia y en el ajuste de los parámetros mediante la comparación con la base de datos de atenuación de la UIT. El modelo supone que la intensidad de lluvia no es constante ni a lo largo de una proyección horizontal ni de una vertical.

El modelo funciona para frecuencias de hasta 55 GHz para probabilidades entre el 0,0001% y el 5%.

Los parámetros requeridos de entrada son:

- $R_{0,01}$: intensidad de la lluvia local para el 0,01% de un año medio (mm/h).
- h_S : altura de la estación terrena sobre el nivel medio del mar (km).
- θ : ángulo de elevación ($^\circ$).
- ϕ : latitud de la estación terrena ($^\circ$).
- f : frecuencia (GHz).
- R_e : radio efectivo de la Tierra (8.500 km).

También se dispone de un esquema de la geometría del trayecto de precipitación, Fig. 2.9:

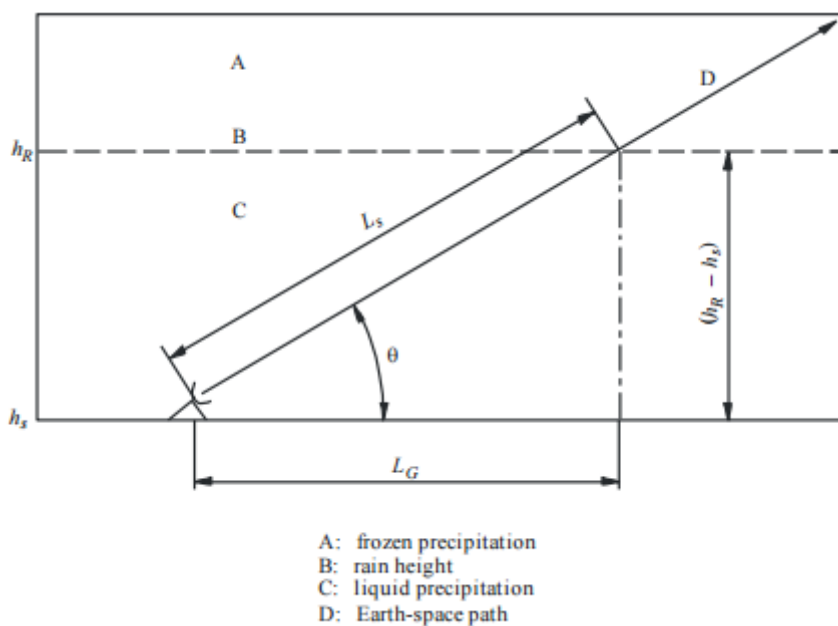


Fig. 2.9 Parámetros del trayecto inclinado. Modelo UIT.R-P.618-12

A continuación se van a describir los pasos a seguir para el cálculo de la distribución acumulada de la atenuación por lluvia:

Paso 1: Determinación de la altura efectiva de la lluvia, h_R

El cálculo de la altura de la lluvia se puede calcular según la ecuación 2.1 como hemos descrito en el apartado 2.6.2 anteriormente.

Paso 2: Cálculo de la longitud del trayecto oblicuo, L_S

Mediante la trigonometría de la Fig. 2.9 se puede obtener L_S teniendo en cuenta el ángulo del enlace inclinado, θ , mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Para } \theta \geq 5^\circ \rightarrow L_S = \frac{h_R - h_S}{\sin \theta} \quad (\text{km}) \tag{2.7}$$

$$\text{Para } \theta < 5^\circ \rightarrow L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{\left(\sin \theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e}\right)^{1/2} + \sin \theta} \quad (\text{km}) \tag{2.8}$$

Cuando $h_R - h_S$ sea igual o menor que cero, la atenuación debida a la lluvia es cero y se finaliza el cálculo y no son necesarios los siguientes pasos.

Paso 3: Cálculo de la proyección horizontal, L_G

De nuevo haciendo uso de la trigonometría y usando la Fig. 2.9 se puede calcular fácilmente:

$$L_G = L_S \cos \theta \quad (2.9)$$

Paso 4: Obtener la intensidad de lluvia, $R_{0,01}$, rebasada durante el 0,01% de un año medio

Se calcula la intensidad de la lluvia rebasada durante el 0,01% del año medio. Si no se tienen disponibles datos estadísticos de la zona geográfica a analizar, se pueden obtener datos aproximados a partir de los mapas de intensidad de lluvia proporcionados por la ITU-R P.837-6. Si la $R_{0,01}$ es igual a cero, la predicción de la atenuación por lluvia es nula para cualquier porcentaje de tiempo y los siguientes pasos no son necesarios.

En la Recomendación ITU-R P.837-6 [15] se recogen mapas de parámetros meteorológicos obtenidos utilizando la base de datos de análisis ERA-40 del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (CEPMPM) que se recomienda para predecir las estadísticas del índice de pluviosidad en un tiempo de integración de 1 min cuando no se dispone de mediciones locales. Se dispone también de los mismos datos pero en formato digital.

Paso 5: Obtener la atenuación específica, γ_R

La atenuación específica se calcula a partir de los coeficientes dependientes de la frecuencia dados por la Recomendación ITU-R P.838-3 y de la intensidad de lluvia, $R_{0,01}$.

$$\gamma_R = k (R_{0,01})^\alpha \quad (dB/km) \quad (2.10)$$

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

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \quad (2.11)$$

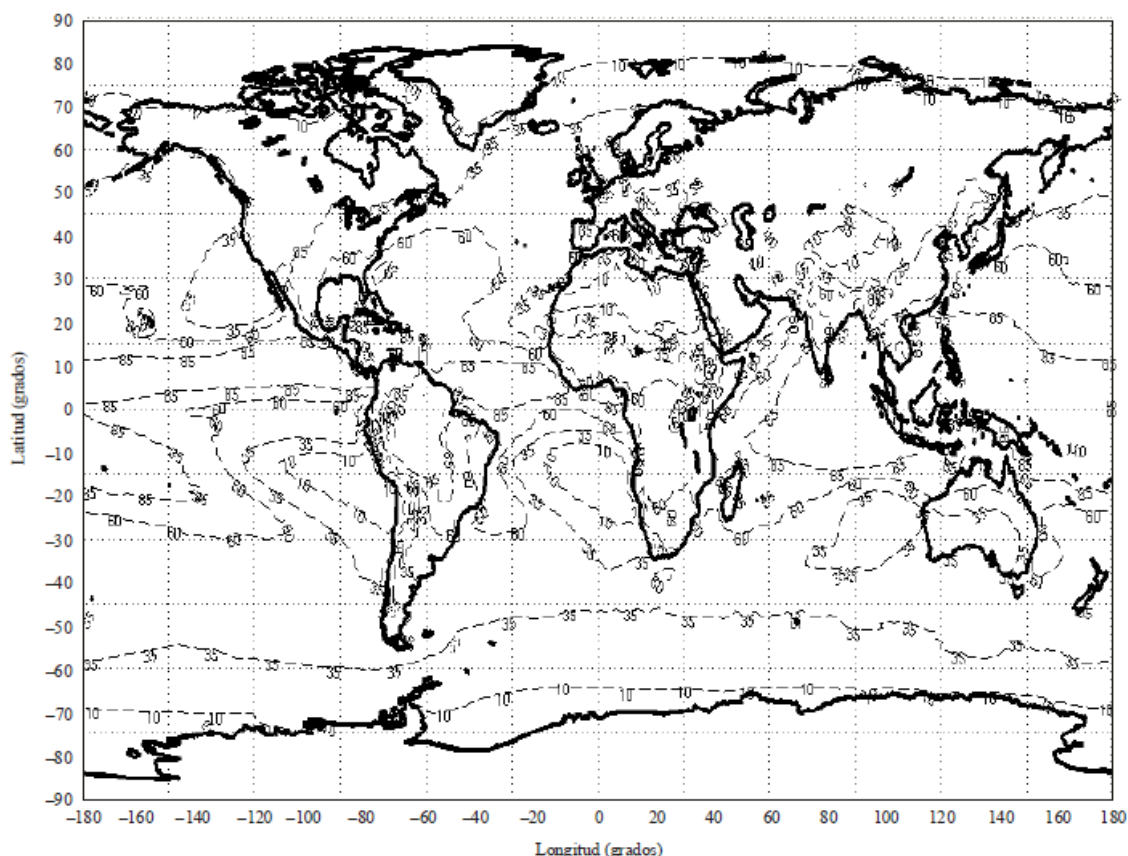


Fig. 2.10 Índice de pluviosidad (mm/h) sobrepasado el 0.01% sobre el año medio según la ITU-R P.837-6

Paso 7: Cálculo del factor de ajuste vertical, $v_{0.01}$ para un 0,01% del tiempo

Primero se calculan una serie de datos necesarios para calcular el factor de ajuste vertical:

$$\xi = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}} \right) \quad (\text{grados}) \quad (2.12)$$

$$\text{Si } \xi > \theta \rightarrow L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \quad (\text{km}) \quad (2.13)$$

$$\text{Si } \xi \leq \theta \rightarrow L_R = \frac{h_R - h_S}{\sin \theta} \quad (\text{km}) \quad (2.14)$$

$$\text{Si } |\varphi| < 36^\circ \rightarrow \chi = 36 - |\varphi| \quad (\text{km}) \quad (2.15)$$

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(1 - e^{-\frac{\theta}{1+\chi}} \right) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)} \quad (2.16)$$

Paso 8: Longitud de trayecto efectiva

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad (\text{km}) \quad (2.17)$$

Paso 9: Cálculo de la predicción de la atenuación para el 0.01% de la media anual

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad (\text{dB}) \quad (2.18)$$

Paso 10: La atenuación de rebasamiento para otros porcentajes entre el 0.001% al 5%

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad (dB) \quad (2.19)$$

Siendo β un valor que depende de la probabilidad, p .

Modelo EXCELL (Exponencial Cell Model)

Se trata de un modelo físico [16] que describe el proceso de la precipitación mediante una población de células de lluvia. Estas células poseen simetría circular y la intensidad de lluvia decrece de manera exponencial con respecto al valor máximo. La población de células se definen por la densidad espacial de células con un determinado radio.

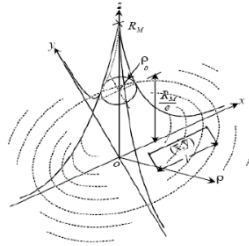


Fig. 2.11 Formato de la célula de lluvia para el Modelo EXCELL

Modelo Leitao-Watson

Sólo es aplicable para ángulos de elevación superiores a 10° y tiene en consideración los datos sobre estructura de las tormentas que proporcionan los datos de radares de polarización dual y su interpretación mediante la teoría de dispersión, además de la altura de congelación durante el periodo de lluvia.

Modelo SAM

Se conoce como Modelo Simple de Atenuación [17] y es un modelo semiempírico. Se basa en una descripción de la tasa de lluvia exponencial. Para intensidades inferiores a 10 mm/h la distribución horizontal de la lluvia se supone uniforme. La altura de lluvia se define en el propio modelo y es función de la intensidad de lluvia.

Otros modelos

Existen un gran número de modelos de predicción de la atenuación por lluvia, ya que este campo está muy estudiado, lo que nos permite tener una gran variedad de datos para comparar. Entre ellos cabe destacar los siguientes: Modelo de Karasawa, Matricciani, Misme-Waldteufel, Svjatogor, NTUA, Tormenta Sintética [18].

2.7 Despolarización por hidrometeoros

Para transmitir una información mediante un sistema de comunicación vía satélite se utilizan las polarizaciones ortogonales, es decir, se pueden transmitir dos canales totalmente independientes en la misma frecuencia, uno en cada polarización, para incrementar el espectro disponible. Este tipo de comunicaciones sufre ciertas interferencias debido a la despolarización de la señal en el trayecto de propagación.

La fuente de esta despolarización suele estar dada por los hidrometeoros en la troposfera, principalmente las precipitaciones, y las principales son la absorción y *scattering*. Algunos sistemas se diseñan para evitar la interferencia en señales debida a la despolarización, que compensan dicha despolarización mediante una despolarización inducida con técnicas adaptativas.

El parámetro que se mide normalmente en los experimentos es la Discriminación de Polarización Cruzada (XPD), definida como la relación entre la potencia copolar recibida en un

canal y la potencia de polarización cruzada detectada en el canal ortogonal, procedentes ambas de la misma señal transmitida.

2.7.1 Modelos de predicción de despolarización

Para el cálculo de la predicción de la despolarización se utiliza la Recomendación UIT-R P.618 que establece una relación entre la XPD [19] y la atenuación excedida para un determinado porcentaje de tiempo en el mismo trayecto de propagación. Incluye un factor de corrección empírico para tener en cuenta la posible despolarización por partículas de hielo.

2.8 Centelleo troposférico

Cuando hablamos de centelleo troposférico nos referimos a la fluctuación de la amplitud y la fase de la señal causada por la turbulencia atmosférica, es decir a la variación de la temperatura, humedad y presión que producen un cambio de índice de refracción.

Aunque como hemos dicho a lo largo de este capítulo la atenuación dominante es la producida por las precipitaciones, el centelleo puede llegar a ser importante para sistemas con poco margen para desvanecimientos operando a frecuencias altas y bajos ángulos de elevación. En la banda Ka y superiores, y con ángulos de elevación menores a 15°, el centelleo puede añadir prácticamente la misma atenuación que la producida por precipitación.

2.9 Cálculo de la atenuación total

Normalmente cuando hablamos de atenuación estamos hablando de una combinación de todas las atenuaciones presentes en el enlace Tierra-Satélite. Por tanto, la atenuación total es la suma de todas las atenuaciones estimadas por cada modelo de predicción mediante técnicas de combinación de efectos.

Hay que tener en cuenta que no todas las atenuaciones tendrán el mismo peso sobre la atenuación total, y que no todas se dan al mismo tiempo aunque estén directamente relacionadas, es por eso que no se puede realizar una simple suma de dichas atenuaciones.

En este estudio vamos a analizar el método propuesto por la Recomendación UIT-R P.618-12 que se utiliza para frecuencias mayores a 18 GHz y con los siguientes parámetros de entrada:

- $A_R(p)$: atenuación por lluvia (dB)
- $A_c(p)$: atenuación por nubes (dB)
- $A_G(p)$: atenuación por vapor de agua y oxígeno (dB)
- $A_S(p)$: atenuación debida al centelleo troposférico (dB)

Donde p es la probabilidad de que se produzca un exceso de atenuación.

A partir de estos datos se puede calcular la atenuación total en dB como:

$$A_T(p) = A_G(p) + \sqrt{(A_R(p) + A_c(p))^2 + A_S^2(p)} \quad (dB) \quad (2.20)$$

Donde:

$$A_c(p) = A_c(1\%) \text{ para } p < 1\%$$

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

Evidentemente, como es de esperar, existe una gran variedad de métodos para hacer el cálculo de la atenuación total, aunque no son tan utilizados.

3 Capítulo 3 – Procesado de datos

3.1 Introducción

El propósito de este capítulo es poner al lector en situación antes de presentar los resultados del estudio.

En primer lugar, se van a explicar detalladamente las dos bases de datos utilizadas para el presente proyecto (apartado 3.2) en el que se van a ver las diferentes características de los datos en cada uno de los casos y destacaremos los datos que son más importantes para este estudio.

En el apartado 3.3 se va a profundizar en el estudio de los datos y su procesado inicial. Se explicará cómo se han procesado los datos de los sondeos de Madrid-Barajas para sacar el dato isocero. Posteriormente, se van a procesar los datos SYNOP, que constará en realizar una sincronización de ambas bases de datos, con lo que se conseguirá un conjunto único de datos con toda la información necesaria.

Se realizará una interpretación de los códigos proporcionados por los datos SYNOP para identificar los días en los que estaba lloviendo en el momento de la medida y en los que no llovía.

Por último, se hará un saneado de los datos, que consistirá en eliminar aquellos datos que estén corruptos o que por su naturaleza puedan dar lugar a resultados inesperados.

3.2 Bases de datos meteorológicas

En este proyecto se han tenido en cuenta dos grandes bases de datos meteorológicas:

- Sondeos de Madrid-Barajas
- SYNOP

A continuación se van a explicar brevemente cada una de ellas. Los datos utilizados para los Sondeos de Madrid-Barajas y los datos SYNOP han sido descargados de la página web del Servicio de Información Meteorológica que utiliza datos disponibles en la red de forma pública, fundamentalmente de la NOAA, y software libre para su tratamiento.

3.2.1 Sondeos de Madrid-Barajas

En este proyecto se van a utilizar los datos obtenidos por sondas lanzadas desde el Aeropuerto de Madrid-Barajas. Estas sondas son lanzadas dos veces al día a las 0 y 12 horas UTC (*Coordinated Universal Time*).

Se ha partido de unos ficheros en formato .txt en los que se encuentra toda la información medida experimentalmente cada día del año para el aeropuerto de Madrid-Barajas para el periodo 1990 - 2013. Estos ficheros constan de 11 columnas que contienen entre otros los siguientes datos:

- **1:** Presión (hPa)
- **2:** Altura (m)
- **3:** temperatura del aire (°C)
- **4:** temperatura de rocío (°C)
- **5:** Humedad relativa (%)

Las demás columnas hacen referencia a parámetros del viento y otros parámetros que no son relevantes para nuestro estudio.

En la Fig. 3.1 se muestra un ejemplo del formato de los datos descargados para el 1 de Enero de 1990:

08221 LEMD Madrid Observations at 00Z 01 Jan 1990

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
945.0	629	6.8	2.5	74	4.87	0	0	284.5	298.4	285.4
940.0	673	8.6	2.6	66	4.93	354	1	286.8	301.0	287.6
850.0	1503	3.6	-2.4	65	3.79	245	10	289.9	301.1	290.6
786.0	2135	-0.3	-6.3	64	3.05	259	12	292.3	301.5	292.8
713.0	2906	-7.1	-8.8	88	2.77	277	14	293.1	301.5	293.5
700.0	3049	-8.3	-9.8	89	2.61	280	14	293.3	301.2	293.7
697.0	3082	-8.5	-10.0	89	2.58	280	14	293.4	301.3	293.9
668.0	3412	-9.3	-11.6	83	2.37	281	15	296.1	303.4	296.5
631.0	3851	-10.9	-19.9	47	1.26	282	16	299.1	303.2	299.4
606.0	4161	-12.1	-22.1	43	1.08	282	16	301.2	304.8	301.4
500.0	5600	-22.9	-35.9	29	0.36	285	19	305.1	306.4	305.1

Fig. 3.1 Ejemplo de los datos de sondeos Madrid-Barajas descargados

Para poder trabajar con dichos datos se ha tenido que realizar un procesado de datos que se explicará en detalle más adelante.

3.2.2 Datos SYNOP

El objetivo fundamental de estos mensajes es dar con la mayor precisión posible el estado de las condiciones meteorológicas de la superficie terrestre presentes y pasadas. Su aplicación fundamental es el diagnóstico de la situación actual y su posterior utilización en la predicción. También son los datos básicos sobre los que se realizan los resúmenes climatológicos.

Su frecuencia de emisión habitual es cada 6 horas, algunas estaciones cada 3 y unas pocas cada hora. Las observaciones más importantes suelen ser la de las 00, 06, 12 y 18 UTC, pero esto está sujeto con frecuencia a normativas de tipo nacional o regional.

En este caso se han utilizado los datos recogidos por la estación 08221, que corresponde al aeropuerto de Madrid-Barajas y que toma datos cada 6 horas para el periodo 2000-2013.

El código SYNOP, llamado FM-12 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), consiste en una serie de informes, que contienen grupos de números y barras, donde se describe el estado del tiempo en dicha estación. A continuación vamos a analizar un ejemplo de código SYNOP y a especificar qué datos son relevantes para nuestro estudio:

**AAXX 10184 08221 11670 73004 10134 20041 39437 40108 52024 60052 70262 85872
333 10142**

Dentro de todos los datos proporcionados por este código cabe destacar:

- **10184**
 - Mes: 10
 - Hora UTC: 18
 - Velocidad del viento en nudos: 4
- **73004**
 - Cobertura nubosa total en octas de cobertura sobre un máximo de 8 octas: 7
 - Dirección del viento en grados: 30
 - Velocidad del viento en nudos: 4
- **10134**
 - Número fijo: 1
 - Temperatura positiva, sobre 0 °C: 0
 - Temperatura: 134 = 13,4 °C
- **20041**
 - Número fijo: 2
 - Temperatura positiva, sobre 0 °C: 0
 - Temperatura de rocío: 041 = 4,1 °C
- **60052**
 - Número fijo, indica que la cifra está referida a lluvia: 6
 - 005 = 5 l/m²
 - Lluvia recogida en las últimas 12 horas (se multiplica x6): 2
- **333**
 - El grupo de temperatura se emite a las 6 o a las 18 UTC
- **10142**
 - Día del mes: 10
 - Temperatura máxima alcanzada ese día: 142 = 14,2 °C

3.3 Procesado de datos

Para poder realizar los estudios pertinentes de este proyecto, se ha tenido que realizar un procesado de datos de dichas bases de datos. Para ello, primero se han tenido que descargar los datos pertinentes seleccionando la estación meteorológica que necesitamos, en este caso Madrid-Barajas, cuyo código es el 08221.

En la Fig. 3.2 se puede ver un ejemplo de cómo se seleccionarían los datos dentro de la página web:

OGIMET

Selección de Mensajes Meteorológicos Sinópticos

LUGAR o LUGARES (*) TIPO ORDEN PARTES NIL FORMATO

PERIODO Año Mes Día Hora

INICIO: 2001 ▼ Octubre ▼ 10 ▼ 18 ▼

FIN: 2009 ▼ Octubre ▼ 11 ▼ 23 ▼

Debe introducir:

1. Los indicativos Sinópticos OMM de los **lugares** a consultar separados por espacios o comas. Si no conoce el indicativo del observatorio puede consultar [esta página](#). Si lo que quiere es todos los synops de un país debe utilizar [este formulario](#)
2. Tipo de mensaje. Actualmente solamente está implementado TODOS
3. Orden de presentación, cronológico directo o inverso.
4. El formato de la salida
 - HTML Página en formato HTML
 - TXT Página en texto plano tipo TXT
5. Fechas del inicio y final del periodo de consulta.

NOTA: Si lo que quiere es obtener ficheros con synops en formato CSV y sin tags HTML, debería consultar la ayuda del binario [getsynop](#)

Fig. 3.2 página web de OGIMET de donde se descargan los datos

En primer lugar, se va a explicar el procedimiento llevado a cabo para procesar los datos de los sondeos de Madrid-Barajas y a continuación se combinan ambas bases de datos obteniendo una sola base de datos con la cual vamos a trabajar, y que contiene toda la información necesaria para realizar todas las comparaciones pertinentes.

3.3.1 Sondeos de Madrid-Barajas

Como se ha dicho anteriormente, se va a partir de unos archivos .txt descargados de la página web del Servicio de Información Meteorológica.

El dato que nos va a interesar para realizar todo nuestro estudio va a ser el dato isocero. Este dato no viene dado directamente en los sondeos, por tanto hay que calcularlo. Para ello, se va a realizar una interpolación para saber a qué altura se encuentra la isoterma 0 °C.

A la hora de realizar la interpolación, nos encontramos con que existen diferentes métodos de interpolación ofrecidos por Matlab, entre ellas:

- **Interpolación ‘nearest neighbour’ o ‘valor más próximo’:** Esta interpolación asigna a la ordenada incógnita el valor de la ordenada cuya abscisa se halla más próxima a la abscisa de la ordenada que buscamos.
- **Interpolación lineal:** En este caso el valor que buscamos se va a encontrar en la recta que une el valor anterior y posterior al valor de interés.
- **Interpolación cúbica o ‘spline’:** Consiste en interpolar haciendo uso de un polinomio de tercer grado que se adapta localmente a la forma de la función definida por los valores que conocemos.

En este caso hemos utilizado la interpolación lineal, ya que según el PFC de Mari Cruz [20] es el método que introduce menor error en el cálculo, y por tanto se obtiene un valor más fiable que con las otras dos.

Para calcular la isocero se realiza un script en Matlab, que realice un barrido de los datos e identifique a que altura la temperatura se hace negativa por primera vez. Una vez encontrada esta altura se realiza una interpolación lineal entre el primer valor con temperatura negativa y el valor anterior con temperatura positiva, para sacar el valor exacto de la altura para la cual la temperatura es 0 °C.

Una vez obtenido el dato isocero, se guarda en una nueva variable dentro de la matriz de datos y se repite el proceso para todos los años del periodo 1990-2013.

Por último, se realiza la unión de todos los datos en una sola matriz, por tanto a partir de ahora vamos a tener una matriz con todos los datos del periodo a estudiar.

En la Fig. 3.3 se puede observar la matriz estructura total con todos los datos proporcionados por los sondeos de Madrid-Barajas y el dato isocero que se ha calculado:

Fields	tiempo_abs	year	mes	dia	hora	pr	z	t	td	hr	wv	dv	isocero
1	726834	1990	1	1	0	1x31 double	1x31 double	1x31 double	1x31 double	1x31 double	1x31 double	1x31 double	2.0864e+03
2	7.2683e+05	1990	1	1	12	1x34 double	1x34 double	1x34 double	1x34 double	1x34 double	1x34 double	1x34 double	2.0029e+03
3	726835	1990	1	2	0	1x27 double	1x27 double	1x27 double	1x27 double	1x27 double	1x27 double	1x27 double	1.9693e+03
4	7.2684e+05	1990	1	2	12	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1x35 double	2.8007e+03
5	726836	1990	1	3	0	1x32 double	1x32 double	1x32 double	1x32 double	1x32 double	1x32 double	1x32 double	2.0392e+03
6	7.2684e+05	1990	1	3	12	1x29 double	1x29 double	1x29 double	1x29 double	1x29 double	1x29 double	1x29 double	1.7500e+03
7	726837	1990	1	4	0	1x36 double	1x36 double	1x36 double	1x36 double	1x36 double	1x36 double	1x36 double	1.8118e+03
8	7.2684e+05	1990	1	4	12	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1.8549e+03
9	726838	1990	1	5	0	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1.7881e+03
10	7.2684e+05	1990	1	5	12	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1x37 double	1x37 double	2.0909e+03
11	726839	1990	1	6	0	1x36 double	1x36 double	1x36 double	1x36 double	1x36 double	1x36 double	1x36 double	1.8549e+03
12	7.2684e+05	1990	1	6	12	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1x35 double	2.0096e+03
13	726840	1990	1	7	0	1x32 double	1x32 double	1x32 double	1x32 double	1x32 double	1x32 double	1x32 double	1.9901e+03
14	7.2684e+05	1990	1	7	12	1x38 double	1x38 double	1x38 double	1x38 double	1x38 double	1x38 double	1x38 double	1959
15	726841	1990	1	8	0	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1x35 double	1.7063e+03
16	7.2684e+05	1990	1	8	12	1x33 double	1x33 double	1x33 double	1x33 double	1x33 double	1x33 double	1x33 double	1.8895e+03
17	726842	1990	1	9	0	1x42 double	1x42 double	1x42 double	1x42 double	1x42 double	1x42 double	1x42 double	1.6937e+03

Fig. 3.3 Matriz de los datos de los sondeos de Madrid-Barajas con el dato isocero incluido

3.3.2 Datos SYNOP

Se va a trabajar con una matriz ya procesada con los datos SYNOP, esta matriz consta de 27 columnas. El dato que nos interesa obtener de dicha matriz es lo que se conoce como código ww que nos va a indicar que condiciones meteorológicas se daban en el momento de la medida, este dato se encuentra situado en la columna 19. Es interesante evaluar si estaba lloviendo o no en el momento de la medida, por tanto nos van a interesar conocer la interpretación de dicho código:

- **0 – 19:** Sin precipitación, niebla, niebla helada (excepto para 11 y 12), tempestad de polvo, tempestad de arena, ventisca baja o alta en la estación, en el momento de la observación o (excepto para 09 y 17) durante la hora precedente.
- **20 – 29:** Precipitación, niebla, niebla helada o tormenta en la estación en el curso de la hora precedente pero no en el momento de la observación.
- **30 – 39:** Tempestad de polvo, arena, ventisca baja o elevada.
- **40 – 49:** Niebla o niebla helada en el momento de la observación.
- **50 – 59:** Llovizna en la estación en el momento de la observación.
- **60 – 69:** Lluvia en la estación en el momento de la observación.
- **70 – 79:** Precipitación sólida en la estación en el momento de la observación.
- **80 – 90:** Chaparrones en la estación en el momento de la observación.
- **91 – 99:** Tormentas en la estación en el momento de la observación.

Se va a proceder a extraer dicho dato e interpretarlo para posteriormente añadirlo a la matriz estructura de los datos de los sondeos de Madrid-Barajas. Dicho proceso se realiza a través de un script de Matlab.

En primer lugar hay que destacar que sólo tenemos datos SYNOP para el periodo 2000-20013, por tanto no se van a poder analizar los datos entre 1990 y 2000 para los que si tenemos datos de sondeos de Madrid-Barajas.

El primer problema con el que nos encontramos es que los datos de los sondeos se toman cada 12 horas (2 veces al día), mientras que los datos SYNOP se toman cada 6 horas (4 veces al día), por tanto, hay que identificar los datos que tienen la misma hora UTC (entre la matriz sondeos y la matriz SYNOP).

Una vez identificado en la matriz SYNOP el dato equivalente, según la hora UTC, de la matriz estructura sondeos de Madrid-Barajas, se extrae el dato de la columna 19 (código ww) y se almacena en una nueva variable (lluvia) dentro de la matriz estructura de los sondeos.

Por último, es interesante realizar una interpretación del código ww para facilitar el acceso a los datos posteriormente, por tanto se añade otra variable a la matriz (interpretación) en la cual se almacena un código numérico con la siguiente interpretación:

- **0:** no llueve en el momento de la medida ni una hora antes
- **1:** no llueve en el momento de la medida pero sí una hora antes
- **2:** llueve en el momento de la medida pero no una hora antes
- **3:** llueve en el momento de la medida y probablemente también en la hora anterior
- **4:** no hay datos para la medida

En la Fig. 3.4 se puede observar cómo queda la matriz estructura de los datos de sondeos Madrid-Barajas con todos los datos relevantes para nuestro estudio:

Fields	tiempo_obs	year	mes	dia	hora	pr	z	t	td	hr	vv	dv	isocero	lluvia	interpretacion
8656	731510	2002	10	21	0	1x86 double	1x86 double	1x86 double	1x86 double	1x86 double	1x86 double	1x86 double	3.5261e+03	0	0
8657	7.3151e+05	2002	10	21	12	1x80 double	1x80 double	1x80 double	1x80 double	1x80 double	1x80 double	1x80 double	3.0648e+03	2	0
8658	731511	2002	10	22	0	1x76 double	1x76 double	1x76 double	1x76 double	1x76 double	1x76 double	1x76 double	2.5400e+03	2	0
8659	7.3151e+05	2002	10	22	12	1x52 double	1x52 double	1x52 double	1x52 double	1x52 double	1x52 double	1x52 double	2.7847e+03	0	0
8660	731512	2002	10	23	0	1x69 double	1x69 double	1x69 double	1x69 double	1x69 double	1x69 double	1x69 double	2.6951e+03	0	0
8661	7.3151e+05	2002	10	23	12	1x67 double	1x67 double	1x67 double	1x67 double	1x67 double	1x67 double	1x67 double	2.7201e+03	0	0
8662	731513	2002	10	24	0	1x88 double	1x88 double	1x88 double	1x88 double	1x88 double	1x88 double	1x88 double	3.1823e+03	0	0
8663	7.3151e+05	2002	10	24	12	1x84 double	1x84 double	1x84 double	1x84 double	1x84 double	1x84 double	1x84 double	2.7539e+03	5	0
8664	731514	2002	10	25	0	1x88 double	1x88 double	1x88 double	1x88 double	1x88 double	1x88 double	1x88 double	3977	0	0
8665	7.3151e+05	2002	10	25	12	1x92 double	1x92 double	1x92 double	1x92 double	1x92 double	1x92 double	1x92 double	4.2846e+03	10	0
8666	731516	2002	10	27	0	1x85 double	1x85 double	1x85 double	1x85 double	1x85 double	1x85 double	1x85 double	4369	0	0
8667	7.3152e+05	2002	10	27	12	1x58 double	1x58 double	1x58 double	1x58 double	1x58 double	1x58 double	1x58 double	4428	10	0

Fig. 3.4 Matriz de los datos de los sondeos de Madrid-Barajas con los datos lluvia e interpretación incluidos

3.3.3 Verificación de los datos

Antes de realizar las comparaciones pertinentes se va a proceder a hacer un estudio de los datos, ya que al ser datos experimentales, es posible que algunos de ellos sean erróneos o estén corruptos y si los tuviéramos en cuenta falsearían los resultados obtenidos. Para ello, se ha realizado un histograma de los datos isocero. El histograma es un diagrama de barras verticales en el que la anchura de cada barra se corresponde con el tamaño del subintervalo y la altura con el número de datos en dicho subintervalo.

Haciendo un análisis rápido de los datos se puede ver que los datos entre 630 y 5500 metros son razonables, ya que en verano la altura de la lluvia suele ser superior a 4000 metros, mientras que en invierno la altura se encontrará por debajo de los 1000 metros. Si hubiera un valor de la isocero muy alto en los meses de invierno sí podrían ser datos erróneos, pero no es el caso.

Por otro lado, los valores inferiores a 620 metros no tienen ningún sentido, ya que se encontrarían por debajo de la superficie, por tanto van a ser descartados para no producir errores en los resultados. También se van a descartar los sondeos donde la primera medida tomada sea superior a 1000 metros, ya que pueden ser datos corruptos, que a la larga van a dar resultados incoherentes.

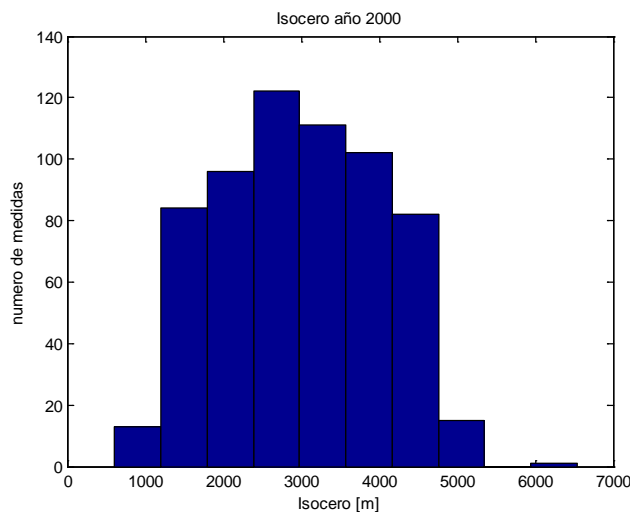


Fig. 3.5 Histogramas año 2000

Capítulo 3 – Procesado de datos

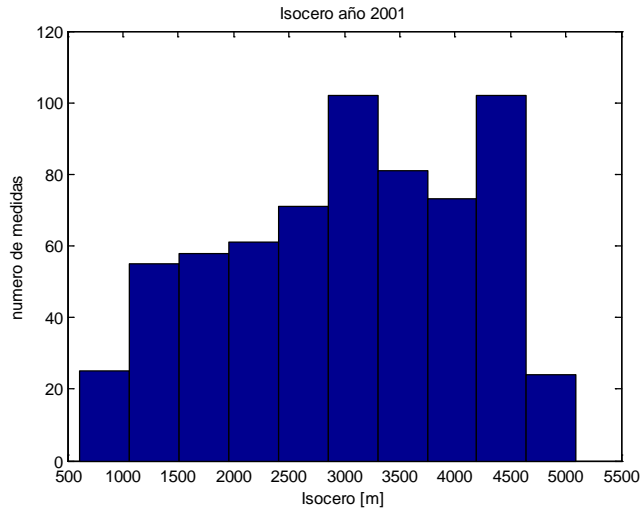


Fig. 3.6 Histograma año 2001

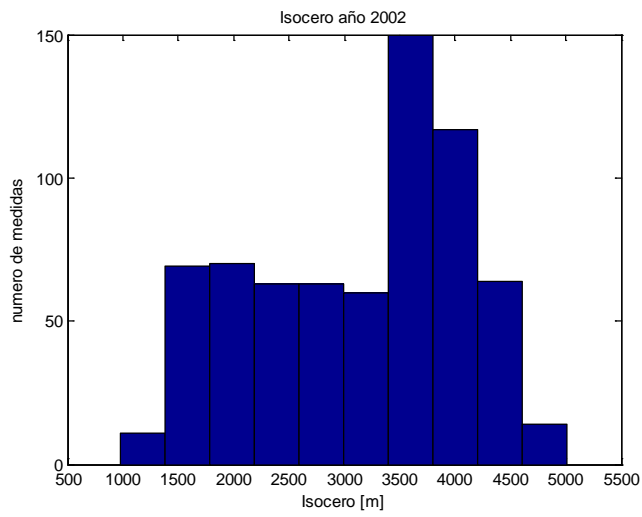


Fig. 3.7 Histograma año 2002

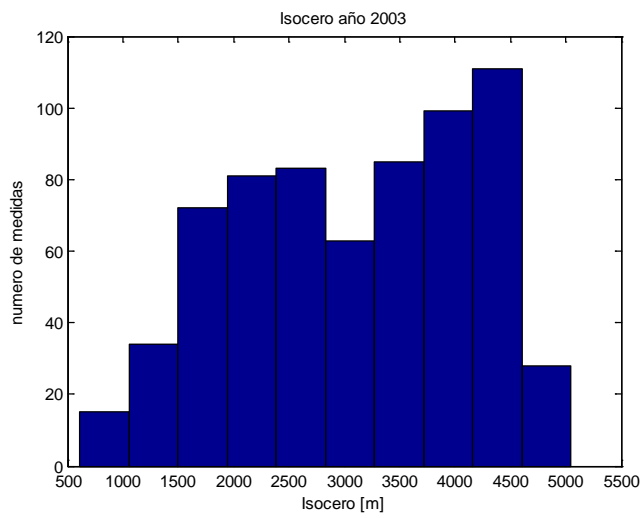


Fig. 3.8 Histograma año 2003

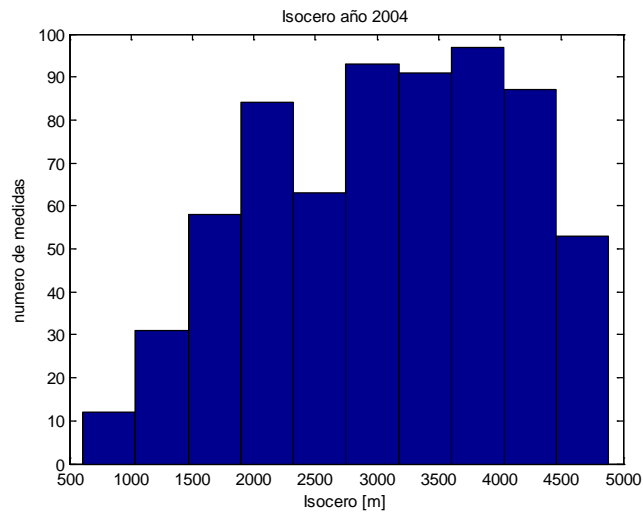


Fig. 3.9 Histograma año 2004

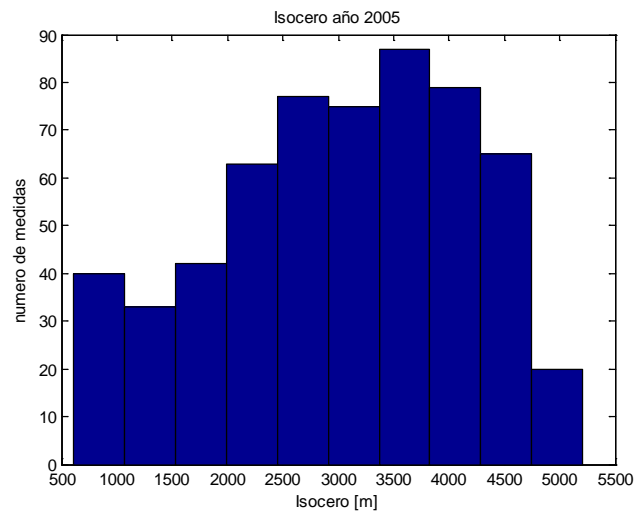


Fig. 3.10 Histograma año 2005

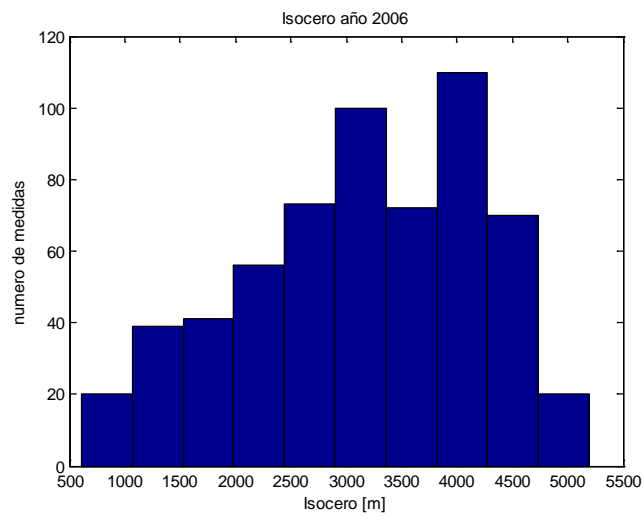


Fig. 3.11 Histograma año 2006

Capítulo 3 – Procesado de datos

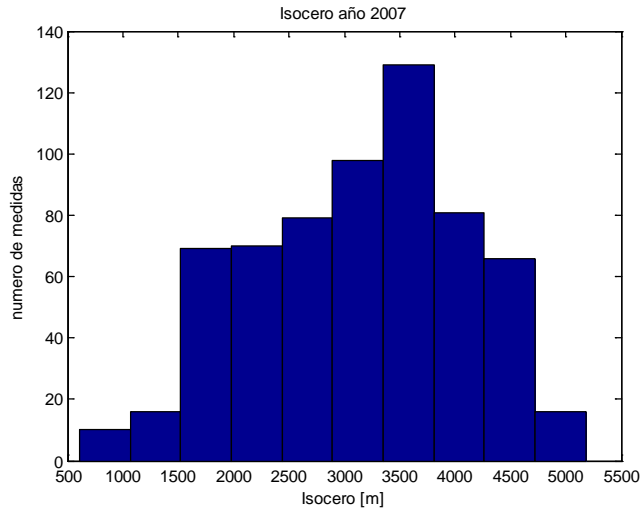


Fig. 3.12 Histograma año 2007

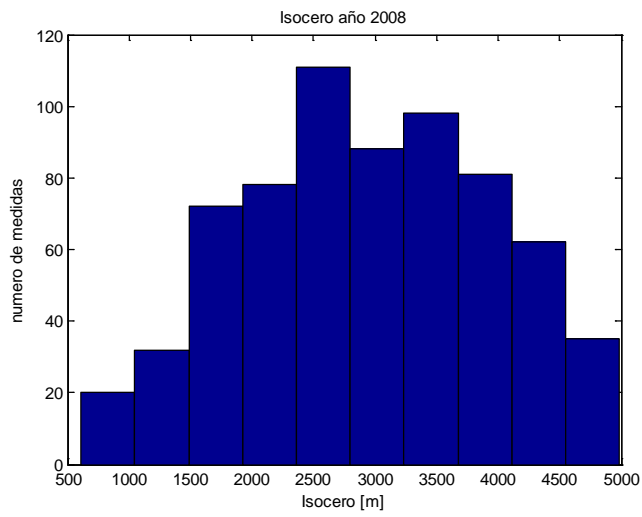


Fig. 3.13 Histograma año 2008

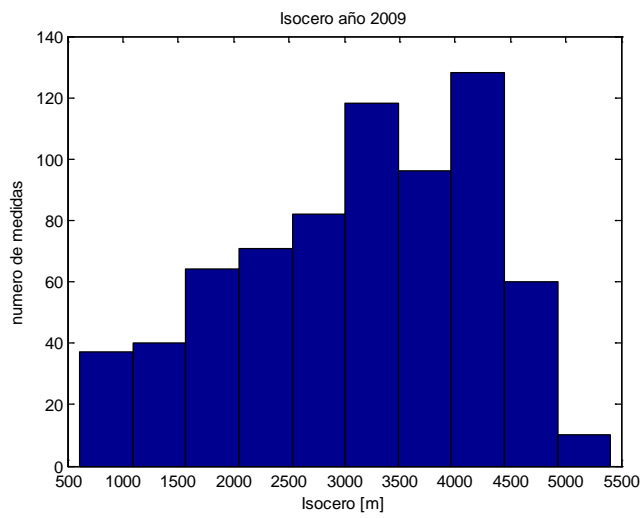


Fig. 3.14 Histograma año 2009

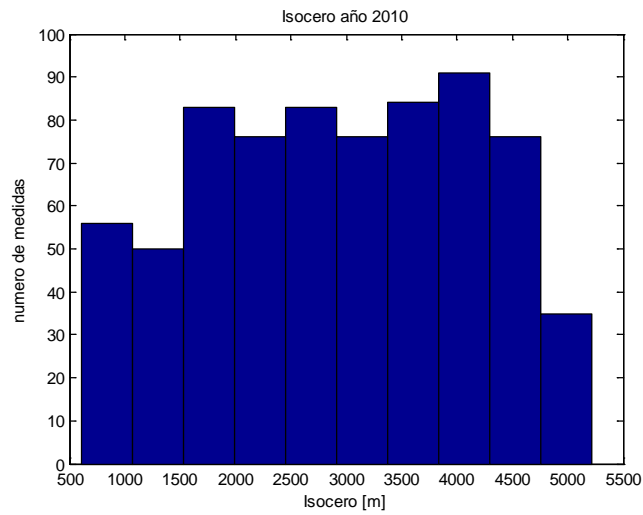


Fig. 3.15 Histograma año 2010

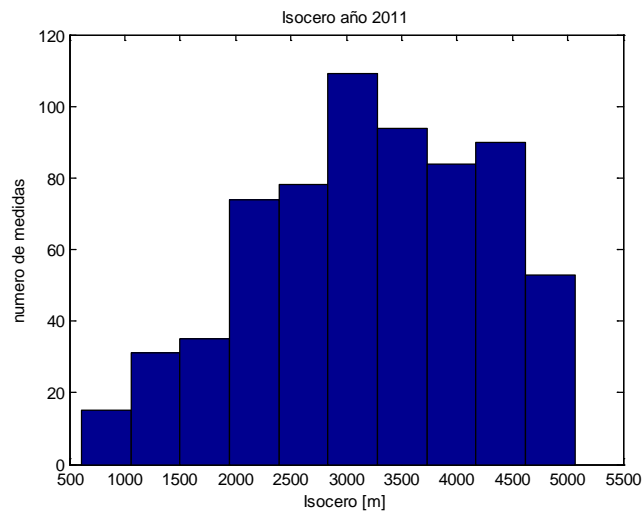


Fig. 3.16 Histograma año 2011

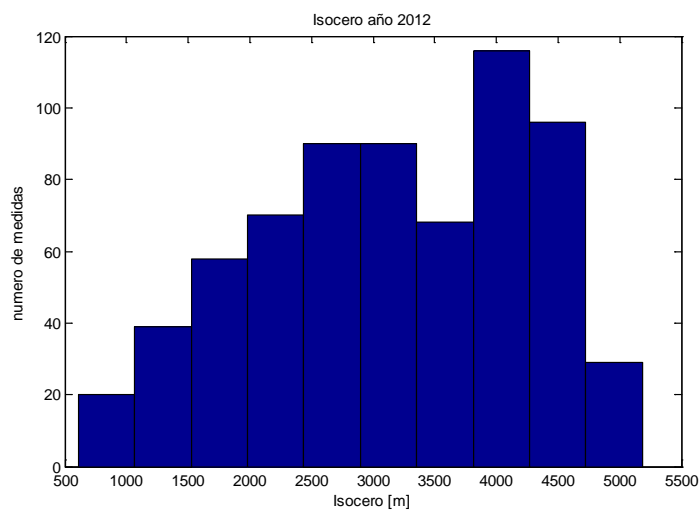


Fig. 3.17 Histograma año 2012

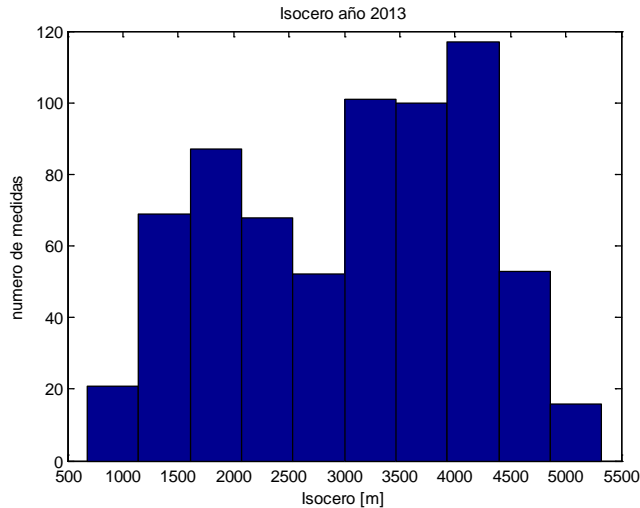


Fig. 3.18 Histograma año 2013

Haciendo un estudio más detallado, en la Fig. 3.19 se puede apreciar como hay algunos días donde hay un número de niveles de altura muy pequeños, entre 4 ó 5 niveles. En principio, la isocero obtenida esos días podría ser bastante precisa gracias a la interpolación utilizada.

Se puede ver también, como con el paso de los años los sondeos van teniendo más resolución, en la mayoría de los casos tenemos más de 30 niveles, mientras que los días en los que se tienen menos de 20 puede significar que hubo algún tipo de problema con las medidas dicho día, por tanto van a ser descartados para el análisis, lo que supone eliminar un 1,3% de los sondeos totales.

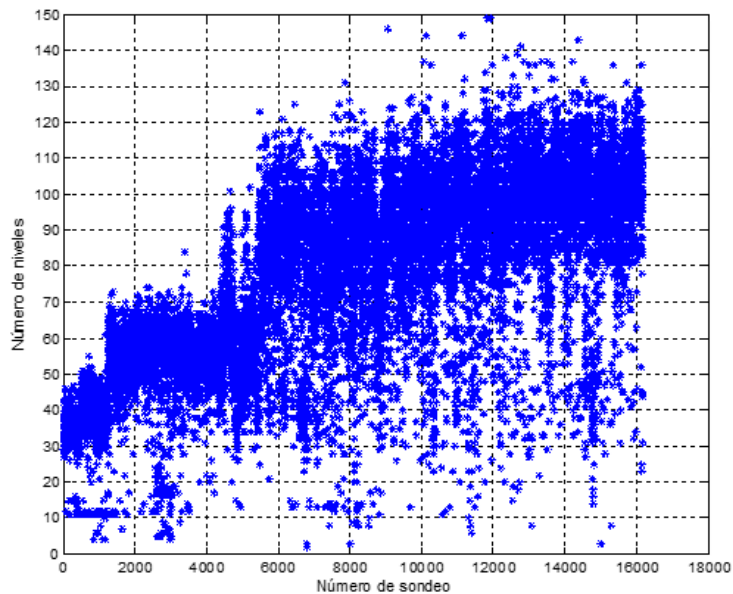


Fig. 3.19 Número de niveles de los sondeos

En la Fig. 3.20 se pueden visualizar los datos después del filtrado anteriormente propuesto.

Se puede ver como la mayoría de los datos se encuentran dentro del intervalo antes propuesto (630 - 5500 metros), sin embargo, también hay algunos valores superiores a los 6000 metros, que en principio podrían ser correctos, pero que distan mucho de los demás valores, por tanto por comodidad van a ser eliminados.

Finalmente, ya tenemos los datos preparados para realizar nuestro estudio.

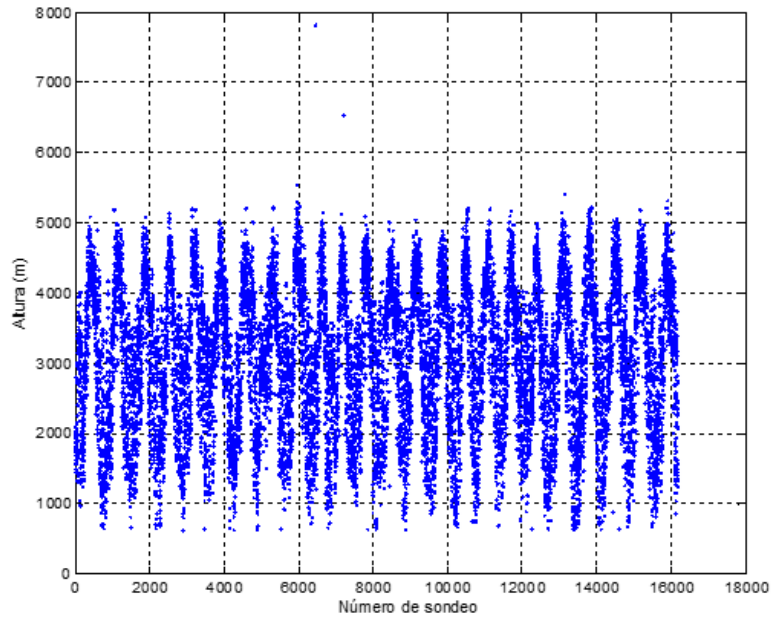


Fig. 3.20 Isoceros después del filtrado

4 Capítulo 4 – Comparación Recomendación 839

4.1 Introducción

En este capítulo se va a hacer una comparativa del dato isocero obtenido por la Recomendación 839 con los distintos datos obtenidos experimentalmente para saber si se produce un error significativo al utilizar un solo valor de la isocero para todas las épocas del año en el emplazamiento de Madrid.

En primer lugar en el apartado 4.2 se explica cómo se ha obtenido el dato de la isocero según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

En el apartado 4.3 se explican los datos experimentales que se van a utilizar para la comparación y se procede a la realización de las medias, tanto anuales como mensuales. Se van a presentar todas las tablas con los datos pertinentes y a continuación las gráficas correspondientes.

4.2 Recomendación 839

En primer lugar se procede a descargar los ficheros pertinentes de la página web oficial de la UIT. Por un lado la UIT proporciona un archivo PDF con la explicación para la utilización de los datos, que como se explica en el apartado 2.6.2 hace referencia al cálculo de la isoterma a 0°C, o también llamada isocero, a partir de la isoterma a -2°C.

En el archivo ZIP encontraremos el mapa digital, del que se va a extraer un único valor de la isocero para el emplazamiento de interés, que en este caso es Madrid. Para poder sacar este dato de la matriz de datos se ha utilizado un script de Matlab. En dicho script se realiza una interpolación bilineal, ya que en el mapa digital se trabaja con tres coordenadas, latitud, longitud e isocero. La latitud y la longitud son datos de entrada y se utilizarán los correspondientes a Madrid:

Latitud: 40,4167

Longitud: -3,7037

En cuanto a la isocero, va a ser el dato de salida y el que realmente nos interesa para realizar la comparativa:

Isocero: 2.647 m

Hay que destacar nuevamente, que este dato hace referencia a todas las épocas del año, y en principio no se sabe a ciencia cierta si se han tenido en cuenta o no, las condiciones meteorológicas a la hora de realizar las medidas.

4.3 Medidas experimentales

Para poder comparar el dato isocero calculado mediante los mapas digitales con nuestros datos reales se plantea la problemática de qué datos deberían ser tenidos en cuenta, ya que como hemos visto en el Capítulo 3, contamos con multiplicidad de datos en el periodo 2000 – 2013.

Ya que en el procesado de los datos se ha incluido información sobre las condiciones meteorológicas en el momento de la medida, resulta coherente hacer dos tipos de comparaciones. Por un lado, los datos recogidos cuando estaba teniendo lugar algún tipo de precipitación, y por otro lado los datos en cuyo caso no se ha recogido ningún dato de precipitación. Cómo sólo tenemos datos de las precipitaciones para el periodo 2000-2013 cabe esperar que sólo se va a tener en cuenta dicho periodo.

A continuación, parece interesante analizar las medias anuales de la isocero y las medias mensuales, para poder determinar si realmente hay una variación significativa entre las diferentes épocas del año y por tanto si el dato único proporcionado por la Recomendación 839 podría resultar erróneo para algunos periodos o por el contrario las diferencias son mínimas.

4.3.1 Realización de las medias

A continuación, se van a mostrar tanto las tablas como las gráficas de las medias obtenidas. En primer lugar, se puede ver la media anual del periodo 2000-2013 en el que se tienen tres medias distintas:

- Sin lluvia: En esta media se han tenido en cuenta todos los datos recogidos cuando no había ningún tipo de precipitación a la hora de la medida.
- Con lluvia: En este caso se han tenido en cuenta los datos para los cuales se estaba produciendo algún tipo de precipitación a la hora de la medida.
- Todos: Finalmente, se ha querido hacer la media de todos los datos, sin tener en cuenta las condiciones meteorológicas, ya que en la Recomendación 839 no está claro si se tienen en cuenta dichas condiciones.

Cómo se va a poder apreciar en las tablas, hay años para los cuales la media de los datos con lluvia es inexistente. Esto se debe a que como es de esperar en ciertos meses, sobre todo en verano, no existen registros en los que estuviera lloviendo y por tanto no hay media que poder calcular. En dichas tablas también se especifica la media correspondiente al periodo 2000-2013 para los tres casos estudiados a lo largo de este proyecto: “sin lluvia”, “con lluvia” y “todos”. Estas medias serán representadas para ver la evolución mensual de la isocero.

Tabla 4.1 Media isocero de enero

AÑO	MEDIA ENERO		
	ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	2007	-	2007
2001	1867	2019	1886
2002	2396	2791	2404
2003	2003	2175	2070
2004	2637	-	2637
2005	2523	-	2508
2006	1845	1097	1797
2007	2513	1839	2532
2008	2583	1877	2559
2009	1788	1533	1760
2010	1925	1864	1924
2011	2046	1156	2031
2012	2580	-	2597
2013	2245	1511	2220
Media	2211	1786	2209

Tabla 4.2 Media isocero de febrero

AÑO	ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	2844	-	2852
2001	2126	2416	2137
2002	2649	-	2632
2003	1723	1532	1714
2004	2397	1744	2325
2005	1566	812	1561
2006	1972	1034	1900
2007	2295	2012	2268
2008	2346	1669	2318
2009	2241	1431	2179
2010	1764	1660	1780
2011	2368	1738	2332
2012	1759	-	1759
2013	1844	1762	1839
Media	2135	1619	2114

Tabla 4.3 Media isocero de marzo

AÑO	ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	2457	1588	2442
2001	2619	2204	2578
2002	2520	1556	2467
2003	2562	2351	2555
2004	2301	1522	2214
2005	2310	-	2318
2006	2474	2115	2472
2007	2359	1925	2349
2008	2494	1926	2484
2009	2683	1473	2643
2010	2003	1848	1987
2011	2114	1914	2096
2012	2652	1190	2598
2013	1909	2242	1953
Media	2390	1835	2368

Tabla 4.4 Media isocero de abril

AÑO	ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	1958	1951	1957
2001	2706	-	2706
2002	2545	1325	2523
2003	2641	-	2623
2004	2458	1594	2426
2005	2564	-	2564
2006	2876	2161	2843
2007	2427	1993	2388
2008	2612	2274	2577
2009	2353	1771	2301
2010	2756	2275	2715
2011	3098	2406	3049
2012	2209	1926	2197
2013	2633	1970	2599
Media	2560	1968	2533

Tabla 4.5 Media isocero de mayo

AÑO	ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	3061	2481	3029
2001	2991	2496	2982
2002	3035	1846	2916
2003	3391	-	3372
2004	2633	2145	2617
2005	3379	-	3375
2006	3395	-	3399
2007	2955	3610	2993
2008	2714	2405	2683
2009	3321	3282	3319
2010	2841	2343	2816
2011	3307	3347	3310
2012	3406	-	3387
2013	2714	2140	2678
Media	3082	2610	3063

Tabla 4.6 Media isocero de junio

AÑO	MEDIA JUNIO		
	ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	3923	-	3923
2001	4133	-	4133
2002	3940	-	3940
2003	4165	-	4153
2004	4032	-	4032
2005	4069	-	4048
2006	3866	3209	3860
2007	3698	3475	3691
2008	3585	2657	3556
2009	3803	-	3809
2010	3621	3115	3569
2011	3952	-	3943
2012	4138	-	4132
2013	3700	-	3683
Media	3902	3114	3891

Tabla 4.7 Media isocero de julio

AÑO	MEDIA JULIO		
	ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	4309	-	4309
2001	4175	-	4168
2002	4155	3221	4139
2003	4336	-	4336
2004	4201	-	4201
2005	4422	-	4412
2006	4324	-	4317
2007	4408	-	4408
2008	4215	-	4215
2009	4472	-	4472
2010	4608	-	4608
2011	4305	-	4306
2012	4337	3946	4328
2013	4290	-	4282
Media	4326	3584	4321

Tabla 4.8 Media isocero de agosto

AÑO	ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	4283	-	4283
2001	4283	-	4282
2002	3970	-	3956
2003	4251	-	4251
2004	4250	-	4250
2005	4389	-	4402
2006	4358	-	4358
2007	4174	-	4168
2008	4376	-	4376
2009	4309	-	4316
2010	4511	4063	4503
2011	4495	-	4495
2012	4450	-	4450
2013	4326	-	4326
Media	4316	4063	4315

Tabla 4.9 Media isocero de septiembre

AÑO	ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	3912	2062,3	3841
2001	3864	-	3864
2002	3679	3593	3675
2003	4015	-	4008
2004	4154	-	4154
2005	3761	3280	3737
2006	3818	3127	3805
2007	3832	-	3832
2008	3673	3614	3671
2009	3703	2353	3660
2010	3950	3632	3945
2011	4045	-	4045
2012	4027	2803	4006
2013	3952	3259	3947
Media	3885	3080	3871

Tabla 4.10 Media isocero de octubre

AÑO	ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	3193	2800	3181
2001	3526	3378	3510
2002	3464	2918	3398
2003	2951	2897	2956
2004	3168	2597	3174
2005	3438	3257	3377
2006	3721	2889	3600
2007	3212	3132	3208
2008	3185	2648	3140
2009	3861	2597	3819
2010	3283	3320	3283
2011	3449	2482	3419
2012	3376	2722	3308
2013	3691	3498	3678
Media	3394	2938	3361

Tabla 4.11 Media isocero de noviembre

AÑO	ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	2205	2819	2283
2001	2288	2030	2280
2002	2757	1994	2622
2003	2821	2248	2787
2004	2845	-	2845
2005	2704	2169	2650
2006	2922	2921	2907
2007	2950	3417	2967
2008	2252	1770	2243
2009	2993	2592	2973
2010	2419	929	2366
2011	2781	2414	2731
2012	2493	2997	2538
2013	2673	1457	2652
Media	2650	2289	2632

Tabla 4.12 Media isocero de diciembre

AÑO	MEDIA DICIEMBRE		
	ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	2401	2054	2348
2001	2266	1766	2245
2002	2659	2344	2622
2003	2283	1851	2281
2004	2228	1922	2207
2005	2073	2261	2097
2006	2076	-	2069
2007	2561	1382	2517
2008	2165	1989	2166
2009	2282	2499	2322
2010	2196	2640	2277
2011	2726	-	2732
2012	2503	2863	2509
2013	2594	2382	2583
Media	2358	2163	2355

En la Fig. 4.1 se han representado las medias mensuales de la isocero respecto a los meses del año, para poder apreciar su evolución a lo largo de un año completo. Cabe destacar que en los meses de invierno la isocero experimental se encuentra por debajo del dato proporcionado por la UIT, mientras que en los meses de verano, la isocero real se sitúa por encima de dicho valor. Este comportamiento es perfectamente normal debido a que, como hemos comentado con anterioridad, en los meses de verano la isocero tiende a ser más alta, alrededor de los 5000 m, mientras que en invierno la isocero no suele superar los 1000 m.

Por otro lado, si nos centramos en los datos con lluvia se puede observar cómo hay dos meses del año en los cuales la isocero experimental coincide con el dato proporcionado por la UIT, estos meses son mayo y mediados de octubre. Mientras que si nos centramos en los datos sin lluvia esta coincidencia se produce en los meses de Abril y Noviembre.

Con esta representación se puede ver claramente cómo la isocero se aleja bastante del dato proporcionado por la UIT y por tanto este error puede afectar a la atenuación del enlace inclinado Tierra-Satélite.

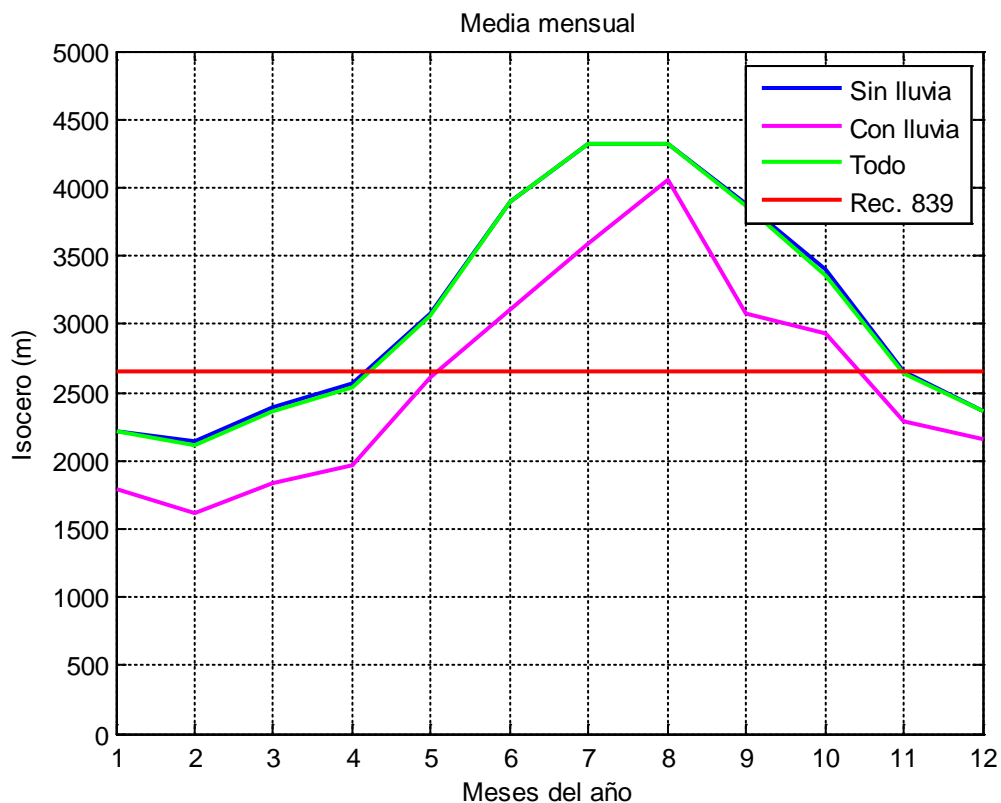


Fig. 4.1 Media isocero mensual

A continuación, en la Tabla 4.13, se presentan las medias anuales de la isocero del periodo a estudiar con su respectiva representación.

Tabla 4.13 Media isocero anual

AÑO	MEDIA ANUAL ISOCERO (m)		
	Sin lluvia	Con lluvia	Todos
2000	3043	2335	3011
2001	3085	2286	3066
2002	3196	2254	3140
2003	3151	2381	3116
2004	3114	1756	3077
2005	3031	2372	3051
2006	3224	2565	3179
2007	3171	2612	3151
2008	2991	2342	2962
2009	3211	2251	3168
2010	3051	2232	2999
2011	3257	2374	3220
2012	3205	2583	3187
2013	3074	2301	3045
Media	3129	2332	3098

En la Fig. 4.2 nos encontramos con que la isocero en condiciones de lluvia es significativamente más baja que en los días sin precipitación. Este fenómeno es completamente coherente, ya que cuando está lloviendo la temperatura es más baja, ya que, en presencia de fenómenos meteorológicos la temperatura tiende a disminuir.

Por otro lado, se puede ver cómo la media de todos los datos, es prácticamente la misma que la media de los datos sin lluvia. Esto tiene sentido, ya que si tenemos en cuenta el número de días en los que llueve y los que no llueve, es fácil predecir que hay más días a lo largo del año en los que no hay ningún tipo de precipitación, por tanto, la media se compensa.

Como se ve, el dato que proporciona la Recomendación 839 se encuentra entre la media sin lluvia y con lluvia. Si tenemos en cuenta la media de todos los datos, se ve como la media experimental se sitúa unos 400 metros por encima, lo que podría dar variaciones significativas en cuanto a atenuación.

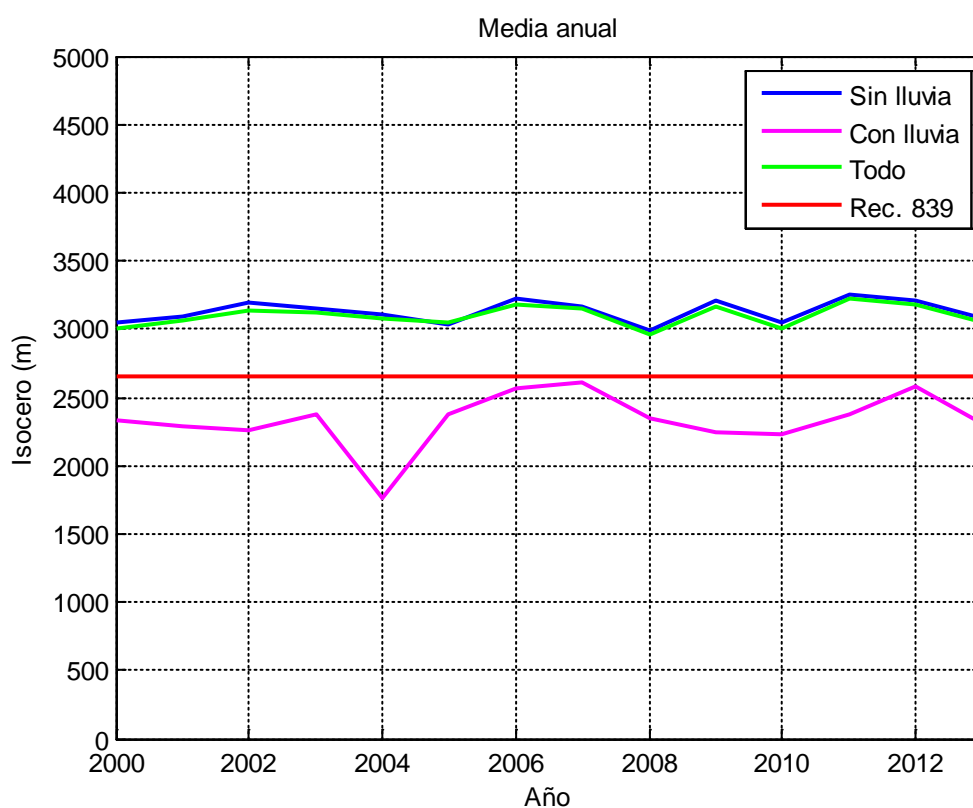


Fig. 4.2 Media isocero annual

Se podría afirmar que aplicando el dato constante proporcionado por la UIT se introduce un cierto error en las medidas y por tanto puede haber errores en la atenuación final del enlace Tierra-Satélite.

A continuación, en la Tabla 4.14 se muestra una recomendación de isoceros, que serían las adecuadas a la hora de realizar cualquier cálculo de atenuación, dichos datos se corresponden con la media los datos experimentales con los que se ha trabajado a lo largo de todo este capítulo. Estos datos son mucho más exactos que el dato proporcionado por la UIT, ya que además, se tienen en cuenta las condiciones meteorológicas. Por tanto, si se utilizaran estos datos a la hora de calcular las atenuaciones, se cometería un error menor.

Tabla 4.14 Datos isocero recomendados

ISOCERO (m)		
Sin lluvia	Con lluvia	Todos
3129	2332	3098

5 Capítulo 5 – Comparación Recomendación 618

5.1 Introducción

A lo largo de este capítulo se pretende hacer un estudio de la Recomendación 618 para saber si el utilizar un dato constante de la isocero para todas las épocas del año puede inducir algún tipo de error a la hora de realizar los cálculos de atenuación total por precipitación en enlaces inclinados.

En primer lugar se va a calcular la intensidad de lluvia según la Recomendación 837, ya que se dispone de datos experimentales. De ahí se obtendrá el dato de intensidad de lluvia para un porcentaje de tiempo del 0,01%. Con dicho dato se van a realizar las operaciones necesarias, utilizando la herramienta Matlab, para el cálculo de las atenuaciones.

Por último, se van a presentar las gráficas con dichas atenuaciones, en las que se van a representar los datos teniendo en cuentas las condiciones meteorológicas, es decir, datos con lluvia, sin lluvia y todos los datos al mismo tiempo.

5.2 Cálculo de la intensidad de lluvia, $R_{0,01}$

La UIT dice que para calcular la atenuación producida por la lluvia en un enlace inclinado hay que utilizar la Recomendación 618 que tiene en cuenta el dato de intensidad de lluvia caída en un determinado punto para frecuencias de hasta 55 GHz. En el apartado 2.6.4.1 se explica paso a paso cómo realizar estos cálculos.

En el paso 4 de dicha Recomendación se utiliza el dato de intensidad de lluvia rebasada durante el 0.01% de un año medio, $R_{0,01}$. Aún disponiendo de datos experimentales, se ha preferido utilizar los valores recogidos en la UIT-R P.837-6 para obtener este dato, donde se recogen mapas de parámetros meteorológicos obtenidos utilizando la base de datos ERA-40.

Para calcular el $R_{0,01}$ el primer paso es descargar los ficheros disponibles en la web de la UIT que corresponden a esta recomendación, en los cuales encontraremos un fichero .m que nos servirá para calcular la probabilidad de lluvia.

Como parámetros de entrada tenemos:

- ***p***: Nivel de probabilidad (%)
- ***lat***: Latitud (deg)
- ***lon***: Longitud (deg)

Donde *p* va a ser un rango de probabilidades en el cual se encontrará nuestro dato de interés (0.01). La latitud y la longitud se corresponden con el emplazamiento de interés, que para este estudio se trata de Madrid.

En cuanto a los parámetros de salida se obtienen:

- ***rr***: intensidad de lluvia rebasada durante el *p*% del tiempo de un año medio(mm/h)
- ***P0***: porcentaje de probabilidad de lluvia (%)

A continuación en la tabla 5.1 se muestran los resultados de intensidad de lluvia en función de la probabilidad.

Tabla 5.1 Intensidad de lluvia rebasada durante el p% del tiempo de un año medio

Prob (%)	rr (mm/h)
0,001	71,66
0,002	57,05
0,003	48,91
0,005	39,26
0,01	27,74
0,02	18,62
0,03	14,53
0,05	10,56
0,1	6,82
0,2	4,35
0,3	3,29
0,5	2,22
1	1,13
2	0,31
3	0,00
5	0,00

En rojo resalta el dato que nos va a interesar a la hora de calcular la atenuación del enlace inclinado:

$$R_{0,01\%} = 27,74 \text{ mm/h}$$

En la Fig. 5.1 se puede ver la relación entre la intensidad de lluvia y el porcentaje de tiempo, como se puede observar la curva tiende a ser una exponencial decreciente.

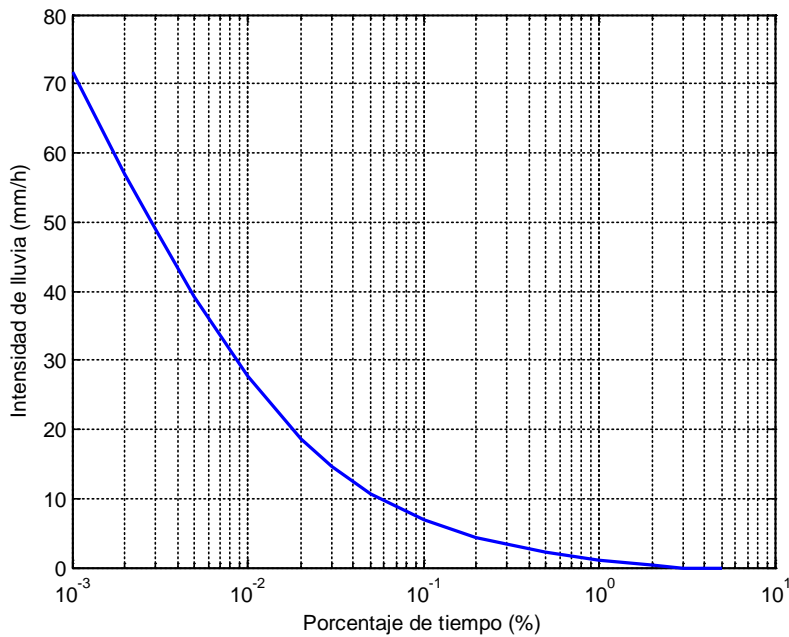


Fig. 5.1 Intensidad de lluvia según el porcentaje de tiempo

5.3 Cálculos Recomendación P.618

En este apartado se van a realizar los cálculos necesarios para obtener la atenuación debida a precipitaciones.

Lo primero es descargar nuevamente los ficheros proporcionados por la UIT correspondientes a la Recomendación 618, entre los que encontraremos un fichero .m que vamos a utilizar para realizar los cálculos. En el fichero *ITUR618.m* tenemos los siguientes parámetros de entrada:

- **p**: Nivel de probabilidad (%)
- **R001**: intensidad de lluvia rebasada durante el 0.01% del tiempo de un año medio (mm/h)

Como parámetro de salida:

- **Ap**: vector de atenuaciones para el vector de probabilidades de entrada

A continuación, se explican los principales datos que necesita saber el programa para la correcta ejecución del mismo. Entre ellos se encuentra la latitud de la estación terrestre, que se corresponde con el ángulo de elevación de la estación terrena de Madrid. Se entiende como ángulo de elevación al ángulo vertical que se forma entre la dirección de una onda electromagnética irradiada por una antena de estación terrestre que apunta hacia un satélite y el plano horizontal, en este caso el satélite que interesa para nuestro estudio es el Hot Bird 13 de la constelación de satélites Eutelsat.

Para este estudio se va a utilizar una de las frecuencias de las balizas de los satélites citados anteriormente, en este caso 19,701 GHz

- **hs**: altura de la estación terrestre sobre el nivel del mar → 630 metros
- **fi**: latitud de la estación terrestre en grados → 40,5 grados
- **f**: frecuencia → 19,701 GHz
- **Re**: Radio efectivo de la Tierra → 8500 km

Dentro del programa *ITUR618.m* se hace una llamada a una función llamada *interpolación_alpha_k.m* que calcula los coeficientes alpha y k necesarios para realizar el cálculo de la atenuación según la Recomendación 618. Esta función tiene tres datos de entrada que son:

- **theta**: ángulo de elevación del satélite EUTELSAT → 40.137 grados
- **f**: frecuencia → 19.701 GHz
- **tilt**: inclinación de la polarización → 0 grados

Como el nombre de dicha función indica, los parámetros de salida son los coeficientes alpha y k.

La primera operación que se realiza en la Recomendación 618 es calcular la altura de la lluvia h_R como se explica en el apartado 2.6.2, para ello se necesita el dato isocero. Por un lado se va a utilizar el dato isocero proporcionado por la Recomendación 839 y por otro lado se van a realizar los cálculos con los datos isocero experimentales obtenidos en el Capítulo 4, para por último realizar una comparativa de todos los resultados.

5.3.1 Tablas de atenuaciones

A continuación se muestran las tablas en las que se recogen los datos obtenidos de los cálculos anteriormente realizados para la atenuación. En la Tabla 5.2 se pueden ver las atenuaciones teniendo en cuenta la isocero obtenida según la Recomendación 839.

Tabla 5.2 Atenuación con datos Recomendación 839

Prob (%)	At (dB)
0,001	23,50
0,002	19,56
0,003	17,32
0,005	14,62
0,01	11,30
0,02	8,47
0,03	7,05
0,05	5,51
0,1	3,83
0,2	2,58
0,3	2,02
0,5	1,46
1	0,92
2	0,56
3	0,41
5	0,27

En la Tabla 5.3 se puede observar las atenuaciones obtenidas si tenemos en cuenta las alturas isocero recomendadas en el Capítulo 4 teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas.

En la Fig. 5.2 se han representado los datos de la Tabla 5.3 en la que se han utilizado las isoceros recomendadas en el Capítulo 4, junto con las atenuaciones obtenidas con la isocero proporcionada por la UIT en función del porcentaje de tiempo.

Si se toma como referencia la curva roja (Rec. 839) se puede observar como en los casos en los que no estaba lloviendo la atenuación es superior, mientras que en los casos en los que llovía la atenuación es menor. En cuanto, a la curva obtenida teniendo en cuenta todos los datos se acerca mucho a la curva de sin lluvia.

Teniendo en cuenta estas cuestiones, se puede afirmar que con la Recomendación 839 se está produciendo un error, que es mayor cuanto menor es el porcentaje de tiempo.

A continuación, se ha procedido a hacer un estudio de cuánto puede llegar a variar el dato de la atenuación. Para ello, se han utilizado los datos de la Tabla 4.13 para obtener cuál es el año con la isocero más alta y cuál el de la isocero más baja, teniendo en cuenta los datos con lluvia, ya que este estudio está centrado en la atenuación producida por las precipitaciones.

Los años seleccionados son los siguientes:

- Valor máximo de la isocero: 2612 m (año 2007)
- Valor mínimo de la isocero: 1756 m (año 2004)

Tabla 5.3 Atenuación con isocero recomendada en Capítulo 4

Prob (%)	At (dB)		
	h _R sin lluvia	h _R con lluvia	h _R en todas condiciones
0,001	26,31	21,50	26,14
0,002	21,99	17,84	21,84
0,003	19,50	15,76	19,37
0,005	16,51	13,28	16,40
0,01	12,82	10,23	12,73
0,02	9,64	7,64	9,57
0,03	8,04	6,35	7,98
0,05	6,30	4,95	6,25
0,1	4,40	3,43	4,37
0,2	2,98	2,31	2,95
0,3	2,34	1,80	2,32
0,5	1,69	1,30	1,68
1	1,07	0,81	1,06
2	0,65	0,49	0,64
3	0,48	0,36	0,47
5	0,32	0,24	0,32

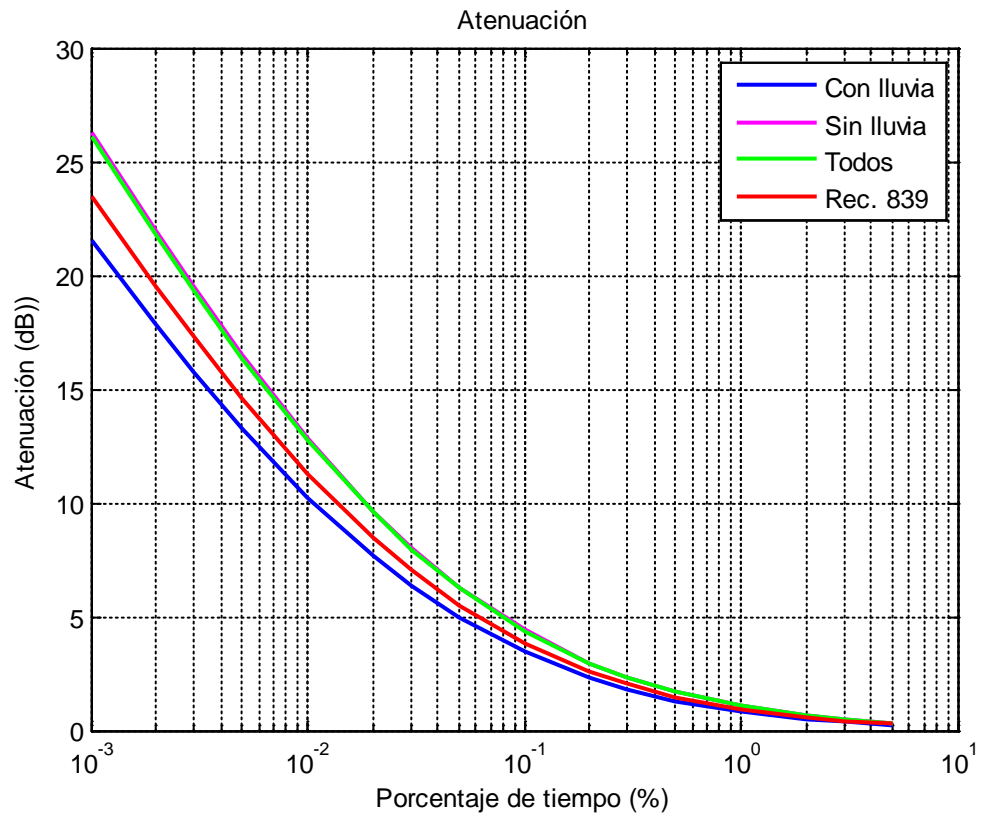


Fig. 5.2 Atenuación con isocero recomendada en Capítulo 4

En las Tablas 5.4 y 5.5 se pueden observar los datos de dichas atenuaciones para los años 2004 y 2007.

Tabla 5.4 Atenuación año 2004

Prob (%)	At (dB) - Año 2004		
	h_R sin lluvia	h_R con lluvia	h_R en todas condiciones
0,001	26,23	17,34	26,02
0,002	21,92	14,28	21,73
0,003	19,44	12,56	19,28
0,005	16,46	10,52	16,32
0,01	12,78	8,05	12,66
0,02	9,61	5,97	9,52
0,03	8,01	4,94	7,94
0,05	6,28	3,83	6,22
0,1	4,39	2,63	4,34
0,2	2,97	1,76	2,94
0,3	2,33	1,37	2,30
0,5	1,69	0,98	1,67
1	1,06	0,61	1,05
2	0,65	0,36	0,64
3	0,48	0,27	0,47
5	0,32	0,18	0,32

Tabla 5.5 Atenuación año 2007

Prob (%)	At (dB) - Año 2007		
	h_R sin lluvia	h_R con lluvia	h_R en todas condiciones
0,001	26,54	23,29	26,43
0,002	22,18	19,38	22,09
0,003	19,68	17,15	19,60
0,005	16,67	14,47	16,60
0,01	12,95	11,19	12,89
0,02	9,74	8,38	9,69
0,03	8,12	6,97	8,08
0,05	6,37	5,44	6,34
0,1	4,45	3,79	4,43
0,2	3,01	2,55	3,00
0,3	2,36	2,00	2,35
0,5	1,71	1,44	1,70
1	1,08	0,90	1,07
2	0,66	0,55	0,65
3	0,48	0,40	0,48
5	0,33	0,27	0,32

A continuación, en la Fig. 5.3 se van a representar las atenuaciones de estos dos años en función del porcentaje de tiempo, en cada una de las siguientes gráficas vamos a poder observar los tres casos diferenciados a los que nos estamos refiriendo a lo largo de todo el análisis.

Se puede observar claramente cómo para el año 2004 (isocero mínima) la curva de atenuaciones difiere bastante de las atenuaciones obtenidas con el dato isocero propuesto por la UIT, mientras que para el año 2007 (isocero máxima) se puede decir que las curvas prácticamente se solapan, por tanto, en este caso se podría afirmar que el dato de la UIT es muy exacto, con un error mínimo.

No obstante, hay que tener en cuenta de que los datos obtenidos en situaciones de lluvia son más imprecisos, ya que no se cuenta con demasiados datos y las medias de dichos valores pueden ser bastante escasos para algunos años.

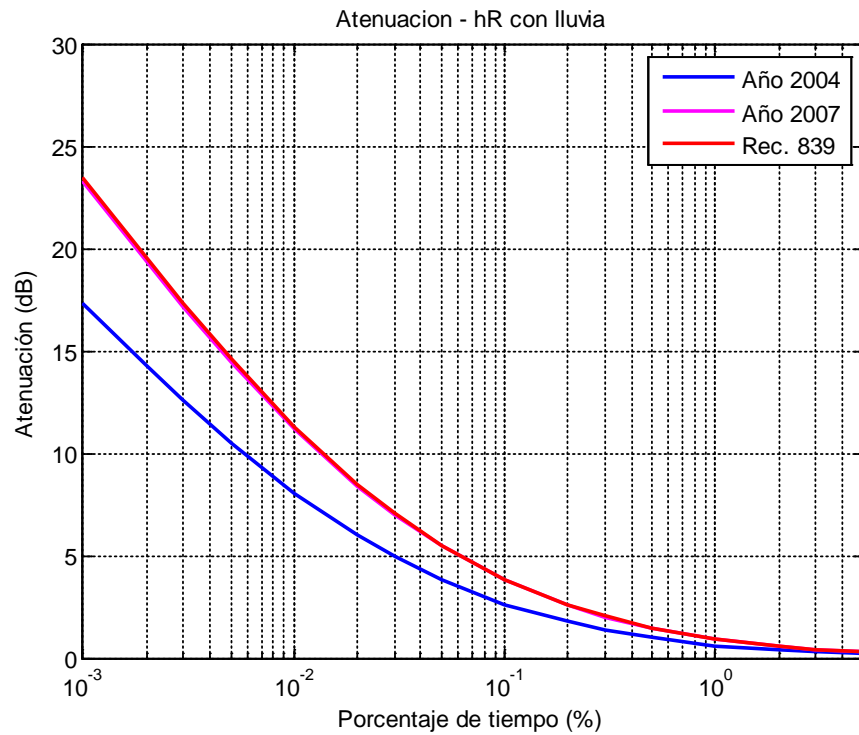


Fig. 5.3 Atenuación de años extremos (h_R con lluvia)

En las Fig. 5.4 y 5.5 se representan los datos para una isocero sin lluvia y para todas las condiciones respectivamente. En este caso, es fácil apreciar como ambas curvas, para los años 2004 y 2007, prácticamente se superponen. La curva de la UIT se encuentra por debajo de los datos reales, por tanto, en estos casos si se podría decir que se comete un cierto error en las atenuaciones.

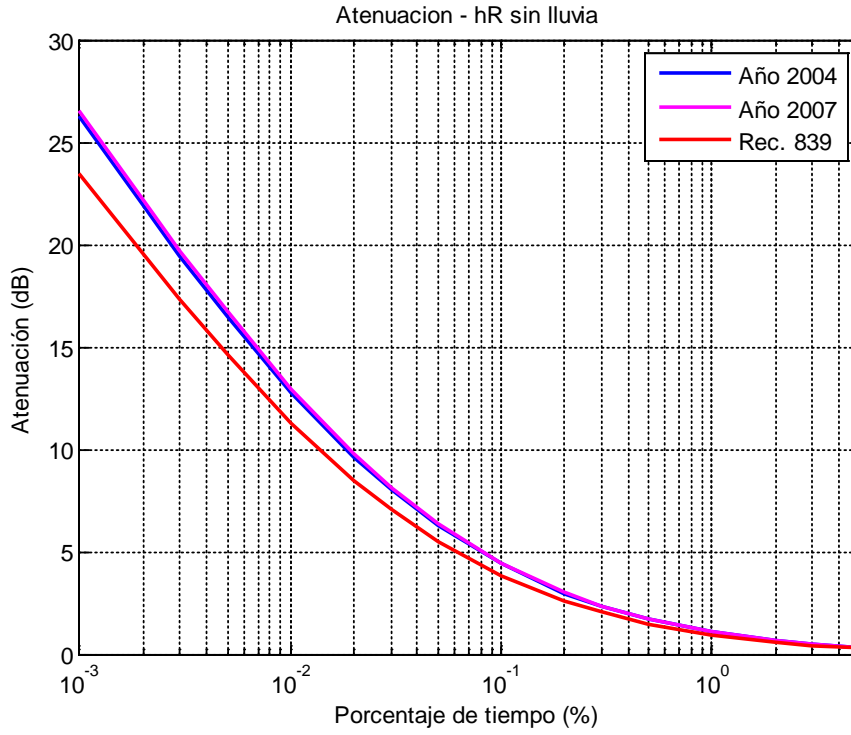


Fig. 5.4 Atenuación de años extremos (h_R sin lluvia)

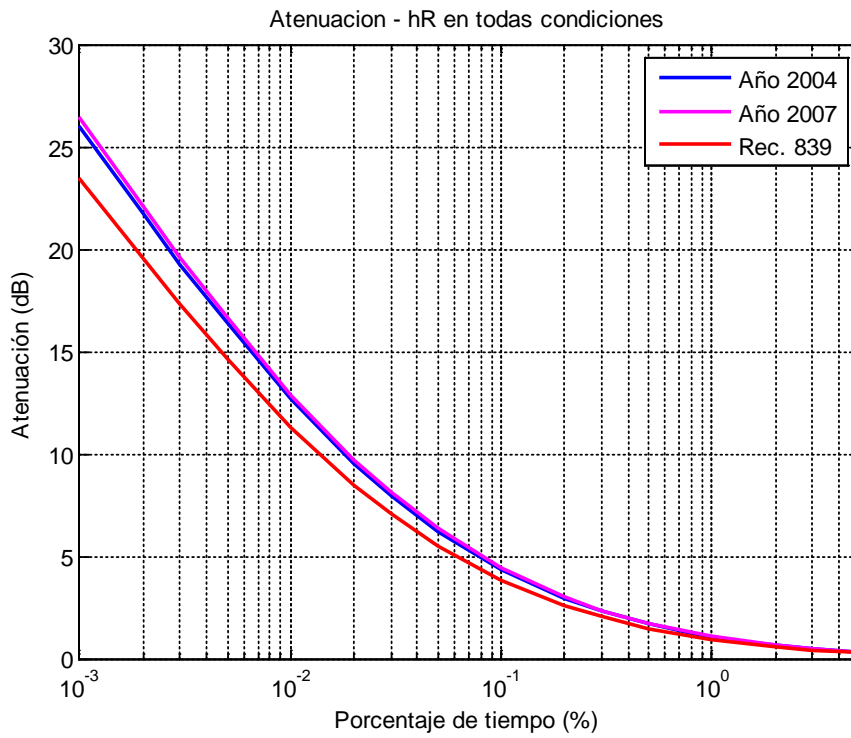


Fig. 5.5 Atenuación de años extremos (h_R en todas condiciones)

6 Capítulo 6 – Conclusiones y futuras líneas de investigación

6.1 Introducción

En este capítulo se recogen las conclusiones obtenidas del estudio experimental de la propagación en banda Ka en el enlace Tierra-Satélite con el satélite Hot Bird 13 de Eutelsat a la frecuencia de 19,701 GHz.

Los resultados obtenidos en el Proyecto se pueden dividir claramente dos tipos:

- Conclusiones para la determinación de la altura de lluvia (apartado 6.2)
- Conclusiones para la atenuación en un enlace inclinado (apartado 6.3)

Los primeros se expusieron en el capítulo 4 del libro, después de realizar el procesado de datos pertinente a los datos experimentales, se procedió al cálculo de la isoterma de 0 °C (isocero) y a su posterior comparación con el dato propuesto por la UIT en la Recomendación 839. Finalmente se propusieron unos datos de isocero más exactos.

Los segundos se explicaron en el capítulo 5, en el cual se tuvieron en cuenta los datos obtenidos en el capítulo 4 y se analizó la atenuación producida por la atenuación de la lluvia, utilizando la Recomendación 618 de la UIT, y la posterior comparativa de los resultados obtenidos utilizando dichos datos o los datos propuestos por la UIT en la Recomendación 839.

Finalmente se propondrán algunas líneas de investigación futura que se podrían realizar a partir del presente proyecto (apartado 6.4).

6.2 Conclusiones para la altura isocero

En este apartado se recogen las conclusiones derivadas de la comparación realizada entre la Recomendación 839 de la UIT y los datos experimentales obtenidos de los sondeos Madrid-Barajas y datos sinópticos:

- Se ha comprobado la influencia que tienen las precipitaciones en la altura de la isoterma a 0°C, sacando como conclusión final que en presencia de precipitación la isocero es significativamente inferior al dato obtenido en ausencia de precipitación.
- Las variaciones que presenta la isocero a lo largo de un año son bastante amplias, de hecho, se ha podido ver cómo la diferencia entre datos extremos es de unos 2000 metros, una variación a tener en cuenta.
- Teniendo en cuenta el periodo 2000 – 2013, sobre el que se ha realizado el estudio, se ha observado como las variaciones a lo largo de los años de la isocero no son muy significativas, con la excepción de los datos en presencia de precipitación, que debido a que se dispone de menos datos, la variación es más abrupta.
- Cómo conclusión final se admite que el dato isocero proporcionado por la UIT (2647 m) se desvía significativamente del valor medido en la mayoría de los casos. Para intentar solventar este error adicional se proponen unos datos de isocero más exactos que el propuesto por la UIT, en los cuales se tienen en cuenta las condiciones meteorológicas.

Tabla 6.1 Isoceros recomendadas

ISOCERO (m)		
Sin lluvia	Con lluvia	Todos
3129	2332	3098

6.3 Conclusiones para la atenuación

En este apartado se recogen las conclusiones derivadas de la comparación realizada entre la Recomendación 618 de la UIT, para un posible enlace de comunicaciones por satélite a 19,701 GHz y con un ángulo de elevación de 40.137 grados, y los datos experimentales obtenidos de los sondeos Madrid-Barajas y datos sinópticos:

- Utilizando los datos isocero recomendados en este estudio (Tabla 6.1) se observa como las atenuaciones difieren de las obtenidas utilizando el dato proporcionado por la Recomendación 839. Teniendo en cuenta los casos en los que había precipitación, se observa que la atenuación se encuentra unos dB por debajo de la atenuación de la UIT, por tanto es un error a tener en cuenta. En cuanto a los casos en los que no había precipitación se puede observar el mismo resultado pero esta vez las atenuaciones reales son mayores.
- Centrando el estudio en el periodo 2000 – 2013, y después de elegir los años más extremos en cuanto a la altura de la isocero en presencia de precipitación. Teniendo en cuenta solo los datos recogidos en presencia de precipitación, nos encontramos con dos casos totalmente opuestos:
 - o Para el año en el que la isocero es más baja, la diferencia de atenuaciones entre este año y los datos proporcionados por la UIT son muy dispares, tanto que la diferencia puede llegar a ser superior a 5 dB.
 - o En cuanto al año en el que la isocero es más elevada, la diferencia es prácticamente nula.

Por tanto, se puede decir que el dato proporcionado por la UIT es, en algunos casos, muy inexacto y puede interferir notablemente en los cálculos realizados para un enlace Tierra-Satélite.
- Para los casos en los que no había precipitación o no se tiene en cuenta las condiciones meteorológicas, la diferencia de atenuaciones es apreciable, aunque no tan abrupta como para los casos en presencia de precipitación.

6.4 Futuras líneas de investigación

El presente Proyecto Fin de Grado se ha centrado en el estudio detallado de la atenuación debida a las precipitaciones para el emplazamiento de Madrid. Dicho proyecto podría ser extendido mediante las siguientes líneas de investigación:

- Continuación de los estudios de atenuación por lluvia con mayor extensión de las bases de datos con el fin de obtener estadísticas a mayor plazo.
- Ampliación del estudio a otros emplazamientos peninsulares que disponen de datos de radiosondas.
- Repetición del estudio utilizando para ello los datos proporcionados por la base de datos ERA-Interim.
- Realización del estudio teniendo en cuenta otros modelos de predicción de atenuación en trayecto inclinado, con el fin de identificar el más exacto.
- Ampliación del experimento a otras frecuencias de satélite, o a diferentes tipos de enlace (radioenlaces terrestres...)

7 Bibliografía

-
- [1] Allnut J.E., "Satellite to ground radiowave propagation", 2nd ed., IET, London, UK, 2011.
- [2] COST 255 Final Report, "Radiowave propagation modelling for new satellite communication services at Ku-band and above". Cost Action Report, 2002.
- [3] Paraboni A., Martelucci A., Riva C., "Research on tropospheric propagation modeling in satellite radio links". Antennas and Propagation, 2007. Proc. Of Eucap 2007, Edinburgh, UK, 2007.
- [4] UIT-R, Recomendación P. 618-12, "Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-Espacio", 2015.
- [5] UIT-R, Recomendación P.676-10, "Atenuación debida a los gases atmosféricos", 2013.
- [6] Hernando R_abanos, J.M., Riera Sal__s, J.M., Mendo Tom_as, L., "Transmisi_ón por Radio", Editorial universitaria Ram_ón Areces, 7a edici_ón, Madrid 2013.
- [7] Salonen E., Karhu, S. and Hyvonen, R., "Study of improved propagation predictions", ESA/ESTEC Contract 9455/91/NL/LC(SC), Final Report, 1994.
- [8] ITU-R, Recommendation P.840-6, "Attenuation due to clouds and fog", 2013.
- [10] Dissanayake A., Allnutt J., and Haidara F., "A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along earth-satellite paths", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 45, no.10, pp. 1546-1558, 1997.
- [11] UIT-R, "Proyecto de Manual sobre Radiometeorolog__a", Documento 3/11-S de la Comisión de Estudio 3, marzo 1995.
- [12] ITU-R Recommendation P.839-4, "ITU-R rain height model for prediction method", 2013.
- [13] K.L.S. Gunn y G.D. Kinzer, "The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air", J. Meteorol., vol. 24, 1976.
- [14] UIT-R, Recomendaci_ón P.838-3, "Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción", 2005.
- [15] UIT-R, Recomendación P. 837-6, "Características de la precipitación para establecer modelos de propagación", 2012.
- [16] C. Capsoni, F. Fedi, C. Magistroni, A. Pawlina y A. Paraboni, "Data and theory for a new model of the horizontal structure of rain cells for propagation applications", Radio Science, vol. 22, 1987.
- [17] W.L. Stutzman y K.M. Yon, "A simple rain attenuation model for Earth-Space radio links operating at 10-35 GHz", Radio Science, vol. 21, 1986.
- [18] COST Action 255, "Radiowave propagation modelling for SatCom services at Kuband and above", Final Report, SP-1252, ESA Publications Division, Noordwijk, Holanda, 2002.
- [19] Vanhoenacker-Janvier D., Oestges C., Matelucci A., "Scintillation and depolarization models for satellite communications in the 20-50 GHz band", Indian Journal of Radio & Space Physics, vol.36, pp 369- 374, October 2007.
- [20] Mari Cruz Moro, "Efectos de los fenómenos atmosféricos sobre enlaces Tierra-Satélite en Madrid", 2001.

[21] Javier Sepúlveda, “Análisis de Resultados Experimentales de Propagación en Trayecto Inclinado en Banda Ka”, 2013.

[22] D. Gustavo Adolfo Siles Soria, “Estudio sobre propagación atmosférica en la banda de los THz: influencia de gases y nubes en 100 y 300 GHz”, 2012.