

ALGORITMOS DE APRENDIZAJE APLICADOS A LA MONITORIZACIÓN METEOROLÓGICA MEDIANTE REDES INALÁMBRICAS DE COMUNICACIONES DISTRIBUIDAS

Iván Daniel Guerra Moreno

Directores: Dr. Juan Luis Navarro Mesa
Dr. Eduardo Hernández Pérez

TESIS DOCTORAL



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Instituto Universitario de Ciencias
y Tecnologías Cibernéticas

D. AGUSTÍN J. SÁNCHEZ MEDINA, SECRETARIO DEL INSTITUTO
UNIVERSITARIO DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS CIBERNÉTICAS DE
LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

CERTIFICA,

Que la Comisión Ejecutiva del Instituto, en su sesión de fecha ocho de junio de dos mil diecisiete, tomó el acuerdo de dar el consentimiento para su tramitación a la tesis doctoral titulada "Algoritmos de Aprendizaje Aplicados a la Monitorización Meteorológica Mediante Redes Inalámbricas de Comunicaciones Distribuidas", presentada por el doctorando D. Iván Daniel Guerra Moreno y dirigida por los doctores D. Juan Luis Navarro Mesa y D. Eduardo Hernández Pérez.

Y para que así conste, y a efectos de lo previsto en el artículo 6 del Reglamento para la elaboración, tribunal, defensa y evaluación de tesis doctorales de esta Universidad, firmo la presente en Las Palmas de Gran Canaria a ocho de junio de dos mil diecisiete.

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

DEPARTAMENTO DE SEÑALES Y COMUNICACIONES

**PROGRAMA DE DOCTORADO
CIBERNÉTICA Y TELECOMUNICACIÓN**



TESIS DOCTORAL

**ALGORITMOS DE APRENDIZAJE APLICADOS A LA
MONITORIZACIÓN METEOROLÓGICA MEDIANTE REDES
INALÁMBRICAS DE COMUNICACIONES DISTRIBUIDAS**

Autor: Iván Daniel Guerra Moreno

Director: Dr. Juan Luis Navarro Mesa

Director: Dr. Eduardo Hernández Pérez

El Director

El Director

El Doctorando

Las Palmas de Gran Canaria, Junio de 2017

Título:

Algoritmos de aprendizaje aplicados a la monitorización meteorológica mediante redes inalámbricas de comunicaciones distribuidas.

Autor:

Iván Daniel Guerra Moreno

Directores:

Dr. Juan Luis Navarro Mesa

Dr. Eduardo Hernández Pérez

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
Programa Oficial de Doctorado en Cibernética y
Telecomunicación.

Las Palmas de Gran Canaria, junio de 2017

A mi familia,

En especial a mis padres por todos esos momentos que se ofrecieron para que descansara un poco y las labores de guardería de las tardes. A mi hermano y cuñada por esas mañanas con Enoc.

A mi esposa Verónica

Mi preciosa rubita, mi sol de cada mañana, que trajo al tesoro mas grande y siempre estuvo ahí apoyando y encargándose de todo cuando yo no podía más.

A Enoc mi hijo

Esto es por ti, por tu futuro

Agradecimientos

Durante los años en los que nos hemos enfrentado a esta tesis han aparecido multitud de personajes que por unos motivos u otros han influido en la finalización de esta tesis.

Algunos por su constancia y apuesta continua por mi como es el caso de Juan Luis que año tras año y mes tras mes hacía magia para que yo siguiera al pie del cañón, otros como Eduardo sirviendo de válvula de escape en búsqueda de la serenidad en los momentos más estresantes, gracias sinceramente por haber soportado mi montaña rusa de vida sobre todo este último año y aun así siguieron apoyando y dándolo todo hasta el último minuto.

Gracias a los que considero compañeros del pabellón B y alguno foráneo, Juanma y los cafés descafeinados de desconexión del mundanal ruido que tenemos en la cabeza, Manolo y sus tertulias filosóficas donde encontramos mil soluciones para arreglar el mundo que jamás pondremos en práctica. Toni con su optimismo sin fronteras, Guillermo, Elena y Fátima, por sus constantes ánimos sin fatiga siempre interesándose por cómo van los avances, Fidel y sus bandas sonoras de fondo que amenizaban las tardes, Pepe por su humor negro siempre intentando levantar el ánimo. Además de muchos otros, compañeros de aventuras doctorales, cada uno en su rama, pero que despertaron esa chispa competitiva que te hace no tirar la toalla.

Índice

Agradecimientos	IV
Índice	VI
Resumen	X
Capítulo 1 Introducción	12
1.1 Motivación y objetivos	13
1.1.1 Medición de precipitaciones	13
1.1.2 Medición de temperatura ambiente	19
1.1.3 Medición de radiación solar	19
1.2 Contribuciones	21
1.3 Organización de la memoria.....	22
Capítulo 2 Condiciones meteorológicas y sus efectos sobre los radioenlaces de microondas	24
2.1 Meteorología, tiempo y clima.	25
2.1.1 Efectos del Sol sobre la Tierra.	25
2.1.2 La atmosfera y el Aire.....	28
2.1.3 Elevación el aire.	28
2.1.4 Precipitación.....	29
2.1.5 Presión del aire y viento.....	32
2.1.6 La temperatura.	32
2.1.7 Espectro electromagnético	33
2.1.8 Humedad	36
2.2 Sistemas de observación meteorológicas.	36
2.2.1 estación meteorológica automática (EMA).....	37
2.2.2 El radar meteorológico.	39
2.2.3 Observaciones desde satélites.....	41
2.2.4 Sistemas de retransmisión de datos meteorológicos de aeronaves (AMDAR).	41
2.2.5 Observaciones marinas.	42
2.2.6 Técnicas de teledetección para la capa límite y la troposfera. ..	43
2.3 Técnicas de predicción meteorológicas.....	45
2.4 Efectos de la meteorología en las redes de radioenlaces terrestres de microondas.	46

2.5	Modelos de propagación.	48
2.6	Parámetros de control de comunicaciones de microondas.....	57
Capítulo 3 Fuentes de datos y generación de las señales		59
3.1	Datos meteorológicos y la señal asociada.....	60
3.1.1	Obtención y generación de la base de datos	60
3.1.2	Tratamiento de los datos y generación de la señal meteorológica 64	
3.2	Datos de potencia y la señal asociada	66
3.2.1	El subsistema ODU-Antena	67
3.2.2	Radioenlaces con una antena y con diversidad	68
3.2.3	Los dispositivos ODU.....	71
3.2.4	Datos de radioenlaces	75
3.2.5	Características generales de los radioenlaces	77
Capítulo 4 Algoritmos para la detección y estimación de precipitación de lluvia.....		82
4.1	Las precipitaciones y su influencia en la atenuación	82
4.2	La señal de potencia recibida en nuestros radioenlaces.....	87
4.2.1	Distinción de presencia de lluvia en enlaces unidireccionales ..	88
4.2.2	Distinción de presencia de lluvia en enlaces bidireccionales.....	89
4.2.3	Relación entre la meteorología y la potencia recibida.....	92
4.3	Detectabilidad de las precipitaciones y su cuantificación	100
4.4	Algoritmos para la detección.....	103
4.4.1	Análisis de los niveles y su potencial uso en detección	103
4.4.2	Algoritmo basado en clasificación binaria mediante SVM.....	105
4.5	Algoritmos para la detección y cuantificación.....	106
4.5.1	Algoritmo basado en técnicas de filtrado de la señal	107
4.5.2	Algoritmo basado en redes neuronales	115
Capítulo 5 Algoritmos para la estimación de temperatura ambiente a partir de la temperatura de ODU		130
5.1	Medición de temperatura.....	131
5.1.1	Descripción del equipo y su validez como elemento de medida. 133	
5.2	Algoritmo de estimación de temperatura ambiente.	142
5.2.1	Algoritmo basado en la estimación por días.	143

5.2.2	Algoritmo basado en la estimación estacional	145
5.2.3	Algoritmo combinado diario y estacional	147
Capítulo 6 Algoritmos para la medición de radiación solar a partir de agrupaciones de equipos exteriores		150
6.1	Relación radiación y temperatura.....	150
6.2	Temperatura y capa de nubes	155
6.3	Calculo de clear sky	158
6.4	Calculo de radiación	161
6.5	Comprobación y tasa de error	165
Conclusiones		176
Líneas futuras.....		178
Referencias bibliográficas generales		180
ANEXOS		186
Anexo I.....		187
	Tablas de estaciones meteorológicas en la BBDD.....	187
	Tablas de Radioenlaces en la BBDD.....	188
Anexo II Derechos de uso de la información		192
	Nota Legal AEMET	192
	Aviso Legal Open Data del Gobierno de Canarias.....	197
	.....	202

Resumen

En esta tesis utilizamos una red de radioenlaces ya desplegados, y estaciones meteorológicas para la extracción de conocimiento. Las radiocomunicaciones de los radioenlaces y sus parámetros de control de funcionamiento ofrecen la posibilidad de crear valor añadido a la red a muy bajo coste. Para ello aprovechamos algo que con frecuencia es visto como un problema como es el efecto que los eventos meteorológicos ejercen sobre la transmisión electromagnética, vistos éstos como causantes de atenuaciones y degradaciones sobre la señal recibida. Para ello desarrollamos una serie de algoritmos y métodos que nos permiten extraer información sobre la meteorología de la zona donde se encuentren los radioenlaces terrestres basándonos en los efectos de las atenuaciones en el medio de propagación [GUERRA,2016] y las variaciones que se producen en los propios dispositivos de transmisión y recepción. Se abre así un amplio espectro de posibilidades científico-técnicas, parte de las cuales hemos abordado en esta tesis.

Tres son las grandes áreas en las que hemos trabajado en cuanto a observación meteorológica: Medición de precipitaciones que se producen en el vano del radioenlace. Estas dan información de gran importancia para muchas aplicaciones en los sectores primario (p.e., agricultura, ganadería) o terciario (p.e., turismo), así como en el seguimiento de eventos meteorológicos adversos. Medición de la temperatura ambiente basado en las variaciones de temperatura sufridas en los dispositivos de transmisión. Y medición de la radiación solar mediante las variaciones de temperatura de agrupación de dispositivos cercanos, varios metros, unos de otros.

Como resultados finales se han generado la primera base de datos con los niveles de potencia recibidas, temperaturas de los dispositivos instalados en las torres de comunicaciones y relaciones señal ruido durante un periodo de varios años con más de un centenar de radioenlaces (134 radioenlaces) que cubren un área de más de 3594.48 kilómetros cuadrados suministrados por la Consejería de Política Territorial, Sostenibilidad y Seguridad del Gobierno de Canarias. Así mismo se ha generado otra base de datos con los datos de estaciones meteorológicas tanto de la Agencia Estatal de Meteorología como de la Consejería de Política Territorial, Sostenibilidad y Seguridad del Gobierno de Canarias.

Se han creado algoritmos de detección de precipitación por lluvia así como algoritmos de detección y cuantificación de precipitación debida a la lluvia. Algoritmos y métodos de estimación de temperatura ambiente por medios indirectos y de estimación de radiación solar por combinación de medios indirectos. Que a su vez han generado dos patentes con un método de estimación de temperatura ambiente con número de registro P201700134 [GUERRA,2017Pa] y una patente con un método de estimación radiación solar con número de registro P201700135 [GUERRA,2017Pb].

Capítulo 1

Introducción

Desde comienzos del siglo XXI las redes de telecomunicación se han ido integrando como parte esencial de la sociedad. Las tecnologías de la información han llegado a casi todos los rincones del planeta suministrando nuevos servicios y posibilidades. A grandes rasgos, estas redes de comunicación pueden ser cableadas o inalámbricas. Nuestro interés se centra en las redes inalámbricas, con especial énfasis en los radioenlaces terrenales en la banda de microondas. Estas redes dan soporte a servicios de telecomunicación donde priman la estabilidad y la calidad de la información o los datos transmitidos. En esta tesis la fase de diseño de la red ya está superada y el despliegue de la misma marca para nosotros un comienzo conceptual de nuestro trabajo donde nos planteamos la posibilidad de darle valor añadido. Para ello aprovechamos algo que con frecuencia es visto como un problema como es el efecto de eventos meteorológicos sobre la transmisión electromagnética, vistos éstos como causante de atenuaciones y degradaciones sobre la señal recibida.

1.1 Motivación y objetivos

Conceptualmente hablando convertimos los eventos meteorológicos en objeto de nuestro interés, y aprovechamos su efecto sobre las atenuaciones como observables que nos permiten desarrollar algoritmos y métodos de observación meteorológica. Se abre así un amplio espectro de posibilidades científico-técnicas, parte de las cuales hemos abordado en esta tesis.

Tres son las grandes áreas en las que hemos trabajado en cuanto a observación meteorológica:

- Medición de precipitaciones. Estas dan información de gran importancia para muchas aplicaciones en los sectores primario (p.e., agricultura, ganadería) o terciario (p.e., turismo), así como en el seguimiento de eventos meteorológicos adversos (p.e., tormentas).
- Medición de la temperatura ambiente. Esta magnitud es una de las más conocidas y útiles.
- Medición de la radiación solar. Es una de las principales causas de la climatología y, por consiguiente, su conocimiento es fundamental.

Objetivo: El objetivo primario es la localización de la información de los parámetros de control de una red de radioenlaces que transmita en frecuencias cercanas a los 23 GHz y la creación de un base de datos con dicha información para el posterior uso de los mismos y ofrecer dicho producto a la comunidad científica para su uso.

1.1.1 Medición de precipitaciones

Visto un radioenlace en su conjunto, para nuestro enfoque distinguimos tres ámbitos de interés:

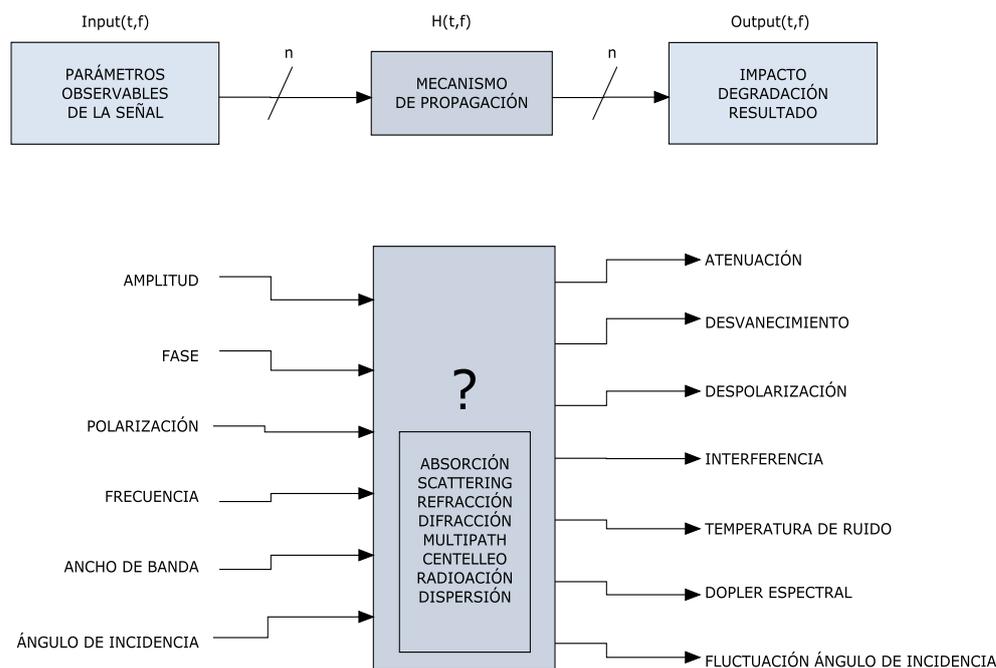


Figura 1.1 Parámetros que originan degradación en la señal.

1. Parámetros observables.
2. Mecanismos que afectan a la propagación.
3. Impacto y degradación sobre la señal de interés.

Los parámetros observables son los que se establecen de manera básica en el diseño de la red, Figura 1.1. Entre estos parámetros están la amplitud, la fase, la polarización, la frecuencia, el ancho de banda de la señal y su ángulo de incidencia. Estos parámetros observables se ven afectados por unos mecanismos que intervienen en la propagación. Entre los mecanismos de la propagación están la absorción de la señal, la refracción, la difracción [ITU-R P, 526 -13], el multitrayecto o multicamino (multipath), el centelleo (scintillation). Una situación muy especial es la que se plantea bajo el concepto de dispersión. Esta puede ser debida a la estructura molecular del medio (p.e., Rayleigh scattering) o a las propiedades dieléctricas del mismo (dispersión) que afecta en frecuencia.

Destacamos en esta tesis la absorción, particularmente, la debida a los fenómenos atmosféricos. Los efectos de estos mecanismos son diversos, así podemos distinguir:

- Atenuación de la señal.
- Desvanecimiento (fading).
- Despolarización.
- Interferencias.

- Temperatura de ruido.
- Variación del espectro.
- Fluctuaciones del ángulo de incidencia.

En esta tesis centramos nuestra atención en dos, atenuación y desvanecimiento, pues son las más influidas por las condiciones meteorológicas. Hay otros efectos como las fluctuaciones debidas, p.e., al viento, que pueden aparecer y confundirse con las anteriores al manifestarse en los niveles de potencia recibida.

Hipótesis 1: La idea subyacente en la cadena “parámetros-mecanismos-degradación” es centrarse en el par “parámetros-degradación”. Con esta idea en mente, hacemos una de nuestras hipótesis principales, esta es, que podemos obtener información acerca de los “mecanismos de propagación” y, particularmente, sobre las condiciones atmosféricas, por ejemplo, presencia de hidrometeoros. Dicho de otra manera, vemos la atmósfera como un sistema oculto para un observador situado en el emisor o el receptor, y este sistema tiene capacidad de modificar la señal transmitida. Procesando convenientemente la señal recibida podemos medir parámetros atmosféricos, p.e., precipitación de lluvia.

En la Tabla 1.1 presentamos una relación entre causas de la atenuación respecto a los parámetros medibles de la misma y el efecto en el medio de transmisión.

Se entiende, pues, que para nosotros el concepto de “observable” sea fundamental, esto es, constituye la principal fuente de información con que trabajaremos. Abundemos un poco más en este concepto. Si bien cuando hablamos de señal es común referirse a las ondas electromagnéticas emitidas o recibidas, en esta tesis hablamos de un concepto diferente. Este viene condicionado por el hecho de que nuestros observables serán los niveles de potencia recibida que proporcionan los radioenlaces.

CAUSA \	PARÁMETROS						EFECTO						
	AMPLITUD	FASE	POLARIZACIÓN	FRECUENCIA	ANCHO DE BANDA	ÁNGULO DE INCIDENCIA	ATENUACIÓN	DESVANECIMIENTO	DESPOLARIZACIÓN	INTERFERENCIA	TEMPERATURA DE RUIDO	DOPPLER ESPECTRAL	FLUCTUACIONES ANGULO DE
ABSORCIÓN	X	.	X	.	.	.	X	X	X	.	X	.	.
SCATTERING	X	X	X	.	X	X	X	X	X	X	.	X	X
REFRACCIÓN	X	X	X	.	X	X	X	X	.	X	.	X	X
DIFRACCIÓN	X	X	X	.	X	X	X	X	X	X	.	X	X
MULTIPATH	X	X	X	.	X	X	X	X	X	X	.	.	X
CENTELLEO	X	X	.	X	.	.	X	X	X	X	.	X	.
RADIACIÓN	X	X	.	.	.	.	.	.	X	X	X	.	X
DISPERSIÓN	.	.	.	X	X	.	.	.	.	.	.	X	.

Tabla 1.1 Relación entre causas de atenuación respecto a los parámetros medibles y el efecto en el medio de transmisión

Así, la señal está constituida por valores de potencia media ordenados temporalmente según se van calculando. Estos valores se dan cada 15 minutos, y representan una media de la potencia medida en intervalos de 100 ms. durante esos minutos.

Es importante destacar que, si bien los mecanismos de propagación pueden ser una incógnita, están muy estudiados y el resultado se recoge en una serie de Recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU).

Radio Propagation Model	Applied Phenomena and Parameters	Applied Frequency Ranges	Corresponding ITU Rec. and Ref.
Gaseous Attenuation Model	Oxygen and water vapor absorption	> 1.0 GHz	ITU-R P 676, ITU-R P 836
Scintillation and Multipath Model for Troposphere	Scintillation and multipath fading	> 1.0 GHz	ITU-R P 618
Attenuation Frequency Scaling Model	Rain attenuation	7 -50 GHz	ITU-R P 618
Cumulative Distribution of Fade Duration Model	Fading duration	> 0.4	[IPPOLITO,2000]
Diffusely Scattering Wave Model	Satellite to mobile with Doppler shift	> 0.1	[IPPOLITO,2000]
Empirical Roadside Shadowing Model	Canopy shadow for land mobile	> 0.1	[IPPOLITO,1981]
Maritime Link: Fading Due to Sea Reflection	Rough sea surface for marine mobile	0.8 - 8.0 GHz	ITU-R P 680
Altshuler Fog Model	Fog attenuation	5 -100 GHz	ITU-R P 840
ITU Cloud Model	Cloud attenuation	5 -100 GHz	ITU-R P 840
Radio Noise Model	Galactic and atmospheric noise	0.1 -100 GHz	ITU-R P 372

ITU Rain Model	Rain attenuation, rain rate distribution	1-400 GHz	ITU-R P 618, ITU-R P 837, ITU-R P 838
Global Rain Model	Rain climate zones	1-400 GHz	[CRANE,2003b]
Wet Antenna Surface Model	Wet factor	~ 20 GHz	[GOLSHAN N,1999]
Ice and Rain Depolarization Model	Co-polar attenuation (CPA) and XPD	4- 35 GHz	ITU-R P 618, ITU-R P 530
Site Diversity Model	Site separation during rain	10 - 30 GHz	ITU-R P 618
Line of Sight with and Multipath Model	Space to Earth or Earth to Earth	> 2.0 GHz	ITU-R P 530, ITU-R P 619
Terrain Diffraction Model	Knife-edge and rounded surface	0.03 - 10 GHz	ITU-R P 526, ITU-R P 530
Transhorizon Propagation Model	Anomalous models: Ducting and scattering	> 0.7 GHz	ITU-R P 452

Tabla 1.2 Tabla de modelos aplicables a cada fenómeno, rango de frecuencia de aplicación y recomendación ITU que la describe.

En estas recomendaciones (Tabla 1.2) tenemos una buena fuente de conocimiento y de expresiones matemáticas que relacionan parámetros, mecanismos de propagación y efecto para la mayoría de los factores a estudiar. Sin embargo, no cubre todo el rango de posibles efectos, como por ejemplo el polvo en suspensión o la humedad de las antenas. Los datos disponibles muestran que los efectos de atenuación de arena para frecuencias por debajo de 5 GHz, casi se pueden despreciar. Por tanto, las recomendaciones de la ITU son de gran ayuda para comprender dichos mecanismos y trabajarlos cuando exista tal recomendación, en caso de no existir nos deberemos apoyar en los datos e investigaciones previas.

Es objeto específico el detectar y cuantificar cuáles son las causas que generan los mecanismos de propagación. Entre estas causas se encuentran las atenuaciones debidas a los gases atmosféricos, precipitaciones, calimas, temperaturas, columnas de humo, objetos que obstruyen la señal, etc.

En la Figura 1.2 podemos ver representada una relación de fenómenos causantes de efecto sobre la señal, destacando la franja de frecuencia en la que más hincapié haremos (18 GHz, 23 GHz).

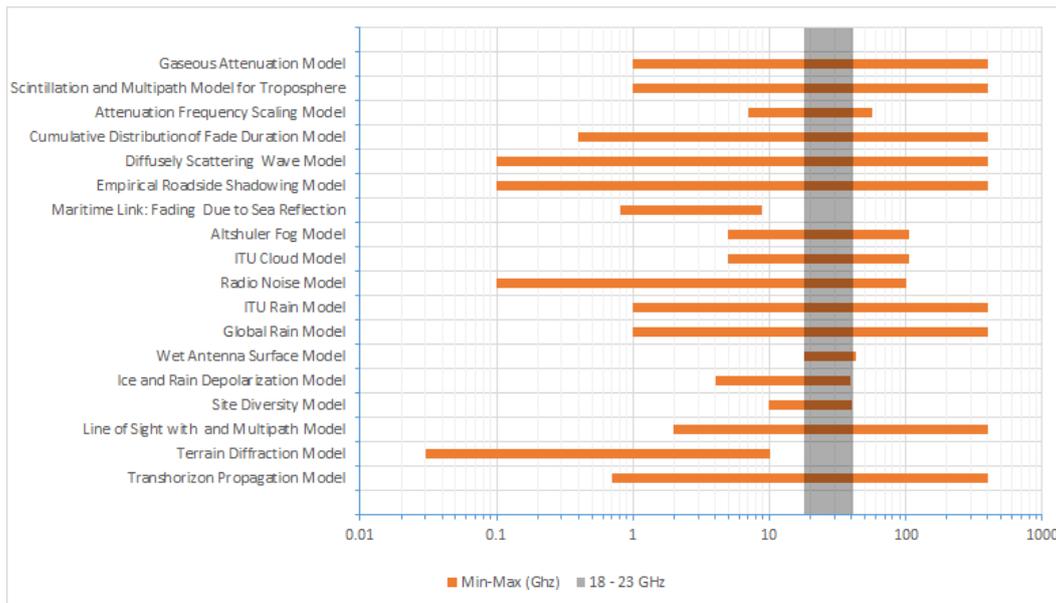


Figura 1.2. Frecuencia de efecto de los fenómenos (Naranja), Banda de frecuencia del presente estudio (gris)

En definitiva, esta tesis está centrada en detectar las causas de los desvanecimientos y atenuaciones presentes en las señales recibidas con el fin de cuantificar dichos eventos, en su mayoría atmosféricos, que permitan realizar una estimación de la meteorología del área geográfica donde se encuentren los radioenlaces.

Objetivo: El objetivo final es la utilización de la información de calidad de la señal de los radioenlaces para la extracción de conocimiento como refuerzo a otros métodos de observación meteorológica ya instalados (p.e., estaciones meteorológicas) o bien como dato aproximado en lugares carentes de estaciones meteorológicas.

A diferencia de las estaciones meteorológicas consistentes en emplazamientos puntuales en localizaciones determinadas que ofrecen las mediciones cada periodo de tiempo determinado para unas coordenadas dadas, las atenuaciones entre los radioenlaces suministran información de lo que sucede en todo el trayecto.

1.1.2 Medición de temperatura ambiente

A partir del concepto de ODU introducido en el apartado anterior, y recuperando el hecho de que dispone de un sensor de temperatura que se ve afectada por varias componentes entre las que destacamos dos principales: el consumo energético en su funcionamiento y la temperatura ambiente. El hecho de que una de las componentes de temperatura se deba al ambiente da lugar a la siguiente hipótesis.

Hipótesis 2: La temperatura del ambiente se puede medir indirectamente utilizando 1 dispositivo ODU, y haciendo el procesado pertinente con la temperatura medidas en su correspondiente sensor.

Objetivo: El objetivo final es la utilización de la información de la temperatura de ODU para la extracción de conocimiento referente a la temperatura ambiente o del aire en una zona determinada como refuerzo a otros métodos de observación meteorológica ya instalados (p.e., estaciones meteorológicas) o bien como dato aproximado en lugares carentes de estaciones meteorológicas.

1.1.3 Medición de radiación solar

Es bien sabido que la posición y los movimientos del planeta Tierra respecto al Sol determinan en gran medida la climatología y meteorología de cualquiera de las zonas de nuestro planeta. Veamos algunos movimientos que afectan a la radiación solar.

- La **Translación**, que consiste en el movimiento elíptico del planeta respecto al Sol, situado éste en uno de los focos de dicha elipse. Se debe a la atracción gravitacional del Sol. Hay que tener en cuenta también que el eje terrestre forma un ángulo de unos 23.5° con respecto a la normal de la eclíptica dando lugar a un fenómeno denominado oblicuidad de la eclíptica. Esta inclinación, combinada con la *Traslación* es la causa de las estaciones anuales, derivadas de los cambios en el ángulo de incidencia de la radiación solar y en la duración de las horas de luz que esa oblicuidad produce.
- La **Rotación**, que consistente en el giro de la tierra sobre su propio eje. En este punto hay que distinguir entre día sideral y día solar. Una revolución completa cada 23 horas 56 minutos y 4.1 segundos se denomina día sideral mientras que un día solar se produce cada 24 horas debido al avance del planeta sobre su órbita.

Hay otros fenómenos como como la precesión, nutación y bamboleo, que veremos en el Capítulo 2, y que también afectan a la radiación.

Los cambios estacionales, periódicos y cuasi-periódicos de orientación de la tierra provocan que la posición relativa de la Tierra respecto al Sol cambie. Esto se traduce en variaciones de la cantidad de luz recibida y por ende del calor recibido en determinadas zonas del esferoide. Estas variaciones de radiación solar y calor originan cambios en las temperaturas de la atmosfera que, al no producirse siempre en la misma zona como consecuencia de los movimientos del planeta, generan gradientes de temperatura.

Son muchos los efectos de la radiación solar, y está fuera del alcance de esta tesis su estudio. Si nos vamos a fijar en uno de ellos, este es, cómo afecta a la temperatura de los equipos de radiocomunicación. Concretamente, el efecto de la radiación solar sobre un subsistema (o dispositivo) presenta en dichos equipos, nos referimos a los ODU y será explicado con más detalle en el capítulo 3 y posteriores. En su interior hay una temperatura que se necesita medir para hacer un seguimiento de cómo funciona. A tal efecto, los ODU poseen en su interior un sensor de temperatura. Es el caso que, en muchos enlaces de comunicaciones, disponemos de 2 ODU, hecho este que nos permite hacer hipótesis acerca de lo que ocurre en el exterior, dando lugar a una de las tres grandes hipótesis en esta tesis doctoral.

Hipótesis 3: La radiación solar se puede medir utilizando al menos 2 dispositivos ODU suficientemente cercanos, y haciendo el procesado pertinente con las temperaturas medidas en sus correspondientes sensores.

Objetivo: El objetivo final es la utilización de la información de la temperatura de ODU mediante la combinación de varios de ellos para la extracción de conocimiento referente a la radiación solar en una zona determinada como refuerzo a otros métodos de observación meteorológica ya instalados (p.e., estaciones meteorológicas) o bien como dato aproximado en lugares carentes de estaciones meteorológicas.

1.2 Contribuciones

La realización de esta tesis ha aportado como fruto de los estudios realizados sobre la propagación de la señal de radiofrecuencia en espacios abiertos en las frecuencias de gigahercios un artículo en el xxxi simposio nacional de la unión científica internacional de radio URSI2016 titulado “Localización libre de dispositivo de elementos móviles en exteriores mediante wsn de baja densidad y técnicas de clasificación” de los autores: Iván Daniel Guerra Moreno, Juan Luis Navarro Mesa, Nieves Sayoa Paíz Casanova, Eduardo Hernández Pérez, Antonio G. Ravelo García y consistente en el estudio de sistemas basados en Localización Libre de Dispositivo (DFL, por sus siglas en inglés) los cuales están basados en la estimación de la posición de una persona u objeto que no porta ningún tipo de dispositivo electrónico o señalizador. En este artículo abordamos este tipo de sistemas mediante el uso de redes inalámbricas de sensores trabajando en la banda de 2’4 GHz. En estas redes los objetos móviles causan variaciones de los niveles de potencia de recepción a los cuales hacemos un seguimiento a través de los RSSi (Received Signal Strength). Los valores de RSSi constituyen la información base que alimenta unos clasificadores que caracterizan las zonas bajo estudio.

También como resultado del prolongado tiempo de estudio se ha creado una base de datos de potencias de recepción con los datos de 136 enlaces desde 2013 hasta 2017 que serán de libre acceso para futuros trabajos y cuyas características se explican en el capítulo correspondiente. Hay que recordar que actualmente las empresas y gobiernos explotadoras de sus redes de radiofrecuencia no guardan esta información más allá de 45 días por lo que el haber creado la base de datos posibilita el acceso a una gran fuente de información que de otra manera no estaría disponible.

La falta de artículos científicos sobre algunos de los puntos de estudio de esta tesis, o de referencias directas a los temas en cuestión por otros investigadores, han posibilitado la creación de dos patentes, actualmente en proceso de revisión por la Oficina Española de Patentes y Marcas sobre la detección de temperatura del aire y sobre la detección de la irradiancia solar mediante dispositivos no diseñados para este fin, más exactamente mediante los ODU de antenas de radiocomunicaciones. Los métodos patentados son de vital importancia dado que las redes de telecomunicaciones, así como las de telefonía móvil crecen a mucha mayor velocidad que las redes de estaciones meteorológicas tanto en espacio como en densidad por lo que de no patentarlos se podría perder una oportunidad de explotación. Las patentes tituladas “*Método de estimación de radiación solar mediante agrupaciones de equipos en exteriores*”. Y “*Método de medición de temperatura del ambiente basado*

en dispositivos externos con medidores de temperatura de funcionamiento del dispositivo” de los autores: D. Iván Daniel Guerra Moreno, D. Juan Luis Navarro Mesa, D. Eduardo Hernández Pérez, D. Antonio Gabriel Ravelo García ya se encuentran actualmente registradas.

Por último, y no menos importante, hay que destacar que esta tesis doctoral está en la génesis de uno de los proyectos de cooperación internacional FEDER del programa INTERREG MAC 2014-2020 aprobados en la primera convocatoria de 2016. Se trata del Proyecto ViMetRi-MAC, código MAC/3.5b/065 titulado *Sistema de vigilancia meteorológica para el seguimiento de riesgos medioambientales* con acrónimo ViMetRi-MAC. La finalidad del mismo es la puesta en marcha de un sistema integral de vigilancia meteorológica basado en la combinación de redes de radioenlaces, estaciones meteorológicas, video vigilancia y audio vigilancia. El ámbito de implantación está en las islas Canarias y de Madeira, y participan desde Canarias junto con la Universidad de las Palmas de Gran Canaria (Jefe de Filas), el Gobierno de Canarias a través de la Dirección General de Telecomunicaciones y la Dirección General de Seguridad y Emergencias, además de la Agencia Estatal de Meteorología. Como socios en Madeira están la Universidad de Madeira, y el Laboratorio Regional de Ingeniería Civil de Portugal (LREC).

1.3 Organización de la memoria

La memoria de la presente tesis ha sido estructurada en 6 capítulos. El primer capítulo es el actual capítulo introductorio donde exponemos las motivaciones, hipótesis, objetivos y contribuciones realizadas en el proceso de investigación.

En el capítulo 2 nos hemos centrado en el desarrollo de las cuestiones y conceptos fundamentales que suponen la base principal de las aportaciones realizadas en los siguientes capítulos. Dentro de ese capítulo se detallarán las causas y orígenes de los fenómenos meteorológicos en estudio. Seguidamente se continuará explicando distintos sistemas de observación meteorológica, las técnicas de predicción y los efectos de la meteorología sobre las redes de comunicaciones de microondas para terminar describiendo los modelos de propagación que nos afectan y los parámetros de control que nos aportaran la información del funcionamiento de las redes de radioenlaces

En el capítulo 3 mostraremos las fuentes de datos y generación de las señales donde describiremos los datos meteorológicos y la señal asociada, así como su obtención y generación de la base de datos. Para continuar con el tratamiento

de los datos y generación de la señal meteorológica, así como de los datos de potencia y la señal asociada. También se describirá el dispositivo sobre el que gravita todo el estudio, el subsistema ODU-Antena.

Es en el capítulo 4 donde nos adentramos en la realización de los métodos y algoritmos para la detección y estimación de precipitación de lluvia adentrándonos en la relación entre la meteorología y la potencia recibida y estudiando varias técnicas de detección y de extracción de información a partir de métodos de filtrados y redes neuronales.

En el capítulo 5 expondremos los métodos y algoritmos para la estimación de temperatura ambiente a partir de la temperatura de un ODU, para en el capítulo 6 continuar con los de la medición de radiación solar a partir de agrupaciones de equipos exteriores, deteniéndonos en las relaciones entre la temperatura y capa de nubes, los cálculos de día despejado ideal y de la radiación solar incidente en los dispositivos.

Terminaremos la memoria con los apartados correspondientes de resultados, conclusiones, líneas futuras, referencias bibliográficas generales y anexos con las tablas de las bases de datos y derechos de uso de la información y datos.

Capítulo 2

Condiciones meteorológicas y sus efectos sobre los radioenlaces de microondas

La gran promesa de los sistemas de telecomunicación, en ciertos aspectos, se puede resumir en una sola palabra “*ubicuidad*” para ello la denominada *sociedad conectada* del siglo XXI se ha dotado de múltiples y diversos soportes de comunicación que permiten hacer realidad dicha promesa. Entre ellos los radioenlaces enmarcados en los servicios terrestres, junto con otros sistemas, facilitan la extensión del alcance de los sistemas y servicios de comunicación de forma inalámbrica. Estos sistemas hacen uso del denominado espectro radioeléctrico comprendido entre las frecuencias que van desde 3 Hz a 3000 GHz, espectro que se encuentra dividido en bandas de frecuencias [ITU-R V,431-8]. Especial interés en esta tesis tiene la banda denominada SHF, por sus siglas en inglés **S**upra **H**igh **F**recuency, en la citada recomendación, banda que abarca de los 3 GHz a los 30 GHz, y que atendiendo al rango de longitudes de onda reciben el nombre de frecuencias centimétricas también denominadas microondas.

Nuestro interés en la banda de microondas reside en su dependencia con la variación de los parámetros atmosféricos (temperatura, humedad, presión, etc.), los hidrometeoros (lluvia, nieve, granizo, etc.), los litometeoros (calima, remolinos, etc.) el viento [AEMET,2002], etc. Esto ha propiciado la publicación de una ingente cantidad de artículos[CRANE,1980] [SEYBOLD,2002] y libros [CRANE,2003b] sobre el particular, además de normas y recomendaciones [ITU-R P,530-13] [ITU-R P,838-3] [ITU-R P,840-3] conducentes a caracterizar su influencia sobre los parámetros radioeléctricos (potencia recibida, polarización, relación señal a ruido, ruido, etc.). El objetivo principal de estas publicaciones era y es la tipificación y cuantificación de esos fenómenos sobre los parámetros de un enlace de radiofrecuencia. Se trata de una bibliografía de uso obligado en el diseño, desarrollo, implementación, instalación y explotación de cualquier sistema de comunicación por vía electromagnética, constituyendo la base para fundamentar las especificaciones del sistema, con un objetivo principal: dotarlos de la capacidad o capacidades necesarias para un comportamiento fiable y con una baja probabilidad de fallos.

El conocimiento que se tiene sobre los enlaces de radiocomunicación y en particular sobre los enlaces de microondas, foco de nuestro interés, también es posible aprovecharlo en pro de otras aplicaciones. Se trata de inferir parámetros meteorológicos en base al estudio de las variaciones de la señal y

los datos de funcionamiento de los radioenlaces terrestres de microondas [D'AMICO,2016], [MESSER,2015], [LIBERMAN,2014].

En este capítulo realizaremos una recopilación y análisis ad hoc de los distintos factores meteorológicos, su monitorización e influencia sobre los modelos de propagación radioeléctrica, con especial énfasis en la banda de microondas. Se pretende sentar las bases cuasi-directas entre meteorología y condiciones de propagación radioeléctrica. Esta interrelación, de forma inmediata, se traduce en la disponibilidad de una red de monitorización meteorológica más amplia y extensa, una mejor cobertura territorial y a la postre en un conocimiento más preciso de la evolución de los fenómenos meteorológicos.

2.1 Meteorología, tiempo y clima.

Al estudio de la atmosfera y de los mecanismos que producen cambios en la misma es a lo que se le denomina *Meteorología*. Mientras que el concepto de *tiempo* meteorológico o simplemente *tiempo*, hace referencia a los mecanismos de cambio estudiados en periodos cortos de tiempo. A escala de una vida humana hablamos de un momento específico, *tiempo*, es decir estado de la atmosfera en un momento específico y sus implicaciones. En este contexto se suele referir al *tiempo* en términos de luminosidad, lluvioso, factores aéreos y factores eléctricos, fundamentalmente, términos que engloban entre otros a los hidrometeoros, lluvia, nieve, granizo, etc. [WALLACE,1977] Por el contrario, cuando se trata de estudiar variaciones de largo recorrido (años) de tiempo meteorológico, se está aludiendo al concepto de *clima*.

2.1.1 Efectos del Sol sobre la Tierra.

La posición y los movimientos del planeta respecto al Sol determinan en gran medida la climatología y meteorología de cualquiera de las zonas del planeta. La Tierra se mueve un par de grados sobre su eje cada 40.000 años, lo que parece estar detrás del carácter cíclico de las glaciaciones y a su vez del reverdecer del Sáhara, lo que colateralmente favoreció la evolución de los homínidos [LARRASOÑA,2013] y [KRÖPELIN,2008].

El planeta Tierra como objeto semiesférico que gira en el espacio respecto a un foco central presenta al menos cinco movimientos principales, conocidos como *Traslación*, *Rotación*, *Precesión*, *Nutación* y *Bamboleo*, Figura 2.1. Aunque no es tema central de esa tesis, expondremos de forma somera cada uno de los movimientos dado que estos tendrán un reflejo en las señales y datos de funcionamiento de los radioenlaces.

La *Traslación* consistente en el movimiento elíptico del planeta respecto al Sol, situado éste en uno de los focos de dicha elipse. Se debe a la atracción gravitacional del Sol y tiene un periodo de 365 días, 5 horas, 48 minutos y 45 segundos. En los primeros días de enero se alcanza la máxima proximidad al Sol, produciéndose el perihelio (147.5 millones de kilómetros), verano austral, mientras que en los primeros días de julio se alcanza la máxima lejanía, denominado afelio (152.6 millones de kilómetros), verano boreal. El eje terrestre forma un ángulo de unos 23.5° con respecto a la normal de la eclíptica, fenómeno denominado oblicuidad de la eclíptica, Figura 2.1a. Esta inclinación, combinada con la *Traslación* es la causa de las estaciones anuales, derivadas de los cambios en el ángulo de incidencia de la radiación solar y en la duración de las horas de luz que esa oblicuidad produce.

Por otro lado, tenemos la *Rotación* consistente en el giro de la tierra sobre su propio eje. En este punto hay que distinguir entre día sideral y día solar. Una revolución completa cada 23 horas 56 minutos y 4.1 segundos se denomina día sideral mientras que un día solar se produce cada 24 horas debido al avance del planeta sobre su órbita[HENAREJOS,2008].

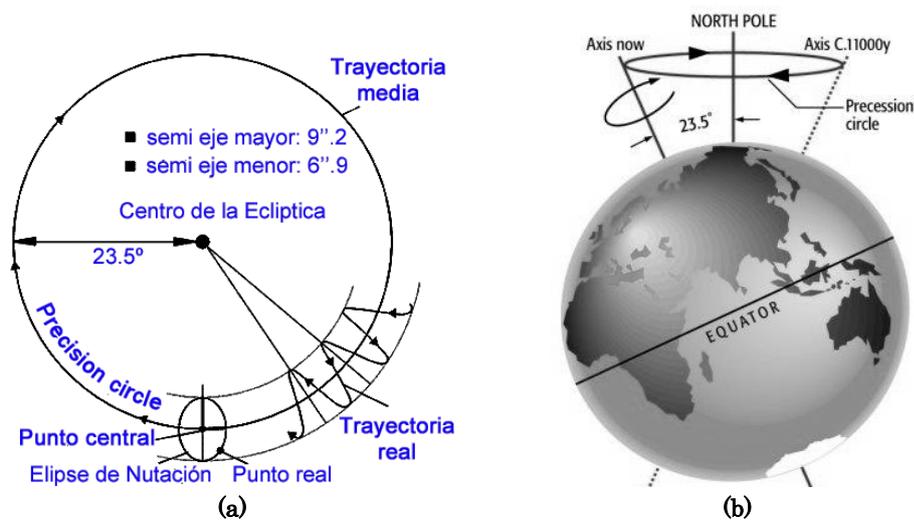


Figura 2.1. Ilustración de los movimientos de la tierra *Nutación* y *Traslación* (a) [ENRÍQUEZ,2011], y *Precesión* (b) [GARCÍA,2007].

Debido al momento de fuerza ejercida por el sistema Tierra-Sol y a la forma de elipsoide irregular aplastado por los polos que presenta la Tierra, el eje de rotación del planeta va variando, es la denominada *Precesión*, Figura 2.1b. La variación es de unos 23.5° con un periodo de 25767 años. Este movimiento es el responsable de los cambios de posición de los polos celestes a través de los siglos.

El movimiento de *Nutación* aparece como consecuencia de la atracción gravitacional de la Luna, generando una oscilación del eje de rotación en sentido vertical, Figura 2.1a.

Por último, tenemos el *Bamboleo* de Chandler (1891), variaciones del eje de rotación de la Tierra de 0.7 segundos de arco cada 433 días, 1.2 años. Según el Jet Propulsion Laboratory [JPL,2000] dos tercios de la fuerza necesaria para generar este movimiento tiene su origen en los cambios de temperatura y salinidad de los océanos, que a su vez provocan cambios en la dirección de las corrientes oceánicas y de la presión del fondo del océano. El tercio restante se debe a fluctuaciones en la presión atmosférica [CARTER,2003].

Todos esos cambios estacionales, periódicos y cuasi-periódicos de orientación de la tierra provocan que la posición relativa de la Tierra respecto al Sol cambie. Esto se traduce en variaciones de la cantidad de luz recibida y por ende del calor recibido en determinadas zonas del esferoide. Estas variaciones de radiación solar y calor originan cambios en las temperaturas de la atmosfera que, al no producirse siempre en la misma zona como consecuencia de los movimientos del planeta, generan gradientes de temperatura. El aire como un compuesto de múltiples gases que es, se desplaza debido a esos

Capítulo 2

Condiciones meteorológicas y sus efectos sobre los radioenlaces de microondas

gradientes de temperatura de unas zonas a otras creando variaciones de presión.

Otro efecto a destacar, también correspondiente a la cantidad de radiación solar y calor, es la evaporación de agua que añade a la atmosfera en movimiento vapor de agua generador de nubes.

2.1.2 La atmosfera y el Aire.

El Aire es una mezcla de gases disponibles en la atmosfera terrestre. Los principales gases que componen el aire terrestre son: el nitrógeno al 78.09%, oxígeno al 20.946%, argón al 0.93% y del resto de los componentes destacan: dióxido de carbono al 0.033% y vapor de agua, este último de gran importancia para la meteorología.

Las masas de aire de la atmosfera presentan propiedades tanto horizontales como verticales. Cuando se produce una transición entre dos masas de aire de distintas densidades y temperaturas aparece lo que se denomina un Frente. Estos frentes además de traer la precipitación producen cambios tanto en las presiones de la atmosfera como en la temperatura, vientos y otros fenómenos, como p.ej. la creación de nubes debido a las turbulencias generadas en las transiciones de las distintas masas de aire.

Los frentes, Figura 2.2, se suelen desplazar guiados por la dirección del viento o por las formas de la superficie terrestre.

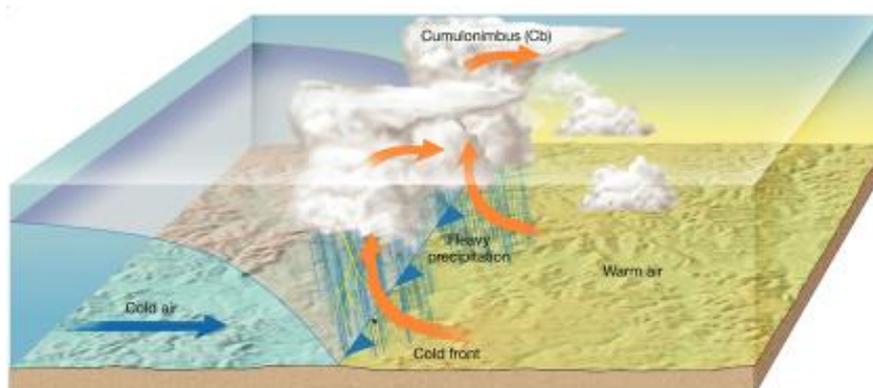


Figura 2.2. Frente frío [THINGLINK,2017].

2.1.3 Elevación el aire.

El aire se puede elevar y lo hace a través de distintos mecanismos: convectivo, orográfico, frontal y convergente. La elevación orográfica, Figura 2.3, tienen lugar cuando las montañas actúan como barreras al flujo de aire, forzando a éste a ascender, proceso en el que el aire se enfría adiabáticamente pudiendo aparecer las nubes e incluso la precipitación.

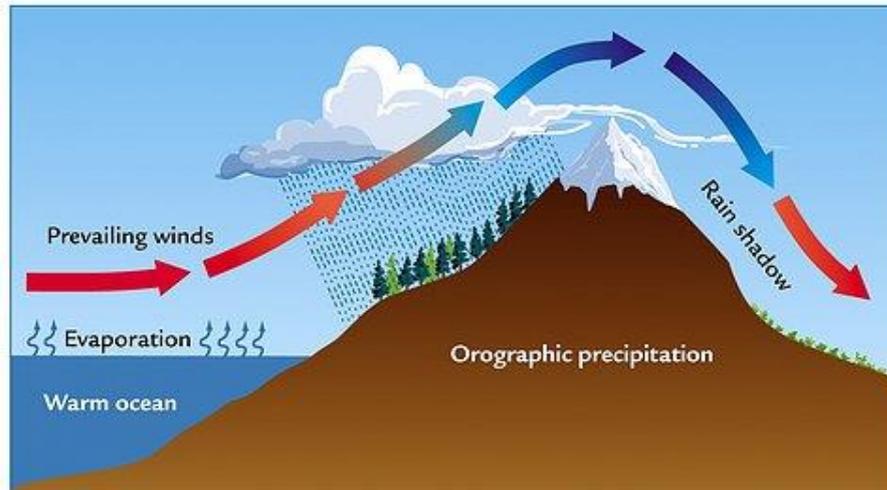


Figura 2.3. Elevación orográfica del aire .

El calentamiento superficial de una porción de aire en mayor medida que el aire que le rodea, provoca que esa masa de aire se eleve, si además concurre la presencia de una cierta cantidad de humedad, al elevarse se expande, se enfría y condensa, lo que puede desembocar en la producción de nubes y ocasionalmente precipitación. El mecanismo convectivo está asociado a precipitaciones aisladas, intensas y de corta duración.

El mecanismo frontal está íntimamente relacionado con los frentes, mientras que el mecanismo convectivo aparece en el encuentro de masas de aire en las capas bajas que se mueven horizontalmente, provocando la elevación por “estrangulamiento” del aire existente en la zona de encuentro. También en estos casos si se dan las condiciones se pueden producir nubes y precipitación.

2.1.4 Precipitación.

La precipitación se define como el producto líquido o sólido de la condensación del vapor de agua que cae de las nubes o del aire y se deposita en el suelo. Dicho término comprende la lluvia, el granizo, la nieve, el rocío, la cencellada blanca, la escarcha y la precipitación de la niebla. En meteorología el termino lluvia describe gotas de agua que caen desde una nube cuyo diametro es superior a 0.5mm. Las gotas se forman cuando millones de pequeñas gotas de

agua chocan en las nubes para formar gotas más grandes. Eventualmente, se vuelven demasiado pesadas y precipitan de las nubes en forma de lluvia. Es interesante observar que a pesar de que típicamente se representan las gotas de lluvia con forma de lágrima, una gota de lluvia no posee realmente esa forma. La forma depende de su tamaño, p.ej. cuando se produce la precipitación debido a la gran presión de aire en la parte inferior de la gota esta se aplana.

La cantidad total de precipitación que llega al suelo en un determinado período, se expresa en términos de profundidad vertical de agua (o equivalente en agua en el caso de formas sólidas) que cubriría una proyección horizontal de la superficie de la Tierra. En el caso de una nevada se expresa como el espesor de nieve reciente que cubre una superficie horizontal plana. La unidad de precipitación es la profundidad lineal, normalmente en milímetros (volumen/área) o en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (masa/área) para la precipitación líquida [WMO,2017].

Las cantidades diarias de precipitación deberían leerse con una resolución de 0.2 mm y, de ser posible, con una resolución de 0.1 mm. Las cantidades semanales o mensuales deberían leerse con una resolución de 1 mm (al menos). Las mediciones diarias de la precipitación deberían efectuarse a horas fijas comunes para toda la red (o redes) de interés. La precipitación inferior a 0.1 mm se denomina generalmente *traza*. La intensidad de la precipitación se expresa igualmente en medidas lineales por unidad de tiempo, normalmente milímetros por hora. En la Tabla 2.1 se exponen los criterios para determinar la intensidad.

Tabla 2.1. Criterios para determinar la intensidad (i) de precipitación débil, moderada o fuerte.

<i>Variable</i>	<i>Rango</i>	<i>Intensidad</i>
Llovizna	$i < 0.1 \text{ mm h}^{-1}$	Débil
	$0.1 \leq i < 0.5 \text{ mm h}^{-1}$	Moderada
	$i \geq 0.5 \text{ mm h}^{-1}$	Fuerte
Lluvia (chubasco)	$i < 2.5 \text{ mm h}^{-1}$	Débil
	$2.5 \leq i < 10.0 \text{ mm h}^{-1}$	Moderada
	$10.0 \leq i < 50.0 \text{ mm h}^{-1}$	Fuerte
	$i \geq 50.0 \text{ mm h}^{-1}$	Violenta
Nieve	$i < 1.0 \text{ mm h}^{-1}$ (equivalente en agua)	Débil
	$1.0 \leq i < 5.0 \text{ mm h}^{-1}$ (equivalente en agua)	Moderada
	$i \geq 5.0 \text{ mm h}^{-1}$ (equivalente en agua)	Fuerte

El tipo de precipitación que llega a la superficie terrestre depende de la temperatura existente en los kilómetros inferiores de la atmósfera.

El depósito de rocío es esencialmente un fenómeno nocturno y, aunque de proporciones relativamente pequeñas y muy variable según los lugares, es de gran interés en las zonas áridas; en las regiones muy áridas puede ser del mismo orden de magnitud que la lluvia. Con el fin de evaluar la contribución hidrológica del rocío, es necesario distinguir entre el rocío formado:

- a) como resultado del transporte hacia abajo de la humedad atmosférica condensada en superficies frías, denominado rocío de precipitación.
- b) por el vapor de agua procedente del suelo y de las plantas y condensado en superficies frías, denominado rocío de destilación.
- c) como agua exudada por hojas, conocido como gutación.

Las tres fuentes pueden contribuir simultáneamente a la formación del rocío, aunque solo la primera aporta agua adicional a la superficie, y la última tiene generalmente como resultado una pérdida neta. Otra fuente de humedad es la procedente de gotitas de niebla o de nube reunidas por las hojas y ramitas de la vegetación, que llegan al suelo por goteo o resbalando sobre los tallos.

El hielo puede acumularse en las superficies como resultado de varios fenómenos: la acumulación de hielo como consecuencia de la precipitación congelada, denominada con frecuencia *hielo liso* o *cencellada transparente*. La *cencellada blanca*, depósito de hielo opaco, de aspecto granular y color blanco o lechoso, formado por la rápida congelación de gotas de agua subfundidas al tomar contacto con un objeto expuesto. La *escarcha* (denominada generalmente helada) es un depósito de cristales de hielo entremezclados, se forma cuando el aire con una temperatura de punto de rocío por debajo del nivel de congelación se satura por enfriamiento.

La niebla consiste en gotas de agua muy pequeñas suspendidas en la atmósfera, que forman una nube sobre la superficie terrestre. Las gotas de niebla tienen un diámetro del orden de 1 a 40 μm , y velocidades de caída comprendidas entre menos de 1 y 5 cm/s aproximadamente. En realidad, las velocidades de caída de las gotas de niebla son tan bajas que, incluso con vientos débiles, pueden desplazarse casi horizontalmente. En caso de niebla, la visibilidad horizontal es en general inferior a 5 km, y raramente se observa cuando la temperatura y el punto de rocío difieren en más de 2°C. Desde un punto de vista hidrológico, existen zonas forestales elevadas que experimentan frecuentes episodios de niebla como resultado de la advección de nubes sobre la superficie de la montaña, de donde, si se considera solo la

precipitación, se puede subestimar notablemente la entrada de agua [SCHEMENAUER,1994].

2.1.5 Presión del aire y viento

La atmosfera de un planeta, vista como una columna de aire que comprende desde la superficie del planeta ya sea océano o tierra hasta el espacio posee cierta masa y por tanto peso. Debido a esto se puede afirmar que la máxima presión atmosférica se da al nivel del mar y disminuye al aumentar la altitud, p.ej. un aumento de altitud de 1000 m conlleva una disminución de 100 hPa. La presión atmosférica también disminuye al aumentar la humedad (vapor de agua pesa menos que otros gases) y la temperatura (el aire cálido es más ligero), de ahí que tengamos variaciones que oscilan entre 880 hPa con los ciclones más profundos (bajas presiones) y 1080 hPa bajo la influencia de los anticiclones más potentes (altas presiones).

Cuando dos masas de aire presentan diferentes presiones, el aire se desplaza de la zona de alta presión a la de baja presión creando un corriente de aire que produce el viento. La velocidad del viento estará en función del diferencial entre ambas presiones y su componente es horizontal[CASTILLO,1999].

Es interesante observar que la intensidad del viento al incidir sobre una superficie genera sobre esta una presión conocida como carga de viento. El efecto del viento depende de las dimensiones de la estructura, de modo que en las instalaciones de antenas en altura [RICHARDSON,1994] se tiene en cuenta su cálculo. Para calcular la carga al viento (F_v) usamos la expresión Ec.2.1.

$$F_v = A \times P \times C_d \quad \text{Ec.2.1}$$

Donde A es el área (m^2), $P=0.613 \cdot v^2$ con v velocidad del viento (m/s) y C_d que es el coeficiente de arrastre. Este coeficiente depende de la geometría del objeto.

2.1.6 La temperatura.

Los conceptos meteorológicos precipitación, presión atmosférica, viento, humedad, frentes, temperatura, etc. están interrelacionados unos con otros. La temperatura está a su vez relacionada con los cinco movimientos del planeta y su posición respecto al Sol.

La temperatura es una medida de la energía cinética de los átomos individuales o moléculas de una sustancia u objeto.

Cuando dos masas están en contacto térmico terminan teniendo la misma temperatura, ya sean masas de aire o dispositivos y aire o dos materiales. Luego, se puede decir que la temperatura representa el estado termodinámico de un cuerpo y su valor está determinado por la dirección del flujo neto de calor entre dos masas. En un sistema de este tipo, se dice que la masa que pierde calor en favor del otro, se encuentra a mayor temperatura. Para determinar la magnitud física de la temperatura con respecto al “estado de un cuerpo” se ha definido una escala de temperaturas aprobada internacionalmente basada en puntos de congelación y en puntos triples universales [BIPM,2017]. La escala que se está aplicando actualmente es la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) y su temperatura se indica con T90. Para el rango de valores meteorológicos (–80 a +60 °C) [BIPM,2017]

Dado que el sol irradia calor, a la hora de medir la temperatura del aire hay que definirla como “la temperatura leída en un termómetro expuesto al aire, protegido de la radiación solar directa” [WMO,2013]. Aunque esta definición no se pueda utilizar como definición de la magnitud termodinámica propiamente dicha, sirve para la mayoría de las aplicaciones

La temperatura varía de unas zonas del planeta a otras. Se puede afirmar que esta variación es debida entre otros factores a la posición del sol respecto a la zona y posición geográfica, a la altitud de la zona, a la cobertura de nubes y efecto albedo (cantidad de radiación reflejada),

2.1.7 Espectro electromagnético

La energía solar es la energía electromagnética emitida por el Sol. La radiación solar que incide en el límite superior de la atmósfera terrestre se denomina radiación solar extraterrestre; el 97 por ciento de ella se encuentra confinada en el intervalo espectral comprendido entre 290 y 3 000 nm y se denomina radiación solar (en ocasiones, radiación de onda corta). Una parte de la radiación solar extraterrestre penetra a través de la atmósfera y llega a la superficie terrestre, mientras que otra parte se dispersa y/o es absorbida en la atmósfera por las moléculas gaseosas, las partículas de aerosoles, las gotas de agua y cristales de hielo presentes en ella.

Capítulo 2

Condiciones meteorológicas y sus efectos sobre los radioenlaces de microondas

La radiación terrestre es la energía electromagnética de onda larga emitida por la superficie de la Tierra y por los gases, aerosoles y nubes de la atmósfera; es también absorbida parcialmente en la atmósfera.

Para una temperatura de 300 K, un 99.99 por ciento de la energía de la radiación terrestre tiene una longitud de onda superior a 3 000 nm, y en torno a un 99 por ciento, superior a 5 000 nm. A temperaturas inferiores, el espectro se desplaza hacia longitudes de onda mayores.

Dado que las distribuciones espectrales de la radiación solar y terrestre apenas se superponen, con frecuencia se las trata por separado en mediciones y cálculos. En meteorología, la suma de estos dos tipos de radiación se denomina radiación total. A continuación, se indican una serie de consideraciones sobre la radiación.

- A diferencia de la conducción y la convección, que necesitan material para viajar, la energía radiante puede viajar a través del vacío del espacio.
- Todos los objetos, a cualquier temperatura, emiten energía radiante.
- Los objetos más cálidos irradian más energía total por unidad de área que los objetos más fríos.
- Los cuerpos radiantes más calientes producen las longitudes de onda más cortas de la radiación máxima.
- Los objetos que son buenos absorbentes de la radiación son buenos emisores también.

Cuando la radiación golpea un objeto, generalmente hay tres resultados diferentes: una cierta energía es absorbida por el objeto, una parte de la energía atraviesa al objeto y, por último, la radiación puede rebotar fuera del objeto sin ser absorbida ni transmitida.

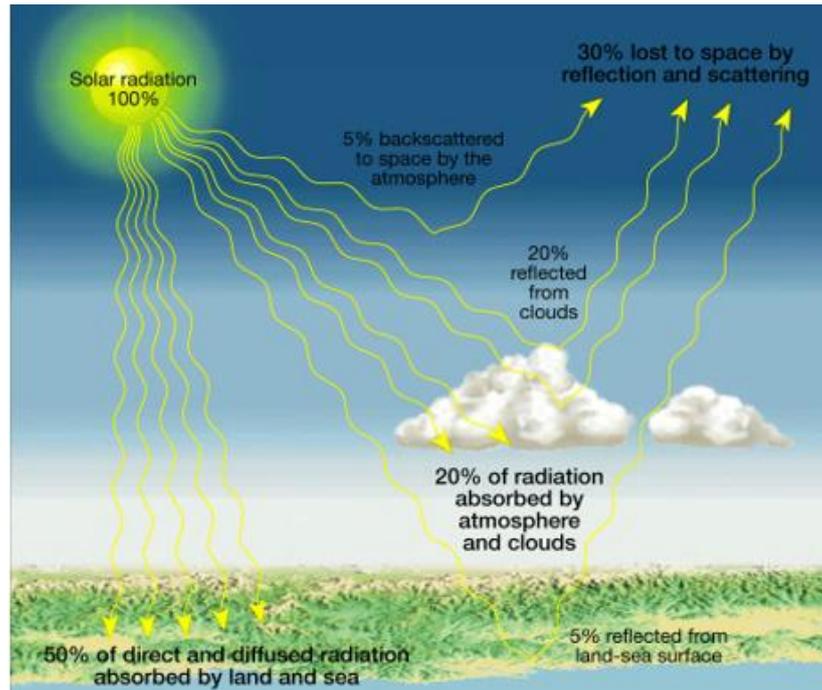


Figura 2.4. Radiación solar y reparto porcentual en el encuentro con distintos objetos [MCADIE,1911].

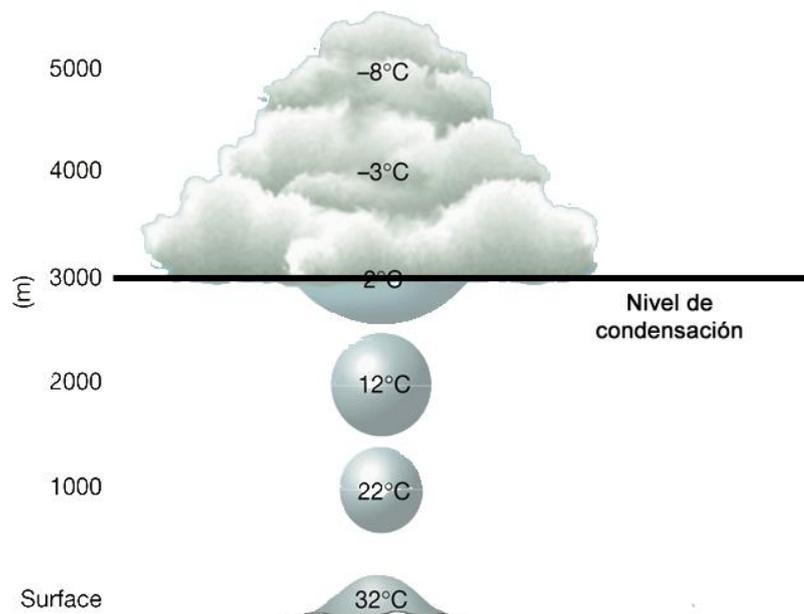


Figura 2.5. Enfriamiento adiabático [ARANDA,1984].

2.1.8 Humedad

Humedad es un término general utilizado generalmente para enunciar la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Existen distintas magnitudes en la medición de la humedad. *Razón de mezcla*, que consiste en la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco o la humedad específica, que es la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire húmedo. *Humedad relativa*, que representa la razón, expresada en porcentaje, entre la presión de vapor observada y la tensión del vapor saturante con respecto al agua a la misma temperatura y presión[WMO,2015].

El aire está saturado cuando contiene la cantidad máxima de vapor de agua que puede retener a cualquier temperatura y presión.

Cuando el contenido de vapor de agua del aire permanece constante, la disminución de la temperatura del aire provoca un aumento de la humedad relativa y el aumento de la temperatura del aire provoca una disminución de la humedad relativa.

La velocidad adiabática [1] seca es la velocidad de enfriamiento o calentamiento que se aplica al aire no saturado mientras que la velocidad adiabática húmeda es la tasa de cambio de temperatura adiabática en el aire saturado.

2.2 Sistemas de observación meteorológicas.

El estudio de las variables meteorológicas en detalle exige múltiples técnicas de captación de datos en función de las resoluciones temporales y espaciales deseadas. El uso de distintas tecnologías permite a su vez la obtención de los indicadores de dichas variables desde distintas perspectivas y con errores distintos, permitiendo tener, de manera global, un mejor entendimiento de los procesos que están sucediendo en esos momentos.

En el caso de la precipitación existen distintos sistemas de observación para un mismo evento como son las estaciones meteorológicas automáticas (EMA), los sistemas basados en radar o detecciones desde satélites. Todas esas

1 Que no va acompañada de intercambio de calor.

fuentes de información transmiten o almacenan los datos para ser procesados por los servicios meteorológicos correspondientes[WMO,2014].

2.2.1 estación meteorológica automática (EMA).

Uno de los sistemas de captura de datos más difundido son las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) [WMO,1966], se define una EMA como una “estación meteorológica en la que se realizan y se transmiten observaciones automáticamente”. Las variables meteorológicas medidas mediante los sensores que se encuentran integrados son leídas o recibidas por una unidad central de adquisición de datos.

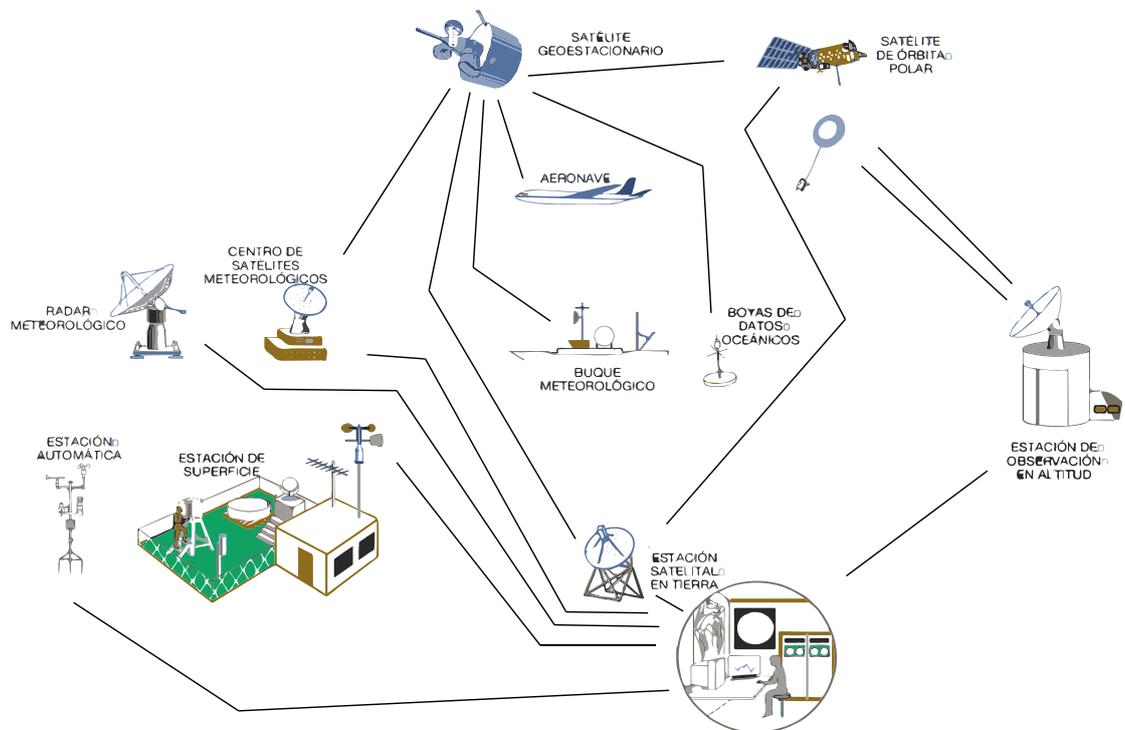


Figura 2.7. Sistema de observación meteorológica.

Los datos obtenidos de los dispositivos de medición autónomos pueden ser procesados a nivel local en la EMA o en otra parte

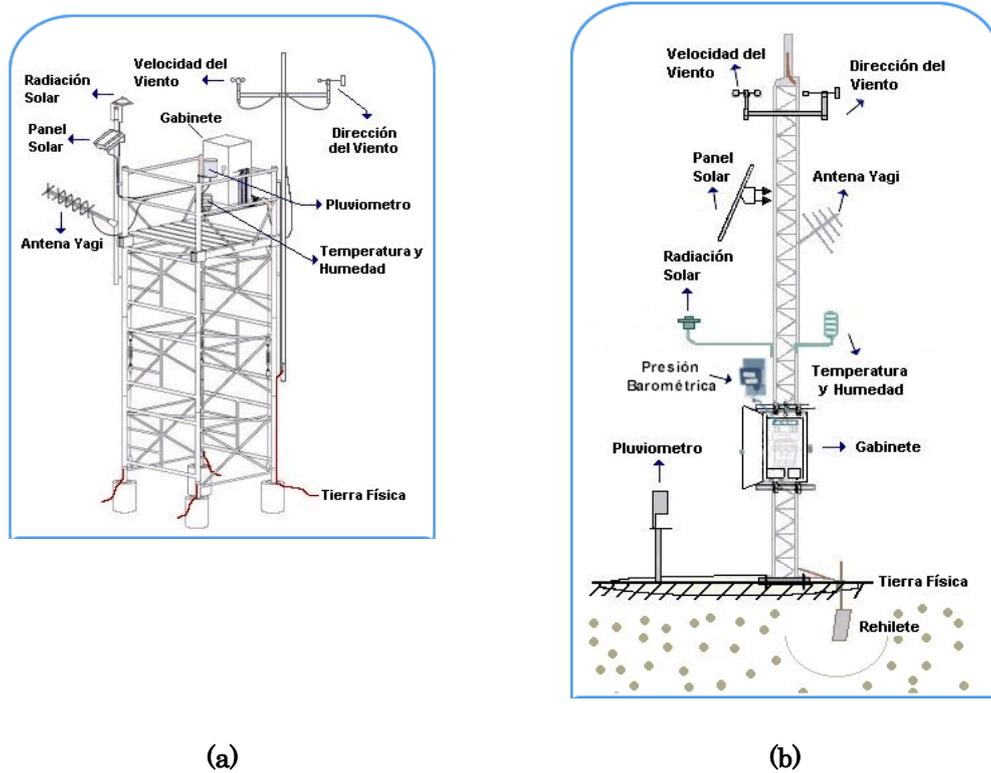


Figura 2.8. Configuración externa de una EMA de estructura tipo andamio (a) y estructura tipo torre triangular (b).

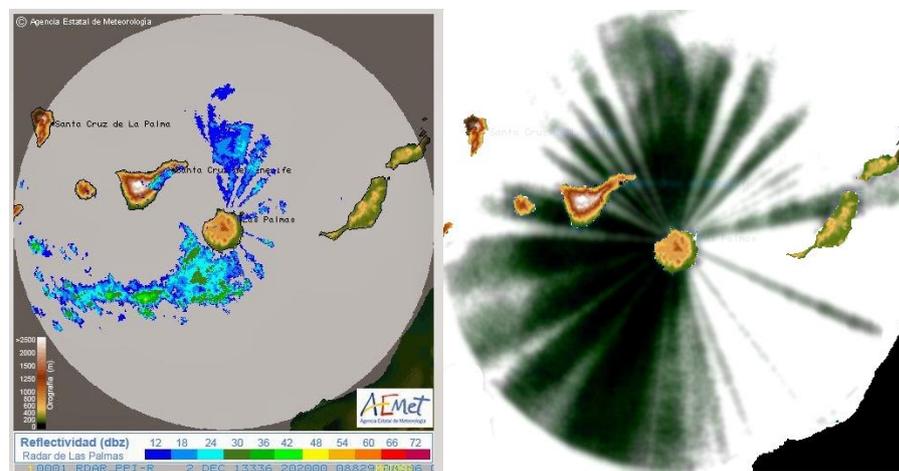
Típicamente, aunque no es determinante las Estaciones meteorológicas automáticas suelen capturar las variables meteorológicas que aparecen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Variables meteorológicas capturadas en las EMA.	
Variable	Descripción
Dirección del viento	El valor obtenido es el promedio de 10 minutos de la dirección del viento. La dirección indica de donde proviene el viento, su unidad de medición es en grados Dextrorsum (giro en sentido de las manecillas del reloj) donde 0° es norte verdadero.
Dirección del viento de ráfaga	La dirección del viento de ráfaga es la dirección de donde proviene la ráfaga más intensa en un lapso de 10 minutos, su unidad de medición es en grados Dextrorsum (giro en sentido de las manecillas del reloj).
Velocidad del viento	La velocidad del viento es el promedio aritmético de las velocidades medidas en un lapso de 10 minutos, su unidad de medición para EMA es en km/h., para ESIMEs es m/s.
Velocidad del viento de ráfaga	La velocidad del viento de ráfaga es la máxima velocidad medida en un intervalo de 10 minutos (se toman muestras cada 5 seg.), su unidad de medición para EMA es en km/h., para ESIME es m/s.

Temperatura ambiente promedio	Es la temperatura ambiente promedio de las mediciones realizadas en un lapso de 10 minutos (se toman muestras cada minuto), su unidad de medición es en °C.
Humedad relativa	La humedad relativa es el promedio de las mediciones realizadas en un intervalo de 10 minutos (se toman muestras cada minuto), su unidad de medición es en %.
Presión atmosférica	La Presión atmosférica es el promedio de las mediciones realizadas en un lapso de 10 minutos (se toman muestras cada minuto), su unidad de medición es el hpa (Hectopascal).
Precipitación	Es la lámina de precipitación acumulada en un lapso de 10 minutos, su unidad de medición es el mm (milímetro).
Radiación	La radiación solar (global) son los valores promedio medidos en un lapso de 10 minutos (se toman mediciones cada minuto), su unidad de medición es en W/m ² (watt/m ²).

2.2.2 El radar meteorológico.

Los radares meteorológicos pueden detectar la precipitación y las variaciones del índice de refracción en la atmósfera generadas por variaciones locales de la temperatura o de la humedad. Transmiten pulsos electromagnéticos en el rango de frecuencias de 3 a 10 GHz (longitud de onda de 10 a 3 cm respectivamente).



a) Medición a una hora determinada. b) Máxima cobertura de radar.

Figura 2.9. PPI de radar meteorológico.

Están diseñados para detectar y localizar zonas de precipitación, medir su intensidad y desplazamiento, y a veces su tipo. El pulso transmitido, cuando encuentra un objetivo meteorológico, devuelve una señal, denominada eco, que tiene una amplitud, una fase y una polarización. La amplitud se emplea para determinar un parámetro denominado factor de reflectividad (Z) que

permite estimar la masa de precipitación por unidad de volumen o la intensidad de la precipitación mediante relaciones empíricas.

En estos radares se pueden consultar la imagen de PPI (Plan Position Indicator) de reflectividad, la de tope de altura de ecos (echotop) RHI (Range Height Indicator) y la de datos de precipitación acumulada en 6 horas [AEMET,2017a]. La Figura 2.9a muestra el PPI más bajo de reflectividad, expresado en dBZ., representa la proyección sobre la horizontal del barrido que realiza el radar en azimut mientras mantiene el eje de la antena elevado 0.5° sobre la horizontal. Se trata del dato radar más cercano al suelo y es, por tanto, el más adecuado para estimar la precipitación que cae en el suelo, aunque también es el más afectado por los bloqueos orográficos. Mientras que la imagen de la Figura 2.9b muestra la cobertura total del radar mediante la integración de todos los índices de PPI detectados a lo largo de tres años.

También a la hora de interpretar la imagen hay que tener en cuenta el efecto de la elevación del haz con la distancia al radar, que puede ocultar las precipitaciones bajas.

La imagen de acumulación de precipitación cada seis horas, en mm, representa la suma de todos los productos de precipitación horaria del periodo, que a su vez se obtienen sumando los datos de reflectividad recogidos cada diez minutos. Sobre cada punto, se convierte la reflectividad a cantidad de precipitación aplicando la relación de Marshall Palmer de lluvia, Ec.2.2.

$$Z = a \cdot R \cdot b \quad \text{Ec.2.2}$$

Donde Z es el factor de reflectividad, a y b son constantes que dependen del tipo de precipitación. Para lluvia toman los valores $a = 200$, $b = 1.6$. Las unidades dBZ para la reflectividad a que se refieren los intervalos de color de las imágenes corresponden a lo expresado en la Ec.2.3:

$$Z (dBZ) = 10 \cdot \log_{10} (Z) \quad \text{Ec.2.3}$$

Donde Z viene expresado en unidades lineales de mm^6/m^3 .

Es importante recordar, que al tener cada tipo de precipitación su propia distribución de tamaños, no existe una relación biunívoca entre reflectividad y contenido acuoso. Tampoco existe relación biunívoca entre reflectividad e intensidad de precipitación pues aquí interviene, además la velocidad de caída de las gotitas. Por eso es preferible representar en las imágenes la reflectividad, que es lo que en realidad detecta el radar, en lugar de la intensidad de precipitación.

2.2.3 Observaciones desde satélites.

Los satélites meteorológicos orbitan a altitudes de unos 36 000 km o de 850 km, y se utilizan para obtener imágenes e información cuantitativa sobre las características de la superficie terrestre y los 20 primeros kilómetros de la atmósfera, para ello se requieren instrumentos muy sensibles y sistemas de tratamiento de datos muy costosos, así como toda una serie de estaciones y subestaciones terrestres capaces de capturar la información disponible en los satélites. Estos sistemas necesitan calibración y validación de sus instrumentos, lo que se realiza a través de la correlación de datos tomados en superficie con las mediciones de los instrumentos a bordo del satélite. Estos procedimientos resultan altamente costosos.

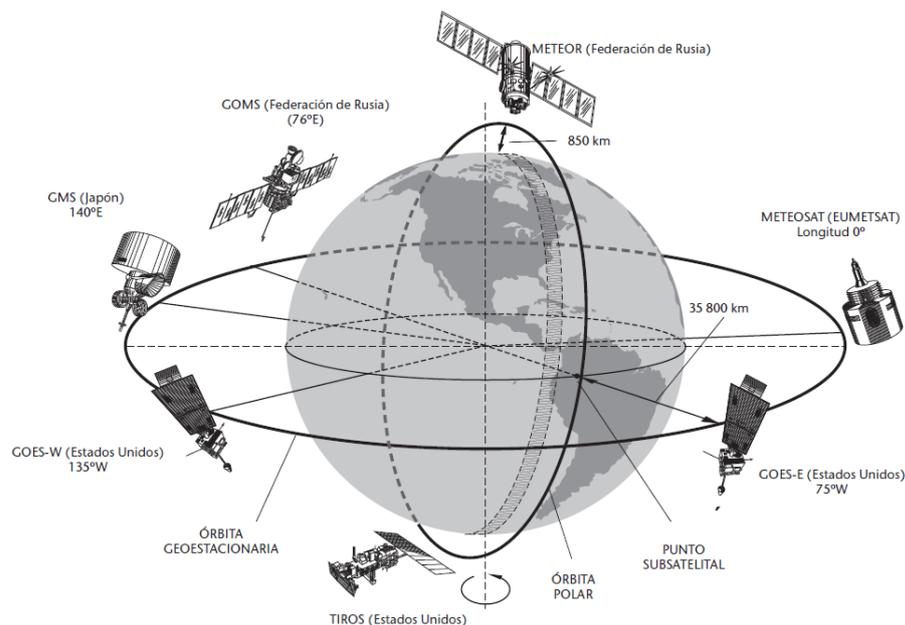


Figura 2.10. Sistema global de observación por satélite de vigilancia meteorológica mundial.

2.2.4 Sistemas de retransmisión de datos meteorológicos de aeronaves (AMDAR).

Cuando se trata de realizar estudios más puntuales y determinados se hace necesaria la utilización de otras tecnologías como son las Aeronaves automáticas sin pilotos (drones) y aerosondas para recorridos de larga distancia con fines de observación meteorológica [HOLLAND,1992]. Y aeronaves tripuladas provistas de sofisticados sistemas de navegación y otros sistemas de detección.

Hay sensores para medir la velocidad, la temperatura y la presión del aire. Además, se dispone de otros datos relacionados con la posición, la aceleración y la orientación de la aeronave, procedentes del sistema de navegación aeronáutica.

En los sistemas AMDAR, estos medios se emplean para compilar y transmitir informes meteorológicos en tiempo real. Generalmente los mensajes incluyen la velocidad y la dirección del viento (en el plano horizontal), la temperatura del aire, la altitud (con respecto a un nivel de presión de referencia), una medida de la turbulencia, el instante en que se efectúa la observación, la fase de vuelo y la posición de la aeronave.

2.2.5 Observaciones marinas.

Las observaciones marinas, en el sentido más amplio, abarcan todas las observaciones meteorológicas y de otro tipo relacionadas con el medio ambiente en la interfaz aire-mar, debajo de la superficie marina y en la atmósfera por encima de la superficie del mar.

Las observaciones pueden hacerse utilizando plataformas fijas o móviles, *in situ* o por teledetección, y empleando técnicas en la superficie terrestre o en el espacio.

Las mediciones sobre el terreno son en general observaciones realizadas en un solo punto, tratando de que sean representativas de la zona marina circundante como ocurre, por ejemplo, con la meteorología sinóptica.

Las técnicas de teledetección se emplean para representar grandes zonas o volúmenes, siendo muy convenientes, en particular, para las observaciones del hielo marino.

Mediciones in situ Este tipo de mediciones u observaciones se llevan a cabo empleando diversos tipos de plataformas, entre otras:

- buques de observación voluntaria (VOS);
- estaciones meteorológicas oceánicas;
- embarcaciones ligeras tripuladas o automáticas;
- boyas fondeadas;
- boyas a la deriva;
- torres;
- plataformas y torres de perforación petrolera y de gas;
- estaciones meteorológicas automáticas (EMA) insulares;

- y sistemas de EMA a bordo de buques.
- AUV (Autonomous Underwater) y ROV (Remote Operate Vehicle)

El tipo de plataforma determina, generalmente, la gama de parámetros medidos y comunicados; así, los buques de observación voluntaria, que utilizan técnicas de observación tanto manuales como medidas, comunican todas las observaciones necesarias para la meteorología sinóptica.

2.2.6 Técnicas de teledetección para la capa límite y la troposfera.

Las técnicas de teledetección se basan en la interacción de la energía electromagnética o acústica con la atmósfera. El instrumento de medición y la variable que debe medirse se encuentran espacialmente separados, al contrario de lo que ocurre en la detección sobre el terreno [KARMAKAR, 2013].

Para las aplicaciones atmosféricas, la técnica puede dividirse en técnicas pasivas y activas [COULTER, 1999].

En las técnicas pasivas se utiliza la radiación de origen natural en la atmósfera (radiómetros de microondas). La radiación térmica procedente de la atmósfera en frecuencias de microondas tiene su origen fundamentalmente en el oxígeno, el vapor del agua y el agua líquida, y depende de la temperatura y de la distribución espacial. En el caso de un gas como el oxígeno, cuya densidad en función de la altura es bien conocida, dada la presión en superficie, la radiación contiene esencialmente información sobre la temperatura de la atmósfera [CRESCENTI, 1997].

Los perfiles de temperatura vertical de la atmósfera baja pueden obtenerse al medir con radiómetros de microondas pasivos en tierra la emisión térmica en microondas del oxígeno en una banda espectral próxima a los 60 GHz.

Las mediciones espectrales en el extremo superior de 22-30 GHz de la banda de absorción —de ensanchamiento por presión— del vapor de agua, proporcionan información sobre la cantidad integrada de vapor de agua y de agua líquida, así como sobre la distribución vertical de vapor de agua [DRUILHET, 1997].

Además, las mediciones espectrales en ambas bandas, combinadas con las mediciones en el infrarrojo de la temperatura de la base de las nubes, proporcionan información sobre la cantidad integrada y la distribución vertical de agua líquida [IASSAMEN, 2009].

Los sistemas activos (sodares, perfiladores del viento, sistema de sondeo radioacústico (RASS) y lidares) se caracterizan por la inyección en la atmósfera de una radiación artificial específica. Por ejemplo, el caso de los Radares láser (lidares) La energía electromagnética a longitudes de onda ópticas y casi ópticas (desde el ultravioleta hasta el infrarrojo pasando por el visible) que generan los láseres es dispersada por las moléculas gaseosas y por las partículas que se encuentran en suspensión en el seno de la atmósfera. Esta dispersión es suficiente para permitir la aplicación del principio del radar en las observaciones de la atmósfera realizadas mediante un lidar (Light Detection And Ranging) [WEITKAMP,2006].

La dispersión óptica puede dividirse generalmente en dispersión inelástica y elástica. Cuando la longitud de onda de la energía láser, dispersada por los componentes atmosféricos, difiere en longitud de onda de la del láser incidente, el proceso se denomina dispersión inelástica. El proceso de dispersión inelástica más utilizado en sistemas de lidares atmosféricos experimentales es la dispersión de Raman[WHITEMAN,1999], resultante de un intercambio de energía entre fotones incidentes y los estados rotacionales y vibratorios moleculares de las moléculas de dispersión. En los procesos de dispersión elástica, las longitudes de onda incidente y dispersada son las mismas. Esta dispersión puede ser de Rayleigh o de Mie, y depende de las especies y del tamaño de las partículas con respecto a la longitud de onda del láser incidente[MCCARTNEY,1976].

Seguimiento con globos: el seguimiento con globos se utiliza frecuentemente para obtener datos sobre viento en la capa límite. Hay dos grandes categorías de globos utilizados en meteorología;

- a) Los globos piloto, que se utilizan para medir visualmente el viento en altitud, y los globos sonda para la medición de la altura de la base de las nubes. No suelen llevar una carga apreciable, por lo que son considerablemente más pequeños que los globos de radiosonda.
- b) globos de radiosonda o de sondeo utilizados para transportar instrumentos para el registro o la transmisión de las observaciones corrientes en altitud suelen ser del tipo extensible, y de forma esférica. Deberían poseer el tamaño y la calidad suficientes para poder transportar la carga requerida (por lo general, entre 200 g y 1 kg) a alturas de hasta 35 km, a una velocidad de ascenso lo bastante rápida como para permitir una aireación razonable de los elementos de medición

Mediciones con cohetes en la estratosfera y la mesosfera: Normalmente, los sistemas de medición con cohetes sonda meteorológicos constan de un instrumento lanzado desde un cohete cerca de su altura máxima (apogeo) que desciende luego mediante un dispositivo de deceleración, similar a un paracaídas, y transmite mediciones de la temperatura a tierra, en tanto que el seguimiento por radar de alta precisión del dispositivo proporciona información sobre el viento.

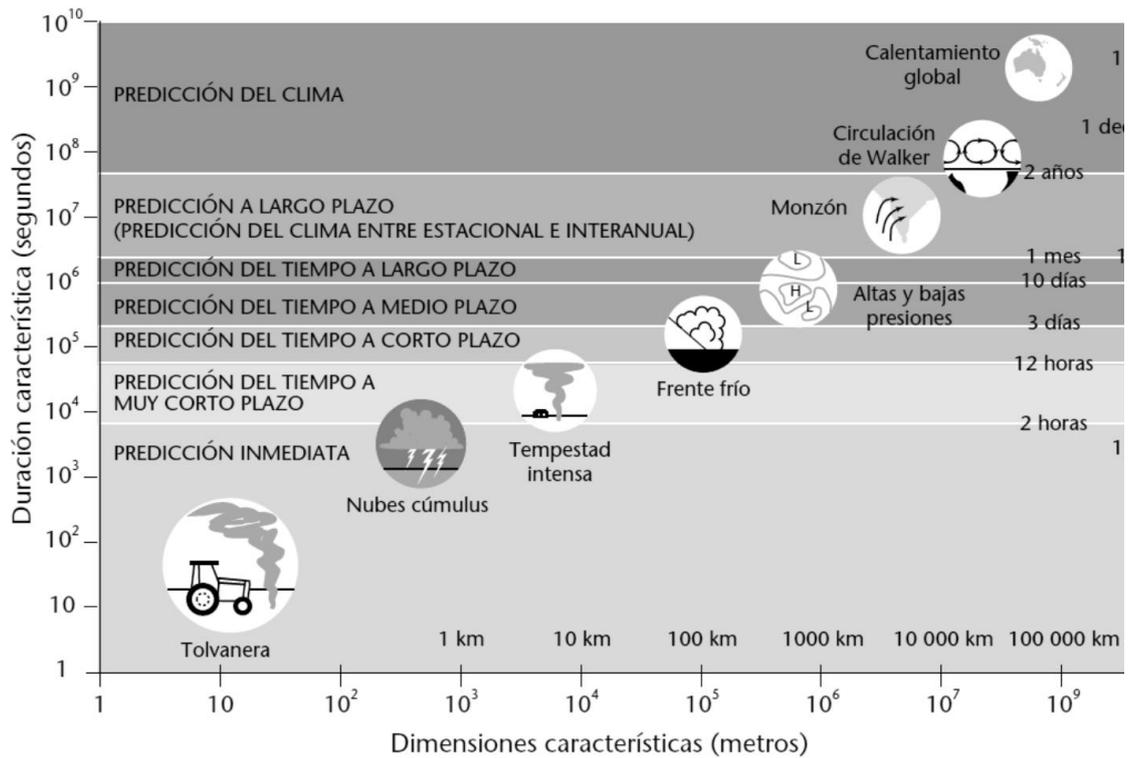


Figura 2.11. Escalas espaciales y temporales de diversos fenómenos atmosféricos (Oficina de Meteorología, Australia).

2.3 Técnicas de predicción meteorológicas

Los fines de las observaciones meteorológicas son diversos, pueden usarse para pronosticar y alertar ante la ocurrencia de fenómenos meteorológicos adversos, también para el funcionamiento de aeropuertos, con fines hidrológicos, agrarios, investigación, etc. Tal y como aparece en la Figura 2.11 eso nos puede permitir acondicionar las medidas a tomar con antelación suficiente o bien conocer con exactitud y resolución espacial adecuada lo que está sucediendo con estos fenómenos. Para ello los medios de información deben cumplir cierta representatividad, es decir deben proporcionar la

exactitud necesaria en la descripción del parámetro, ya que los distintos usos y aplicaciones tienen una escala espacial y temporal definida para realizar sus predicciones. Las escalas de pronóstico están estrechamente relacionadas a la escala temporal del fenómeno, así p.ej. para un pronóstico del tiempo a muy corto plazo se requieren observaciones más frecuentes provenientes de una densa red de observaciones sobre un área limitada para poder detectar cualquier fenómeno de pequeña escala y su rápida evolución.

2.4 Efectos de la meteorología en las redes de radioenlaces terrestres de microondas.

Para la mayoría de los sistemas de comunicación un aspecto clave es la disponibilidad, entendida esta como el porcentaje de tiempo que el enlace permite la realización de comunicaciones con unas especificaciones de tasa de error determinada. Soslayando cuestiones como las averías de los sistemas, interferencias y desvanecimientos por multitrayecto, hay otros factores cuyo impacto afecta significativamente a la disponibilidad del servicio. Estos factores, cuando hablamos de la banda SHF son debidos a la meteorología y se relacionan directamente con los llamados hidrometeoros, de entre ellos la lluvia que se puede considerar es el factor más limitante, Figura 2.12. Los efectos empiezan a ser significativos por encima de los 5 GHz y alcanzan gran significación en el rango de 20 a 30 GHz.

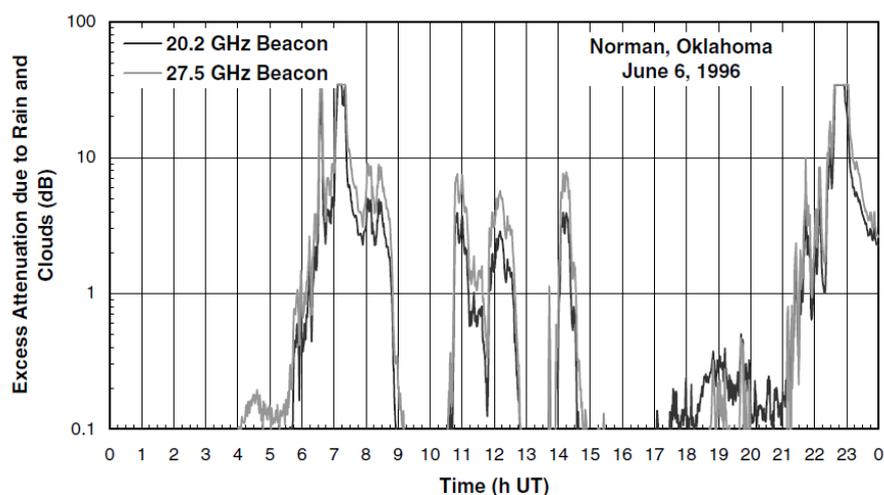


Figura 2.12. Incrementos de la atenuación por lluvia y nubes en radioenlaces en función de tiempo para dos frecuencias 20.2 GHz y 27.5 GHz.

Por otro lado, las comunicaciones en estas bandas revisten una serie de características técnicas que las hacen muy atractivas en múltiples aplicaciones. Es por eso que se han desarrollado modelos de predicción

estadística de atenuación de lluvia para facilitar a los diseñadores de sistemas de comunicaciones las herramientas que permitan cumplir los requisitos y costes. Los modelos de predicción de atenuación de lluvia son de dos tipos:

- (1) modelos de regresión que usan la tasa de lluvia y las estadísticas de la atenuación en el vano para generar un modelo para una sola ubicación, extensible con suerte a otras similares.
- (2) Modelos físicos que utilizan información estadística sobre la ocurrencia de la lluvia y los procesos de dispersión de la lluvia para proporcionar predicciones que debe ser válido en todas partes.

Este último tipo de modelo todavía tienen limitaciones debidas a una comprensión imperfecta del proceso de la lluvia. Nuestro conocimiento del proceso de atenuación de la lluvia ha avanzado, hasta el punto de que la atenuación se puede establecer con bastante aproximación, si tenemos una estructura detallada de la lluvia, es decir conocemos el tamaño de la gota, la forma, la orientación, temperatura y distribución del estado físico de los hidrometeoros a lo largo del camino. Sin embargo, dicha información no está disponible, y por tanto son necesarios modelos de predicción estadísticos.

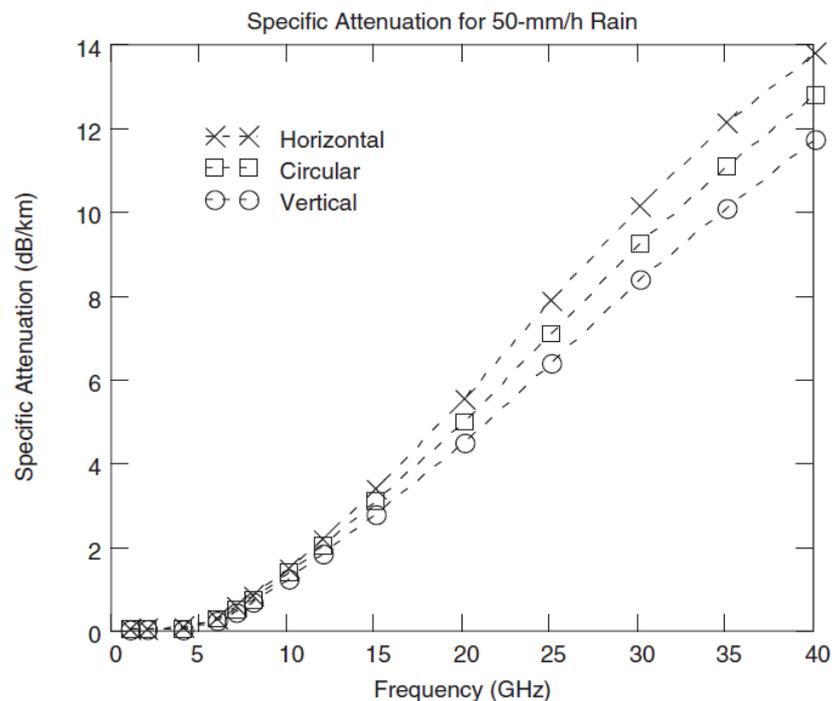


Figura 2.13. Efecto de la polarización de la transmisión en función de la frecuencia para lluvia de intensidad Fuerte.

2.5 Modelos de propagación.

Cuando nos adentramos en el estudio de la propagación de las ondas electromagnéticas a través de un medio deberemos tener una serie de conceptos. Hay que tener en cuenta que una onda de radio transmitida desde un punto en cualquier dirección se propagara partiendo de ese punto a la velocidad de la luz, que la energía viajará en línea recta a menos que exista un obstáculo que se lo impida y que de no existir obstáculo esa energía lo hará por siempre.

Es por ello que uno de los primeros conceptos puede ser algo confuso a priori, es el concepto de perdida de espacio libre.

Las ***pérdidas en espacio libre*** estrictamente hablando no existen como tales, la onda transmitida cumple la ley de la conservación de la energía [LANDAU,1973]

. El concepto de pérdidas en el espacio libre hace más bien referencia a un diferencial entre la potencia transmitida en un punto frente a la potencia recibida en otro punto debido a esa transmisión.

Desde el punto de vista físico podemos considerar que la propagación de la energía electromagnética en el espacio libre [ITU-R P, 525 -3] presenta dependencia con la distancia siguiendo en forma de inversa del cuadrado.

Siendo P_i la potencia por unidad de área en vatios por metro cuadrado a una distancia d y P_t potencia isotrópica equivalente:

$$P_i = P_t \left(\frac{1}{4 * \pi * d^2} \right)$$

Si aplicamos que la apertura de una antena (A) es función de su Ganancia (G) y de la longitud de onda que se transmite (λ)

$$A = G * \left(\frac{\lambda^2}{4 * \pi} \right)$$

En el caso de una antena isotrópica presenta ganancia unidad ($G = 1$), podemos afirmar que la apertura de una antena isotrópica (A_i) es

$$A_i = \left(\frac{\lambda^2}{4 * \pi} \right)$$

La potencia de recepción (P_r) respecto a una antena isotrópica quedaría de la forma siguiente.

$$Pr = Pi * A = Pi * \left(\frac{\lambda^2}{4 * \pi} \right) = Pt \left(\frac{1}{4 * \pi * d^2} \right) \left(\frac{\lambda^2}{4 * \pi} \right)$$

$$Pr = Pt \left(\frac{\lambda^2}{4 * \pi * d^2 * 4 * \pi} \right)$$

$$\frac{Pr}{Pt} = \left(\frac{\lambda^2}{4 * \pi * d^2 * 4 * \pi} \right)$$

$$\frac{Pt}{Pr} = \left(\frac{4 * \pi * d}{\lambda} \right)^2$$

Aplicando la fórmula de FRIIS [FRISS,1946] simplificada podemos determinar que la Atenuación en espacio libre entre la potencia de transmisión y la potencia de recepción

$$Loss = \frac{Pt}{Pr}$$

$$Loss = \left(\frac{\lambda}{4 \pi d} \right)^2 = \left(\frac{c}{4 \pi d f} \right)^2$$

Aproximadamente las perdidas en espacio libre [ITU-R P, 525 -3] resultan:

$$Loss (dB) = 32.4 + 20 \cdot \log_{10}[f(MHz)] + 20 \cdot \log_{10}[d(km)] \quad \text{Ec.2.4}$$

Por lo que las pérdidas por espacio libre, Ec.2.4, solo son dependientes de dos factores, por un lado, la frecuencia de la transmisión y por otro la distancia del vano del radioenlace.

Estas pérdidas se podrían considerar como las únicas perdidas que se producen en el vano si el medio de transmisión fuera el espacio. Una gran diferencia respecto al espacio libre es la propagación a través de una atmosfera. En caso de radioenlaces terrestres esta propagación se realiza a través de la troposfera, que comprende desde el nivel del suelo hasta los 17 kilómetros de altitud en el ecuador del planeta o tan solo 7 kilómetros en los polos. La troposfera se caracteriza también por ser la capa más delgada y densa que engloba el 70% de la masa total de la atmosfera.

Capítulo 2

Condiciones meteorológicas y sus efectos sobre los radioenlaces de microondas

Cuando una onda electromagnética se propaga a través de la atmosfera, interactúa con las moléculas de gas causando pérdidas de energía o bien interactuando con ellas y sus oscilaciones moleculares. La cantidad de perdida de energía depende de lo próximo que esté cada frecuencia de trasmisión a cada frecuencia de resonancia de cada tipo de molécula.

Las ***atenuaciones atmosféricas*** predominantes en los enlaces de microondas son las debidas a las moléculas del oxígeno y las del vapor de agua (no confundir con gotas de precipitación) a lo largo del enlace.

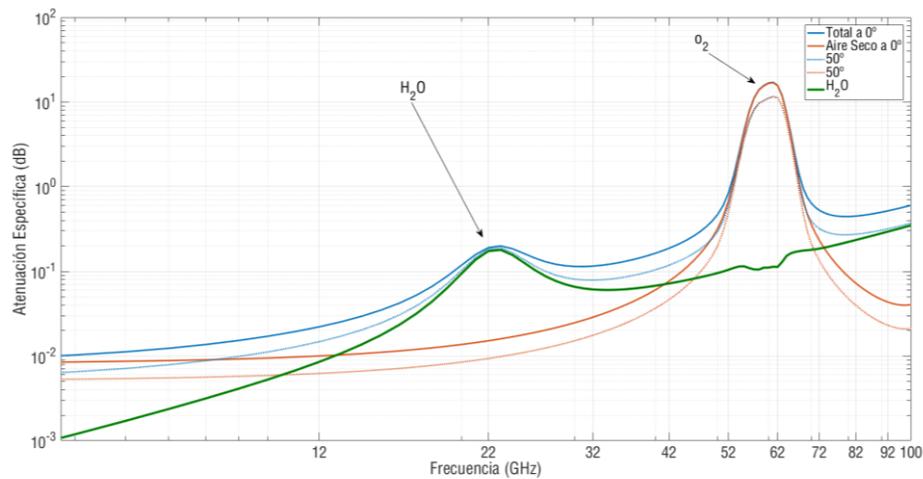


Figura 2.14. Atenuación por absorción de una OEM en función de la frecuencia para oxígeno y vapor de agua.

A la vista de la Figura 2.14 el vapor de agua presenta un pico de resonancia a 22,3GHz y en 57GHz en caso del oxígeno.

La atenuación específica se calcula mediante la integración de todas las atenuaciones debidas a las distintas líneas de resonancia [ITU-R P,676].

$$A = \gamma r_0 = (\gamma_o + \gamma_w) r_0 \quad \text{dB}$$

Por lo tanto, se calcula la atenuación específica para el aire seco, γ_o (dB/km), y la atenuación específica para el aire húmedo, γ_w (dB/km), a partir de las expresiones:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0.1820f (N''_{\text{oxígeno}}(f) + N''_{\text{vapordeagua}}(f)) \quad (\text{dB/km})$$

$$N''_{\text{oxígeno}}(f) = \sum_{i(\text{oxígeno})} S_i \cdot F_i + N''_D(f)$$

$$N''_{\text{vapor de agua}}(f) = \sum_{i(\text{vapor de agua})} S_i \cdot F_i$$

$S_i = a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp [a_2 (1 - \theta)]$ para el caso de oxígeno

$S_i = b_1 \times 10^{-1} e \theta^{3.5} \exp [b_2 (1 - \theta)]$ para el caso del vapor de agua

$$e = \frac{\rho T}{216.7}$$

Donde

p : Presión del aire seco (hPa)

e : Presión parcial del vapor de agua (hPa)

$p_{tot} = p + e$: Presión barométrica total

$\theta = 300/T$

T : temperatura (°K).

ρ : Densidad de vapor de agua o humedad

Los valores del resto de las variables como son $N_D''(f)$, F_i y los valores de los coeficientes a_n y b_n se extraen de los datos de espectroscopía relativas al vapor de agua como de las relativas al oxígeno y en detalle en la correspondiente recomendación ITU P 676.

En las recomendaciones de la ITU UIT-R P.676 tenemos la formulación en detalle para el cálculo de dicha atenuación, pero a grosso modo hay que destacar que la atenuación atmosférica es función de la longitud del trayecto, de la frecuencia, de la temperatura, de la presión y de la densidad de vapor de agua presente en el trayecto. En las Figura 2.15, 2.16 y 2.17 podemos observar la importancia de cada uno de esas variables.

Capítulo 2

Condiciones meteorológicas y sus efectos sobre los radioenlaces de microondas

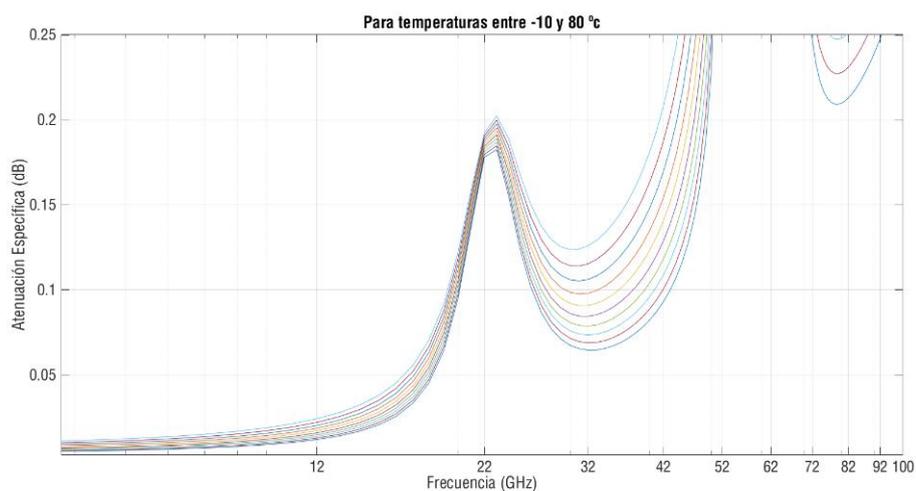


Figura 2.15. Atenuación en función de la frecuencia y de la temperatura.

Para un enlace que trabaje sobre los 22 GHz se puede observar como el efecto de las variaciones de las temperaturas es bastante bajo, del orden de 0.025dB por kilómetro siendo algo mayor para frecuencias de 32GHz del orden de 0.06dB por kilómetro.

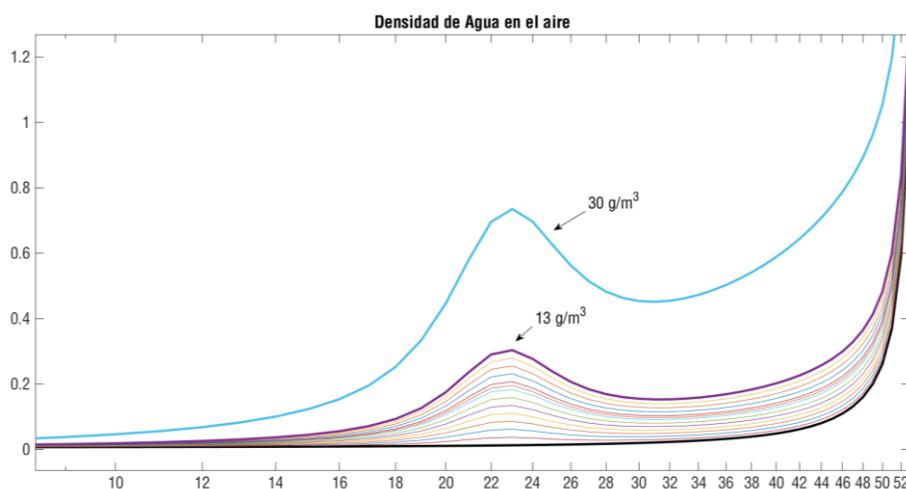


Figura 2.16. Atenuación en función de la frecuencia y de la densidad del agua en el aire.

La densidad de agua en el aire o humedad absoluta es otro factor a tener en cuenta a la hora de realizar el cálculo de la atenuación atmosférica, sobre todo a frecuencias cercanas al 22,3 GHz dado que nos encontraríamos en la frecuencia de resonancia de la molécula de agua. Las atenuaciones pueden variar 0.5dB si se duplica la densidad de agua en el aire. La humedad máxima es función de la temperatura y como referencia, la máxima humedad posible

a 30°C es de aproximadamente 30 gr/m³ mientras que la misma máxima humeada a cero grados es de tan solo 5 gr/m³.

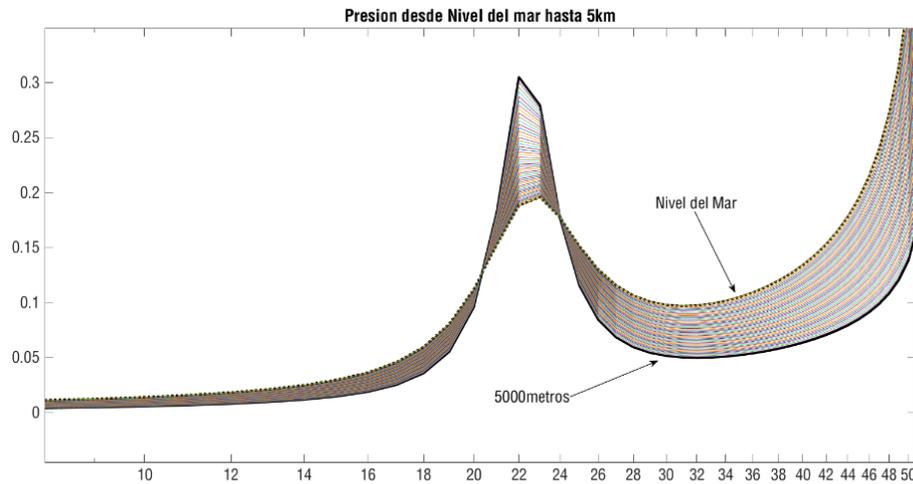


Figura 2.17. Atenuación en función de la frecuencia y de la presión atmosférica.

Por último, está el factor de presión del aire en Pascales que es función de la altitud, una atmosfera estándar a nivel de mar es de 101.325 kPa, a una altitud de 5000 metros la presión desciende aproximadamente a la mitad de dicho valor [ROBLEDO,2007].

Es importante destacar para la continuación de este trabajo que la variación de ciertos parámetros como la temperatura no debería afectar demasiado, mientras que otros factores como la densidad del aire pueden hacer que se produzcan atenuaciones extras de hasta 0.5 dBs.

Aunque ***la atenuación causada por la lluvia*** puede despreciarse para frecuencias por debajo de 5 GHz, ésta debe incluirse en los cálculos de diseño a frecuencias superiores donde su importancia aumenta rápidamente. La atenuación específica debida a la lluvia puede calcularse a partir de la Recomendación UIT-R 838. La atenuación específica Att (dB/km) se obtiene a partir de la intensidad de lluvia R (mm/h) mediante la ley exponencial:

$$Att = kR^\alpha \quad \text{Ec. 2.5}$$

donde k y α son variables que dependen de la frecuencia, de la polarización de la onda electromagnética y del tamaño de la gota de agua, su forma y su densidad volumétrica (Drop size distribution –DSD). En [OLSEN R,1978] ya se definen las componentes necesarias que relacionan la ecuación de potencia

de atenuación con la cantidad de precipitación. Y en [ZINEVICH,2008] donde se comienza a estudiar la posibilidad de estimar la precipitación a partir de los radioenlaces y donde basándose en estudios de [ATLAS,1977] consideran que el DSD es despreciable a nivel de estimación y asumida como error.

Algunos valores de k y α para distintas frecuencias y polarizaciones lineales (horizontal y vertical) se muestran en la tabla 2.3. En la Rec. UIT-R 838 se proporcionan un mayor número de valores. Para obtener valores a frecuencias intermedias se recomienda aplicar interpolación, utilizando una escala logarítmica para la frecuencia y para k , y una escala lineal para α . De la tabla se deduce que la atenuación es ligeramente superior para polarización horizontal que para vertical. Esto se debe simplemente a la forma que adquieren las gotas de lluvia por el rozamiento durante la caída.

Tabla 2.3. Coeficientes de regresión para estimar el valor de la atenuación específica.

Frecuencia (GHz)	Polarización horizontal		Polarización vertical	
	k	α	k	α
6	0,00175	1,308	0,00155	1,265
8	0,00454	1,327	0,00395	1,310
10	0,0101	1,276	0,00887	1,264
20	0,0751	1,099	0,0691	1,065
30	0,187	1,021	0,167	1,000
40	0,350	0,939	0,310	0,929
60	0,707	0,826	0,642	0,824
100	1,12	0,743	1,06	0,744

En la figura YY se representan curvas de atenuación específica por lluvia en función de la frecuencia y para distintos valores de precipitación. Como puede observarse, la atenuación específica crece rápidamente para frecuencias por encima de 10 GHz. Para una tasa de precipitación de $R = 50$ mm/h se obtienen valores de atenuación específica mayores de 10 dB/km para frecuencias superiores a 30 GHz.

Por lo tanto, la lluvia es un parámetro diferenciador en la calidad de los sistemas de radiocomunicaciones que operen a frecuencias milimétricas.

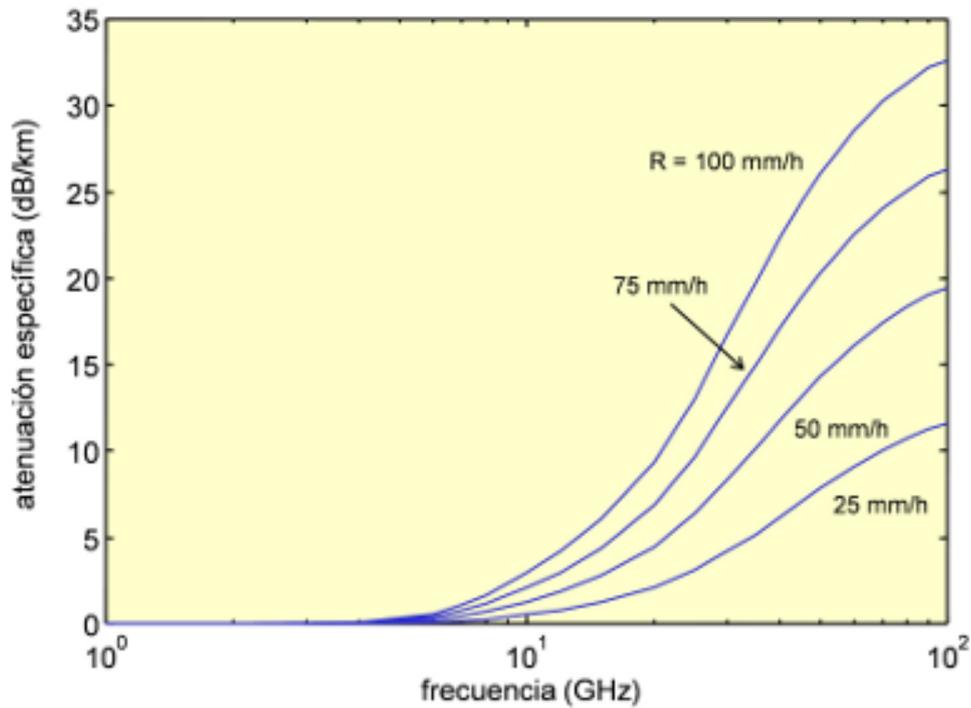


Figura YY: Atenuación específica para distintas intensidades de lluvia.

Conviene indicar por último que en todos los cálculos anteriores se considera propagación en trayectos horizontales y polarizaciones lineales. Si se tiene una inclinación de la polarización con respecto a la horizontal o un determinado ángulo de elevación en el trayecto, entonces los valores de k y α de la tabla deben modificarse por medio de unas fórmulas de corrección incluidas en la misma Recomendación.

En conclusión, podemos considerar que la potencia recibida en un sistema remoto no es más que un balance de ganancias y pérdidas en las cuales la suma de todas las pérdidas posibles calculadas cuando se realiza el diseño de un radioenlace menos todas las ganancias que se puedan producir y menos la potencia con la que se transmite desde una longitud L son iguales a la potencia de recepción- figura 2.18. Esa no es más que la definición simplificada de la fórmula de Friis [FRISS,1946]

Capítulo 2
Condiciones meteorológicas y sus efectos sobre los radioenlaces de microondas

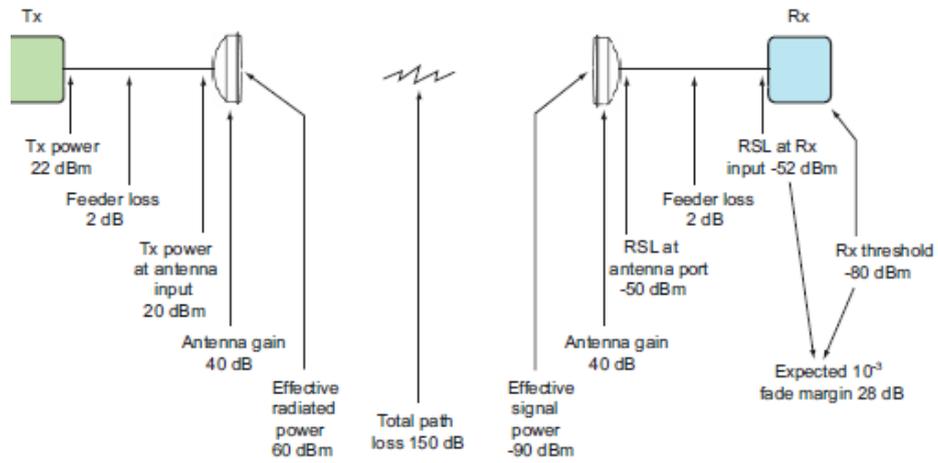


Figura 2.18. Balance de ganancias y pérdidas en un radioenlace.

2.6 Parámetros de control de comunicaciones de microondas.

En función de la aplicación y grado de integración de cada fabricante, los elementos funcionales de un nodo de radioenlace pueden variar de ubicación desde el punto de vista estructural. Pero esencialmente los nodos de un radioenlace suelen estar compuesto de una antena de dimensiones y características variables instalada en torres exteriores y conectada al alojamiento de la transmisión a través de cables coaxiales o guías de ondas, una unidad externa de preprocesado de la señal, Outdoor Device Unit (ODU) y un dispositivo interno encargado del enrutamiento y control de los parámetros de funcionamiento del sistema.

Las estaciones deben tener un sistema de energía compartido, lo suficientemente confiable para que el servicio no se interrumpa y dentro de los límites estandarizados de voltaje, frecuencia y calidad de la señal de suministro eléctrico.

En las redes de telefonía móvil, así como en las redes con tecnología TETRA, o TErrestrial Trunked Radio, como es el caso de nuestra red, los radioenlaces de Backhaul están diseñados para asegurar una muy alta estabilidad de las comunicaciones.

En las comunicaciones de microondas los parámetros de control están estrechamente ligados al ODU y son: RSL (Received Signal Level) nivel de señal a la entrada del receptor, RSSI (Received Signal Strength Indicator), SNR (Signal Noise Ratio), voltaje y temperatura de ODU.

Las variaciones incontroladas de estos parámetros indican normalmente funcionamientos anómalos. Su seguimiento posibilita la detección de ciertos cambios en el medio de transmisión (atmosfera) debido a variaciones meteorológicas.

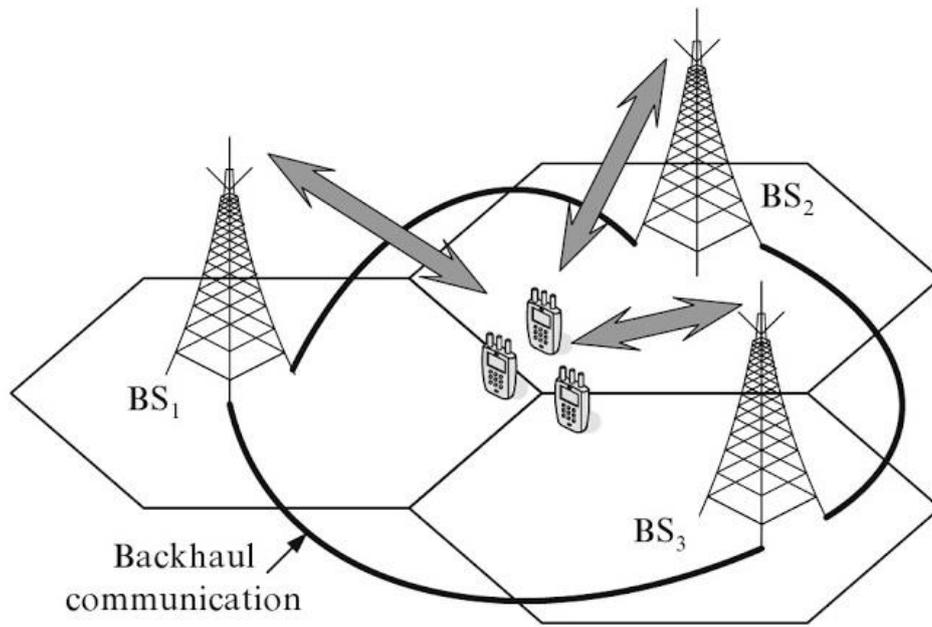


Figura 2.6. Ejemplo de red de telecomunicación [DING,2013].

Capítulo 3

Fuentes de datos y generación de las señales

Si bien en esta tesis doctoral presentamos aportaciones científico-técnicas, estas se validan sobre datos en situaciones realistas. La visión hacia una aplicación finalista de nuestro trabajo hace que necesitemos de bases de datos que nos permitan realizar una labor de aprendizaje automático, prueba de los resultados del aprendizaje y, finalmente, una validación de los mismos. Todo esto en unas condiciones fieles a la realidad en que finalmente se implantarán nuestras aportaciones. De esta forma los logros científicos que alcancemos serán sólidos, tanto desde un punto de vista teórico como práctico.

Generar las bases de datos que necesitamos constituyó uno de los primeros desafíos de esta tesis. Así, obtener información proveniente de una serie de radioenlaces y estaciones meteorológicas, organizarlas y procesarlas para poder hacer un uso adecuado, es una de nuestras aportaciones.

En los primeros apartados daremos una serie de características técnicas y descripciones de funcionamiento. Nos centramos en los aspectos esenciales para entender el tipo de información que extraemos, nuestros datos, y cómo hemos construido unas bases de datos. A partir de ellas hemos generado las señales de interés sobre las que trabajamos a lo largo de la tesis.

3.1 Datos meteorológicos y la señal asociada

La información meteorológica elaborada por la Agencia Estatal de Meteorología ha sido adquirida desde el propio portal web de la Agencia (AEMET) [AEMET,2017b]. A tal efecto, cada día hemos capturado los datos de las últimas 24 horas, esto con cada una de las estaciones meteorológicas de interés. Se ha hecho mediante un algoritmo encargado de visitar la página, localizar los datos deseados y enviarlos a una dirección donde se almacena en forma de archivo de texto para su procesado y carga en nuestra base de datos meteorológica.

En el anexo II adjuntamos la nota legal de uso de estos datos a fecha 1 de junio de 2017.

En la Figura 3.1 podemos observar como es una estación meteorológica estándar utilizada por AEMET.

Una segunda fuente de información meteorológica utilizada es la creada por el Viceconsejería de Medioambiente del Gobierno de Canarias desde su plataforma OpenData [GOBCAN,2017a]. Más concretamente se han descargado los datos validados por los gestores de la Red de Control y Vigilancia de la Calidad del Aire de Canarias [GOBCAN,2017b].

3.1.1 Obtención y generación de la base de datos

Es muy importante tener en cuenta que la escala temporal de los datos es horaria, esto es, se da un dato por hora, y se proporciona referido a cada hora en punto. Esto tiene consecuencias sobre los datos obtenidos de los radioenlaces pues, tal como veremos, estos son quinceminutales.



Figura 3.1 Estación meteorológica estándar de AEMET

Muestreo temporal: El muestreo de los datos es horario, dado cada hora en punto.

Datos capturados: En la tabla 3.1 mostramos un ejemplo de captura de datos, y a continuación el significado de cada dato.

Time	Temperatura	WV	Wdir	WRacha	WDirRacha	Precipitación	Presión	Tendencia	Humedad
20/07/2016 13:00	27.6	21	Este	51	Este	0	0	0	64
20/07/2016 14:00	27.9	10	Sur	29	Este	0	0	0	67
20/07/2016 15:00	26.7	17	Este	32	Este	0	0	0	72
20/07/2016 16:00	25.6	17	Sudoeste	25	Oeste	0	0	0	75
20/07/2016 17:00	25.3	12	Sur	20	Sudoeste	0	0	0	79

Tabla 3.1 Ejemplo de captura de datos meteorológicos

- Time: Momento de la captura. Se realiza en cada hora en punto.
- Temperatura: Temperatura del aire, en grados Celsius (°C).
- Velocidad del viento (WV): Velocidad media del viento en los 10 minutos anteriores a la hora indicada, en km/h. Se considera que el

viento está en calma cuando la velocidad media, en diez minutos, es inferior a 1,8 km/h.

- Dirección del viento (W_{dir}): Dirección media del viento, en los diez minutos anteriores a la hora indicada, en relación a los 8 rumbos principales. Estos son: norte, sur, este, oeste, noreste, noroeste, sureste y suroeste.
- Velocidad racha (WR_{acha}): Velocidad máxima del viento, en los 60 minutos anteriores a la hora indicada, en km/h.
- Dirección racha ($W_{DirRacha}$): Dirección de donde viene el viento, en el instante de la racha, en relación a los 8 rumbos principales.
- Precipitación de lluvia: Precipitación acumulada en la última hora, en mm (l/m^2).
- Presión atmosférica: Medida al nivel de la estación, en hPa.
- Humedad relativa del aire: Expresada en porcentaje.

Otro dato de interés puede ser la “Tendencia de la presión”, esto es, la característica y valor de la variación de la presión en las últimas 3 horas, expresado en hPa. Una característica positiva (+) indica un aumento de la presión atmosférica y una característica negativa (-) indica una disminución de la misma.

Por otro lado, la red de calidad de aire de Canarias dispone de tres redes de inmisión, dos de ellas de titularidad privada (Endesa con 28 estaciones y CEPSA con 5 estaciones) y una tercera red de titularidad pública perteneciente a la Vice consejería de Medio Ambiente (20 estaciones).

Debido a que la evaluación de la calidad del aire que exige la normativa [SIMAC,2017] se aplica en zonas muy definidas la distribución de las estaciones se centra en zona poblacionales y ecosistemas muy determinados.

Así mismo, el tipo de datos suministrado por cada una de las 53 estaciones es muy variado, presentando algunas unos parámetros y otras estaciones otros parámetros distintos. Grosso modo podemos encontrar en las distintas estaciones parámetros medidores de valores de los contaminantes expresados en $\mu g/m^3$, excepto para el CO (monóxido de carbono) que se expresan en mg/m^3 , datos de partículas de 10micras 2.5 micras, dirección de viento en grados, velocidad en m/s, temperatura en $^{\circ}C$, humedad relativa en %, presión barométrica en mbar, precipitación en l/m^2 y la radiación solar en W/m^2 .

Fecha	Hora	SO2	NO	NO2	PM10	PM2,5	O3
01/01/2015	1	2	4	17	31	14	61
01/01/2015	2	3	1	45	30	15	43
01/01/2015	3	3	1	40	21	11	48

Fecha	Hora	CO mg/m3	Benceno	Tolueno	Xileno	TRS	UVPM
01/01/2015	1	0.2	0.7	0.3	0.4	0.1	1.3
01/01/2015	2	0.3	1.3	0.8	1.1	0.1	1.7
01/01/2015	3	0.3	1.1	0.8	1.2	0.1	1.9

Fecha	Hora	Dirección	Velocidad	Temperatura	Humedad	Presión	Radiación Solar	Precipitación
01/01/2015	1	115	3.9	17	60	996	762	0
01/01/2015	2	79	4.3	17	61	996	436	0.8
01/01/2015	3	109	6	18	52	997	204	0

Tabla 3.1 Ejemplo de captura de datos meteorológicos

Estructura de la BBDD: Una vez que se han adquirido los datos, estos son almacenados (12785 archivos en caso de AEMET que ocupan 56.7MB) en una Base de Datos meteorológicos con una estructura como la que se presenta en la Tabla 3.2, donde cada campo está relacionado con los datos anteriormente descritos.

#	Nombre	Tipo	Cotejamiento	Nulo	Predeterminado
1	Time	datetime		No	Ninguna
2	Temperatura	float		Sí	NULL
3	WV	float		Sí	NULL
4	Wdir	varchar(50)	latin1_swedish_ci	Sí	NULL
5	WRacha	float		Sí	NULL
6	WDirRacha	varchar(50)	latin1_swedish_ci	Sí	NULL
7	Precipitación	float		Sí	NULL
8	Presión	float		Sí	NULL
9	Tendencia	float		Sí	NULL
10	Humedad	float		Sí	NULL

Tabla 3.2 Estructura de la base de datos meteorológicos

3.1.2 Tratamiento de los datos y generación de la señal meteorológica

Una vez que hemos adquirido los datos y son almacenados en la Base de Datos, es necesario realizar un tratamiento adecuado pues no se pueden usar directamente. Este tratamiento se realizará para cada estación meteorológica disponible, y tienen una importancia capital pues sirven de referencia para las técnicas que se presentan en esta tesis. Dicho de otra forma, el diseño y aprendizaje de nuestros algoritmos depende de los datos meteorológicos.

El tratamiento comprende dos etapas. En la primera, se hace una lectura desde la Base. Y en la segunda, realizamos un estudio de los datos de precipitación para buscar esos momentos e intervalos temporales en los que no hay información disponible. Es lo que hemos denominado vacíos o “gaps”.

Causas de gap: Los tipos de gap se pueden producir por diferentes factores que explicaremos a continuación:

- Vida útil de la batería: Todas las estaciones de meteorología cuentan con una batería para que se puedan capturar y transmitir los datos. El problema reside en la antigüedad de esta, puesto que cuanto más antigua sea, los ciclos de carga y descarga serán menores y se producirán periodos temporales en los que la estación no transmita los datos.
- Placas solares muy pequeñas: Cuanto más pequeña es una placa solar, menos luminosidad capta. Algo en lo que también influye el hecho de que estas se ensucian y, con frecuencia, solo se limpian cuando llueve.
- Lluvias torrenciales: La ganancia de la antena con la que se transmiten los datos es muy baja y si llueve demasiado dicha señal no llega al receptor.
- Interferencias: Las estaciones transmiten en banda libre a frecuencia de MHz. Esto tiene como consecuencia que puede haber interferencias, y que la señal transmitida no llegue al receptor.

Tipos de gap: Hay dos tipos principales, y para cada uno realizaremos una acción diferente.

- Ausencia de datos. En estos casos la base temporal es correcta, esto es, manejamos correctamente la hora de medida, pero no tenemos un dato real.
- Error de fecha. Este caso lo encontramos al analizar las fechas. A saber, podemos encontrar que nos faltan datos de una hora, un día completo o incluso semanas enteras.

Generación de la señal meteorológica: Una vez que obtenidos los datos y comprobamos los tipos de gap, para generar la señal meteorológica correspondiente (por ejemplo, temperatura, nivel de precipitación) se procede a ordenar los datos respetando la base temporal y rellenando convenientemente los vacíos que pudiera haber. Esto se hace de la siguiente forma:

- Ausencia de datos. Para manejar esta situación introducimos en la Base y en la señal un valor aberrante, de tal manera que sepamos que es un dato falso cuya finalidad es mantener una continuidad temporal.
- Error de fecha. Para manejar esta situación localizamos las fechas y se guarda en un vector la fecha de inicio de la interrupción temporal y la fecha fin del mismo. Así mismo, guardamos la fecha de inicio de nuestros datos y su fecha de final.

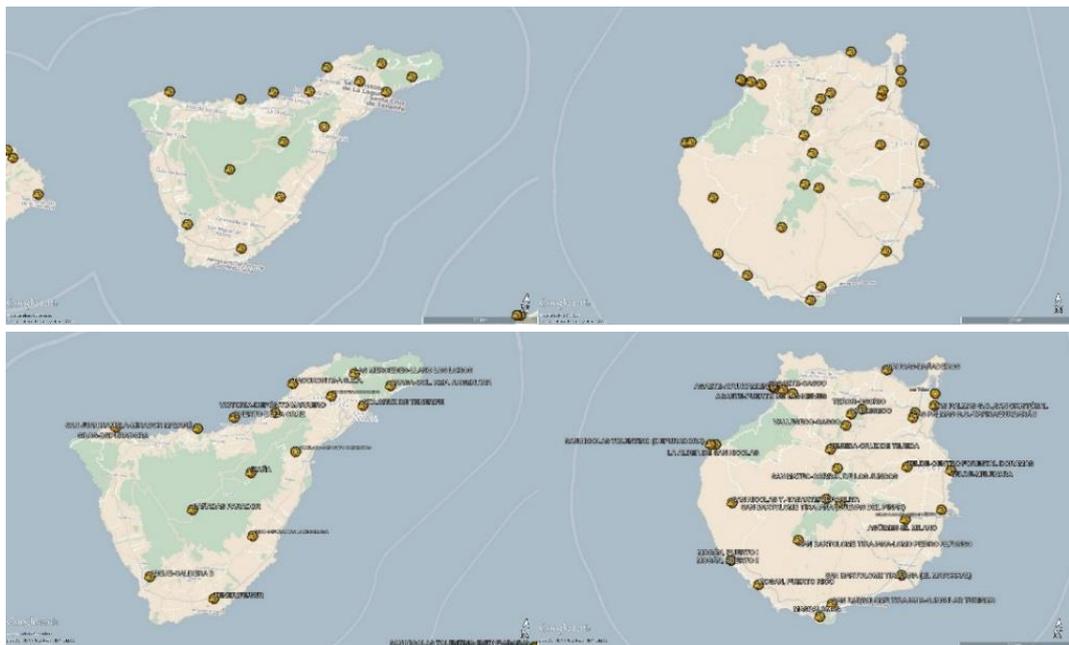


Figura 3.2. Zonificación de estaciones meteorológicas de AEMET.



Figura 3.3. Zonificación de estaciones de calidad del aire y meteorológicas del gobierno de Canarias

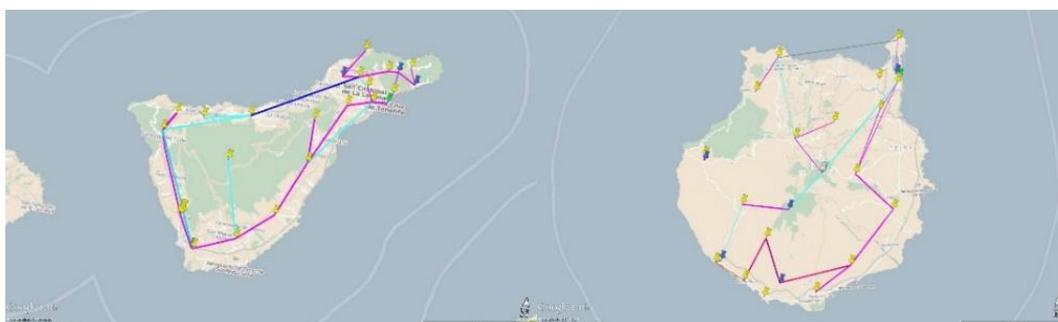


Figura 3.4. Zonificación de estaciones de radioenlaces de RESCAN.

3.2 Datos de potencia y la señal asociada

Los datos de potencia se recopilan de los radioenlaces de una red de retorno (Backhaul). Estos radioenlaces pertenecen a la red de emergencias y seguridad de Canarias (RESCAN), y dependen del Gobierno de Canarias a través de la Dirección General de Telecomunicaciones [GOBCAN,2017c].

Actualmente los datos referentes a la calidad de las señales de radioenlaces no son almacenados por los distintos propietarios de las redes. Esto se debe principalmente a su uso puntual en situaciones de averías o en casos de estudios de pérdidas de comunicación.

La captación de los datos fue realizada por personal especializado de forma no automatizada. Esto se ha hecho accediendo mensualmente a cada uno de

los nodos de los enlaces y capturando dichos datos antes de que fueran sobrescritos por nuevos datos al tratarse de sistemas con memorias FIFO (First In First Out), pues estos sistemas guardan una cantidad determinada de datos sobrescribiendo continuamente los más antiguos.

3.2.1 El subsistema ODU-Antena

Los radioenlaces mencionados comprenden los enlaces intermedios entre el núcleo o backbone y las subredes basadas en tecnología TETRA. Desde el punto de vista técnico esta red se sustenta en equipamientos de la marca Aviat Networks [AVIAT,2015]. Concretamente, en esta tesis nos centramos en unidades de radiofrecuencia (RFU) compacta y de alto rendimiento para aplicaciones de microondas consistentes en antenas y Output Devices Units (ODU) de los modelos Eclipse ODU 300.

Tanto antenas como ODU son elementos esenciales para los capítulos de aportaciones en esta tesis, y prestaremos atención a su descripción.

Comenzamos por presentar un ejemplo del lugar que ocupa un ODU-Antena. En este apartado nos vamos a centrar sobre todo en los ODU y las antenas ya que serán usados específicamente como soporte y proveedores básicos de datos e información en general.

En la Figura 3.5 se puede apreciar un montaje completo con los siguientes elementos principales:

- Mástil para elevar la antena.
- Conjunto ODU-Antena.

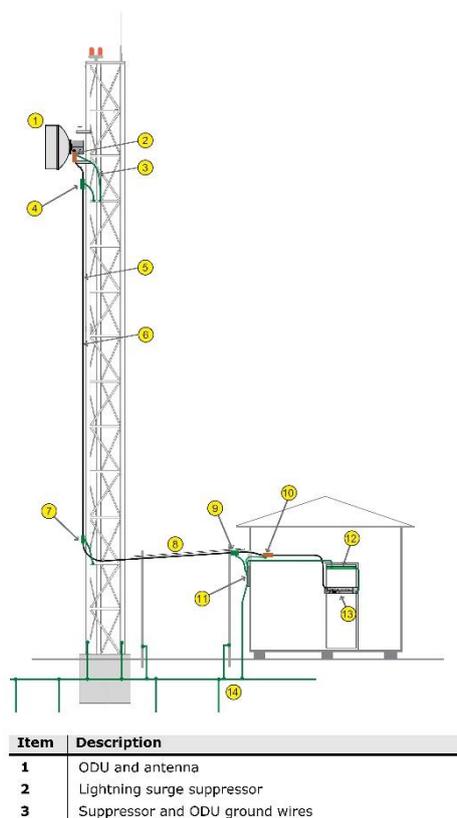


Figura 3.5 Ejemplo del montaje de Antena-ODU sobre mástil

- Caseta donde se ubican diversos equipos del sistema de comunicación.

3.2.2 Radioenlaces con una antena y con diversidad

Los radioenlaces con que trabajaremos pueden usar una sola antena, o estar en diversidad de antenas para prevenir desvanecimientos que pongan el radioenlace en corte. Destacaremos algunos detalles que nos serán de interés a la hora de analizar los datos que obtengamos.

A modo de ejemplo, veamos una antena de 1,2 m a 23 GHz. Normalmente tiene $0,9^\circ$ de ajuste desde el centro del haz principal hasta el primer punto nulo ($0,4^\circ$ a -3 dB). En este caso, uno de los problemas habituales es el movimiento de la antena a través del haz principal, pues resultará en un rápido aumento y caída del nivel de la señal. Estamos ante lo que se conoce como un problema de desapuntamiento. La importancia de tener en cuenta esto es que debido a rachas de viento fuerte puede haber cambios de niveles de señal recibida. La causa se puede apreciar en la Figura 3.6.

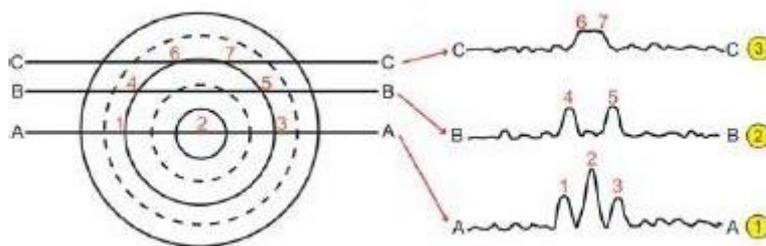


Figura 3.6 Ejemplo de cambios de nivel por desapuntamiento

1. La línea AA representa la trayectoria de seguimiento de acimut de una antena correctamente alineada. El haz principal está en el punto 2 y los primeros lóbulos laterales en los puntos 1 y 3.
2. La línea BB representa la trayectoria de seguimiento del acimut con la antena ligeramente inclinada hacia abajo. Las lecturas de la intensidad de la señal muestran solamente los primeros picos del lóbulo lateral, 4 y 5.
3. La línea CC representa una trayectoria de seguimiento de acimut con la antena aún más inclinada hacia abajo. Los primeros picos de señal del lóbulo lateral (6 y 7) aparecen como un pico, dando lugar a una interpretación errónea de un haz principal.

Puede ocurrir que, debido a los cambios de refracción en la atmósfera, reflexiones en obstáculos, etc. se produzca una propagación multicamino con efecto de un desvanecimiento (fading) profundo de señal, y un consiguiente corte en la comunicación. Cuando el riesgo de que ocurra es fenómeno es grande, una forma de evitarlo o mitigarlo es utilizando un sistema en diversidad, puede hacerse en frecuencia o en espacio. En los radioenlaces que hemos utilizado hay la segunda opción, esto es, diversidad en espacio con dos antenas convenientemente posicionadas para que no estén las dos en un desvanecimiento profundo.

Esto se puede apreciar en la Figura 3.7 [HARRIS,2009] donde el fabricante se lleva por la recomendación ITU-R P.530-13 [ITU-R P,530-13]. Hay una antena principal y una secundaria dispuestas verticalmente. La secundaria tiene como misión la de complementar de tal forma que si la principal padece un desvanecimiento profundo (p.e., -40 dB) la otra no lo tenga tan pronunciado (p.e., -20 dB). Si se produce al revés el efecto de protección es análogo.

1+1 Monitored Hot Standby Space Diversity - Outdoor Node

Multipath forms essentially in the **vertical** plane; consequently, the antennas should **always** be placed **vertically** to achieve de-correlated paths !

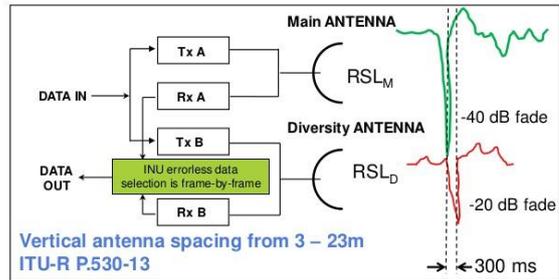


Figura 3.7 Ejemplo de diversidad en espacio mediante antenas

En la Figura 3.8 [HARRIS,2009] podemos apreciar un diagrama de bloques de funcionamiento de un sistema con dual antenas y odus, en transmisión (p.e., Site Y) solo uno de los subsistemas transmite, mientras que en recepción (p.e., Site X) ambos reciben.

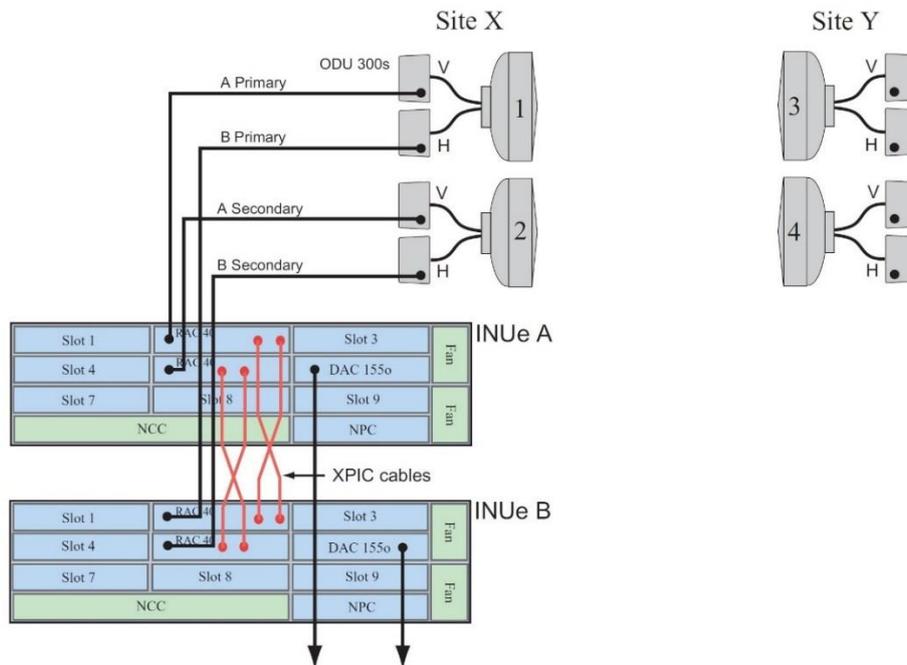


Figura 3.8 Diagrama de bloques de un sistema dual de antenas y odus con diversidad de espacio

3.2.3 Los dispositivos ODU

Estos equipos son totalmente transparentes a la carga útil transmitida, soportando cualquier tipo de tráfico, todo-IP / Ethernet, (Time-division multiplexing) TDM o Ethernet de modo mixto junto con TDM. Las modulaciones son digitales y van desde QPSK hasta 256 QAM con tasas de transmisión de datos hasta 462 Mbit/s a través de cualquier enlace de microondas.

Los ODU se montan directamente detrás de la antena para eliminar las pérdidas en la conexión de la guía de ondas y están diseñados para una máxima fiabilidad, incluso en las condiciones más difíciles. En cuanto a las características físicas poseen un sistema eficiente de disipación de calor y se encuentran completamente sellados frente a las condiciones medioambientales. Disipación y sellado son aspectos importantes a tener en cuenta cuando lleguemos al capítulo de estimación de temperatura a partir del sensor interno en este dispositivo. En la Figura 3.9 podemos apreciar un conjunto ODU-Antena de la marca Aviat.

De las hojas de características de los equipos podemos extraer alguna información relevante como es:

- a) Se suministran dos indicadores de potencia de señal recibida RSL en la pantalla de rendimiento del portal y el voltaje RSSI en el conector BNC de la ODU.
- b) ± 2 dB de diferencia entre RSL teórico y el RSL medido para el RSL máximo de niveles entre -40 y -70 dBm y a una temperatura entre 0 y 35°C.
- c) ± 4 dB para niveles entre -28 y -40 y entre -70 y -85 dBm a una temperatura de entre -33 a 0 y de entre 36 a 55°C.



Figura 3.9 Detalle del conjunto Antena-ODU de la marca Aviat [WINET,2014]

3.2.3.1 Gestión de la potencia transmitida par mantener la calidad

El Control Automático de Potencia Transmitida (Automatic Transmit Power Control, ATPC) permite al radioenlace hacer una gestión de la potencia transmitida y así mantener la calidad de las comunicaciones mediante el control de los umbrales para los márgenes de desvanecimiento. Si las condiciones del vano se deterioran debido a desvanecimientos, el ATPC incrementa gradualmente la potencia de transmisión para mantener los niveles de umbrales y los márgenes de recepción. Cuando las condiciones causantes del desvanecimiento finalizan, los niveles de potencia de transmisión se reducen hasta el mínimo nivel determinado en la instalación.

Una recomendación importante es que un ATPC es efectivo si todos los enlaces en la misma región geográfica deberían tener activado también el atpc. Esto es debido principalmente a la disminución de uno de los enlaces a sus niveles mínimos de transmisión podría originar que otros enlaces cuyos atpc estén al máximo originen interferencias sobre otros enlaces con canales adyacentes. El ATPC está basado en dos valores monitorizados. El RSL (Receive signal strength level) y la relación señal al ruido (SNR), cada nodo transmite información acerca de esos dos parámetros a su nodo destino (Figura 3.10). El nodo destino analiza la información y ajusta su potencia de transmisión para mantener los márgenes de desvanecimiento prefijados.

Si el nodo local determina que el RSL en el modo remoto es demasiado bajo aumenta su nivel de potencia en incrementos de 0.1 dB hasta que el RSL esté dentro del rango especificado y si el valor RSL está dentro del rango, pero la SNR es baja, entonces la potencia de transmisión se incrementa hasta que el SNR esté dentro del rango especificado. Los cambios de potencia ATPC pueden ocurrir a una velocidad de hasta 6 dB/segundo para compensar las condiciones de desvanecimiento rápido. Esta velocidad de compensación para un margen, por ejemplo 30 dBm, entre máximos y mínimos en un periodo de 15 minutos podría dar resultados singulares.

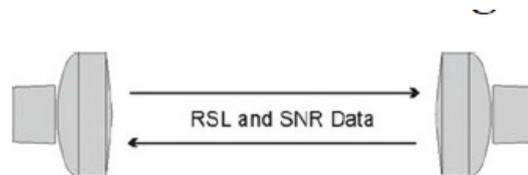


Figura 3.10 Intercambio de valores RSL y SNR

Por ejemplo, que en tan solo 5 segundos varíe la potencia de máximo a mínimo o viceversa, permaneciendo en esos niveles mientras el suceso siga activo. Una lluvia de 15 minutos provocaría un rápido escalón que se mantendría en forma de continua. Y una lluvia muy rápida o pasajera podría hacer que en otros 5 segundos el nivel vuelva a su posición mínima que al promediar durante 15 minutos sería prácticamente indetectable.

Esta es la forma de seguir el desvanecimiento en el extremo remoto:

- La radio remota transmite sus RSL y SNR actuales al extremo local una vez cada 100 ms.
- La radio local entonces determina un margen de desvanecimiento mediante la compensación de estos valores RSL y SNR desde el nivel de umbral de recepción calculado para la opción de modulación y ancho de banda seleccionada.
- Si los valores de RSL y SNR satisfacen el margen de *Fade Margin* objetivo, el algoritmo ATPC no ajusta la potencia de transmisión local.
- Si los valores de RSL y/o SNR son demasiado bajos, la potencia de transmisión local se incrementa hasta que se alcanza el margen de atenuación objetivo o hasta que se alcanza el valor máximo de potencia de transmisión, lo que ocurra primero.

De forma similar, si el valor de RSL es demasiado alto, la potencia de transmisión local se reduce hasta que se alcanza el margen de desvanecimiento objetivo o hasta que se alcanza el valor de potencia de transmisión mínimo, lo que ocurra primero.

Partiendo de la información aportada en las hojas de características, podemos afirmar que cada segundo se recibe 10 RSL, uno cada 100 ms. Dado que el ODU dará un valor de RSL cada 15 minutos, dispondremos de $10(\text{muestras/s}) * 60(\text{s}) * 15(\text{minutos}) = 9000$ muestras de RSL para obtener un valor que ofrecer como dato.

Hay dos formas principales de dar ese dato “quinceminutal”:

- Un valor intermedio entre el máximo y el mínimo nivel entre las 9000 muestras.
- Un valor promedio obtenido a partir de las 9000 muestras.

En los equipos de los que hemos obtenido datos la forma de obtener la RSL correspondiente a cada intervalo de 15 minutos es la segunda, esto es, el promedio de las 9000 muestras.

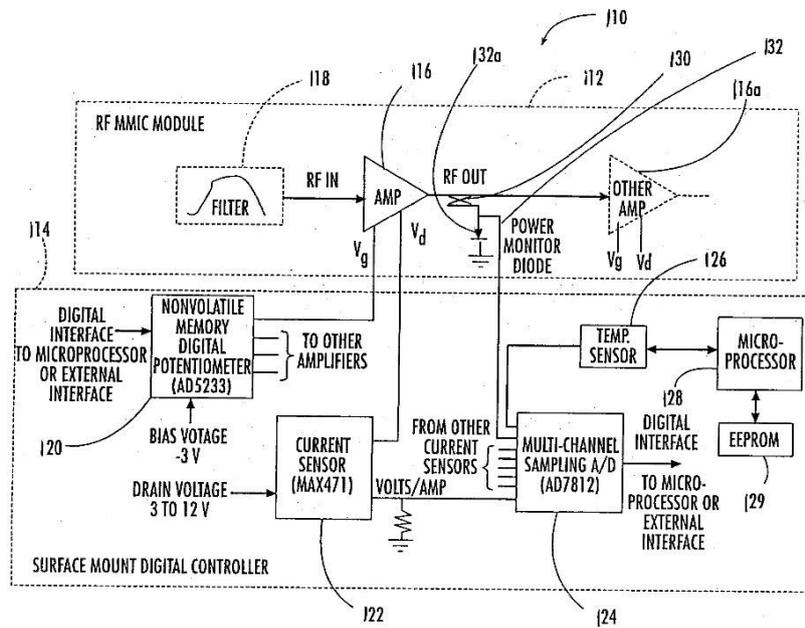


Figura 3.11 Ubicación del sensor de temperatura dentro del ODU

3.2.3.2 Obtención de la temperatura de ODU

En todo ODU es importante disponer de un sensor de temperatura, que tiene la finalidad de calibrar constantemente el modemIF sobre temperatura. En la Figura 3.11 vemos dónde se encuentra el sensor de temperatura (TEMP. SENSOR, 126) [AMMAR,2006].

A continuación (Figura 3.12) mostramos detalles las partes de la carcasa que contiene el ODU.

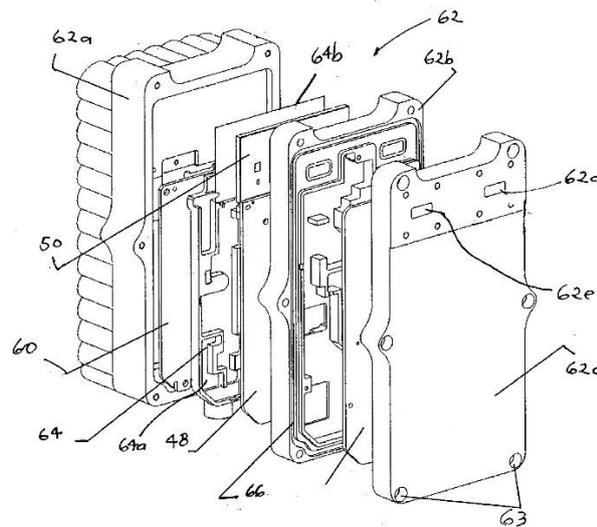


Figura 3.12 Partes de la carcasa que reviste la circuitería y los sensores

Veamos algunos detalles de interés:

- La temperatura ambiente no debe superar los 55°C a la sombra sin ganancia debidas a los rayos solares.
- La temperatura del ODU no deberia superar los 90°C dado que un sobrecalentamiento del sistema podria generar variaciones perjudiciales en la potencia de transmision.
- Los rayos solares pueden añadir 10°C o mas a la temperatura interna del ODU.

Las propias hojas de características advierten en caso de alarmas en los que se sospeche de problemas debidos a temperaturas medioambientales realizar un seguimiento historico tanto de las temperaturas como de la posicion del sol y de confirmarse recomiendan instalar un parasol.

3.2.4 Datos de radioenlaces

Los datos para la Base fueron recogidos cada 30 a 45 días y cargados en archivos de texto 'csv'. Los nombres de archivos y los nombres de campos de datos escritos a mano por un operador. Esto que implica cambios de nombres para mismos enlaces, cambios de nomenclaturas, cambios de caracteres en los nombres y duplicidades o datos ausentes.

Para un mejor manejo de la información, se creó un sistema automático de renombrado de los archivos mediante el reconocimiento de sus datos internos, asignando los nombres correctos a cada archivo.

Así mismo, se creó un sistema automático de carga de archivos en una base de datos bien estructurada sin valores duplicados. En la actualidad, estamos tratando con 10475 archivos que ocupan unos 4.73GB de información

Muestreo temporal: El muestreo de los datos es quinceminutal, dado cada cuarto de hora, cuatro veces por hora. Esto ha de tenerse en cuenta a la hora de utilizar la información meteorológica, que es horaria (ver apartado 3.1.1).

Datos capturados: En la tabla 3.3 mostramos un ejemplo de captura de datos.

Time	Object	SNR	RSL_ Mean	ODU_ Temp	ODU Input Voltage
2012-11-14 01:15:00	[R20_Hospital Militar - Monteluz] LINK1	25.04	-50.99	24.4	-54
2012-11-14 01:30:00	[R20_Hospital Militar - Monteluz] LINK1	25	-50.89	24.4	-54
2012-11-14 01:45:00	[R20_Hospital Militar - Monteluz] LINK1	25.33	-50.86	24.5	-54
2012-11-14 06:30:00	[R20_Hospital Militar - Monteluz] LINK1	25.1	-51.54	23.9	-54.1

Tabla 3.3 Ejemplo de captura de datos de radioenlace

- Time: Momento de la captura. Se realiza en cada cuarto de hora.
- Object: Contiene el nombre que identifica el radioenlace en función del emplazamiento de las antenas transmisora y receptora.
- SNR: Es la relación Señal-A-Ruido dada en dB.
- RSL_mean: Es la potencia media en los 15 minutos anteriores y promediada con 9000 muestras de RSL, tal como se explicó en el apartado 3.2.3.1.
- ODU_Temp: Es la temperatura de ODU, expresada en °C.
- ODU Input Voltage: Es el voltaje interior del ODU, dado en dB.

Estructura de la BBDD: Una vez que se han adquirido los datos, estos son almacenados en una Base de Datos de radioenlaces con una estructura como la que se presenta en la Tabla 3.4, donde cada campo está relacionado con los datos anteriormente descritos.

#	Nombre	Tipo	Cotejamiento	Nulo	Predeterminado
1	<u>Time</u>	datetime		No	<i>Ninguna</i>
2	Object	varchar(50)	<i>latin1_swedish_ci</i>	Sí	<i>NULL</i>
3	SNR	float		Sí	<i>NULL</i>
4	RSL_Mean	float		Sí	<i>NULL</i>
5	ODU_Temp	float		Sí	<i>NULL</i>
6	ODU Input Voltage	float		Sí	<i>NULL</i>

Tabla 3.4 Estructura de la base de datos de radioenlace

3.2.5 Características generales de los radioenlaces

La captura de datos comenzó el 14 de noviembre de 2012, inicialmente con 8 enlaces bidireccionales. Gradualmente se amplió el número de estos hasta alcanzar los 134 enlaces en el mes de noviembre de 2016. Los enlaces están ubicados en las islas de la Gomera, el Hierro, Tenerife, Gran Canaria y Fuerteventura, si bien la mayoría están en Gran Canaria y Tenerife.

Disponemos actualmente de los datos suministrador por 52 puntos de repetición los cuales nos suministran datos de 134 vanos de radioenlaces distintos.

A continuación, se presenta información de interés por cómo afecta a las señales de potencia que miden los equipos de comunicación.

Frecuencias de trabajo: Los enlaces de los que disponemos trabajan en las bandas de frecuencia de 6 a 38 GHz. En la Figura 13 podemos ver qué frecuencias de trabajo tenemos y cuántos radioenlaces las tienen. Tal como se puede apreciar, todos los radioenlaces trabajan a Gigahercios, que son las frecuencias más sensibles a los fenómenos meteorológicos que nos interesan, y la mayoría está por encima de 10 GHz, que es donde se presenta mayor sensibilidad.

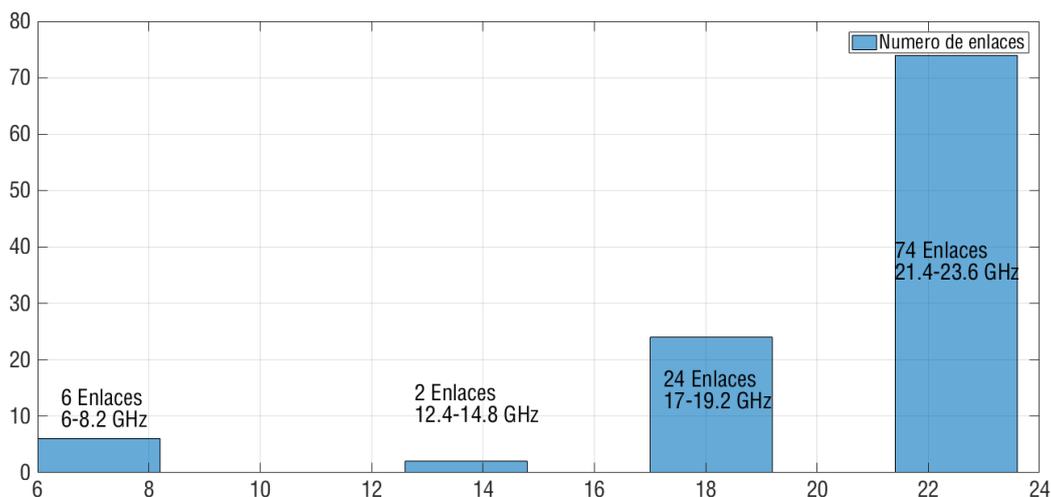


Figura 3.13 Distribución de frecuencias y número de enlaces en cada caso

Polarización: La red de radioenlaces presenta una distribución de polarizaciones horizontales y verticales bastante equilibrada siendo 44 antenas con polarización horizontal frente a 62 antenas con polarización vertical. En la Figura 3.14 tenemos representados estos datos.

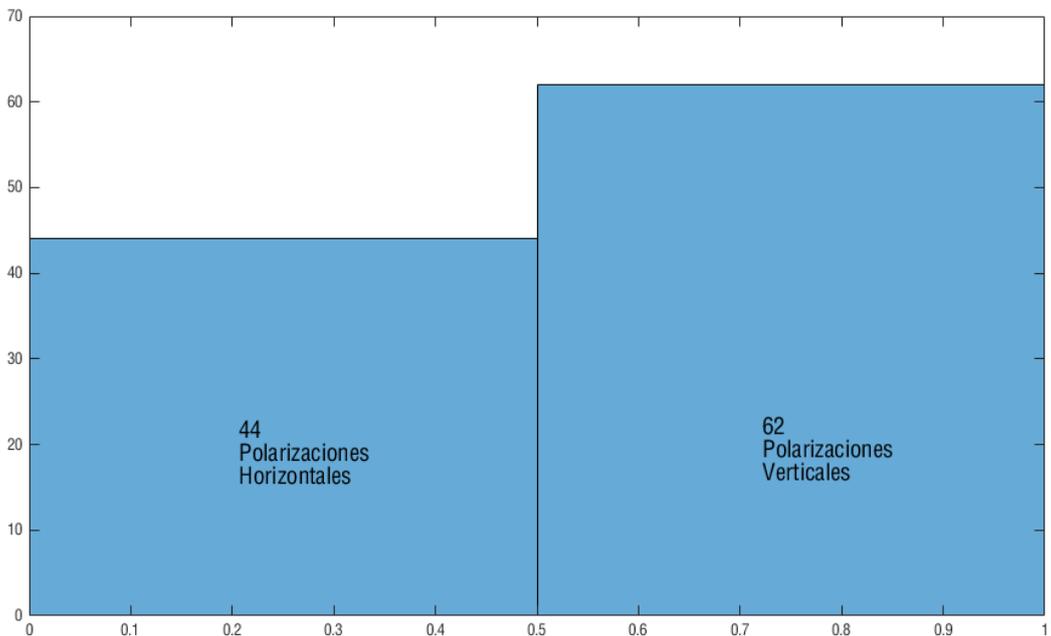


Figura 3.14 Distribución de polarizaciones y número de enlaces en cada caso

Diámetro de las antenas: En cuanto a diámetro de las antenas (Figura 3.15), la mayoría de ellas presentan dimensiones menores a 70 centímetros hasta un límite superior de 1.2 metros.

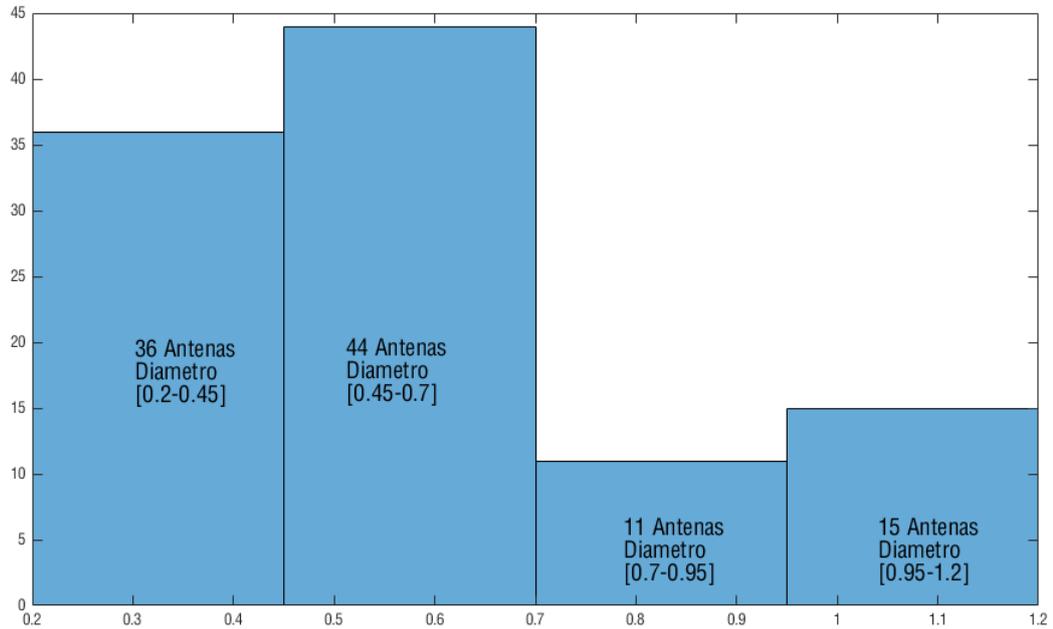


Figura 3.15 Distribución de diámetros de las antenas

Longitud de los vanos: La mayoría de los enlaces presentan un vano entre 4 y 12 kilómetros de longitud, existiendo algunos casos especiales de menos de 2 kilómetros y otro grupo de una treintena de kilómetros e inclusive más de 62 kilómetros. La longitud del vano es importante dado que las atenuaciones debidas a las precipitaciones se expresan en dB/Km. Estos detalles se pueden apreciar en la Figura 3.16.

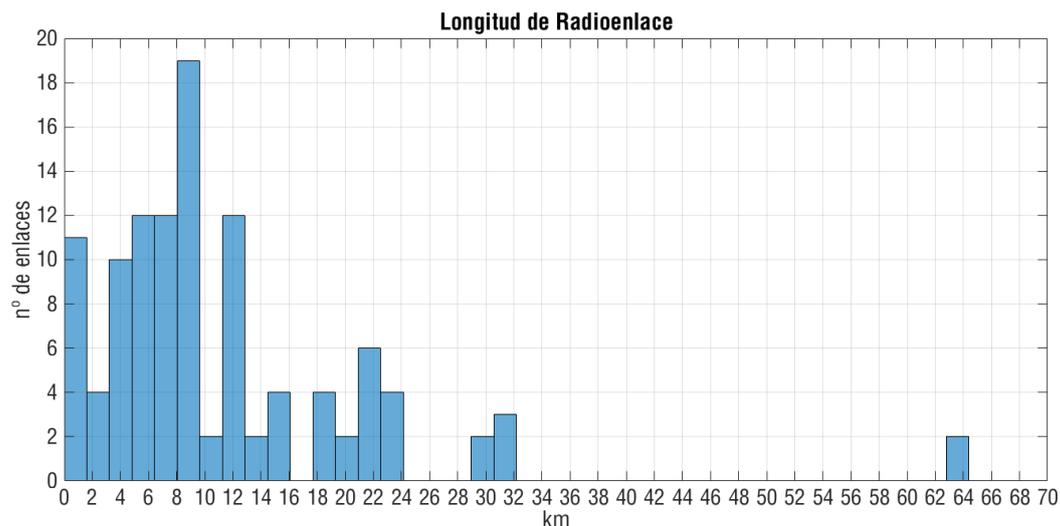


Figura 3.16 Distribución de longitud de los vanos

Distribución de alturas de antenas: La altura a la cual está instalada cada antena también es un dato a tener muy en cuenta debido a las diferentes altitudes con las que se dispone en nuestra base de datos (ver Figura 3.17). Debemos recordar que tanto las presiones como las temperaturas presentan una relación directa con la altitud, además de que cuando se trata de miles de metros las capas nubosas se pueden situar en la horizontal respecto a la antena. Otro factor a tener en cuenta son las antenas con cota a nivel del mar. Estas bajas cotas presentan como veremos más adelante los problemas propios de entornos marinos, como son las brumas, partículas de sal en el aire, etc.

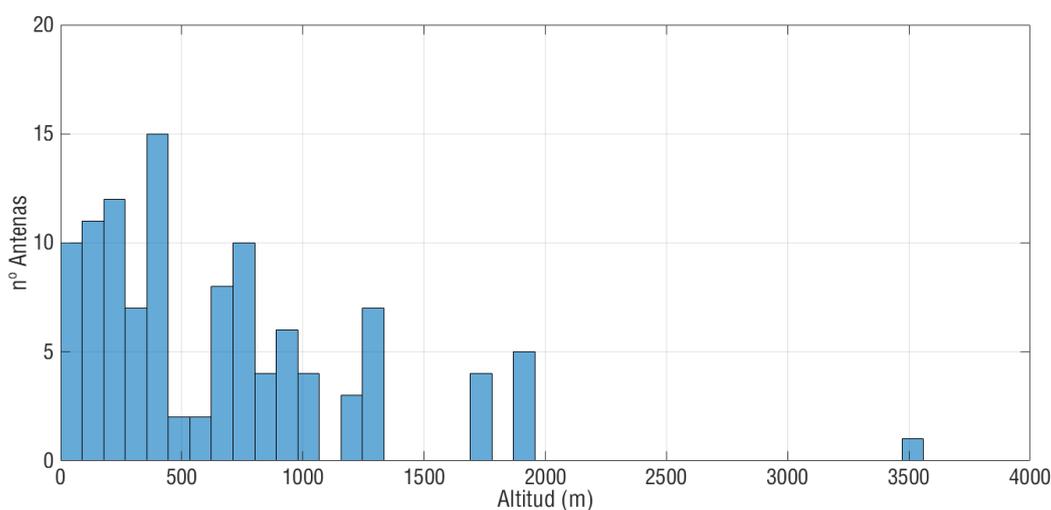


Figura 3.17 Distribución de las alturas de las antenas

Distribución de diferencial de alturas transmisor-emisor: Los diferenciales de alturas de los radioenlaces presentan las especificidades de atravesar las comunicaciones distintas capas de aire con sus respectivas densidades y presiones, así como las inclinaciones de las antenas y su relación respecto al sol incidente o acumulación de humedad en la antena en mayor o menor proporción. En la Figura 3.18 tenemos un histograma los datos de diferenciales (horizontal) y número de enlaces que lo tienen.

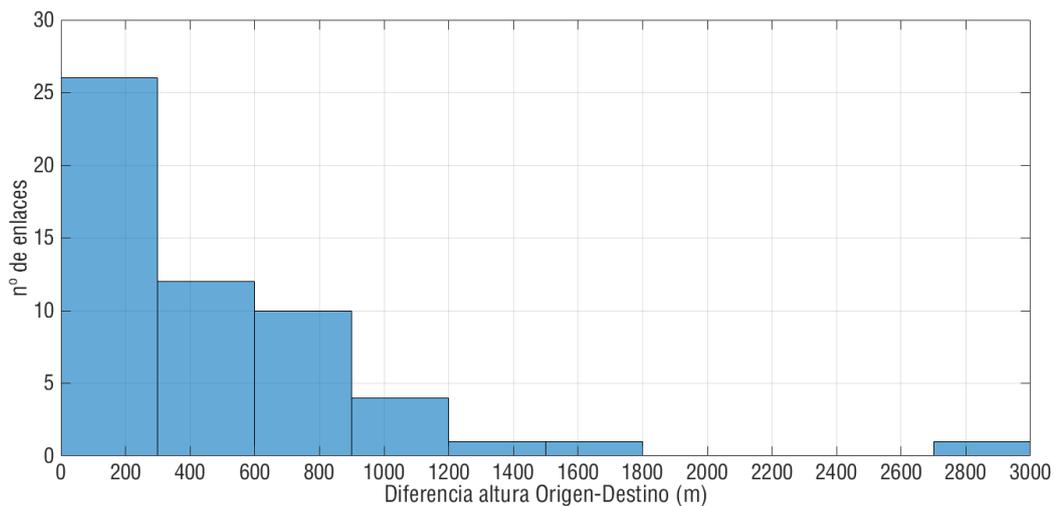


Figura 3.18 Histograma de diferencial de alturas transmisor-emisor

Capítulo 4

Algoritmos para la detección y estimación de precipitación de lluvia

En este capítulo presentamos una serie de aportaciones que hemos hecho para detectar precipitaciones en forma de eventos de lluvia. Estos son fruto de un análisis detallado del fenómeno y de cómo se manifiesta en las señales de niveles de potencia recibida. A partir de ese análisis y de los conceptos teóricos expuestos en capítulos anteriores hemos desarrollado y depurado tres algoritmos de detección y estimación.

La primera versión se basa en la detección trabajando sobre la señal de alta frecuencia obtenida al sustraer la componente cíclica, de baja frecuencia.

En la segunda vamos un paso más allá, e incorporamos el conocimiento de patrones característicos que hemos observado en periodos en que no hay precipitación, hasta llegar a un detector basado en la comparación de dichos patrones mediante correlación.

Por último, presentamos un detector-estimador de nivel de precipitación mediante la aplicación de los conocimientos anteriores, y su integración en el diseño una red neuronal con arquitectura basada en una red de Capa Recurrente (Layer Recurrent Net - LRN).

4.1 Las precipitaciones y su influencia en la atenuación

Recordemos que en el Capítulo 1, al hablar de las motivaciones de esta tesis introducíamos una idea subyacente. Esta es, a partir de la cadena “parámetros-mecanismos-degradación” queremos determinar si conociendo el par “parámetros-degradación” podemos obtener información que nos permita

hacer hipótesis acerca de los “mecanismos de propagación”. En este capítulo nos centramos en las precipitaciones debidas a lluvia. Particularmente, vemos la atmósfera como un sistema oculto para un observador situado en el emisor o el receptor. Este sistema tiene capacidad de modificar la señal transmitida, caracterizada esta por parámetros conocidos por diseño, y cuya respuesta es una señal afectada por el sistema atmósfera. Antes de continuar, veamos algunos aspectos de cómo ha evolucionado el estudio de este tema.

Ya desde los años 60 es conocido el fenómeno de la atenuación de las señales de radiofrecuencia debidas a las precipitaciones [HOGG,1968] [SEMPLAK,1969]. Estas atenuaciones se estudiaron con más detalle en los años 70 con el apogeo de la carrera espacial [CRANE,1971] donde R.K. Crane estudió el fenómeno que afectaba a las comunicaciones satelitales. Actualmente, los modelos predominantes de cálculo de la atenuación debida a las precipitaciones siguen los modelos de Crane o los modelos recomendados por la ITU basados en los modelos de R.L. Olsen a finales de los años 70 [OLSEN,1978]. Estos estudios tenían como finalidad predecir estadísticamente las precipitaciones estableciendo relaciones entre las distribuciones de probabilidad de lluvia y las atenuaciones de las señales.

Más modernamente, en especial desde 2006, varios estudios han demostrado que es factible estimar las precipitaciones utilizando enlaces de microondas de redes celulares de telecomunicaciones [MESSER,2006], [BIANCHI,2013a], [CHWALA,2012], [DOUMOUNIA,2014], [LEIJNSE,2007a], [LEIJNSE,2007b], [MESSER,2006], [OVEREEM,2011], [RAYITSFELD,2012], [ZINEVICH,2009]. El principio básico de la detección y estimación de la precipitación mediante el uso de radioenlaces de microondas se basa en la capacidad de la lluvia de atenuar las señales electromagnéticas. Tomando la potencia recibida suministrada por los equipos en el extremo receptor del enlace en función del tiempo, y conociendo las características físicas del mismo, se puede calcular la atenuación integrada en la trayectoria inducida por la precipitación en un instante dado y, posteriormente, calcular la intensidad pluviométrica sobre la trayectoria del vano del enlace.

Cada enlace se caracteriza por una potencia de transmisión, una potencia de recepción en el destino, una serie de ganancias y un conjunto de eventos que originan atenuaciones en el receptor.

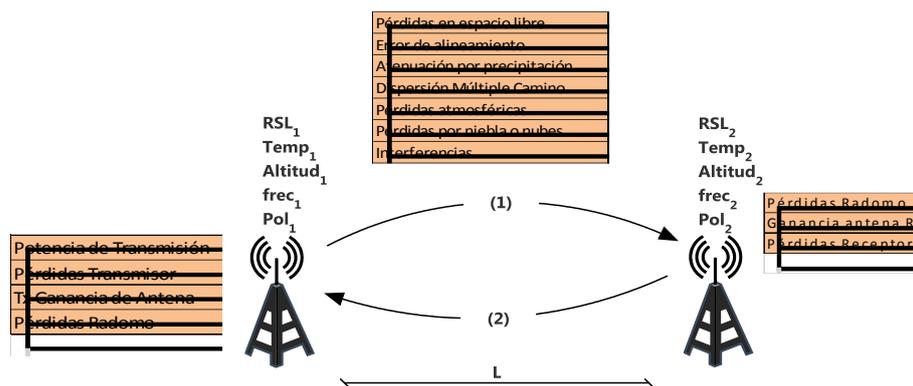


Figura 4.1. Parámetros de transmisión y recepción, así como principales fuentes de pérdida.

Las pérdidas en la transmisión se pueden clasificar entre las estables una vez instalado el radioenlace y las temporalmente variantes como son las debidas a las condiciones atmosféricas, precipitación por lluvia u otros hidrometeoros, etc. Por otro lado, las interferencias podrían causar atenuaciones que se confundan con pérdidas.

En la Figura 4.1 tenemos una representación de diversos parámetros y tipos de pérdidas, donde además se contempla la posibilidad de que el radioenlace sea bidireccional. Los parámetros se refieren al transmisor (Tx) y al receptor (Rx) como frecuencias de trabajo (frec), temperaturas (Temp), polarización (Pol), etc. Nos vamos a centrar en las pérdidas. En una primera clasificación vamos a distinguirlas según dónde se producen:

- Transmisor: Pérdidas (loss) de transmisión y en el radomo.
- Receptor: Pérdidas (loss) de transmisión y en el radomo.
- Propagación: Pérdidas atmosféricas, apuntamiento, desvanecimientos por lluvias, niebla, etc., multicamino.

A modo de ejemplo, en un radioenlace funcional típico, del total de las pérdidas o atenuaciones en el receptor, se puede ponderar la importancia o escala de cada una de las atenuaciones por separado. En la Figura 4.2 podemos ver que, de los factores atenuantes variables, en este ejemplo el 90.8% de la atenuación es debida a las precipitaciones.

Atenuación por lluvia	90.8% dB	Gamma = 0.12 dB/km
Multicamino	3.6% dB	
Pérdida atmosférica	0.2% dB	
Pérdida por niebla	3.6% dB	
Interferencia	1.8% dB	
Total de pérdidas	100% dB	

Figura 4.2. Ejemplo de ponderación de pérdidas en función de su origen.

Visto desde una perspectiva de un día completamente despejado podríamos afirmar que las pérdidas de transmisión producidas solo deberían deberse a las variaciones atmosféricas. Llegado el caso, podríamos considerar incluso las interferencias pues, tal como ya hemos dicho, pueden dar lugar y confundirse con pérdidas. No obstante, en sistemas dedicados en exclusiva como el que usamos en nuestro trabajo esto es improbable y no lo consideraremos.

Hemos de hacer notar que el multicamino, cuando se produce sobre la capa reflectante de la superficie, p.e. suelo, se puede considerar un tipo de atenuación invariante en el tiempo siempre que no cambien significativamente aspectos como la refracción atmosférica. En principio, estos cambios serían lentos. A corto, medio y largo plazo la temperatura o el grado de humedad del suelo sí que podría significar una variación de la capa reflectora. Así mismo a largo plazo se puede producir alguna atenuación debida a la vegetación estacional. Otra característica sería cuando se trate de la superficie capa de agua en el suelo, mar, rio, estanque etc. La altura de la capa superficial de la lámina de agua cambiaría el ángulo de incidencia del rayo en caso de producirse.

Por otro lado, en situaciones de nubosidad el multicamino se puede producir ya no solo en la capa inferior como reflector en el suelo, sino también en la capa superior (nubes), sobre todo si estamos tratando con enlaces en los que alguno de los nodos se encuentre a gran altitud. En estos casos se producen varios fenómenos. Por un lado, nos encontraremos con que la nube puede hacer de capa reflectante que origine cambios de fase en la señal transmitida y por tanto puede producir señales secundarias que no siempre son captadas como atenuaciones (mostrar grafica donde se produce inversión de atenuación ida vuelta). La misma nube puede bloquear el trayecto en su zona de Fresnel añadiéndose así una atenuación debida a la niebla o nubes.

Retomamos ahora las Figuras 4.1 y 4.2, y distinguimos las siguientes pérdidas (loss o error) considerándolas como:

- **Constantes:** En este grupo podemos incluir las pérdidas de transmisión (Tx loss), propagación en espacio libre (Path loss) y recepción (Rx loss).
- **Variables:** En este grupo incluimos pérdidas de variabilidad lenta como multicamino (Multipath) o atmosféricas (Atmospheric).
- **Súbitas:** Este es un caso particular del anterior, esto es, de pérdidas variables que comparten el hecho de que aparecen de repente, esto es, de forma súbita. Es el caso de las debidas a desapuntamiento

(Alignment error) o desvanecimientos por lluvia (Rain fade). Incluimos aquí las de interferencias (Interference),

A efectos de lo que nos interesa, hay que precisar que las atenuaciones que hemos denominado Constantes o Variables pueden ser permanentes, o producirse y mantenerse características durante horas, puede que días o más. Veremos que con un filtrado adecuado el efecto de estas atenuaciones se puede suprimir o hacer insignificantes, dejando así al descubierto las atenuaciones súbitas, justo las que nos interesa detectar. Abundemos un poco más en esta idea.

Las atenuaciones que hemos denominado Súbitas aparecen como un evento repentino. Es fácil ver que es el caso de la lluvia cuando llega una columna de agua, por ejemplo, entrando en alguna de las Islas Canarias. También los desapuntamientos pueden ser súbitos, por ejemplo, debido a rachas de viento. Las interferencias pueden ser súbitas y permanecer durante un tiempo hasta desaparecer.

Ahora haremos algunas suposiciones que consideramos realistas:

- **Interferencia:** Las bandas frecuenciales en las que trabajan nuestros radioenlaces son exclusivas y no hay interferencias (ni siquiera por no-linealidades de radioenlaces próximos). Por tanto, podemos despreciar el efecto de sistemas interferentes.
- **Desapuntamiento:** Suelen darse con viento suficientemente fuerte para mover las antenas de transmisión o de recepción. En principio, podemos considerar que no se va a dar porque las antenas están debidamente ancladas y sujetas.
- **Lluvia:** Se da cuando una columna de agua ocupa total o parcialmente el espacio intermedio entre las antenas emisora y receptora.

Finalmente, debemos hacer la consideración de que los desapuntamientos y la lluvia pueden producir efectos similares en los niveles de potencia, dando lugar a confusiones (falsas alarmas, falsos positivos) cuando buscamos lluvia. En cualquier caso, en esta tesis trabajamos considerando que solo hay lluvia.

4.2 La señal de potencia recibida en nuestros radioenlaces

En el capítulo 2 y 3 hemos visto los parámetros que afectan a la señal y los tratamientos de los datos hasta convertirlos en señal. Una de los preprocesados más importantes es el control de gaps y datos faltantes de los enlaces. La distinción de ambos se basa en la existencia o no de alguno de los campos de información, así como los gaps es la falta total de datos, inclusive los datos temporales, los datos faltantes se producen cuando el equipo sí devuelve un registro, pero los datos del mismo son nulos. El primer preprocesado, por tanto, consistió en detectar y diferenciar entre los dos tipos de error y rellenar en cada momento con los datos que permitieran mantener una programación fluida. En la Figura 4.3 se puede observar un tramo de una señal RSL en bruto. Representa cómo evoluciona la señal desde mediados de 2014 hasta finales de 2016. Podemos observar que el margen dinámico de la señal varía entre -42 y -58 dBm. Además, se puede observar que, grosso modo, hay dos grandes componentes: un nivel de continua en periodos largos, y una componente variable superpuesta a la continua. Destacan también que hemos denominado los gaps como grandes espacios sin datos, los datos faltantes son representados como valores que tienden a cero. Aparte de las atenuaciones se pueden observar múltiples variaciones del nivel de potencia de transmisión, entendidos como variaciones del nivel de continua en recepción.

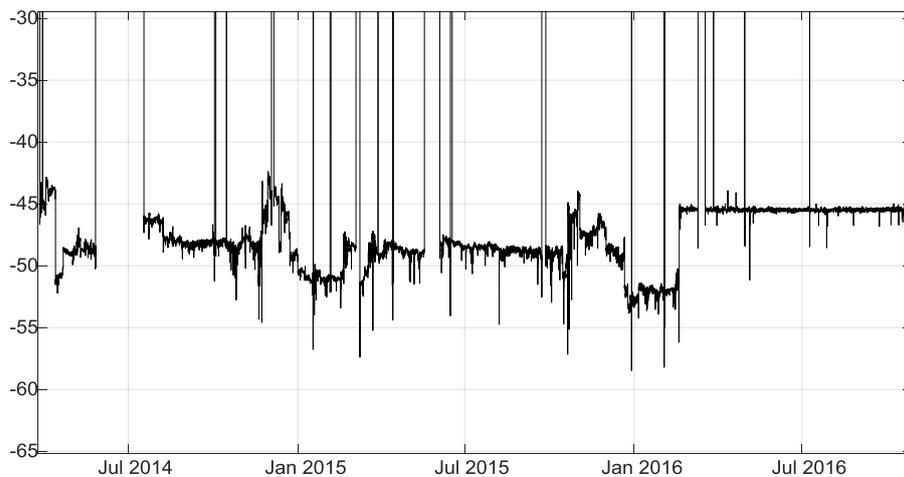


Figura 4.3. RSL media de un enlace en bruto.

Hay que tener en cuenta que las precipitaciones medidas son niveles puntuales geográficamente hablando, están muy localizadas en el punto de instalación del pluviómetro mientras que las atenuaciones de un radioenlace realizan una integración de todas las atenuaciones individuales que se produzcan a lo largo de todo el vano. Un ajuste de las mediciones del pluviómetro a partir de los datos de radioenlaces se puede comprobar en [FENCL, 2017].

$$ARainT = \sum_{i=1}^L ARain_i \text{ (dB)}$$

donde hemos tenido en cuenta L secciones de atenuación por lluvia.

4.2.1 Distinción de presencia de lluvia en enlaces unidireccionales

Veamos cómo se distingue la presencia de lluvia en las señales de un radioenlace unidireccional. Para ello mostramos en la Figura 4.4 un segmento de señal RSL y la precipitación en el mismo periodo de observación. Este periodo comprende días de noviembre y diciembre de 2015 según se muestra en el eje horizontal. La estación se encuentra a unos kilómetros de distancia del vano.

En la parte superior se representan los niveles de señal RSL dados en dBm, y en la inferior unos intervalos de lluvia dados en mm/h. Se puede observar que las grandes variaciones de señal son producidas por precipitaciones de lluvia. Cabe pensar que estas variaciones son debidas a atenuaciones, al menos las de nivel más elevado.

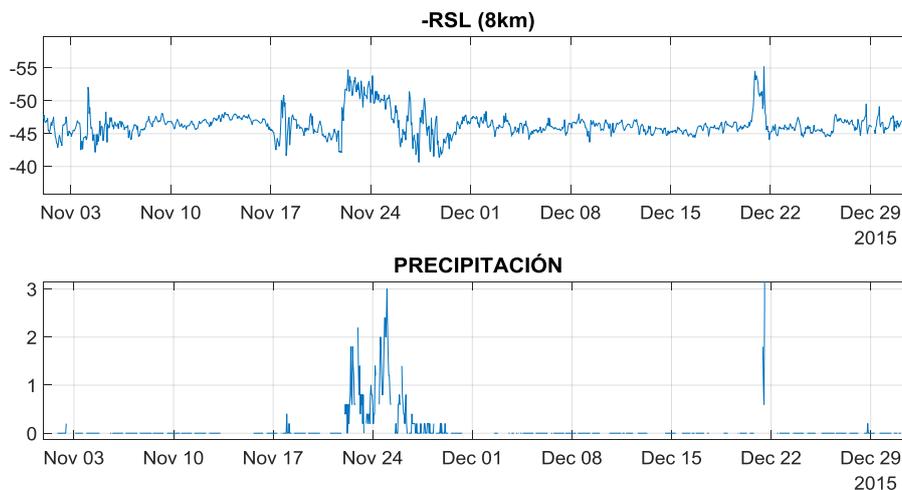


Figura 4.4. Efecto de las precipitaciones sobre los niveles de potencia.

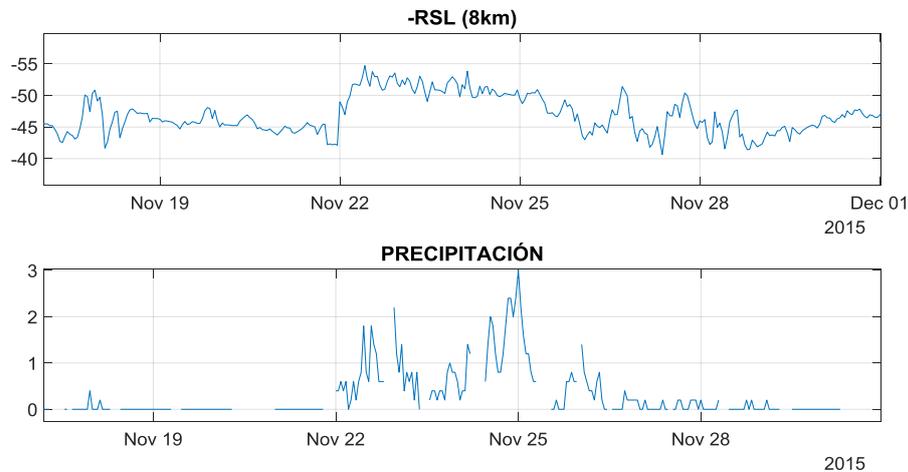


Figura 4.5. Efecto de las precipitaciones, ampliación de detalles.

En la Figura 4.5 tenemos un detalle ampliado donde se puede apreciar con mejor detalle el efecto anteriormente citado. Cabe resaltar dos cosas. En primer lugar, cuando hay lluvias se altera la señal mostrando variaciones de alta frecuencia respecto de un pedestal de continua (≈ -45 dBm). Y, en segundo lugar, intervalos en los que no hay lluvia registrada en el pluviómetro, pero sí variaciones significativas en la señal. Estas variaciones se pueden deber a diversas causas, por ejemplo, que sí llueva a lo largo del vano, pero no sobre la estación.

4.2.2 Distinción de presencia de lluvia en enlaces bidireccionales

Hasta ahora hemos tratado los enlaces como unidireccionales, si bien todos los radioenlaces con que trabajamos son bidireccionales. Vamos a hacer consideraciones acerca de esto.

Muchos radioenlaces presentan diversidad espacial. Esto ha de tenerse en cuenta pues puede suponer una fuente extra de información, y nos permite realizar una comparación entre los distintos niveles de recepción en un mismo vano. Uno de esos radioenlaces se puede ver en la Figura 4.6. En este caso hay dos antenas en cada extremo del vano, y denominamos A la superior y B la inferior. El sentido de las flechas entre antenas indica la antena que transmite y la que recibe. El emplazamiento H hace referencia al edificio del Hospital Militar del barrio de San Nicolás, y UM es otro emplazamiento situado a 1.1 kilómetros de distancia en el edificio de Usos Múltiples. Ambos están en la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria.

Cada gráfica representa un histograma con la diferencia en dBm (eje horizontal) entre pares de señal RSL de un mismo enlace. El eje vertical representa el número de muestras que presentan una diferencia dada.

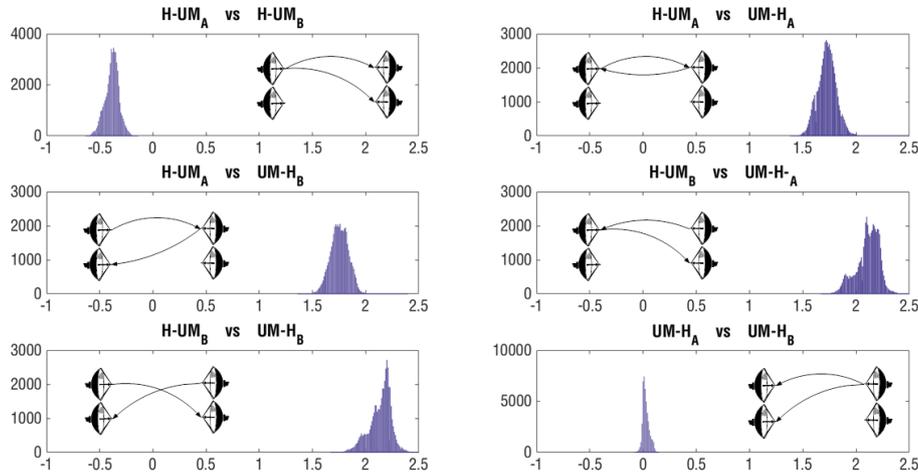


Figura 4.6. Diferencia por pares RSL-RSL. Relación entre potencias de recepción entre enlaces con diversificación espacial.

Se puede ver que existen diferencias entre enlaces que no tienen por qué deberse al espacio de propagación. A continuación, exponemos las diferencias más relevantes:

- No hay simetría total en la comunicación. Esto se da incluso en los enlaces $H-UM_A$ vs $H-UM_B$ y $UM-H_A$ vs $UM-H_B$ que son simétricos. No obstante, es cierto que las diferencias son pequeñas, centradas y con poca desviación entorno a una media de +0.1 dBm en un caso y -0.4 dBm en el otro.
- Las diferencias son más apreciables cuando usamos diferentes portadoras, esto es, se transmite simultáneamente en ambos sentidos, pero en canales adyacentes. Es el caso, por ejemplo, de $H-UM_A$ vs $UM-H_B$ donde las diferencias están en torno a 1.75 dBm.
- Si bien hay diferencias apreciables, no pueden ser consideradas muy elevadas.

En la Figura 4.7 se observan esos errores correspondientes a los enlaces antes nombrados. Y como la principal diferencia son los niveles de continua. Los diferentes niveles de continua debidos a la potencia de transmisión se pueden ver en la diferencia entre las dos graficas superiores frente a los dos inferiores. Por el contrario, entre las dos graficas superiores el transmisor es el mismo

H por lo que las diferencias están generadas por el sistema de la antena A que pierde medio dBm con respecto a su antena en diversidad.

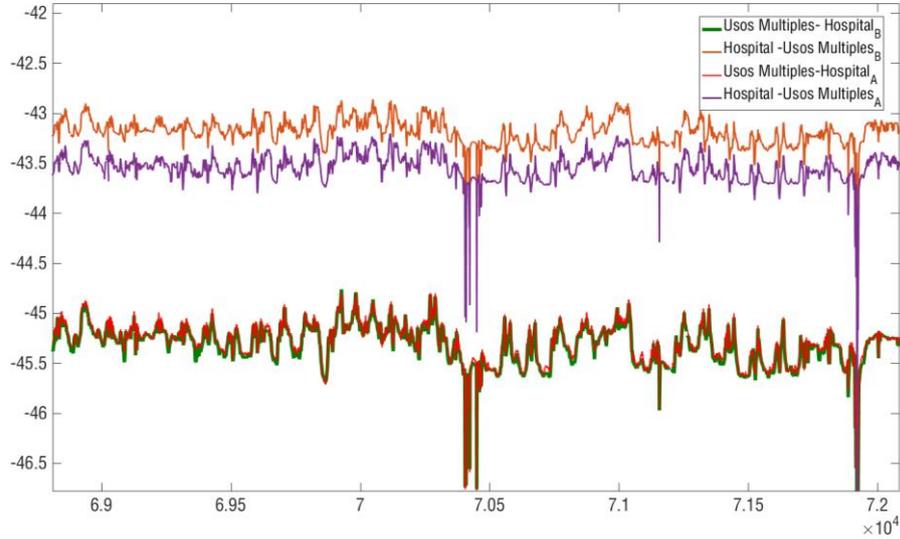


Figura 4.7. Señal temporal de 4 enlaces.

Representando los histogramas (Figura 4.8) de las cuatro señales se puede deducir que se necesita un procesado previo antes de intentar detectar los motivos de las atenuaciones. Es por ello que en la Figura 4.9 se han normalizado las señales comprobándose que presentan todas ciertas simetrías y correlaciones. El preprocesado de normalización se debe realizar a cada una de las señales de potencia de recepción.

$$p^n = \frac{P - p^{mean}}{p^{std}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

donde P^{mean} es media de los datos, y P^{std} es la desviación estándar de los datos.

Es importante destacar que nuestros algoritmos necesitan de esta normalización. Así, en el apartado 4.5 esta normalización es parte del preprocesado.

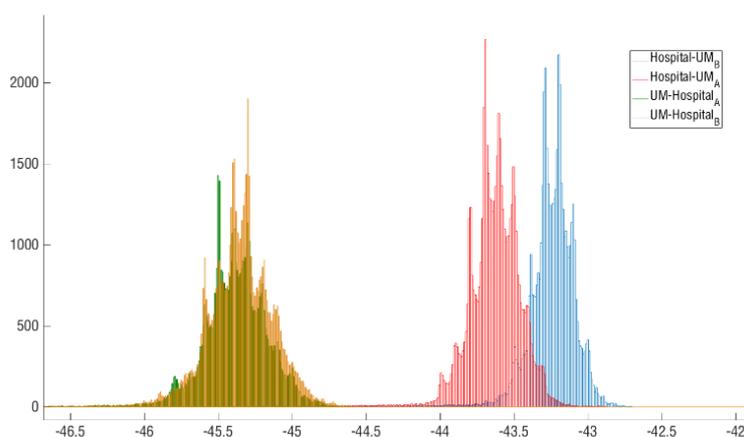


Figura 4.8. Histograma de los cuatro enlaces en la Figura 4.7.

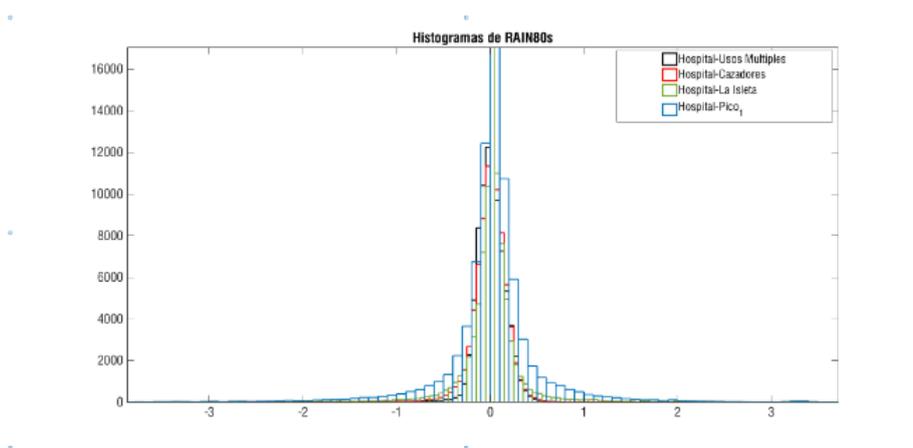


Figura 4.9. Histogramas normalizados de los 4 enlaces.

4.2.3 Relación entre la meteorología y la potencia recibida

Antes de profundizar en la relación entre la potencia recibida y la meteorología, hagamos algunas consideraciones de interés sobre una serie de elementos que están interrelacionados.

Factores que afectan a la potencia recibida: Tal como se vio en el capítulo 2, la fórmula de Friis relaciona la potencia de recepción con la potencia de transmisión y otros factores que afectan a la propagación. Por comodidad, vamos a trabajar con la expresión en dB. A la potencia de transmisión, hay que añadir la sumatoria de todas las ganancias menos la sumatoria de todas las atenuaciones implicadas, y se puede expresar en la siguiente ecuación.

$$P_r(\text{dBm}) = P_{tX}(\text{dBm}) + G_{T_x} + G_{R_x} - L_{EL} - L_{Att} - L_{Rain} - L_{f_0} \quad \text{Ec. 4.2}$$

siendo:

$P_r(\text{dBm})$: Potencia de recepción.

$P_{tX}(\text{dBm})$: Potencia de transmisión.

G_{T_x} : Ganancia de la antena transmisora.

G_{R_x} : Ganancia de la antena receptora.

L_{EL} : Pérdidas en espacio libre.

L_{Att} : Pérdidas atmosféricas.

L_{Rain} : Pérdidas debido a la precipitación.

L_{f_0} : Pérdidas debidas a las nubes o nieblas.

Factores constantes: La potencia de transmisión es una constante salvo cuando se producen saltos automáticos de ganancia, pero se puede afirmar que entre dichos saltos de nivel de transmisión es constante. Las ganancias que intervienen están relacionadas con las ganancias de las antenas receptoras y transmisoras, y son constantes. Un desapuntamiento entre antenas no varía las ganancias propias, sino que generan pérdidas extras. Las pérdidas en espacio libre dependen exclusivamente de la frecuencia de la portadora y de la longitud del vano del radioenlace por lo que se consideran constantes en el tiempo.

Factores variables: Las atenuaciones tienen componentes variables que hemos de tener en cuenta. Así, las atenuaciones de tipo atmosférico, las debidas a precipitaciones y las debidas a nubosidad o niebla, pérdidas por de apuntamiento o desalineación de las antenas, por obstrucción de obstáculos, reflexiones del terreno o vegetación, así como las atenuaciones debidas a fenómenos desconocidos terminarían por definir las atenuaciones implicadas en la propagación de la onda por el aire.

Las atenuaciones atmosféricas son dependientes en gran medida de factores meteorológicos, dado que dependen de la cantidad de moléculas de Oxígeno y de moléculas de agua que existan en el enlace. La cantidad de estas depende directamente de la presión del aire, de la humedad del mismo y de la temperatura. Estos factores son los que producen una oscilación en los valores medios de potencia recibida con periodicidad diaria y sincronizada con la salida y puesta de sol. Vamos a profundizar un poco más en esto.

Los datos brutos de potencia de recepción medios presentan una serie de periodicidades u oscilaciones que a priori pueden entenderse como dificultades añadidas a la hora de extraer las atenuaciones debidas a las precipitaciones, que son las que nos interesan. Estas oscilaciones presentan

una periodicidad de 23.5 horas aproximadamente y, como veremos, permiten discernir fácilmente los días de las noches.

Una de las atenuaciones es la atenuación debida a los gases atmosféricos L_{Att} . En el artículo de David [DAVID,2009], se aplica un método novedoso para la monitorización del vapor de agua en la atmosfera usando redes de radioenlace, y son unos de los causantes de que las señales electromagnéticas se atenúen cuando se propagan a través de la atmósfera. Este efecto se debe principalmente a las resonancias de absorción de oxígeno y vapor de agua, con contribuciones más pequeñas provenientes del gas nitrógeno.

La atenuación específica (atenuación por kilómetro) es función de la temperatura, presión, densidad del vapor de agua y frecuencia de la señal. La fórmula para la atenuación específica en cada frecuencia es

$$\gamma = \gamma_o(f) + \gamma_w(f) = 0.1820fN''(f).$$

siendo: $N''(f)$ la parte imaginaria de la refractividad atmosférica compleja y consta de una componente de línea espectral y una componente continua:

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

La componente espectral consiste en la suma de términos de espectro discretos compuestos de una función de ancho de banda de frecuencia localizada, F_i y multiplicada por una intensidad de línea espectral, S_i . Para el oxígeno atmosférico, cada línea espectral es:

$$S_i = a_1 10^{-7} \left(\frac{300}{T}\right)^3 \exp\left[a_2 \left(1 - \left(\frac{300}{T}\right)\right)\right] P$$

Mientras que, para el vapor de agua, cada línea espectral es:

$$S_i = b_1 10^{-1} \left(\frac{300}{T}\right)^{3.5} \exp\left[b_2 \left(1 - \left(\frac{300}{T}\right)\right)\right] W$$

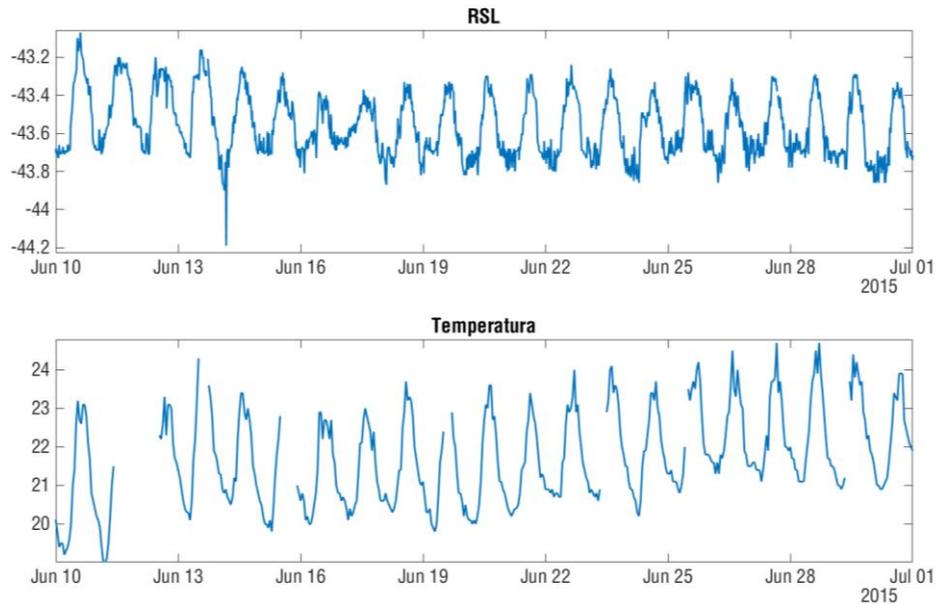


Figura 4.10. Observación de la ciclicidad diaria compartida entre RSL y temperatura.

La atenuación total atmosférica es por tanto la suma de las atenuaciones debidas al oxígeno más las atenuaciones debidas al vapor de agua multiplicado por la longitud del vano:

$$L_{Att} = L (\gamma_o + \gamma_w).$$

Ciclicidad de los valores de RSL y temperatura: En este punto, es conveniente destacar que las atenuaciones debidas a los gases atmosféricos dependen de la presión atmosférica P , de la densidad del vapor de agua W , y de la temperatura ambiente, T . Des estas tres magnitudes, en nuestra base de solo datos disponemos de valores de temperatura. Veamos si hay alguna relación de cómo evoluciones ésta y los RSL.

En la Figura 4.10 representamos las señales de RSL (dBm) de un radioenlace y la temperatura (°C) de una estación meteorológica cercana, dadas a lo largo de una serie de días de junio de 2015. Ambas señales son horarias, a tal efecto la de RSL se ha pasado de quinceminutal a horaria, que es el periodo de muestreo de la señal de temperatura. Este es, $T_m=60*60=3600$ s.

Se ponen en evidencia dos resultados principales. Por un lado, las dos señales presentan similitudes cíclicas o periódicas, con periodicidad diaria. Y por otro, entre las dos señales hay una componente de baja frecuencia comparada con la evolución diaria. De hecho, ambas llevan una especie de pedestal de

continua. Procedemos a realizar un estudio frecuencial de ambas señales para conocer mejor la periodicidad.

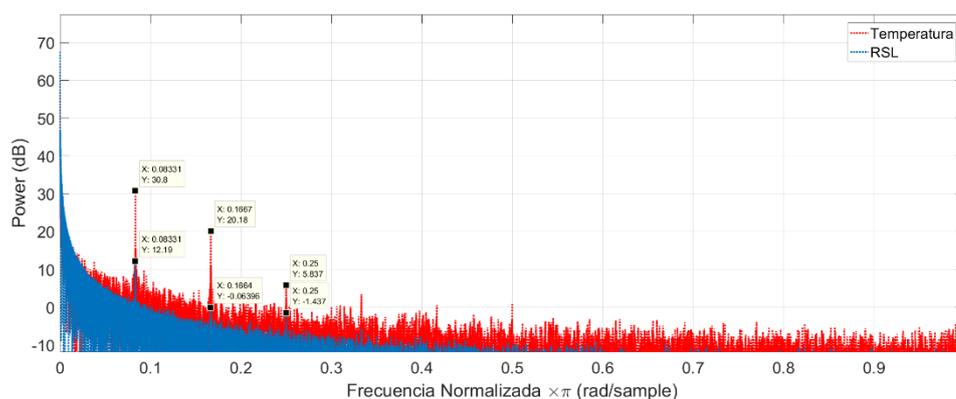


Figura 4.11. Espectro y pseudoespectro de las señales de RSL y temperatura.

Para este estudio hemos calculado los espectros. En la Figura 4.11 tenemos una representación espectral de la señal RSL y temperatura a lo largo de 2015. En rojo mostramos el espectro de temperatura y en azul el de RSL.

Ambas señales presentan una frecuencia fundamental (normalizada a 1) de $\omega_0 = 0.08331 \times \pi$ (rad/muestras). Necesitamos la frecuencia de muestreo para proseguir. Esta se obtiene a partir del periodo de muestreo, T_m , como $f_m = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{3600}$ Hz. Con estos datos, considerando que $f = 1/T$, donde T es el periodo que buscamos, y $f = f_m * f_0$, podemos calcular el periodo despejando T y obtenemos $T = 8.6424e+04$ segundos, que pasado a horas resulta $P = 24.0067 \approx 24$ h. Este resultado viene a ser lógico dado que coincide con la oscilación día-noche que gráficamente percibimos. Una conclusión que sacamos es que ambas señales evolucionan a la par con el ciclo día-noche, y que el periodo coincide con el de un día.

A continuación, procedemos a calcular la atenuación teórica debida a la atmosfera (Latt), dada con respecto a la temperatura y humedad reales en un periodo de tiempo determinado. Posteriormente, lo comparamos con la potencia de recepción.

Veamos con un poco más de detalle el origen de esa ciclicidad. Se puede comprobar en la Figura 4.12 donde mostramos una señal RSL a la que se le ha sustraído el pedestal del que hablábamos restando la mediana de la señal durante el periodo de interés.

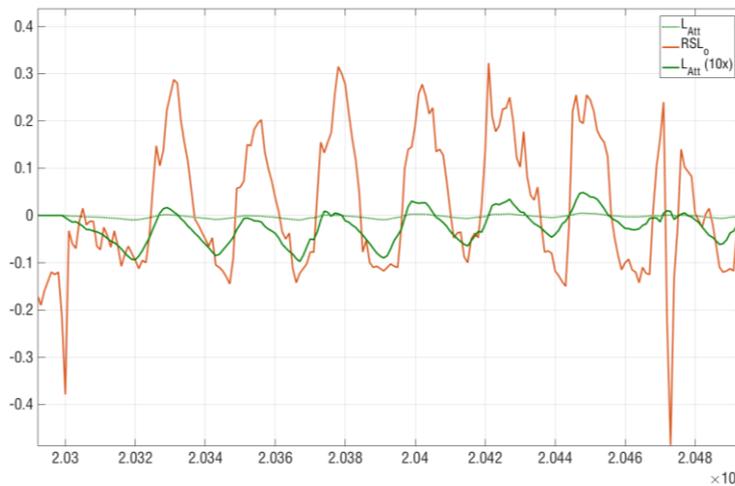


Figura 4.12. Señal de RSL sin mediana comparada con las pérdidas de atenuación teóricas sin mediana y la misma Att escalada x10.

Más adelante veremos que esta sustracción nos permite quitar componentes constantes que no interesan para detectar precipitación. Además, mostramos la L_{Att} teórica y esta misma ampliada (x 10) para una mejor apreciación de sus valores.

Las siguientes atenuaciones a calcular serán las debidas a espacio libre (Rec. UIT-R P.525-3). Las pérdidas en espacio libre para longitudes del vano L mayores que $L \geq \lambda/4\pi$ solo dependen de su longitud de onda y de la distancia. Por lo que las pérdidas en espacio libre recibidas en el receptor son un valor constante.

$$L_{SPL} = 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4 \pi L} \right)$$

Las pérdidas debidas a la niebla y nubes presentan al igual que las atmosféricas por gases una componente de temperatura, pero también de humedad muy importante. En la recomendación P.840-6 (09/2013) [ITU-R P,840-6] podremos encontrar el modelo más actualizado respecto a las atenuaciones por estos fenómenos, pero se puede simplificar diciendo que la atenuación debida a nubes y niebla en el vano es función de la distancia, la temperatura, densidad de agua (humedad) y frecuencia.

$$L_{fog} = L (Kl(f) H)$$

donde H es la densidad de agua líquida (no confundir con densidad de vapor de agua). Por ejemplo, visibilidad de 300 metros equivale a $H= 0.05\text{g/m}^3$ mientras que de 50m $H=0.5\text{g/m}^3$.

Por otro lado, $k_1(f)$ es el coeficiente de atenuación específica dependiente de la frecuencia

$$K_l = \frac{0,819f}{\epsilon''(1 + \eta^2)}$$

con ϵ y η dependientes solo de la frecuencia y de la Temperatura y basados en el modelo matemático de dispersión de Rayleigh P.840-6 (09/2013) [ITU-R P,840-6].

Estas atenuaciones añadirán una cierta modulación extra solo durante los momentos en que se produzca la niebla o el enlace atraviese un manto de nubes como puede suceder en las zonas de cumbres. Al tratarse de eventos de larga duración (varias horas continuas) son susceptibles de ser filtradas y no detectadas, cosa que nos puede interesar.

El resto de pérdidas debidas a reflexiones del terreno, vegetación [ITU-R P,833], edificaciones, etc., se consideran constantes dado que no varían con el tiempo, o lo hacen muy lentamente.

Por último, la atenuación debida a precipitaciones en frecuencias de GHz se ve afectada por la tasa de precipitación que es de tipo impulsivo y muy variable en el tiempo, polarización, frecuencia y longitud del enlace. [ITU-R P,838-3]. Estas atenuaciones han sido estudiadas en el capítulo 2 con más detalle.

Aislamiento de componentes de alta frecuencia asociadas a la precipitación:

Como conclusión se puede determinar que la potencia de recepción P_r es el equivalente a la suma de tres valores constantes menos las perdidas anteriormente descritas, algunas de las cuales son constantes, otras de baja frecuencia (LF) y otros de alta frecuencia (HF) o impulsivas. Así, reescribiendo la Ec 4.2 podemos ver la fórmula de Friis como:

$$P_r = P_{t_{Cte}} + G_{Cte} + G_{Cte} - L_{Cte} - L_{LF} - L_{HF} \tag{Ec 4.2}$$

donde explícitamente resaltamos elementos constantes, de baja frecuencia y de alta frecuencia.

La precipitación se puede considerar como una serie de impulsos de atenuación que son añadidas a una señal oscilante debida a las atenuaciones atmosféricas y atenuaciones debidas a las nieblas y trasladando en nivel, mediante la adición o sustracción de una serie de niveles de continua.

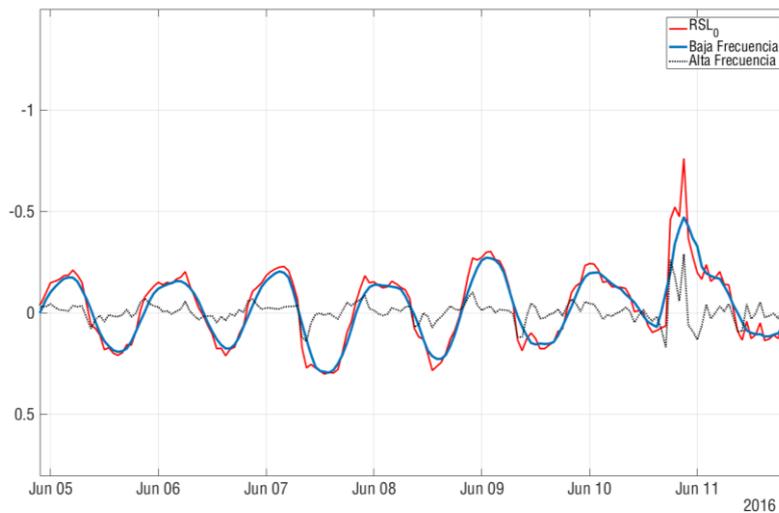


Figura 4.13 Señal cíclica (azul) extraída de la original

Una descripción basada en componentes constantes, de baja y de alta frecuencia, donde la información vinculada a los fenómenos meteorológicos está en las componentes de alta, nos lleva a la necesidad de un filtrado. El filtrado principal pasa por realizar la extracción de las medianas de la señal de atenuación y eliminar, por tanto, las componentes continuas que afecten a la misma. Para ello hemos probado dos tipos de extracción, de medias y de mediana, resultando esta última la más adecuada para cálculos posteriores.

Con vistas a aislar el efecto de las precipitaciones respecto de los demás, el siguiente filtrado será el encargado de extraer la ciclicidad que añade las atenuaciones debidas a los gases atmosféricos y nieblas. Esta periodicidad es sustraída junto a las posibles variaciones de niveles de continua debidas a los controles automáticos de ganancia realizando un filtrado de la señal a través de la selección de los parámetros del filtro adecuados. En la Figura 4.13 mostramos la señal de RSL una vez extraída la mediana (en rojo), y la parte cíclica. La señal de alta frecuencia resultante se obtendrá, por tanto, sustrayendo de la señal (en rojo) la componente de baja frecuencia (en azul). La señal de alta frecuencia (línea de puntos) resultante se obtendrá, por tanto, quitando la señal original respecto de la componente de baja frecuencia mediante una resta. El resultado englobará tanto a la atenuación debida a la precipitación como a otras atenuaciones impulsivas que pudiera haber. En este punto debemos hacer algunas consideraciones acerca de la señal de alta frecuencia. Por la forma en que la obtenemos, los valores negativos son los de interés pues representan las pérdidas propiamente dichas. Esto dará lugar en el procesado posterior (apartado 4.5) a que, por conveniencia en los algoritmos, le cambiemos el signo, y trabajemos con los valores ya

transformados en positivos. Si bien no acaba aquí la extracción de información para detectar y cuantificar las atenuaciones de lluvia, sí que es un punto muy importante que hemos de cuidar.

4.3 Detectabilidad de las precipitaciones y su cuantificación

Una de las características comunes a los detectores realizados por diversos autores es la utilización de los valores máximos y mínimos de potencias de recepción de los enlaces. Frente a estos valores está el uso de potencia media recibida. Ambas formas de usar la información de potencia están condicionadas por los equipos de transmisión/recepción usados, y tienen sus fortalezas y debilidades.

Las técnicas basadas en los niveles máximos y mínimos ofrecen simplificación de cálculos dado que las componentes de baja frecuencias de los máximos y los mínimos se ven compensados entre ellos resultando en una señal muy estable y dependiente de algunas condiciones atmosféricas.

Si bien en esta tesis usamos valores de potencia media recibida, a continuación, presentamos un método baso en el uso de valores máximos y mínimos [OLSEN,1978]. Que posteriormente es aplicado por Overeem et Al. Cuyo algoritmo se desarrolla en una serie de pasos como sigue[OVEREEM,2016]:

1. Preprocesado de niveles mínimos y máximos.
2. Clasificación de enlaces en momentos secos y húmedos.
3. Determinación de los niveles de referencia o umbrales.
4. Cálculo de P y P_Ref:

$$P=(P_{\min}+P_{\max})/2$$

$$P_{\text{ref}}=\text{median}(P(1:\text{end}))$$

Si el intervalo de tiempo seco es inferior a 2.5horas en un periodo de 24horas, P_ref no lo aplican y por tanto no computan la precipitación (R)

5. Filtrado de outliers (valores anormales) de las señales máximas y mínimas.
6. Corrección de los niveles máximos y mínimos.

$$P_{\min}^C = \begin{cases} P_{\min} & \text{if wet AND } P_{\min} < P_{\text{ref}}, \\ P_{\text{ref}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{\max}^C = \begin{cases} P_{\max} & \text{if } P_{\min}^C < P_{\text{ref}} \text{ AND } P_{\max} < P_{\text{ref}}, \\ P_{\text{ref}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

7. Cálculo de la intensidad media de precipitación y conversión de niveles máximos y mínimos en intensidades medias de precipitación.

$$A_{\min} = P_{\text{ref}} - P_{\max}^C, \quad \langle R_{\min} \rangle = a \left(\frac{A_{\min} - A_a}{L} H(A_{\min} - A_a) \right)^b,$$

$$A_{\max} = P_{\text{ref}} - P_{\min}^C, \quad \langle R_{\max} \rangle = a \left(\frac{A_{\max} - A_a}{L} H(A_{\max} - A_a) \right)^b,$$

donde H es la función de Heaviside, esto es, si el argumento es menor que 0, H=0, si no, H=1. A_a tiene como finalidad corregir la atenuación debida a la humedad de las antenas (dB) y se asume que es constante, p.e., independiente del nivel de lluvia y su frecuencia. Los coeficientes a y b se proporcionan en ficheros de valores.

8. Cálculo del valor de precipitación.

$$\langle R \rangle = \alpha \langle R_{\max} \rangle + (1 - \alpha) \langle R_{\min} \rangle,$$

donde el parámetro α pondera la contribución relativa de R_{\min} y R_{\max} dados en $mm \cdot h^{-1}$.

Veamos ahora en unas gráficas cómo funciona este algoritmo con señales de potencia reales. En la Figura 4.14 tenemos la evolución de los niveles R_{\min} , R_{\max} y las medidas de las estaciones y radares meteorológicos. La frecuencia del radioenlace es $f=38$ GHz, la longitud del vano es $L=1.6$ Km y los intervalos de medida de los niveles de potencia son de $\Delta t=15$ minutos. En el eje vertical izquierdo se muestran los niveles de potencia recibida en dBm y en el eje derecho la intensidad de lluvia media ($mm \cdot h^{-1}$) dada por un radar.

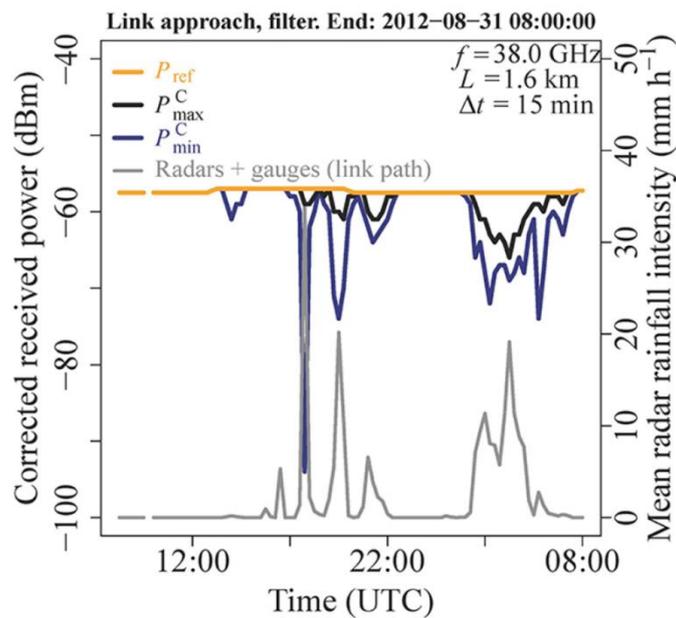


Figura 4.14 Filtrado de los niveles de potencia de recepción.

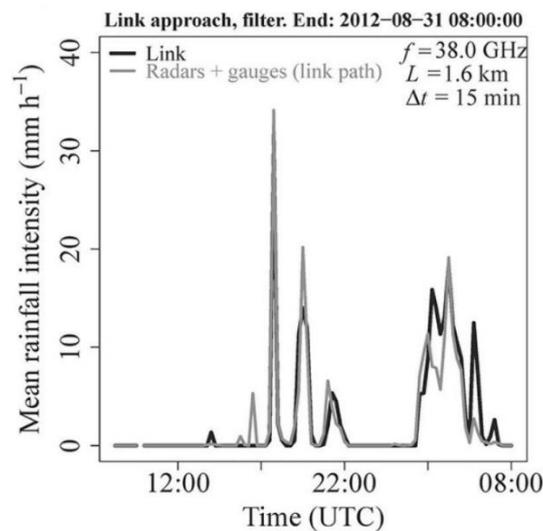


Figura 4.15 Comparación entre R medida y la real

Tal como podemos apreciar, hay varios eventos de lluvia mostrados por el radar que se manifiestan claramente como cambios en los niveles máximos y mínimos de potencia. En la Figura 4.15 se muestra la precipitación medida superpuesta a la real donde la estimación son buenas., esto es, se ajustan bastante bien a las reales.

En la Figura 4.16 se muestra la precipitación acumulada, donde se puede apreciar la calidad del algoritmo de estimación en términos de capacidad de seguimiento de la precipitación.

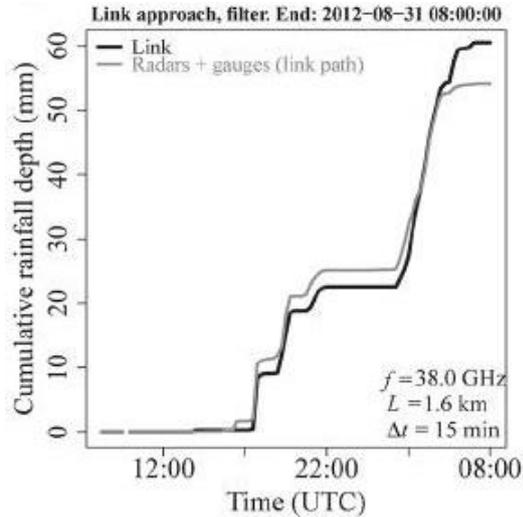


Figura 4.16 Comparación entre precipitaciones acumuladas

4.4 Algoritmos para la detección

A raíz de las consideraciones hechas en los apartados 4.1 y 4.2, incluso en 4.3, una primera aproximación al problema de detección y estimación de lluvia puede estar basada en la detección propiamente dicha, esto es, sin entrar a cuantificar. Y esta basada en conocer los niveles de señal asociados a eventos de lluvia y de no-lluvia.

4.4.1 Análisis de los niveles y su potencial uso en detección

Lo anterior es una consideración intuitiva resultante del análisis de numerosos registros de señal RSL y las señales de precipitación en estaciones meteorológicas próximas.

Toca ahora verificar si la intuición se ve amparada por resultados que la objetiven. A tal efecto vamos a estudiar las señales RSL, damos la lista de radioenlaces y sus estaciones próximas, todas en Gran Canaria durante 2015, y repartidos entre el nivel del mar y las cumbres.

1. Pico II-Los Moriscos.
2. Montaña de Cazadores-Agüimes.
3. Edificio de Usos Múltiples-Hospital Militar.

En la Figura 4.17 mostramos superpuestos los histogramas de RSL quiceminutales (superior) y horarios (inferior) correspondientes a eventos de lluvia (rojo) y no lluvia (azul). Estos datos han sido tomados de los radioenlaces 1 y 2 de la lista. Los analizamos con muestreo quiceminutal y horarios pues será lo que normal tomar los datos como quiceminutales y transformarlos a horarios, si procede. De una inspección visual podemos destacar que los niveles de lluvia y no-lluvia tienen tendencia a ser diferentes. Así, con lluvia observamos algo ya esperable, esto, es, los niveles tienden a ser más bajos. Así, por ejemplo, con los datos horarios resulta fácil ubicar un umbral en -52 dBm y otro entre -50 y -46 dBm, y de estos inferir que podemos abordar un problema de detección.

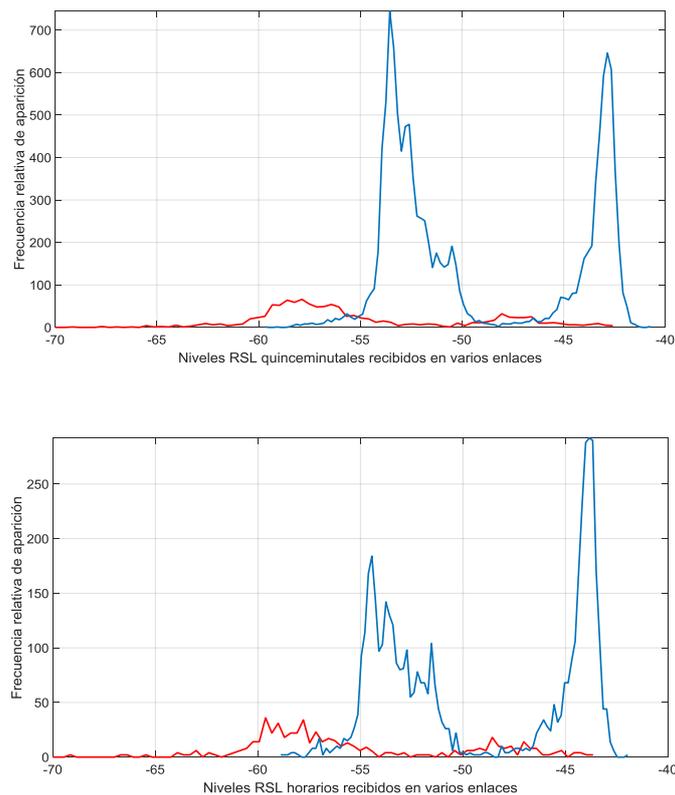


Figura 4.17 Histogramas de RSL horario correspondientes a eventos de lluvia y no-lluvia

Es interesante saber cómo quedan los niveles normalizados de la firma que se expresó en el apartado 4.2.1. En la figura 4.18 mostramos mediante un

histograma el resultado la normalización. En este caso, se ve una clara superposición de histogramas que hace muy difícil mejorar los resultados respecto de una posible aplicación de umbralle en la Figura 4.17. No obstante, esta normalización será de gran ayuda en los algoritmos presentados en 4.5.

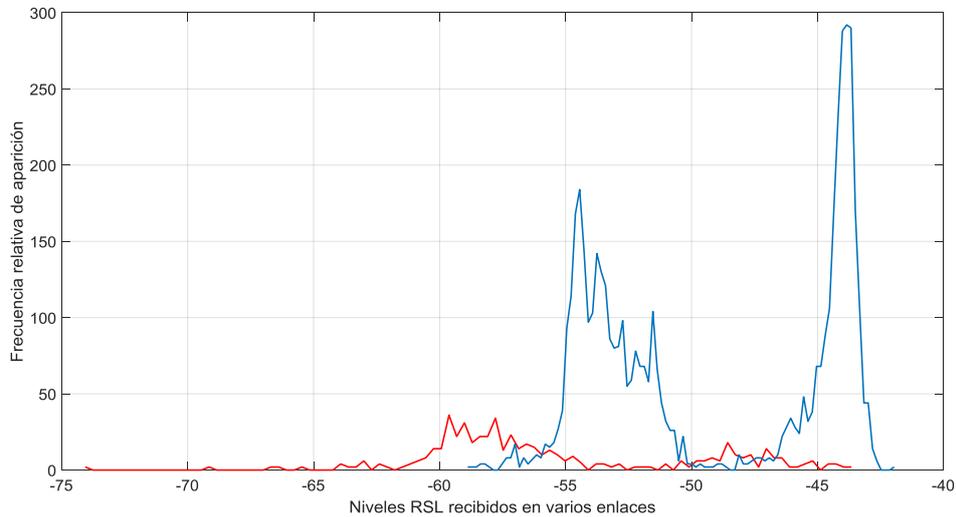


Figura 4.18 Histogramas de RSL horario normalizados de eventos de lluvia y no-lluvia

4.4.2 Algoritmo basado en clasificación binaria mediante SVM

Los resultados mostrados en el apartado anterior dan buena muestra de que el problema de detección utilizando los niveles de potencia es abordable. Esto es, las señales de RSL tienen suficiente riqueza como para plantearse una detección. Sin embargo, es fácil ver que resulta muy difícil hacerlo con el simple uso de datos quiceminutales o transformados a horarios.

La aproximación que vamos a seguir va en la línea de explotar la riqueza anteriormente dicha, y lo haremos aplicando técnicas de clasificación [GUERRA,2017]. Dado que la Figura 4.17 da a entender una dificultad en separar bien las clases, hemos optado por el uso de Máquinas de Vectores Soporte (Support Vector Machine, SVM) [HASTIE,2001]. El kernel usado es de tipo polinomial de orden 3.

Las condiciones de los experimentos son:

- Radioenlace participante: Edificio de Usos Múltiples-Hospital Militar.
- Total de eventos usados 7659, de los cuales 237 son de lluvia.
- Datos de tipo quiceminutal.

- Vectores de características, 4 componentes cada 15 minutos, p.e., 01:00-00:45-00:30-00:15.
- Fase de entrenamiento, 75% de los datos. De ellos, 75% para entrenamiento, 25% para validación sobre el entrenamiento.
- Fase de test: 25% para test con datos que no se usaron para entrenar-validar.
- El proceso de diseño del clasificador se repite en 21 iteraciones seleccionando aleatoriamente los datos de entrenar-validar, y de test.
- Los 21 clasificadores entrenados se usan para el clasificador final bajo la fórmula de ‘majority voting’.

En la tabla 4.3 mostramos los resultados en términos de True Positives y True Negatives (TP+TN), False Positives (FP) y False Negatives (FN). Los resultados se dan en porcentajes sobre los datos usados en el Test. Podemos observar que las tasas de error sobre verdaderos positivos y negativos (TP+TN) es muy baja, igual pasa con las falsas alarmas (FP). Sin embargo, la tasa de falsos negativos (FN) no es tan baja, si bien puede aceptarse como buena [GONZALEZ,2017].

	TP+TN	FP	FN
Edificio de Usos Múltiples-Hospital Militar	1.72%	1.19%	18.33%

Tabla 4.3 Resultados de detección

4.5 Algoritmos para la detección y cuantificación

En el apartado 4.2.3 evidenciamos las componentes de alta frecuencia de la señal de RSL por su interés para tratar eventos de lluvia. En este apartado vamos un paso más allá y presentamos algoritmos que nos darán dos resultados: detección de eventos de lluvia y cuantificación de las precipitaciones durante esos eventos.

A continuación, presentamos dos tipos de algoritmos:

- Basados en técnicas de filtrado de la señal.
- Basados en clasificación mediante redes neuronales.

4.5.1 Algoritmo basado en técnicas de filtrado de la señal

Como paso previo, hay que realizar una serie de adaptaciones para la extracción de la señal de precipitación desde la original de RSL. Dado que la señal meteorológica (precipitación, etc.) se presenta en escala horaria, hay que submuestrear la señal quinceminutal original de RSL para transformarla en escala horaria. Para obtener la precipitación acumulada durante una hora, procedemos a realizar una integración de las mediciones entre horas de RSL en mW, y devolviendo nuevamente los niveles a dBm.

Hemos ideado un algoritmo en el que la sustracción de la componente cíclica es un elemento esencial, y su estimación se hace de dos formas diferentes:

- Basada en filtrado de medias móviles.
- Basada en convolución con un patrón característico.

4.5.1.1 Estimación basada en filtrado de medias móviles

Dado que necesitamos estimar la componente cíclica, y esta tiene un periodo de un día completo, necesitamos que el filtrado abarque al menos 24 horas. En el apartado 4.2.3 ya vimos que la propia señal de RSL (también la temperatura) lleva una frecuencia fundamental normalizada de $W_0=0.08331 \pi \text{rad/muestras}$, esto es, el periodo básico es de 24h.

Desde un punto de vista práctico, las bondades de aplicar un filtrado mediante MA tienen que ver con la reducción de ruido aleatorio y diversas componentes de altas. Como contra presenta una baja capacidad de separar correctamente las bandas de frecuencia [SMITH,1999], si bien esto no es un problema para nuestros propósitos.

Sobre la base de que el filtrado ha de contemplar un intervalo mínimo de 24 horas, hemos probado a utilizar intervalos más largos llegando a la conclusión de que 24 horas es la mejor opción. Esto se debe a que el balance que obtuvimos de nuestros ensayos entre omisiones y falsas alarmas es muy bueno, también las detecciones de lluvia propiamente dichas. En consecuencia, el filtrado básico es de media móvil (Moving Average, MA) mediante una ventana de $P=24$ coeficientes.

La elección de los coeficientes puede hacerse de muchas formas. No obstante, para un problema como el que tenemos entre manos, que los coeficientes sean todos iguales a $1/P$ ha dado muy buenos resultados. Es como estimar la media de la señal.

$$\widehat{RSL}_n = \frac{\sum_{i=0}^{P-1} (RSL_{n-i})}{P}$$

El resultado de ese filtrado habría que restarlo a la señal original para obtener las altas frecuencias.

$$Att_n = RSL_n - \widehat{RSL}_n$$

El siguiente paso es el de convertir los niveles de atenuación estimada en niveles de mm/h de precipitación a partir de la longitud del vano y las constantes adecuadas. Esto se hace mediante la siguiente expresión ya intriducida en el Capítulo 2, Ec 2.5, y que recuperamos aquí:

$$Att_n = k \cdot R_{Rain}^\alpha \cdot L \tag{Ec 4.3}$$

donde Att_n es la atenuación real y R_{Rain} es la precipitación asociada. Las variables k y α dependen de la frecuencia, de la polarización de la onda electromagnética y del tamaño de la gota de agua, su forma y su densidad volumétrica (Drop size distribution – DSD). Si en la Ec 4.3 despejamos R_{Rain} obtendremos un valor de precipitación a lo largo del enlace o, lo que es lo mismo, sin dependencia del tamaño del vano, la frecuencia, la polarización u otra variable. Obtenemos así la siguiente expresión:

$$R_{Rain} = \sqrt[\alpha]{\frac{Att_n}{k \cdot L}} \tag{Ec 4.4}$$

En la práctica, si en la Ec 4.4 sustituimos Att_n por el valor estimado obtendremos una estimación de R_{Rain} , que podemos ver como una nueva señal.

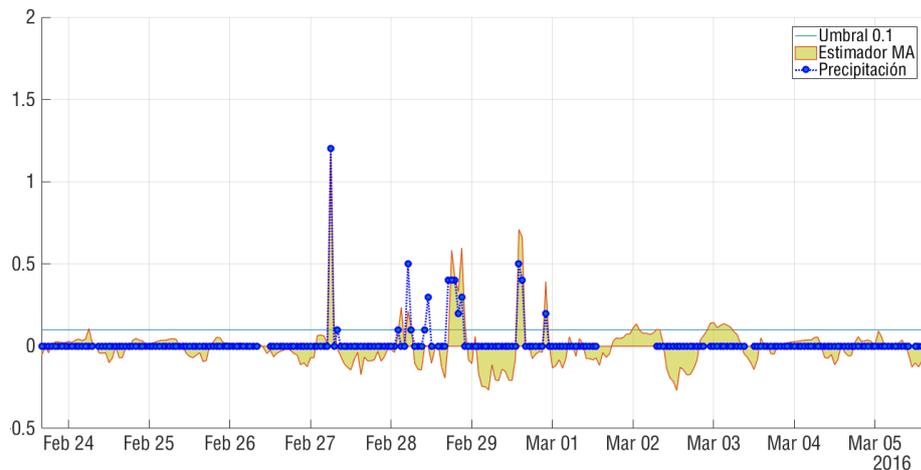


Figura 4.20 Señal de estimación de precipitación frente a precipitación y umbral.

En la Figura 4.20 tenemos un ejemplo de valores de R_{Rain} (sombreado), entre febrero y marzo de 2016, obtenidos al desarrollar el proceso descrito en este apartado, y una vez aplicada la Ec 4.4. En el apartado 4.2.3 ya adelantábamos que necesitaríamos cambiar el signo. Esto ya se ha hecho en la representación. Se puede apreciar que hay muchos valores mayores que cero dando a entender que hay precipitación. Esto no refleja debidamente la realidad y se hace necesario evitarlo. Para ello introducimos un umbral, U , tal como se muestra en la siguiente expresión.

$$R_{Rain} = \begin{cases} R_{Rain} - U & \text{si } R_{Rain} > U \\ 0 & \text{si } R_{Rain} \leq U \end{cases} \quad \text{Ec. 4.5}$$

donde ponemos a cero los valores inferiores a U , y sustituimos por la resta cuando son mayores o que dicho umbral. El valor del umbral se ha fijado a 0.1 mm/h para evitar el ruido que permanece en la salida (Figura 4.20, trazo azul). Para determinar este valor se ha tomado de referencia dado que es la resolución de las estaciones pluviométricas de validación que a las que tenemos acceso. También representamos los valores reales de precipitación (puntos azules), y nos permite ver las detecciones correctas.

La Figura 4.20. además nos aporta información relativa a posibles falsas alarmas (p.e., el 2 y 3 de marzo) dado que no se dispone de información de pluviómetro, y omisiones (p.e., dos a mediados del 28 de febrero) donde no se produjo atenuación en el radioenlace.

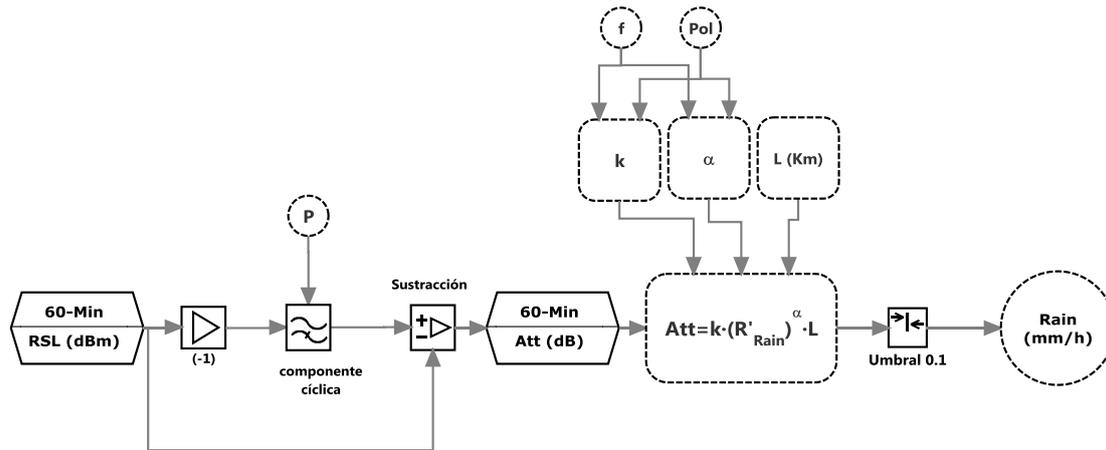


Figura 4.21 Esquema general, estimación de ciclicidad basada en media móvil

A continuación, vamos a explicar los pasos del algoritmo. Para ello nos ayudaremos de la Figura 4.21.

1. Captación de los niveles de RSL, ya transformados de quinceminutales a horarios. En esta etapa se toma la señal y, por conveniencia del procesado, se le cambia el signo.
2. La componente cíclica se obtiene mediante un filtrado de MA con $P=24$ muestras aplicado sobre toda la señal.
3. Aislamiento de componentes de alta frecuencia asociadas a la precipitación. Este es el proceso explicado en el apartado 4.2.3, Ec 4.2 y Figura 4.13, y se hace mediante sustracción de la componente cíclica respecto de la señal original.
4. El resultado de la fase anterior da los valores estimados de atenuaciones, A_{tt} , debidas a lluvia.
5. Con estas atenuaciones se calculan los valores de precipitación, R'_{Rain} , según la Ec 4.4. Para ello se usan datos de frecuencia de trabajo y polarización para calcular las constantes k y α , y la longitud L del vano. Estos valores tienen la consideración de candidatos pues todavía muestran valores ruidosos.
6. La forma de suprimir los valores ruidosos es aplicando un umbral según tal como se explicó anteriormente.
7. En el paso final se tienen los valores de R_{Rain} estimados según la Ec. 4.5.

4.5.1.2 Estimación basada en convolución con un patrón característico

El segundo método similar al primero, pero en vez de realizar un simple filtrado de medias se realizará un filtrado mediante convolución de la señal con un patrón característico o máscara.

En este caso se ha procedido a realizar una separación previa de eventos de precipitación de una hora de duración, otro grupo con eventos de precipitación de un par de horas y un tercer grupo con un día sin precipitación. En la Figura 4.22 mostramos un pseudo-código de búsqueda de las máscaras.

```

Siendo t = tiempo actual
Siendo n=el periodo entre precipitaciones con mín= 4 máx= 24
Para t'=0 hasta t'<(t-1)
    Si duración(precipitación(t'))=(1 hora)
        Guardar ventana en vector mascara lluvia corta
    Si duración(precipitación(t'))>1 hora
        Guardar ventana(t'-n:t') en vector mascara lluvia larga
        Si no (precipitación) en 24 horas
            Guardar día en mascara sin lluvia
        fin si
    fin para
    
```

Figura 4.22 Pseudo-código

Cada una de las tres mascaras resultantes son el resultado de calcular la forma de onda de la señal RSL media de todas las que componen los tres tipos de máscara buscada. En la Figura 4.23 mostramos la forma resultante de las máscaras.

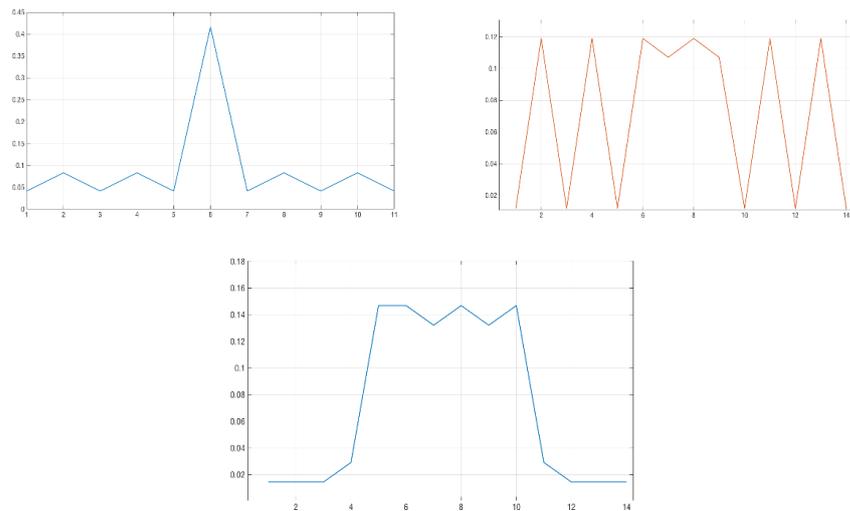


Figura 4.23 Mascaras promedio

A continuación, vamos a explicar las singularidades del algoritmo. Para ello nos ayudaremos de la Figura 4.24.

La única diferencia con algoritmo basado en medias móviles es que la señal RSL es convolucionada con las distintas mascararas como forma de extraer la componente cíclica. La salvedad en este caso es que las atenuaciones Att (dB) se obtienen restando la señal original al resultado de la convolución.

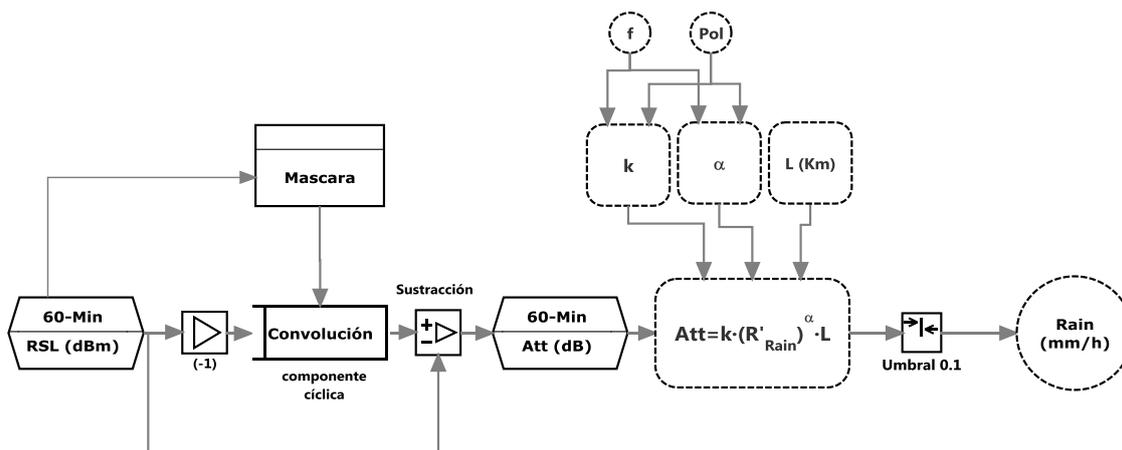


Figura 4.24 Esquema general, estimación de ciclicidad basada en convolución

4.5.1.3 Experimentos de detección y cuantificación

En este apartado mostraremos los resultados de una serie de experimentos que hemos realizado para estudiar cómo se comportan nuestros algoritmos.

En el primer experimento se ha tomado el radioenlace que hay entre La Isleta y el Edificio de Usos Múltiples, ambos en la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria. El periodo bajo estudio corresponde a los años 2014, 2015 y 2016 analizados de forma ininterrumpida, salvo en los periodos en que no hubiera señal de RSL o de precipitación registradas. El número de medidas es 9423, dados de forma horaria. Entre ellos hay 419 eventos de lluvia de los que conocemos la medida obtenida de un pluviómetro en la proximidad al vano, de tal forma que podemos afirmar que todos los eventos de lluvia recogidos en el pluviómetro son detectables mediante el radioenlace.

Vamos a mostrar los errores obtenidos con los algoritmos explicados en los apartados 4.5.1.1 (Estimador MA) y 4.5.1.2 (Máscara 1 a 3), donde Máscara 1 es la de una hora de duración, Máscara 2 un par de horas, y Máscara 3 un día

sin precipitación. En la Figura 4.25 mostramos histogramas de error, ε , en los que éste se calcula restando el valor obtenido por nuestro algoritmo y el dado por el pluviómetro. En el eje horizontal se dan los valores de error entre -4 y 14 mm/h. En el eje vertical se da el número de eventos de lluvia en que se ha obtenido un error dado.

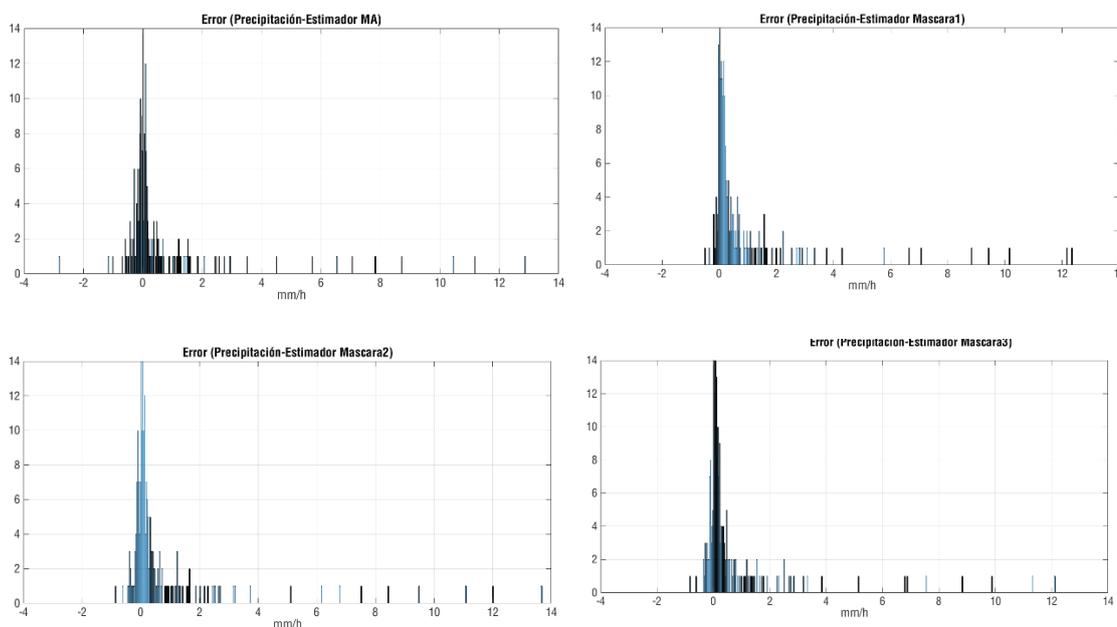


Figura 4.25. Histogramas de error con las cuatro opciones aplicadas al radioenlace Isleta-Usos Múltiples entre 2014 y 2016

A la luz de los resultados, destacamos los siguientes aspectos:

- Los errores están entorno a cero, con una dispersión mayoritaria en el margen $\varepsilon \in [-1, 1]$.
- La desviación de los errores es $\sigma \leq 1$.
- Los errores grandes (> 2 mm/h) se dan normalmente de forma aislada, rara vez a ráfagas.
- Es difícil decir cuál de las cuatro opciones es la mejor. Depende de cada radioenlace, si bien en este caso es MA es la mejor opción.

En el segundo experimento hemos medido la capacidad de nuestros algoritmos de medir de forma continuada, y lo hacemos mediante la precipitación acumulada de forma similar a la Figura 4.16. se han tomado los radioenlaces que hay entre La Isleta y el Edificio de Usos Múltiples, y El Hospital Insular y el Edificio de Usos Múltiples, y ambos en la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria. Los periodos bajo estudio están entre el 22 y el 25 de febrero, y el 7 y el 23 de febrero, respectivamente, ambos en el año 2015.

En la Figura 4.25 mostramos los resultados obtenidos con el radioenlace Isleta-Usos Múltiples. Podemos ver que en todas las opciones de nuestro algoritmo conseguimos hacer un seguimiento bastante preciso de la evolución real (Precipitación), visto en términos de incremento de precipitación. De todos los métodos, el basado en la Máscara 3 (día completo sin precipitación) es el que mejor resultados da.

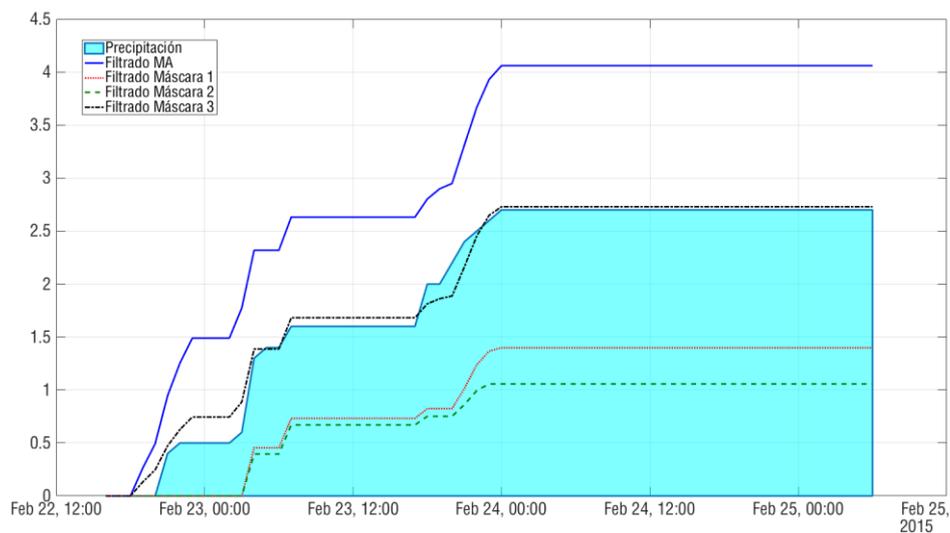


Figura 4.26 Precipitación acumulada, radioenlace Isleta-Usos Múltiples

En la Figura 4.26 mostramos los resultados obtenidos con el radioenlace Hospital-Usos Múltiples. Al igual que en el caso anterior, todas las opciones de nuestro algoritmo conseguimos hacer un seguimiento bastante preciso de la evolución real (Precipitación), visto en términos de incremento de precipitación. En este caso, el basado en filtrado MA es el que mejor resultados da.

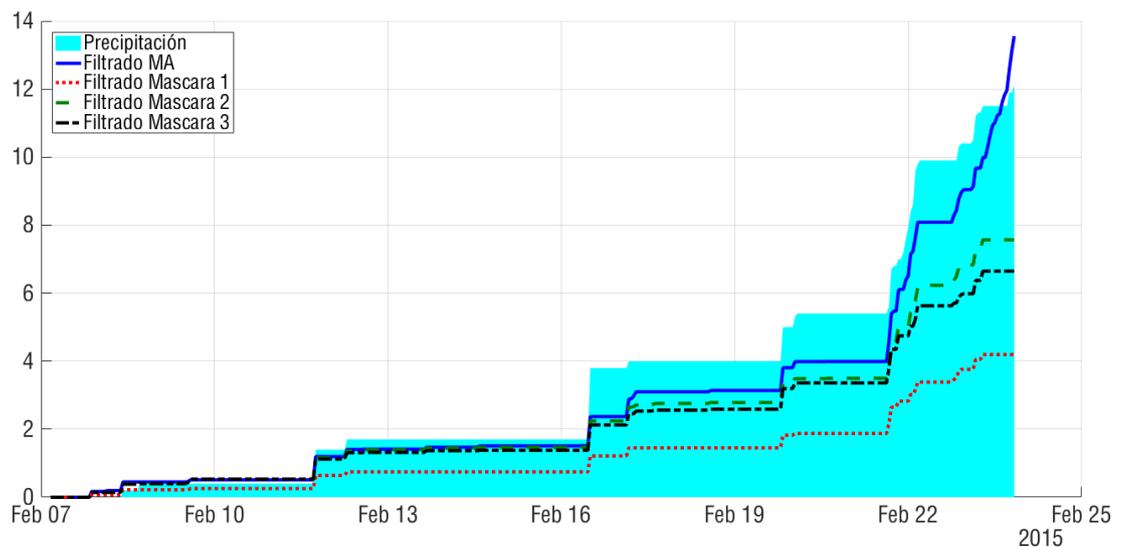


Figura 4.27 Precipitación acumulada, radioenlace Hospital -Usos Múltiples

4.5.2 Algoritmo basado en redes neuronales

En este algoritmo partimos de los algoritmos vistos en 4.5.1 como forma base para extraer información asociada a los eventos de lluvia frente a los de no lluvia.

Si bien en el apartado 4.5.1 hemos seguido una aproximación basada en filtrado, en este apartado presentamos una aproximación basada en técnicas de clasificación. Particularmente, se ha optado por utilizar una red neuronal que sea capaz de caracterizar las altas frecuencias y determinar cuáles corresponden a precipitaciones y de cuanta cantidad. Estamos, pues, ante un problema de clasificación binaria con el añadido de que aprovechamos cómo es la expresión matemática de las neuronas para usar una a la salida que nos dé valores de precipitación.

En la Figura 4.28 mostramos el proceso de creación de nuestra red neuronal. En ella se muestra el proceso desde que se toman los datos de precipitación a partir de los pluviómetros y las señales RSL, y las siguientes fases o etapas. El procesado se hace utilizando los algoritmos introducidos en 4.5.1, para la red se elige una arquitectura adecuada y se procede a un entrenamiento supervisado, se ajustan los parámetros y se entrena la red. El Entrenamiento va acompañado de una Validación con datos que no han participado en el

entrenamiento. Finalmente, se utiliza un Test con radioenlaces y pluviómetros que no han participado en los experimentos.

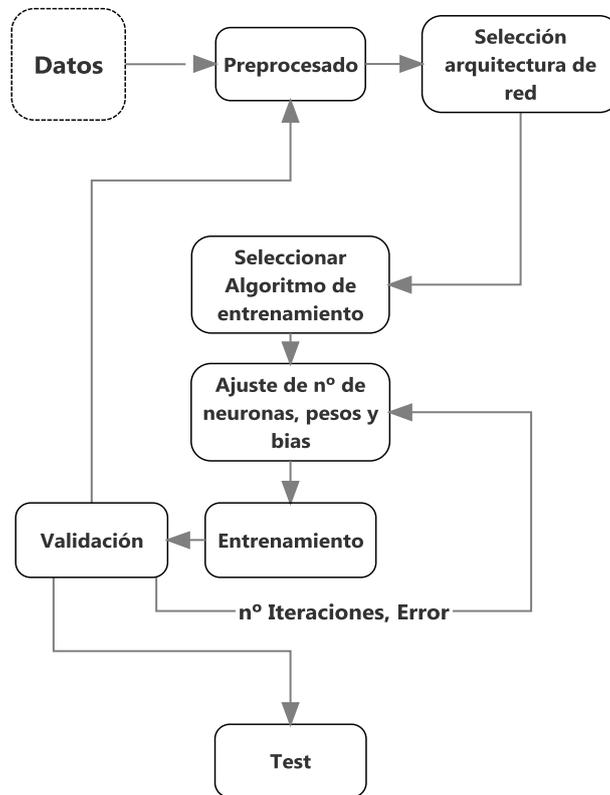


Figura 4.28 Proceso de creación de la red neuronal

La estructura seguida para la extracción de los niveles de lluvia a partir de la potencia de recepción basado en una red neuronal ha seguido el siguiente proceso. Se muestra en la Figura 4.28.

El objetivo principal de la etapa de preprocesado de datos es facilitar el entrenamiento y tal como vimos al principio del capítulo en normalizar las señales de RSL entre sí. El preprocesado de datos consiste en pasos como normalización, transformaciones no lineales, extracción de características, codificación de entradas / objetivos, manejo de datos faltantes, etc. La idea es realizar un procesamiento preliminar de los datos para facilitar la extracción de la información pertinente para la formación de red neuronal.

Para ello se ha de preparar un vector de características que ofrezca información suficiente a la red para poder discernir los diferentes afectos en la señal.

Comenzamos normalizando los datos mediante el cálculo de la mediana de la señal que estemos estudiando, desde el tiempo t actual hasta $t-n$ siendo n el instante de tiempo más antiguo. La sustracción de ese valor de mediana centrará en el eje de coordenadas y la señal perderá las atenuaciones debidas a espacio libre y otras atenuaciones o pérdidas constantes.

El preprocesado de normalización se debe realizar tanto a la entrada como al objetivo.

$$p^n = \frac{p - p^{mean}}{p^{std}}$$

Donde:

P^{mean} es el promedio del vector de entrada

P^{std} es la desviación estándar de cada elemento de la entrada.

La señal aun tendrá todas las periodicidades e incluso escalones debidos a controles automáticos de ganancia, es por ello que procedemos a realizar el filtrado paso bajo mediante la correlación de una señal ideal a través de la señal en estudio.

Para ello se comenzará calculando una ventana o máscara que se correlará con la señal que estemos estudiando.

Esta máscara de correlación ha sido calculada en base a los valores medios de varios días sin precipitación. Para ello se seleccionan varios días sin precipitación en los datos de los pluviómetros y con ausencias de atenuaciones destacadas en RSL. Los resultados se muestran en la Figura 4.29. Siendo $data1$ la máscara original calculada de n muestras (23) impares. De tal forma que la longitud (L) de cada máscara será de:

$$L = (n \cdot (4 \cdot m) - 1)$$

Siendo: $\begin{cases} n \text{ el número impar de muestras de la mascara original} \\ m \text{ equivalente a días escala horaria y } 4m \text{ a escala quinceminutal} \end{cases}$

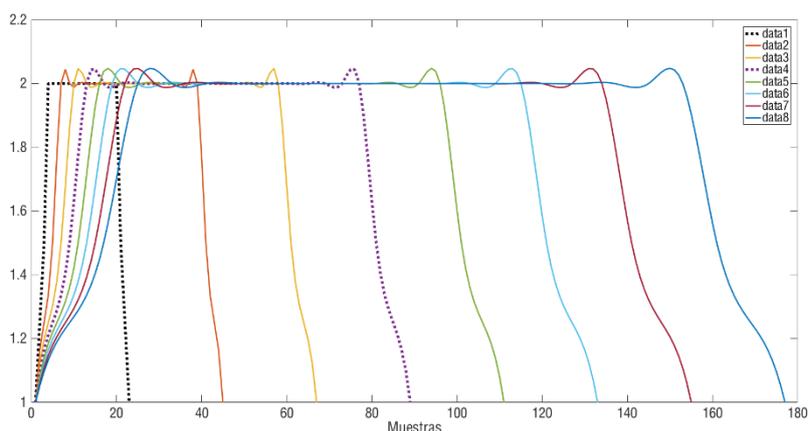


Figura 4.29 Ventanas de correlación de 8 máscaras correspondientes a dos días. Data4 correspondiente a la máscara de 24 horas

El tamaño de la máscara L determina la frecuencia de corte del filtro, cuanto más estrecha sea la ventana más bajas frecuencias cortará.

Al correlar cada una de las máscaras obtenemos 8 señales filtradas quinceminutales y le añadimos la señal original invertida y sin mediana. Creando de esta manera una matriz de señales que describen la forma de onda para cada instante de tiempo t .

El siguiente paso es la extracción de características. Para cada tiempo t en escala quinceminutal extraemos los 4 valores anteriores, si nos fijamos en la Figura 4.30 podemos comprobar como transformamos un vector 15-minutal de dimensión n , siendo n el número de muestras, mediante un muestreo horario sin pérdida de información debido a que los datos de la señal que se salta el muestreo son añadidos en la parte superior de cada columna horaria para devolver en escala horaria una matriz de características de $n/4$ filas por 4 columnas. Este proceso se aplica a cada una de las máscaras.

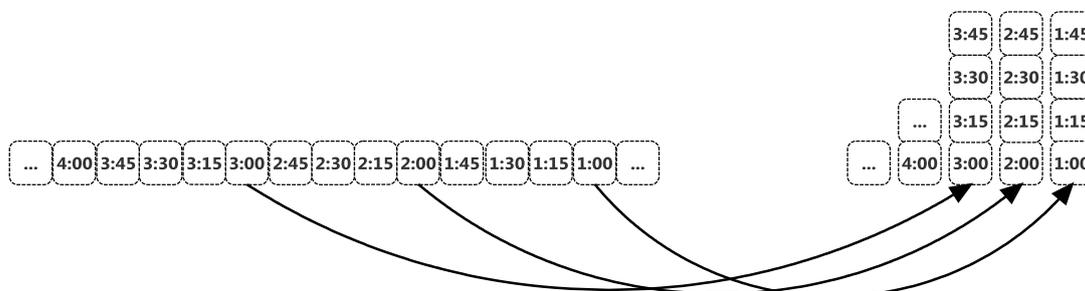


Figura 4.30 Proceso de transformación de vectores. La justificación de el porque se crea la matriz característica de esta forma es debido a que la precipitación que ofrece el pluviómetro resolución horaria no tiene por qué haber sucedido en el instante ese exactamente ni en toda la hora

de integración de mm/h. De producirse precipitación a las 14:15 de 20 minutos por ejemplo hasta las 15:00 no obtendríamos un resultado de lluvia acumulada en esa hora. Por lo que deberemos respetar en los datos de atenuación esta información sin destruirla dado que presenta componentes frecuenciales que podrían facilitar la detección. Realizar la atenuación acumulada en esa hora para compararla con la precipitación acumulada destruiría información y perderíamos resolución temporal.

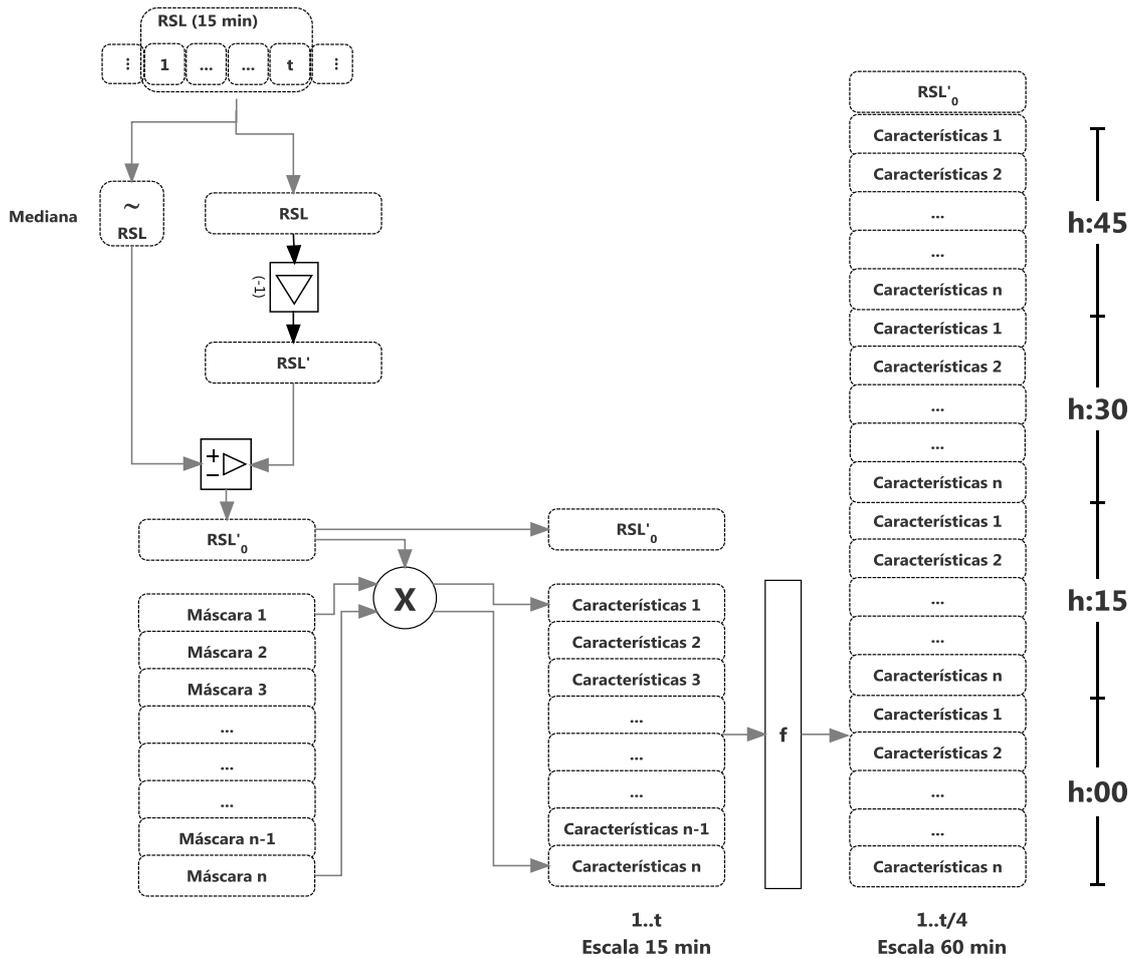


Figura 4.31 Esquema de generación de la matriz característica

4.5.2.1 Arquitectura de la red

El siguiente paso en el proceso de formación es la elección de la arquitectura de red. El tipo de arquitectura de red está determinado por el tipo de problema que deseamos resolver. Una vez elegida la arquitectura básica, debemos decidir detalles específicos como cuántas neuronas y capas queremos utilizar, cuántas salidas debe tener la red y qué tipo de función de rendimiento queremos utilizar para la formación.

Una vez tenemos la matriz de características con resolución horaria junto con la precipitación en escala horaria seleccionamos la arquitectura de la red. En nuestro caso particular, y debido a que estamos tratando con señales temporales, que pueden ofrecernos información en las muestras anteriores a la actual, hemos optado por una arquitectura basada en una red de Capa Recurrente (*Layer Recurrent Net* - LRN).

Una versión simplificada anterior de esta red fue introducida por Elman [ELMAN,1993]. La principal característica de esta arquitectura es la representación del tiempo implícitamente por sus efectos sobre el procesamiento más que explícitamente como sucede en las representaciones espaciales. Implica el uso de conexiones recurrentes para proporcionar a las redes una memoria dinámica. En este enfoque, los patrones de capas ocultas son devueltos a sí mismos. En el LRN, hay un bucle de retroalimentación, con un solo retardo, alrededor de cada capa de la red, excepto para la última capa. La red original de Elman tenía solamente dos capas, y utilizaba una función de transferencia del tipo sigmoide tangencial (tansig) para la capa oculta y una función de la transferencia del tipo lineal puro (purelin) para la capa de salida. La red original de Elman es entrenada mediante una aproximación al algoritmo de backpropagation mientras que en nuestra red realizamos una generalización de la red Elman para así tener un número arbitrario de capas y tener funciones de transferencia arbitrarias en cada capa. El entrenamiento de la LRN se aplica usando versiones exactas de los algoritmos basados en gradiente

A la hora de entrenar hemos optado por un método de Levenberg-Marquardt [YU,2011] que al igual que los métodos cuasi-Newton, está diseñado para acercarse a la velocidad de entrenamiento de segundo orden sin tener que calcular una matriz Hessiana². Cuando la función de ganancia tiene la forma

² La "matriz hessiana" de una función multivariable $f(x,y,z,...)$ organiza todas las derivadas parciales de segundo orden en una matriz cuyas entradas son funciones.

de una suma de cuadrados, entonces la matriz Hessiana puede aproximarse mediante las matrices Jacobianas³:

Debido a que nos interesa tener memoria de los sucesos pasados en la detección de precipitaciones en el diseño añadimos un bloque de retardo (Figura 4.32) que devuelve la salida de la primera capa de la red a la propia red para relacionarla con la entrada de las características.

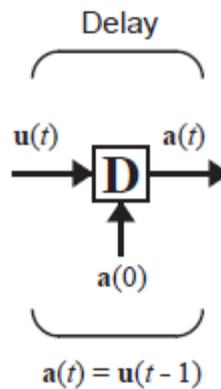


Figura 4.32 Bloque de retardo de nuestra red

Por último, las salidas de las capas de las neuronas son ajustadas a través de la función de transferencia que presenta la forma de una tangente sigmoideal hiperbólica,

$$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$$

La primera capa de la red estará compuesta de S neuronas. En la Figura 4.31 mostramos la relación entre la entrada (vectores de R=36 características), y las S neuronas de esta capa.

³ La matriz jacobiana es una matriz formada por las derivadas parciales de primer orden de una función. Una de las aplicaciones más interesantes de esta matriz es la posibilidad de aproximar linealmente a la función en un punto. En este sentido, el jacobiano representa la derivada de una función multivariable.

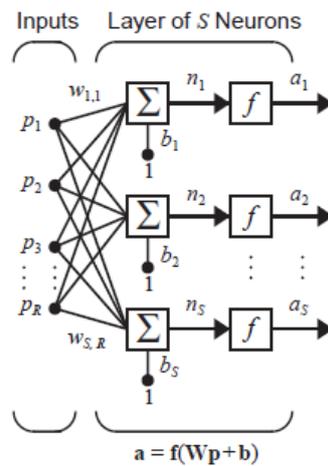
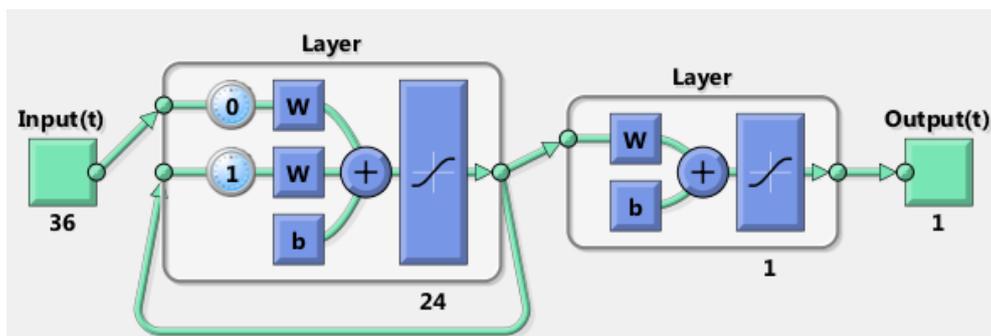


Figura 4.33 Entradas y neuronas de la primera capa de nuestra Red

La selección de este número de capas a pesar de coincidir con el periodo anteriormente calculado fue resultado de ensayo y error. Diseñando inicialmente con una sola neurona e incrementando sucesivamente mientras el error fuera en decremento al pasar las 24 neuronas el error comenzó a acrecentarse de nuevo por lo que establecemos en 24 neuronas esta capa de la red. Por tanto, hemos tomado $S=24$ neuronas.

Por último, tal como se muestra en la Figura 4.34, se añade una segunda capa de una sola neurona de ajuste de niveles. Es esta capa la que permite ‘calibrar’ la red, esto es, añadimos una función que transforma los vectores de características en valores de precipitación.



4.34 Diseño final de nuestra Red neuronal

Las 36 características de entrada a la red representan la muestra actual con resolución horaria y sus respectivos quince minutos anteriores, así como esa misma señal filtrada un número determinado de veces.

En el proceso de entrenamiento se dividió la señal en tres grupos de datos de un radioenlace determinado, en porcentajes de 70% para entrenamiento, 15

de validación y 15% de test. Estos datos fueron aleatoriamente variados en cada iteración y se realizaron 10000 iteraciones. Se añadieron los datos de precipitación de la estación meteorológica más cercana a modo de target objetivo en escala horaria sin datos faltantes con resolución horaria y con los valores exactos de mm/h de precipitación. El proceso de entrenamiento-validación y test final se muestra en la Figura 4.35.

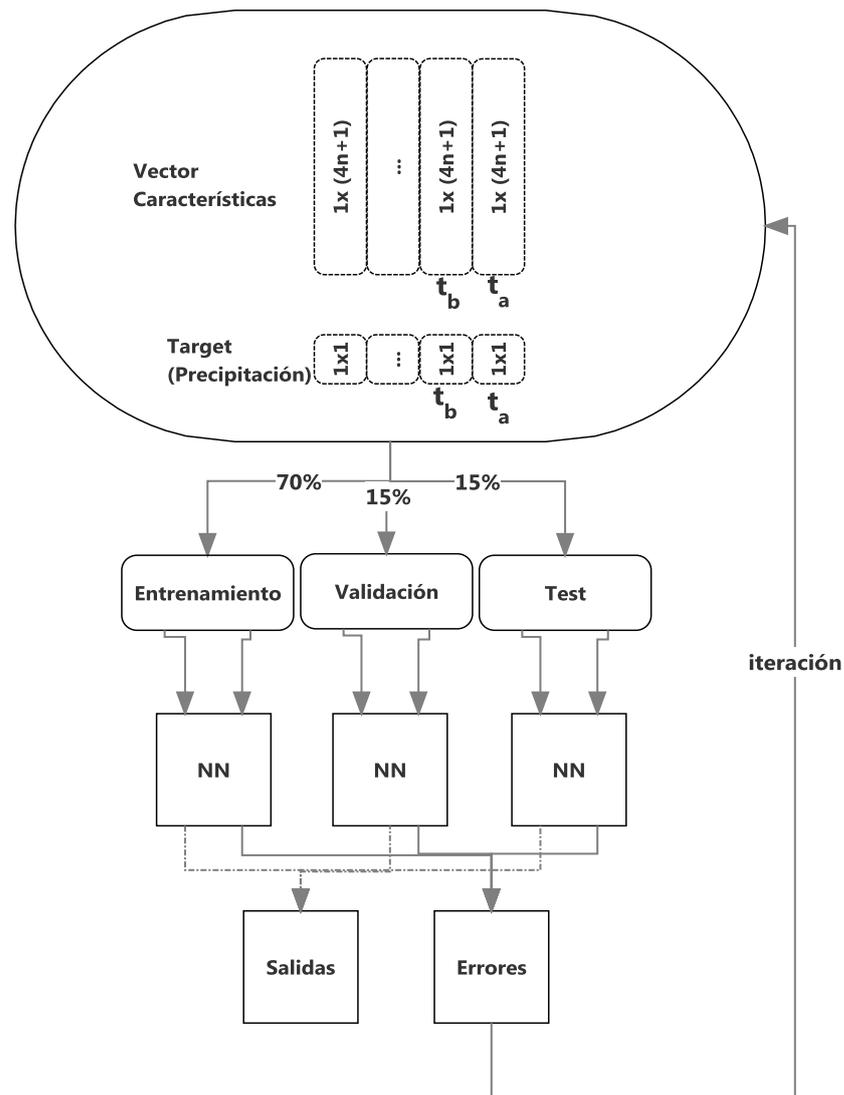


Figura 4.35 Esquema con el proceso de entrenamiento-test y validación

Con cada iteración de entrenamiento la red va ajustando sus pesos y sesgos (bias) automáticamente y los va comparando continuamente con el error mínimo alcanzado hasta converger o alcanzar el límite de iteraciones. El resultado es una red programada con el mínimo error posible para esas condiciones.

En nuestro caso la red ha sido probada con otros radioenlaces distintos al del entrenamiento para estudiar la estabilidad y validez del preprocesado y de la creación de los vectores de características.

La salida de la red neuronal representa la cantidad de precipitación que atenúa la señal en mm/h. Esto se puede apreciar en la Figura 4.36. En la parte superior mostramos un ejemplo de señal RSL, y en medio la misma señal son las componentes constantes. En la gráfica inferior se muestra la precipitación de Salida compara da con la real. Al igual que pasaba con los algoritmos en 4.5.1, hemos de hace run procesado posterior para mejorar los resultados pues presentan elementos de mejora. Veámoslos.

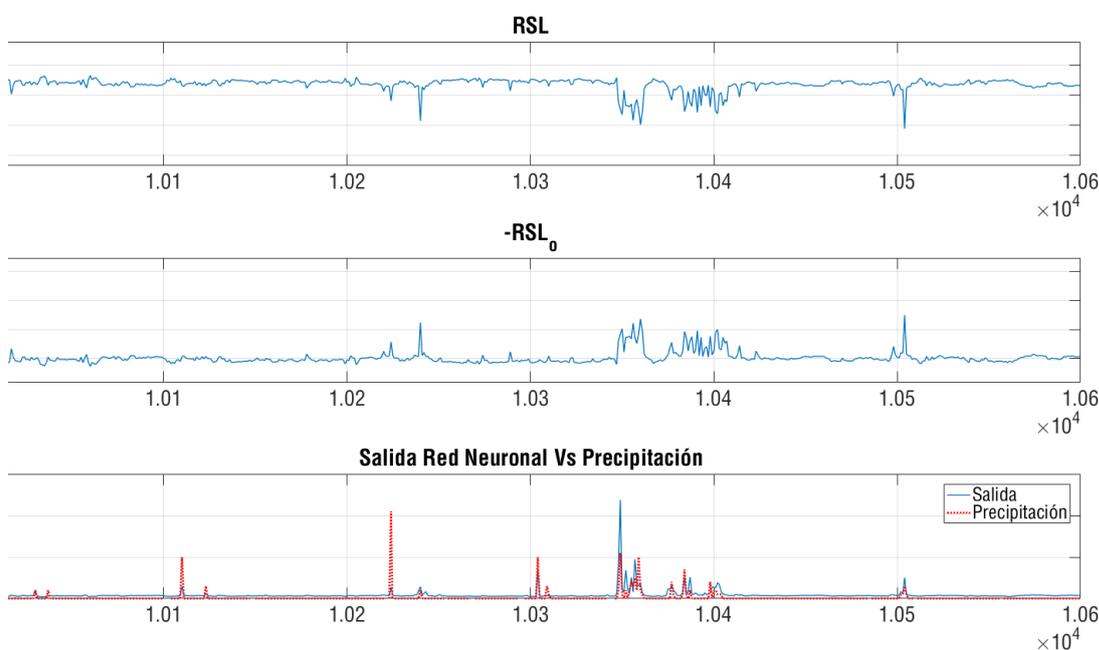


Figura 4.36 Señal original (RSL), componente de alta frecuencia y nivel de precipitación estimado por la Red

De forma sistemática, la salida de la red presenta una mínima oscilación y un nivel de continua de unos pocos mm/h que son filtrados mediante una transformación adecuada y posterior aplicación de umbral de nivel. Para la transformación hemos elegido un filtrado morfológico de tipo TopHat. Este consiste en un proceso de recorte de los lóbulos superiores de las señales sin tener en cuenta los niveles. Básicamente consta de tres etapas. En la primera se erosiona la señal de precipitación con un elemento estructurante. En la

segunda, la señal resultante se dilata por la misma cantidad que se realizó la erosión. Esto es, en esencia, una apertura morfológica. Y en la tercera, esta apertura es sustraída a la señal de precipitación resultando la señal recortada y quedándonos con los picos de la señal exclusivamente y, finalmente, con un valor estimado de precipitación.

En la Figura 4.37 se muestra la salida de la red NN, procesado con top-hat y aplicación de umbral. En la gráfica superior mostramos la salida de la Red que, como se puede apreciar, posee un nivel de continua una oscilación o ruido. En la gráfica del medio vemos cómo, después de aplicar un procesado de sustracción basado en top-hat obtenemos una señal transformada trasladada con su mínimo a cero. En la inferior se ve el resultado de aplicar sobre la señal transformada un umbral $U=0.1$.

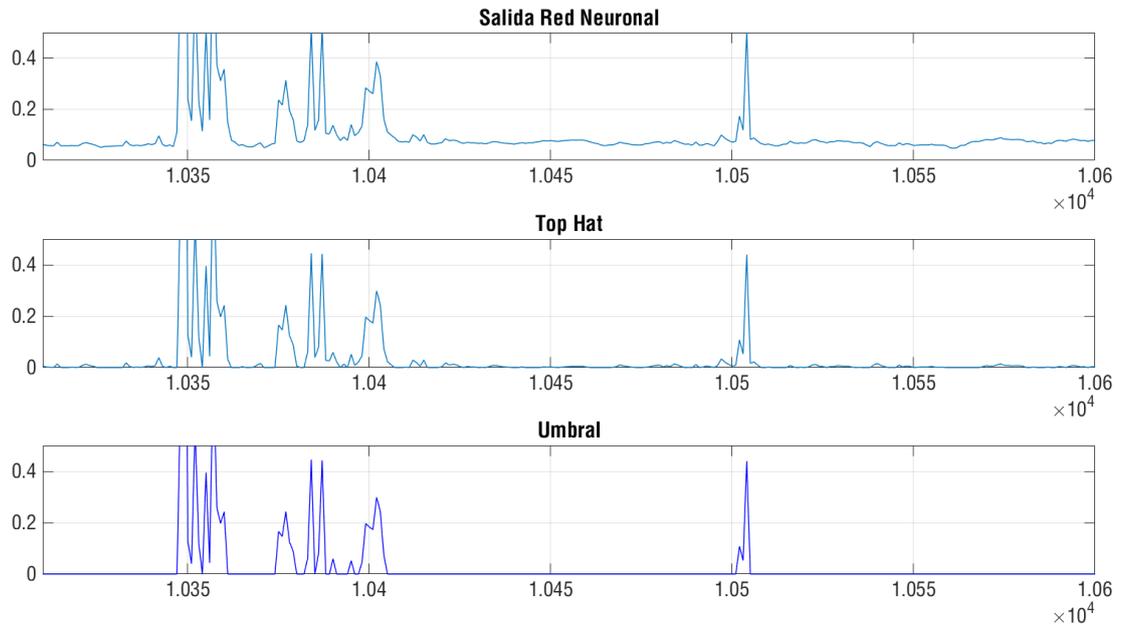
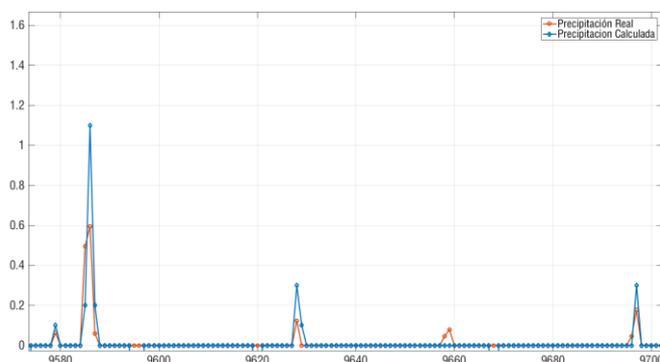


Figura 4.37 Salida de la red NN, procesado con top-hat y aplicación de umbral

4.5.2.2 Experimentos de detección y cuantificación

En este apartado mostraremos los resultados de una serie de experimentos que hemos realizado para estudiar cómo se comporta este algoritmo. Para ello hemos utilizado varios radioenlaces de la isla de Gran Canaria.

En el experimento de la Figura 4.38 mostramos el resultado de una detección y cuantificación (en azul) comparada con la que muestran los datos de un pluviómetro (en rojo). Podemos ver que el algoritmo presenta detecciones correctas y omisiones, p.e., una omisión en la hora 9660.



4.38 Otra salida de la red neuronal de precipitación estimada frente a la precipitación real de una estación cercana

Representando las precipitaciones reales frente a las precipitaciones calculadas comunes (Figura 4.39) se puede observar el error cometido en la cuantificación para un radioenlace. Podemos ver que se pueden producir de todo tipo de situaciones, detecciones correctas (y su error de cuantificación), omisiones de eventos de lluvia, falsas alarmas, etc.

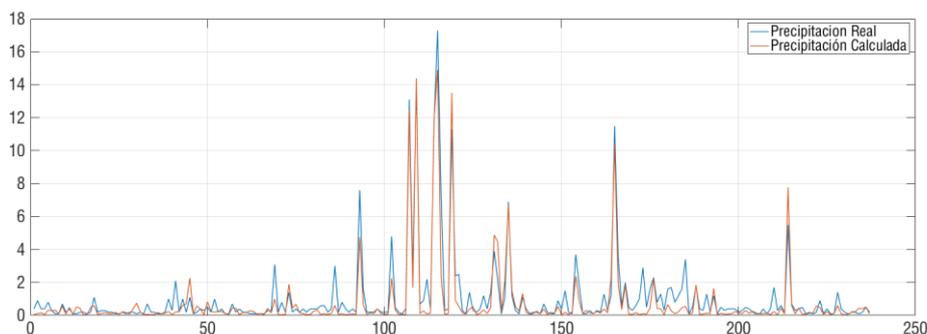


Figura 4.39 Comparativa de precipitación real y calculada

Algo más de información se obtiene si tenemos en cuenta la cantidad de lluvia detectada acumulada respecto a la cantidad de lluvia acumulada real. Es lo que se muestra en las Figuras 4.40. En este caso vemos que hasta el evento 6200 hacemos un seguimiento bastante preciso. A partir de este punto se producen errores notables en cuanto a precipitación acumulada. Consideramos que esto tiene una relevancia que hemos de relativizar. Hemos

de tener en cuenta cómo se manifiestan (o no) nuestros errores de detección, y en el siguiente experimento lo explicaremos.

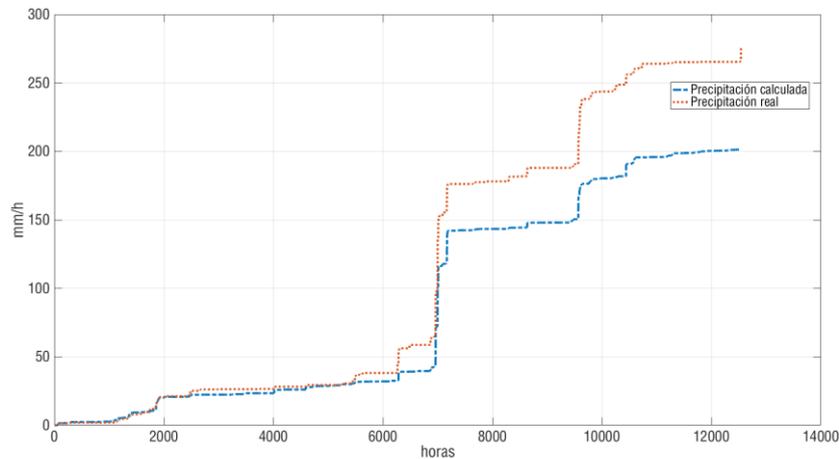


Figura 4.40 Precipitación acumulada

Vamos a dar un paso más allá en los experimentos y lanzamos uno sobre un radioenlace. Este radioenlace es el Hospital-Usos múltiples y los datos corresponden al periodo de los tres años completos. Hay un total de 9672 horas analizadas, de ellas 399 contienen eventos de lluvia.

Vamos a presentar los datos en términos de matriz de confusión. Esta sirve de aproximación de la bondad del sistema, pero arrastra un error de base consistente propio del diseño. Hemos de tener en cuenta cómo se manifiestan (o no) nuestros errores de detección. La precipitación calculada a lo largo de todo un vano de radioenlace se está comparando con la estación meteorológica más cercana. Esta estación no puede capturar la precipitación en ambas antenas a la vez por lo que en ocasiones sucede que la precipitación se encuentra en el punto más alejado del vano respecto a la estación meteorológica. Así mismo, sucede que puede estar lloviendo sobre el pluviómetro y no sobre el radioenlace por lo que no se mostraran atenuaciones destacables. Y una tercera situación de error es el tiempo que tarda la precipitación en desplazarse desde el radioenlace hasta el pluviómetro o viceversa pudiendo haber desfases horarios entre los detectores.

Teniendo en cuenta lo anteriormente dicho podemos afirmar (ver Figura 4.41) que en el 98% de las veces que no se produce precipitación el detector acierta. El 54% de las lluvias las detecta correctamente. El 77% de las detecciones del detector son lluvias comprobables.

		precipitación	
		NO	SI
Detector	NO	9210	181
	SI	63	218

Figura 4.41 Datos de detección sobre el radioenlace Hospital-Usos múltiples

A continuación presentamos en la Figura 4.42 un histograma de error correspondiente a la detección dentro del radioenlace pico_ii_moriscos en el periodo de enero de 2013 a enero de 2016 donde hay 98378 muestras analizadas de las cuales 789 corresponden a lluvia. En el eje horizontal tenemos los errores absolutos de cuantificación, ϵ , de precipitación. Como vemos, se dan en la franja $\epsilon \in [-0.5, 0.5]$. En el eje vertical mostramos el número de veces que se ha dado cada error. El error que se da en $\epsilon=0$ corresponde principalmente a los casos en que no hay lluvia y clasificamos correctamente. En la mayoría de detecciones de producen errores que como hemos visto, están acotados en valores muy bajos.

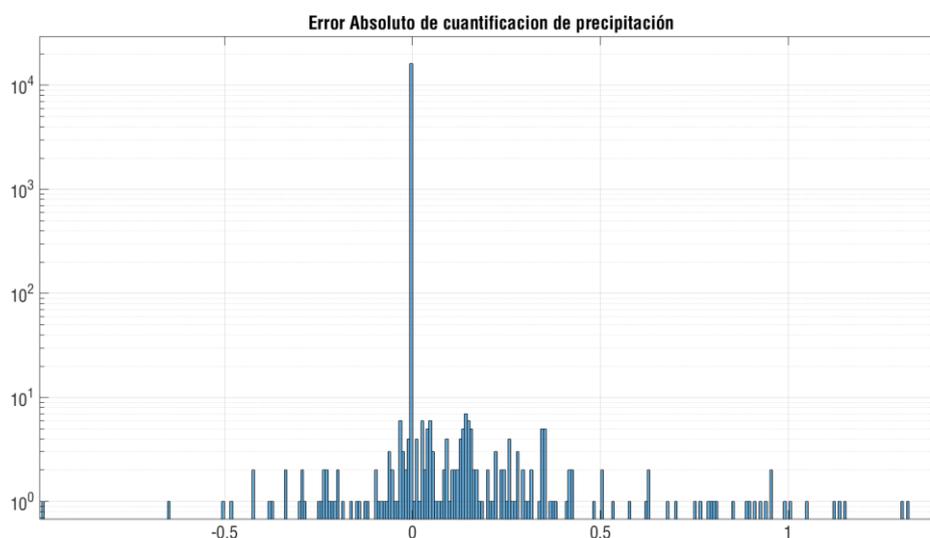


Figura 4.42 Histograma de error en las detecciones observadas en el radioenlace pico_ii_moriscos

Los histogramas de error expuestos a lo largo de este capítulo nos han llevado a una serie de consideraciones acerca de nuestras cuantificaciones y cómo es la cuantificación que dan los pluviómetros (ver Figura 4.43). Un factor a tener en cuenta es relativo a los niveles de cuantificación propios de los pluviómetros frente a los niveles de cuantificación de nuestros algoritmos.

Mientras que los pluviómetros realizan por diseño cuantificaciones con pasos de 0.1 mm/h de resolución (barras amarillas cada 0.1 mm/h), nuestro sistema de detección y cálculo se asemeja más a la respuesta analógica de la precipitación (barras azules), esto es, dentro de la recta real da cualquier valor razonable en términos de la magnitud que medimos.

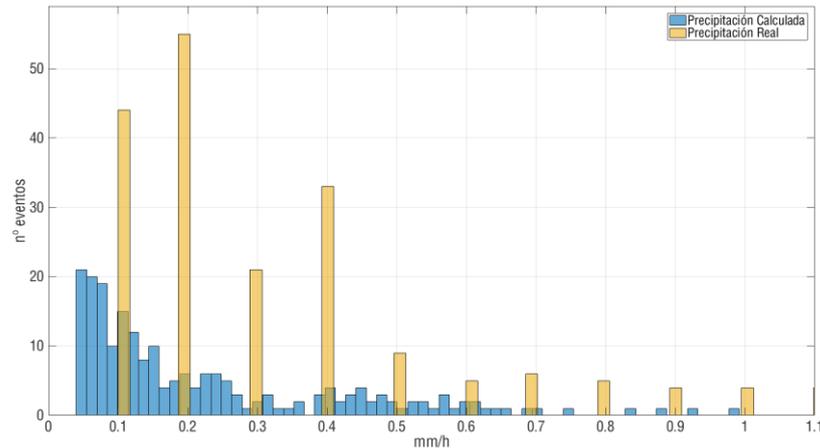


Figura 4.43 Histograma comparativo de medidas de los pluviómetros y nuestro sistema

Según el pluviómetro todas las precipitaciones entre 0 y 0.1 mm/h serán contabilizadas como 0.1 mm/h. Un ejemplo del error del pluviómetro sería el caso de las precipitaciones de 0.8mm/h. Nuestro Sistema de cálculo detecta precipitaciones de 0.75mm/h, de ser cierta la precipitación calculada el pluviómetro no podría determinar una precipitación de esa intensidad debido a su propia digitalización y su error de cuantificación, devolviendo una medida de 0.8, falseando así la medición real y aumentando nuestro error de cuantificación.

Capítulo 5

Algoritmos para la estimación de temperatura ambiente a partir de la temperatura de ODU

Los análisis climáticos y meteorológicos abordan el problema a través de métodos estadísticos, aproximaciones estocásticas, etc., que hacen uso de los parámetros físicos atmosféricos más relevantes, entre ellos la temperatura. Para la realización de estos análisis la física de la atmósfera usa los denominados modelos atmosféricos, que facilitan la realización de predicciones sobre la evolución de los fenómenos climáticos y meteorológicos. La base fundamental de estos modelos es la termodinámica de la atmósfera que, considerada como un gas ideal, depende entre otros parámetros de la temperatura. El conocimiento preciso, espacial y temporal, de la temperatura redundaría en modelos más precisos y por ende en predicciones de mayor fiabilidad.

Actualmente la medición de la temperatura a nivel de la superficie terrestre fundamentalmente cae en manos de una red de EMA que, a lo largo de los años, ha ido creciendo en número, facilitando así un muestreo más preciso del reparto de la temperatura a lo largo y ancho de la geografía, pero aún es insuficiente. El crecimiento de esta red de EMA se ve limitado por otras variables, de entre ellas quizás la más relevante de todas sea el coste de un mantenimiento fiable y confiable.

Por otro lado, nos encontramos en unos niveles de desarrollo tecnológico que alcanza un nivel de tecnificación importante, existen multitud de dispositivos desde los que se usan a nivel de usuario (Smartphone, tablets, ordenadores portátiles, etc.) hasta los de uso profesional (sistemas de comunicación, sistemas de proceso, cámaras de vigilancia, etc.) sistemas que están repartidos por toda la geografía, aunque de manera dispar. Además, concurre que muchos de estos sistemas para su correcto funcionamiento disponen de sensores que, miden continuamente diversos parámetros, entre ellos la temperatura interna de funcionamiento. Particularmente en esta tesis, como

se ha comentado en capítulos anteriores, nos hemos centrado en los ODU (Outdoor Devices Unit) como elementos de sensorización indirecta de la temperatura.

La medición de temperatura que nos proporciona, en este caso, el ODU es una temperatura de funcionamiento interno del dispositivo, pero a todas luces estará influido por el ambiente exterior: frío, calor, exposición al Sol del mediodía, tarde o amanecer, etc. Luego, se abren aquí dos grandes retos: analizar e investigar los datos disponibles para encontrar las interrelaciones entre estos y el parámetro deseado (temperatura exterior), e investigar el desarrollo de métodos algorítmicos que permitan obtener la información deseada con un error asumible, a ser posible del mismo orden de los sensores dispuestos en las EMA.

Comenzamos el capítulo presentando y haciendo consideraciones acerca de la medición de temperatura. Los instrumentos de medición de la temperatura ambiente se agrupan en instrumentos de medición directa e instrumentos de medición indirecta, esta tesis, como y se ha dicho, se centra en la medición indirecta. Proseguimos introduciendo el método algorítmico desarrollado, para ello hemos partido de: estimaciones diarias de temperatura y consideraciones de estacionalidad, más concretamente variabilidad mensual. El método resultante ha dado lugar a una solicitud de **patente**, actualmente en trámite, que vaya por título “Método de medición de temperatura del ambiente basado en dispositivos externos con medidores de temperatura de funcionamiento del dispositivo” (Solicitud de Registro P201700134) [GUERRA,2017Pa].

5.1 Medición de temperatura

Los métodos de medición de temperatura ambiente puntual (en localizaciones geográficas específicas) se pueden dividir en dos grandes grupos según la ubicación del sensor de medida respecto del punto en el que se mide:

1. Medición directa en el punto donde se desea medir. Su funcionamiento es ampliamente conocido y se basa en el uso de sensores como, por ejemplo, termómetros o similares;
2. Medición indirecta en los cuales los sensores no están directamente expuestos al ambiente.

Como referencia de partida tomamos los métodos de medición directa, para ello mostramos en la Figura 5.1 las temperaturas, en grados centígrados, de varios termómetros de las EMA de la agencia estatal de meteorología, además sucede que se encuentran enmarcadas dentro de un área de unos 14 km de

diámetro. Los datos están referidos a poco más de 8 días comprendidos entre finales de mayo y principios de junio de 2015, primavera.

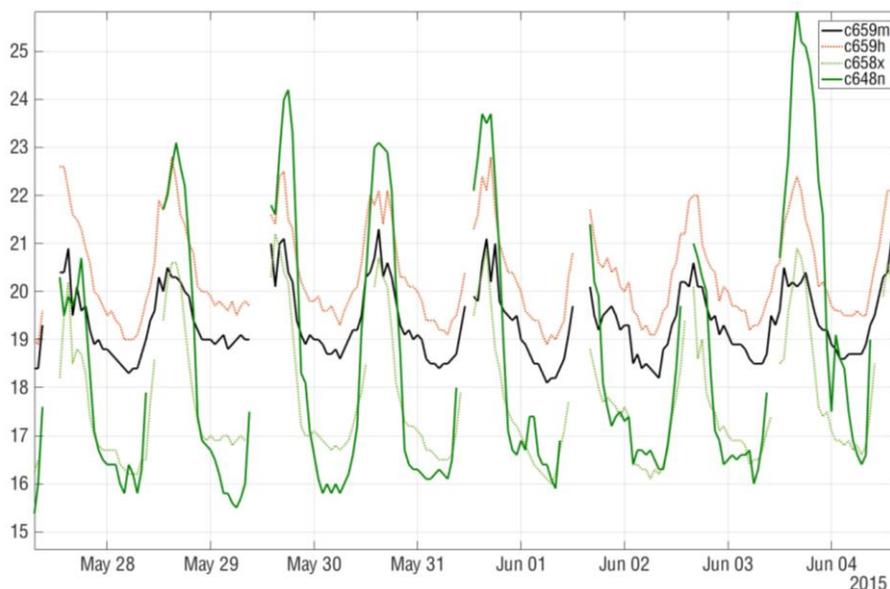


Figura 5.1. Temperaturas recogidas por varias estaciones de la AEMET.

Las estaciones meteorológicas consideradas en la Figura 5.1 corresponden a la situada en la Plaza de la Feria (c659m), la estación ubicada en el barrio de San Cristóbal (c659h) ambas de la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria, la estación instalada en Tafira (c658x) municipio de Las Palmas de Gran Canaria y la estación del municipio de Telde (c648n), todas las estaciones integradas en la isla de Gran Canaria, vertiente noreste.

Tomando como referencia la estación de Plaza de la Feria, la Tabla 5.1 recoge diferencias de distancias y de altitud con las restantes.

Estación	Distancia (km)	Dif Altitud (m)
San Cristóbal	2.66	6
Tafira	4.41	328
Telde	14.24	341

Tabla 5.1. Distancias y diferencias en altitud de las estaciones con respecto a Plaza de la Feria.

Podemos observar a simple vista en la Figura 5.1, que las mediciones realizadas por estaciones cercanas y a similar altitud presentan grandes diferencias en la temperatura medida. En la Figura 5.2 mostramos un histograma que recoge las diferencias entre la temperatura medida en la estación Plaza de la Feria y la estación San Cristóbal. Estas estaciones están separadas 2.66 km y presentan 6 m de diferencia de altitud. La diferencia de temperatura observada entre estaciones esta desplazada en $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ con diferencias máximas comprendidas entre -2.8 y 2.7 respecto a ese desplazamiento. Este hecho puede deberse a diversos aspectos: actividad humana, zona más expuesta a vientos dominantes y al mar, zona más densamente poblada, mayor número de edificios de más de 8 plantas (posibles sombras), etc., que provocan una temperatura algo más estable, con una menor dinámica de variación.

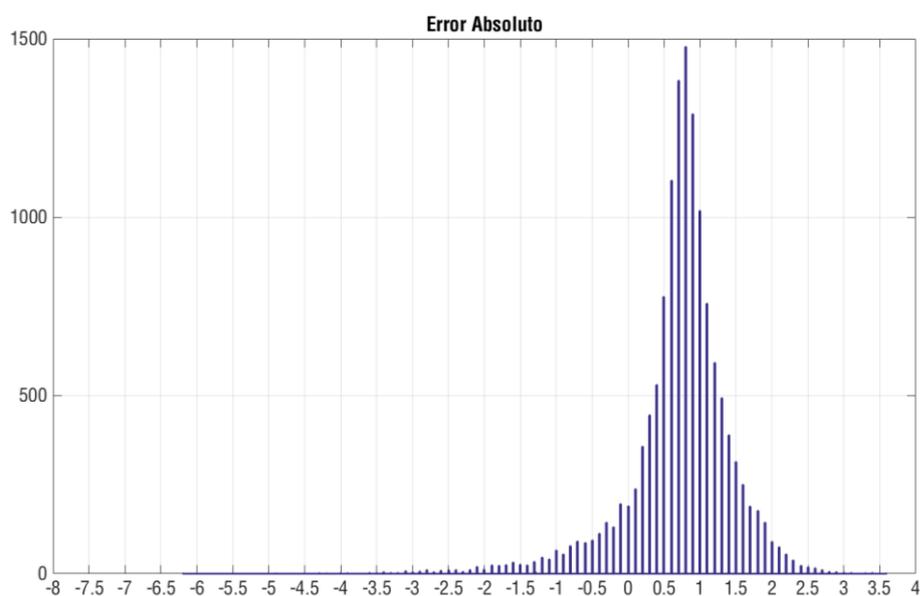


Figura 5.2. Diferencia de temperatura entre estaciones c659m y c659h.

5.1.1 Descripción del equipo y su validez como elemento de medida.

En los últimos años han aparecido nuevas formas de estimar indirectamente la temperatura ambiente, haciendo uso de métodos basados en sensores medidores de la temperatura de funcionamiento, instalados internamente. Esto se hace con el objeto de prevenir el calentamiento en exceso de la batería, algo que puede resultar peligroso. En el caso de la estimación de la temperatura ambiente a partir de las mediciones de la temperatura de las baterías de teléfonos móviles y sus termistores internos, la investigación al

respecto permitió determinar una fuerte correlación entre la temperatura ambiente y la temperatura de la batería del móvil [OVEREEM,2013].

El método que proponemos se enmarca dentro del grupo de “Medición indirecta”, y hace uso de las medidas de temperatura obtenidas en el ODU (Outdoor Device Unit) de una antena de comunicaciones. Un ODU, recordamos, es un dispositivo integrado en los equipos de radioenlaces de comunicaciones, concretamente la antena, Figura 5.3. Su sensor de temperatura interna, con precisión de 1°C, tiene la finalidad de proporcionar información relacionada con el estado de funcionamiento de dichos equipos y la compensación de temperatura de los circuitos amplificadores del ODU.

Destacamos aquí una diferencia entre los métodos expuestos en el Capítulo 4, para detección y estimación de lluvia. El método que aquí se presenta no tiene en cuenta las características de propagación entre los puntos de un radioenlace, sino las propiedades debidas a los materiales, electrónica, funcionamiento, dimensiones o localización, entre otras características para la estimación de la temperatura ambiente.

El método aprovecha los niveles de temperatura internos de la electrónica medidos por sensores instalados dentro del ODU, temperatura de ODU (ODU_{Temp}), sin la necesidad de instalar un dispositivo de medición directa en las proximidades. Al estar el sensor encapsulado en el interior del dispositivo la medición de temperatura del dispositivo se ve afectada por dos tipos de factores:

1. La electrónica interna que, a su vez, está condicionada por el funcionamiento del sistema (recepción y transmisión en el caso de ODU).
2. Por la temperatura del exterior.

El método que proponemos permite calcular la temperatura ambiente en el exterior del dispositivo a partir de estos datos de temperatura.

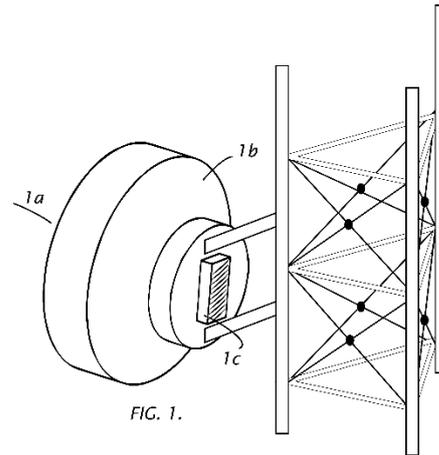


Figura 5.3. Conjunto ODU-Antena. 1a Radomo. 1b Antena. 1c ODU.

En la Figura 5.3 aparecen los elementos que nos interesan de un conjunto ODU-antena.

A grandes rasgos el método para la detección de la temperatura ambiente en una región geográfica, consta de tres etapas principalmente:

1. Suministro de parámetros de control de la temperatura de ODU.
2. Seguimiento de los parámetros de control para realizar el aprendizaje.
3. Procesado de los datos y de los parámetros geográficos de la región donde se encuentran los dispositivos con el fin de obtener una aproximación de la temperatura del aire.

Inicialmente se introducen las características de los dispositivos: dimensiones, materiales y demás particularidades de fabricación del mismo. Dado que los ODU están instalados en exterior se necesitarán los datos de geoposicionamiento así como de apuntamiento de la antena. Recordemos que los dispositivos ODU se encuentran en la red de comunicaciones que estamos tratando adheridos a la parte trasera de la antena de radiofrecuencia. Por lo tanto, la elevación y el acimut de esta nos ofrecen información del posicionamiento del ODU respecto de los rayos solares a lo largo de las horas de luz solar. En otro tipo de instalaciones el ODU puede estar conectado a la antena mediante un corto tramo de cable o mediante una guía de onda.

Para el seguimiento de los parámetros de control se extrae la información relativa a la temperatura de funcionamiento interna del dispositivo, por ejemplo, la temperatura que se produce en el interior de la electrónica.

Es posible descomponer dicha temperatura en sus componentes interna y externa. Para la descripción nos ayudaremos de la Figura 5.4 donde se aprecian los elementos intervinientes en el proceso. La temperatura interna (T_w) será función de la electrónica y por ende de los modos de trabajo del

dispositivo, principalmente en las etapas de recepción, transmisión o modificación de frecuencias. Esta temperatura se encontrará limitada por el armazón o continente del dispositivo anteriormente comentado.

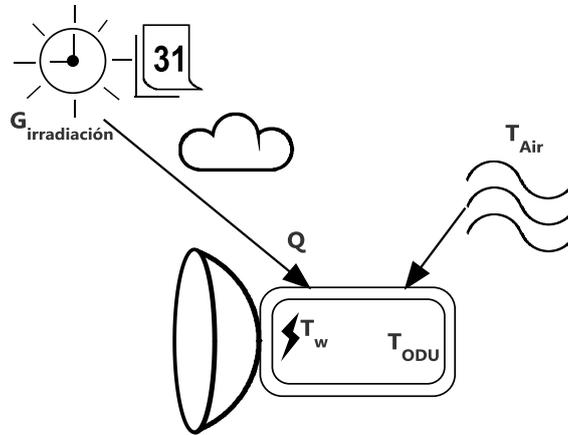


Figura 5.4. Elementos importantes en el proceso de medida.

La temperatura externa es la debida principalmente a dos factores, la temperatura del ambiente que rodea al dispositivo (T_{AIR} Temperatura de aire a la sombra) y la temperatura debida a los rayos del sol que inciden en dicho dispositivo (Temperatura del aire al sol = $T_Q = f(G_{\text{Irradiancia}})$) [VOGEL,1968].

$$T_w = T_Q(G_{\text{irradiación}}) + T_{\text{AIR}} \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Ec.5.1}$$

La relación entre las temperaturas y la Irradiancia solar es un hecho conocido y estudiado, se trata de un proceso convectivo cuyo modelo sigue la Ley de enfriamiento y calentamiento de Newton, Ec.5.2.

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot A \cdot (T_A - T) \quad (W) \quad \text{Ec.5.2}$$

donde dQ es la cantidad de calor ganado o perdido en el tiempo dt , h es el coeficiente de convección en $W/(m^2K)$ dependiente del gas o líquido en el que se esté inmerso, A es la superficie que entrega calor con una temperatura T_A al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T , en nuestro caso serían temperatura ambiente (T_A) y temperatura de ODU (T). Además, es interesante observar que dada una temperatura ambiente dada T_A , un cuerpo determinado alcanzaría una temperatura T por radiación solar al cabo de un tiempo t , Ec.5.3.

$$T = T_A + C \cdot e^{-k \cdot t} \quad (^\circ\text{C})$$

$$\text{con } k = \frac{h \cdot A}{\rho \cdot V \cdot c} \quad \text{Ec.5.3}$$

donde C es una constante que depende de las condiciones iniciales de temperatura ambiente y del cuerpo considerado, ρ la densidad del cuerpo considerado, V el volumen del mismo y c el denominado calor específico o capacidad térmica característico de ese cuerpo. Esta expresión nos induce a poner es escena varias cuestiones principales a la hora de observar los datos:

1. El tiempo de exposición a la radiación solar del ODU influirá en el grado de desviación de su temperatura interna con respecto a la temperatura ambiente.
2. El tiempo de exposición a la radiación solar no será igual durante todo el año, debido a los cambios de posición del Sol, por tanto, hemos de contar con la variable estacional.
3. Hemos de esperar intercambios de calor entre el ODU y el ambiente, que serán distintos durante la mañana y la tarde, principalmente, con la correspondiente inercia en esos cambios.
4. La irradiancia debido a presencia de nubes de distinto tipo, calimas de distinta naturaleza y espesor, eclipses, humedad, etc., aportará aleatoriedad a los procesos de enfriamiento y calentamiento del ODU.

Por ilustrar este proceso, vamos a comentar un par de hechos significativos donde se puede observar claramente alguna de estas cuestiones esta relación. El 26 de febrero de 1979 se produjo un eclipse solar total de larga duración y se realizaron estudios de las temperaturas y la cantidad de Irradiancia captada en el mismo punto. Como se puede comprobar en la gráfica (Figura 5.5) la medida de la temperatura resultante bajó significativamente, con una cierta inercia, varios grados al desaparecer la fuente de Irradiancia, volviendo paulatinamente a sus valores normales tras pasar el eclipse.

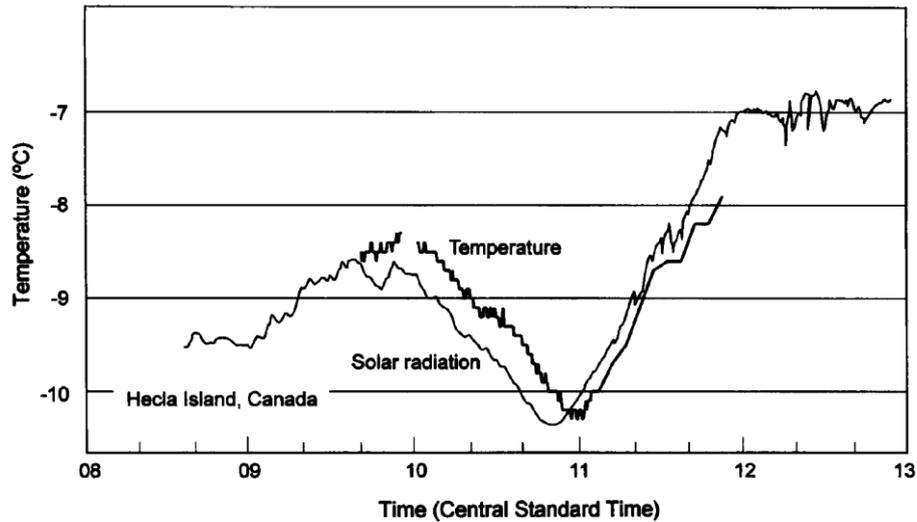


Figura 5.5. Perfiles de radiación solar y temperatura durante el eclipse de 1979 [ANDERSON,1999]

El estudio se volvió a repetir en el Reino Unido durante el eclipse solar de 1999. En la Figura 5.6 podemos observar (círculo) cómo las temperaturas medidas cayeron durante el eclipse, lo que además provocó cambios en la velocidad y dirección del viento. Es interesante destacar que la temperatura no descendió en la misma proporción que en una puesta de sol o durante la noche, otra característica es el carácter abrupto del proceso con respecto a la transición día-noche[APLIN,2003].

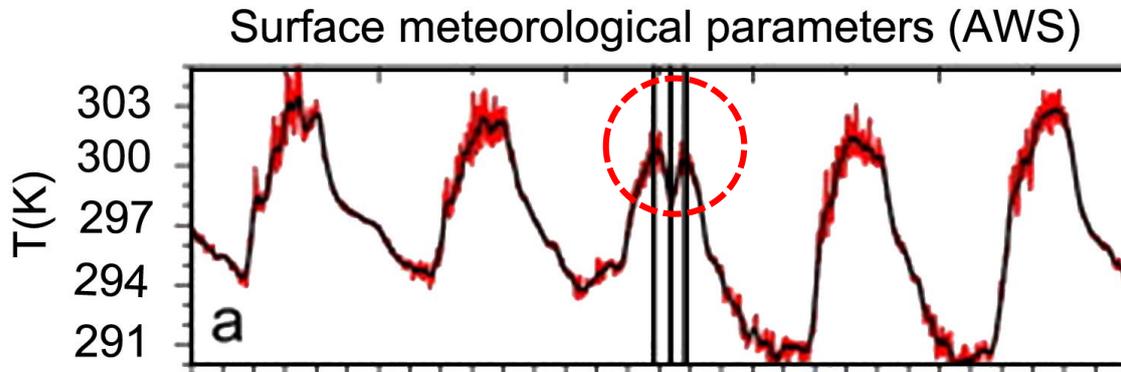


Figura 5.6. Perfiles de temperatura durante el eclipse de 1999 [VENKAT,2010]

La lectura más relevante que a nuestro juicio podemos hacer con respecto a lo reflejado en las Figuras 5.5 y 5.6, es que el modelo a investigar debe separar la componente de la temperatura del aire de la temperatura añadida por el calor irradiado por el sol.

Para afrontar el problema realizamos un estudio de los datos disponibles. Observamos que la Temperatura del ODU presenta correlación directa con la temperatura del aire medida por la estación meteorológica (Figura 5.7, gráfica superior), a un aumento de una le sigue el de la otra. A primera vista esta circunstancia nos puede inducir a afrontar el problema mediante un análisis

de regresión lineal, aunque a la vista de la gráfica no presenta una correlación fuerte, optamos aun así por realizar una regresión univariante lineal simple de mínimos cuadrados, en la que determinamos las constantes a y b del modelo dado en Ec.5.4. El resultado se representa con trazo rojo discontinuo en la Figura 5.7 gráfica superior. Un somero análisis de los residuos que representamos en la Figura 5.7 gráfica inferior, muestra claramente que el ajuste no es bueno, además los residuos no presentan la misma varianza, por lo que modelar directamente no es posible.

$$T_{ODU} = a \cdot T_A + b \quad (^\circ\text{C}) \quad \text{Ec.5.4}$$

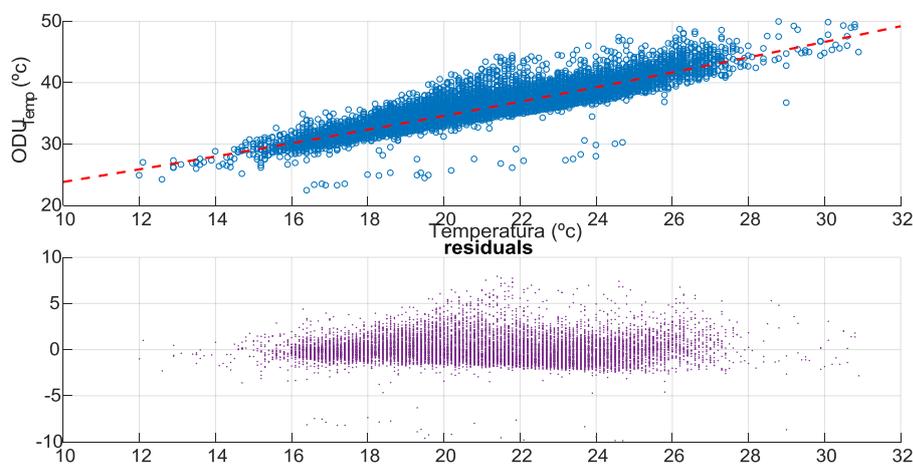


Figura 5.7. En la gráfica superior observamos la dispersión comparativa entre la temperatura del ODU (ordenadas) y la temperatura del aire (abscisas) en la estación meteorológica más cercana. La gráfica inferior nos muestra las diferencias residuales (ordenadas) en función de la temperatura ambiente (abscisas).

Hay casos donde es difícil contar con el valor verdadero de una variable, como es precisamente el caso que nos ocupa, el ODU se encuentra en una localización distinta de la EMA. Para dichos casos, una alternativa es normalizar el error, usando la mejor estimación posible al valor verdadero. En la Figura 5.8 presentamos un histograma de errores normalizados, esto es, alrededor de cero. Este error se aplica como método estadístico a casos donde evaluamos el desempeño de varios procedimientos de medida en un ensayo de aptitud, justo es el caso que nos ocupa. Al observar nuevamente la Figura 5.7 gráfica superior se constatan varias cuestiones. La mayoría de los datos de temperatura AEMET se encuentran entre 15 °C y 27°C, el rango comprendido entre los 16°C y los 18°C es donde menor dispersión encontramos entre temperatura ambiente y temperatura de ODU. Entendemos que esto se debe a que en esas condiciones el proceso convectivo influye menos, p.ej. horas nocturnas, periodos de alta nubosidad o posición del Sol. En contraste la zona,

principalmente, entre los 20°C y los 22°C es donde mayor es la dispersión, es decir con estas temperaturas es más que probable que estemos antes días despejados, sin embargo, puede ocurrir que la misma temperatura aparezca para dos periodos horarios distintos, p.ej. a media mañana y a media tarde. Al tratarse de momentos horarios distintos el Sol adopta posiciones distintas respecto al ODU, por tanto, comportamientos convectivos también distintos, y en los que el tiempo de exposición junto con las condiciones iniciales juegan su papel, Ec.5.3. El resultado será que para una misma temperatura ambiente pueden aparecer temperaturas de ODU bien distintas. La Figura 5.8 refuerza esta hipótesis, donde observamos una clara asimetría. La diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de ODU normalizada, nos pone de manifiesto una asimetría negativa, al alargarse la cola de la distribución hacia valores inferiores a la media. La respuesta que podemos dar a estos resultados es un aplicar un cambio de enfoque, que permita comparar lo comparable, es decir debemos buscar un nexo común distinto a los valores de temperatura, según lo interpretamos en esta tesis hemos de agrupar los datos por periodos horarios e incluso muy probablemente por meses en un segundo estadio, así como por valores de temperatura ambiente que nos permitan absorber e integrar en el modelo las varianzas observadas, cada una en su contexto.

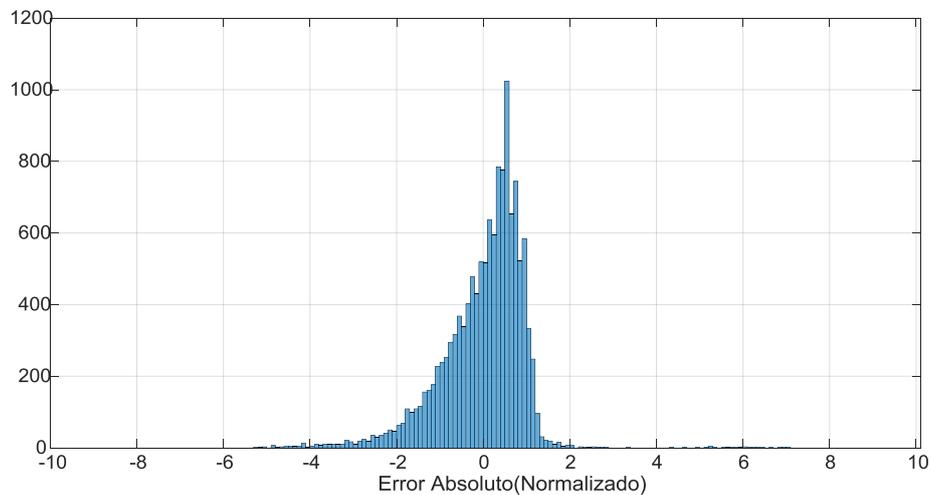


Figura 5.8. Error calculado entre la temperatura de ODU y la temperatura de la estación meteorológica más cercana.

La Figura 5.9 nos puede ayudar a reforzar este supuesto. Se realiza una comparativa entre la temperatura de ODU y la temperatura de una EMA,

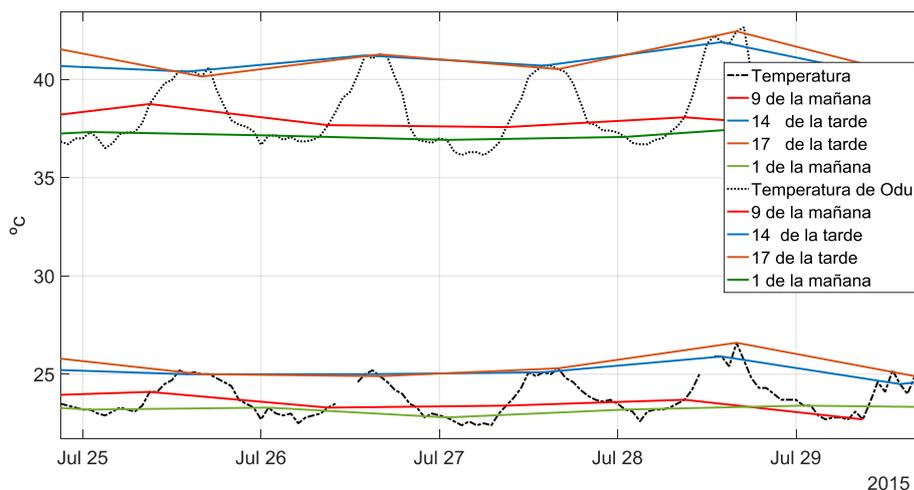


Figura 5.9. Valores de temperatura de ODU y real en varios días de julio de 2015.

para varios días de julio de 2015. Además, se ha representado la temperatura de ODU y de EMA para determinadas horas diarias, 01 horas, 9 horas, 14 horas y 17 horas. Una de las características que podemos comprobar de la temperatura de ODU es su correlación con respecto a la temperatura del aire en función de la hora del día. La existencia de cierta correlación entre todos los trazos, es palpable, contemplados de manera agrupada y contextual, lo que a nuestro punto de vista refuerza el supuesto. Para cada hora la diferencia entre ambas temperaturas es cuasi constante, algo mayor en las horas principales del día, horas de mayor incidencia solar, y algo menor para la madrugada y primeras horas de la mañana.

En la Figura 5.10. aportamos dos gráficos, a la derecha temperatura de EMA por horas para las 24 horas-día, a la izquierda una gráfica similar, pero representando la temperatura de ODU también por horas para las 24 horas día. En la Figura 5.11 hacemos algo similar, pero por meses. En ambos casos la tendencia es claramente la misma, algo más acusada para ODU, pero en ambos casos hay más dispersión en las temperaturas de ODU. Esto dificulta su uso de una manera cuasi-directa y pone en evidencia la necesidad de un tratamiento de los datos que permita “absorber” esa mayor dispersión.

5.2 Algoritmo de estimación de temperatura ambiente.

El enfoque que hemos aplicado, a la vista de la tipología de los datos disponibles, es compartimentar los datos por horas y meses a fin de reducir la presencia de múltiples regresiones a regresiones, digamos, horarias. También hemos visto la necesidad de aplicar alguna transformación de los datos disponibles para transformar su incidencia sobre la estadística a utilizar en el diseño de cada modelo horario.

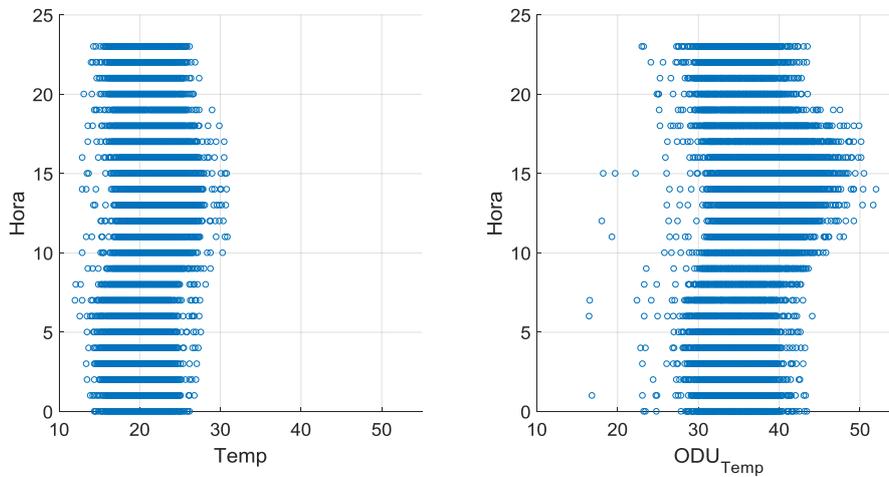


Figura 5.10. Diferencias de medidas por horas de un día.

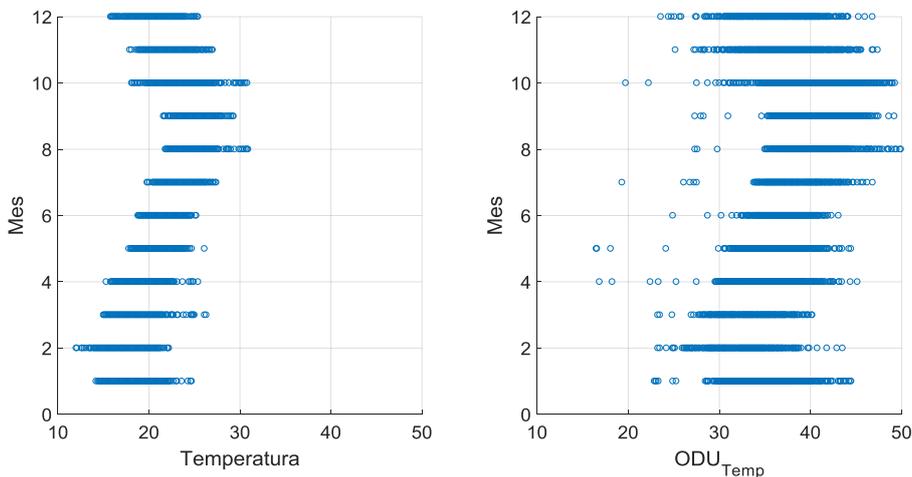


Figura 5.11. Diferencias de medidas por meses de un año.

Como avanzamos en el párrafo anterior, la metodología que presentamos se basa en el cálculo de modelos de regresión caracterizados para periodos horarios diarios, por días, y por meses. Transformación de datos agrupándolos por valores de temperatura: con los datos de temperatura de las EMA realizamos un ordenamiento por valores de temperatura, las temperaturas de

ODU las tomamos correspondientes a esos índices, al realizar este ordenamiento incorporamos al modelo la varianza de las temperaturas de ODU, justo con los valores de temperatura ambiente a los que corresponde.

5.2.1 Algoritmo basado en la estimación por días.

El diagrama de flujo de este método se presenta en la Figura 5.12. Partimos de datos proporcionados por las EMA, datos de temperatura ambiente (T_0 en el diagrama de la Figura 5.12) que provienen de instrumentos trabajando en su zona lineal más una componente aleatoria de distribución normal. Con respecto a las Temperaturas de ODU ($TODU$ en el diagrama de la Figura 5.12) realizamos el mismo supuesto, son datos proporcionados por sensores trabajando en su zona lineal y con una componente aleatoria de distribución normal.

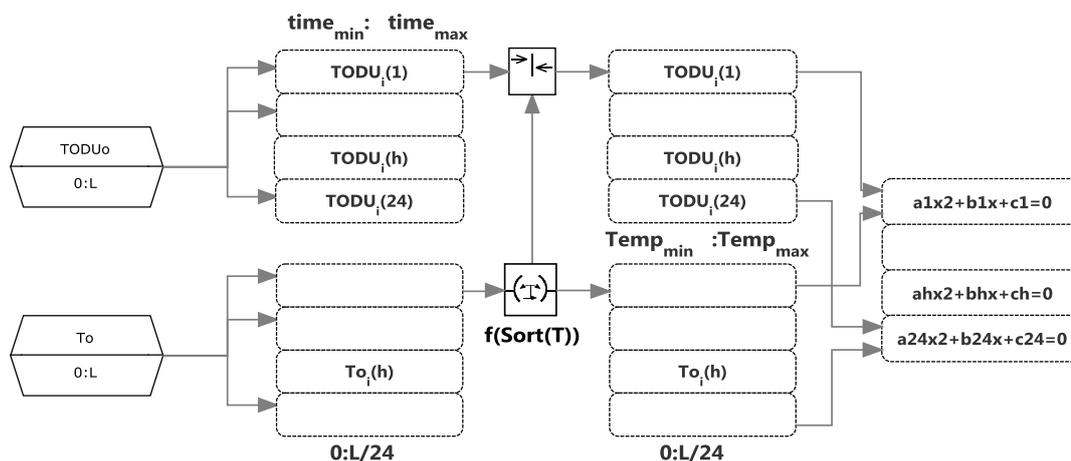


Figura 5.12. Diagrama de flujo del método de medida de temperatura considerando los días.

Como entrada el algoritmo dispone de dos vectores con datos de cada temperatura de dimensión $L \times 1$ (año completo), ordenados inicialmente por fechas. El primer proceso es ordenarlos por horas del día, obtenemos así 24 vectores de dimensión $(L/24) \times 1$. Cada vector corresponde a los valores de temperatura a un periodo horario determinado, así por ejemplo $TODU_i(1)$ corresponde a las temperaturas de ODU entre las 00:00 horas y las 01:00 horas, igualmente para la T_0 .

A continuación, cada vector $T_{0_i}(h)$ se reordena por nivel de temperatura, se aplica el mismo movimiento de posición al vector $TODU_i(h)$. Transformamos de esta manera los datos "eliminando" su perspectiva temporal, pero conservamos el nexo en datos de uno y otro vector, ya que reordenamos uno en función de la magnitud de la temperatura, mientras el otro lo ordenamos en función de las traslaciones realizadas en el primero.

Al reordenar de esta forma todos los valores de temperatura del aire, sucede p.ej. que para una temperatura de 23° estarán todos juntos y tendrán una temperatura equivalente de **TODU**. Como ya habíamos avanzado agrupamos de esta manera la varianza que para ese valor de temperatura se produce en los valores de la temperatura de ODU para ese periodo horario.

El siguiente paso es usar ese conjunto de vectores para realizar el análisis de regresión por periodos horarios, en este caso el modelo que en todos los casos mejor se ajusta es no lineal de segundo grado.

$$T_{Ai} = a_i \cdot T_{ODU}^2 + b_i \cdot T_{ODU} + c_i \quad (^\circ\text{C})$$

En la Figura 5.13 mostramos los resultados obtenidos para cada hora, curva de regresión particular en cada caso y las nubes de dispersión, en abscisas tenemos la temperatura de ODU y en ordenadas la temperatura ambiente.

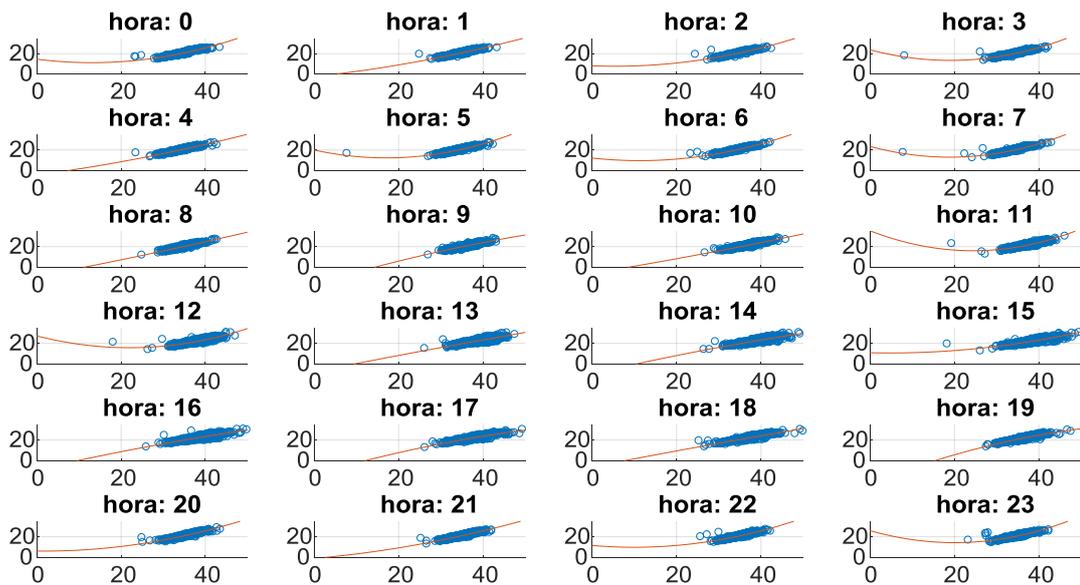


Figura 5.13. Nubes de dispersión de temperaturas para cada hora.

Dispondremos por tanto de un conjunto de regresiones aplicadas a cada hora del día, tal y como se refleja en Ec.5.5, independientes del día del año.

$$a_h(T_{ODU}(h))^2 + b_h(T_{ODU}(h)) + c_h = T_{air}(h) \quad \text{Ec.5.5}$$

donde $h \in [1:24]$, conjunto de horas del día.

La aplicación de este procedimiento sobre los datos del año siguiente, tomados estos como datos de prueba del algoritmo, nos arroja los resultados que representamos en forma de histograma en la Figura 5.14, por lo que salvando errores aberrantes este algoritmo es capaz de estimar la temperatura

ambiente con, a groso modo, -1°C a $+1.5^{\circ}\text{C}$ de diferencia, con un sesgo de $-0,25^{\circ}\text{C}$ sobre la estimada por las EMA de AEMET.

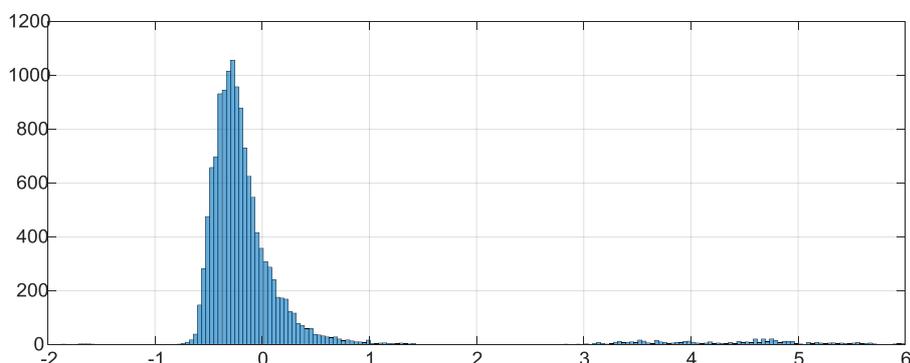


Figura 5.14. Histograma de errores para estimación de temperatura ambiente con algoritmo basado en días.

5.2.2 Algoritmo basado en la estimación estacional

En el algoritmo anterior no hemos tenido en cuenta la variación estacional a lo largo del año. La concepción de este segundo algoritmo parte de los mismos fundamentos y la misma propuesta anterior, excepto que el agrupamiento inicial se realiza por meses. De modo que si el conjunto de los datos disponibles de un año completo es un vector de dimensión $L \times 1$, se agrupan en 12 vectores de dimensión $(L/12) \times 1$.

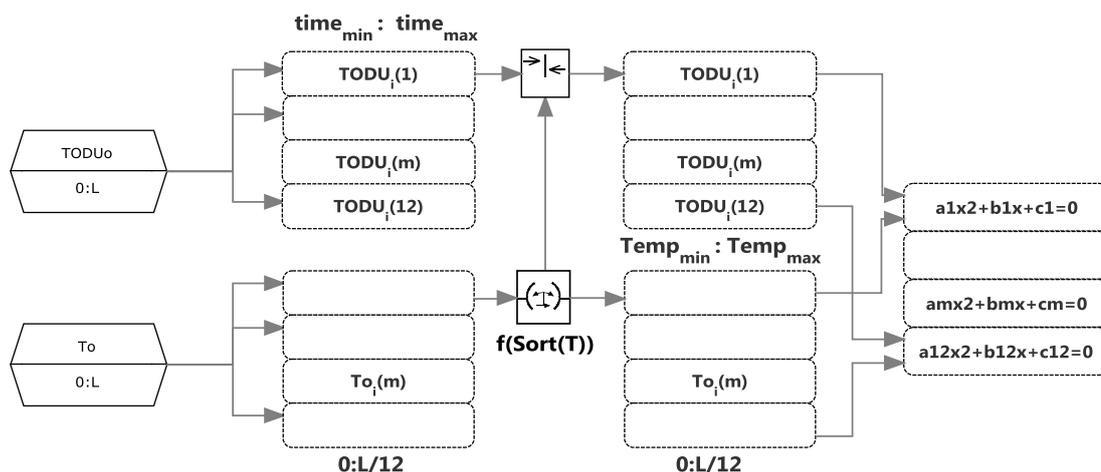


Figura 5.15. Diagrama de flujo del método de medida de temperatura considerando los meses.

En la Figura 5.15 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo. Este algoritmo salvo en lo referente al agrupamiento de los datos disponibles realiza el mismo proceso, únicamente se diferencia del basado en días en el espacio temporal que usamos. Ahora como resultado de este procedimiento

obtenemos un conjunto de curvas de regresión cuadráticas de carácter mensual, para cada mes del año independiente de la hora del día.

$$a_m(T_{ODU}(m))^2 + b_m(T_{ODU}(m)) + c_m = T_{air}(m) \quad \text{Ec.5.6}$$

para $m \in [1:12]$, conjunto de meses del año.

En la Figura 5.16 podemos observar la representación de las curvas de regresión por mes y la nube de punto a los que representa, tal y como sucedió con el algoritmo basado en días el error cometido seguía siendo del mismo orden.

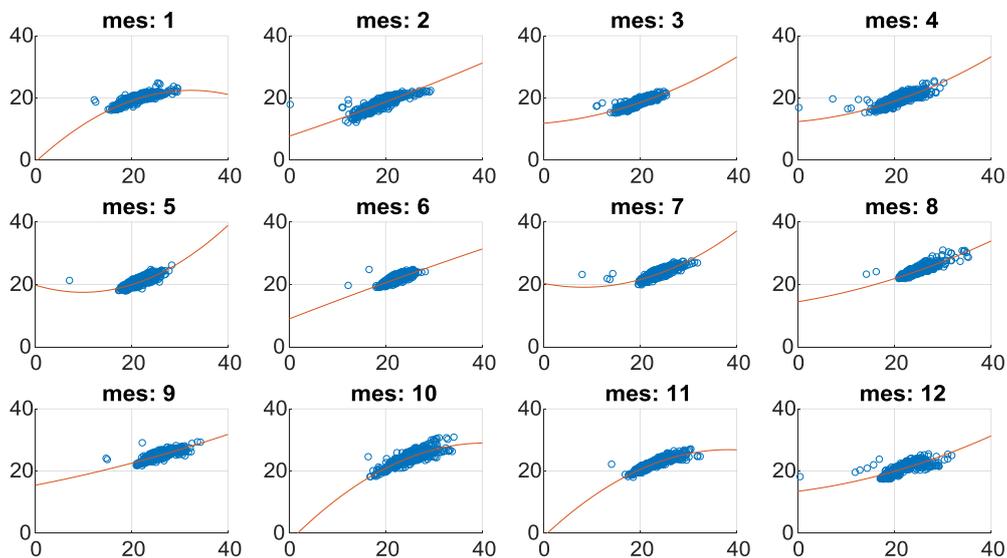


Figura 5.16. Nubes de dispersión de temperaturas para cada mes.

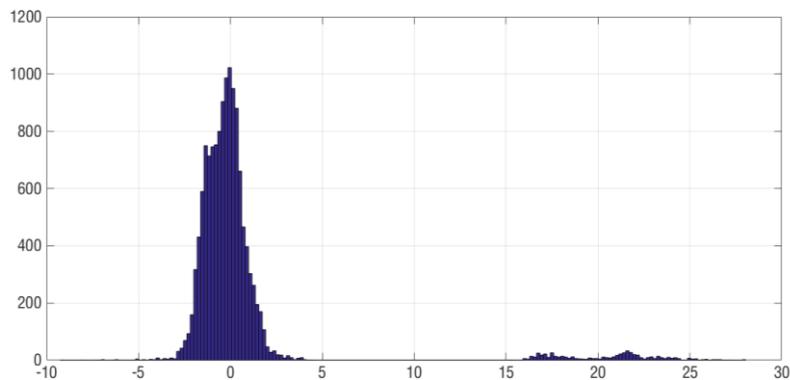


Figura 5.xx. Histograma de errores para estimación de temperatura ambiente con algoritmo basado en meses.

5.2.3 Algoritmo combinado diario y estacional

Dado el buen comportamiento de los algoritmos por día y por mes, el siguiente paso es proceder a una combinación de ambos, tal y como podemos ver en el diagrama de flujo de la Figura 5.17. Ahora al llegar una nueva temperatura de ODU con su fecha y hora correspondientes se le asignan las curvas que la van a transformar en temperatura ambiente.

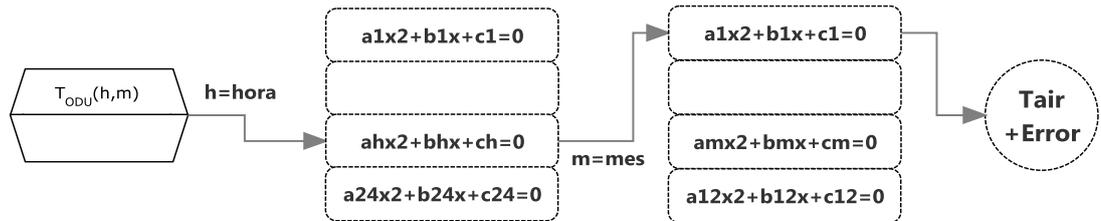


Figura 5.17. Diagrama de flujo general del método de medida de temperatura.

Como una primera aproximación a la bondad del resultado obtenido, en la Figura 5.18 se representan, para varios días comprendidos entre el 28 de junio y el 04 de Julio del 2015, la temperatura de ODU, la temperatura medida en la estación AEMET más próxima y la estimada mediante el algoritmo de la Figura 5.17. El ajuste entre el estimado y el medido es bastante bueno, en general las diferencias están por debajo de 1°C. Conviene en este punto reseñar que los datos disponibles corresponden a estaciones meteorológicas, que no están ubicadas en el mismo lugar que el ODU, ni tan siquiera están separados unos metros, generalmente hay separaciones de más de 1 km, por lo que puede suceder que las condiciones de insolación por presencia de nubes o incluso viento, no se repartan uniformemente, influyendo en esas diferencias.

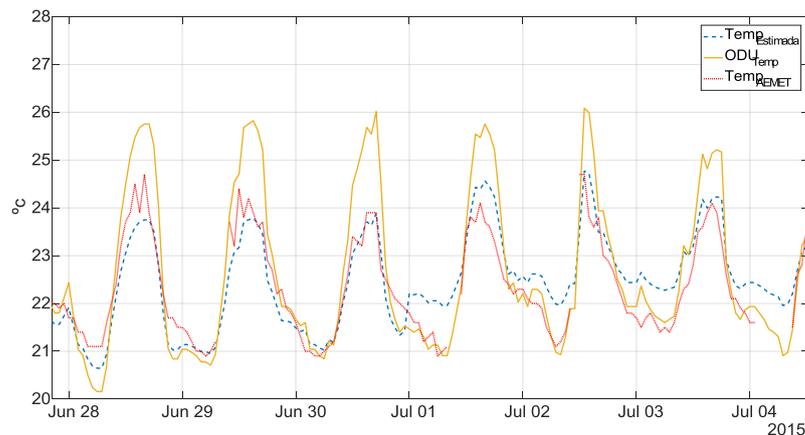


Figura 5.18. Representación de temperaturas de ODU, aire y calculada.

En la Figura 5.19 se presenta un histograma obtenido como resultado de las estimaciones del algoritmo. Figura 5.17, alimentado con los datos del año reservado para prueba. Se puede ver que en una gran mayoría los errores han

quedado reducidos a un margen entre -1°C a $0,5^{\circ}\text{C}$, centrados en $-0,25^{\circ}\text{C}$. Con esta mejora el algoritmo de estimación se encuentra dentro de los límites de especificación de los instrumentos de las estaciones EMA de AEMET.

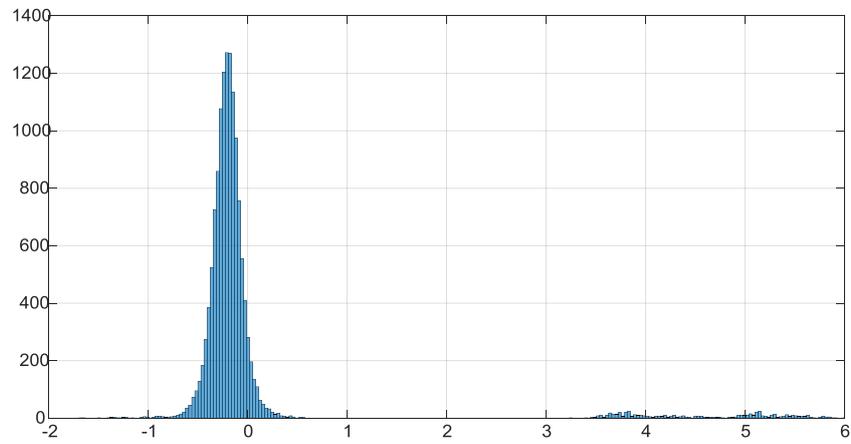


Figura 5.19. Histograma de errores para estimación de temperatura ambiente con algoritmo basado en días y variación estacional.

Capítulo 6

Algoritmos para la medición de radiación solar a partir de agrupaciones de equipos exteriores

La radiación solar es una forma de propagación del calor que entrega o irradia el calor del sol a los cuerpos más fríos, mientras que la temperatura es la magnitud que utilizamos para medir la cantidad de calor. Tomando como base ambas definiciones, este capítulo tratará de dar respuesta a la hipótesis 3 formulada en esta tesis, es decir vamos a utilizar información adicional a la extracción de la temperatura, propuesta en el capítulo cinco, para el cálculo de la cantidad de radiación incidente en la zona geográfica. Establecer que es posible hacerlo con una precisión aceptable permitirá un mejor conocimiento sobre el terreno de la incidencia de la radiación solar en multitud de espacios de diversa índole, bosques, zonas aridas, espacios urbanos, etc.

Como un resultado, entendemos que relevante, la investigación y el desarrollo del método aquí propuesto ha dado lugar a la solicitud de una patente bajo el título “Método de estimación de radiación solar mediante agrupaciones de equipos en exteriores”, registrada con Número de Solicitud P201700135, que en la actualidad se encuentra en trámite[GUERRA,2017Pb].

6.1 Relación radiación y temperatura.

La relación entre la radiación solar y la temperatura es un hecho conocido desde la antigüedad, lo que ha permitido la formulación científica de varias leyes que relacionan ambas magnitudes en función del ámbito del conocimiento de la que estemos tratando.

Si iniciamos nuestro razonamiento tomando el estudio de una superficie ideal que se comporte como un absorbente perfecto, concepto conocido como cuerpo negro podemos aplicar las leyes de radiación expuestas por Plank [BARRETO,2008], Ec.6.1, que relaciona la intensidad de radiación emitida por el

cuerpo negro en equilibrio termodinámico con la temperatura y la longitud de onda que recibe.

$$I(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \quad \text{Ec.6.1.}$$

Donde:

$I(f, T)$ es la potencia por unidad de área de la superficie que emite en la dirección normal, por unidad de ángulo sólido, y por unidad de frecuencia, radiada por un cuerpo negro a la temperatura T;

h es la constante de Planck.

c es la velocidad de la luz en el vacío.

k es la constante de Boltzmann.

f es la frecuencia de la radiación electromagnética.

T es la temperatura del cuerpo en grados Kelvin.

Es importante destacar que para cuantificar la radiación solar se utilizan dos magnitudes. Una de ellas corresponde a la potencia que incide por unidad de superficie y la otra corresponde a la energía de la radiación que alcanza a esa misma unidad de superficie, se denominan irradiancia e Irradiación, que se definen y cuantifican del modo siguiente [DUFFIE,2013]:

- *Irradiancia*: potencia o radiación incidente por unidad de superficie. Indica la intensidad de la radiación solar. Se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2).
- *Irradiación*: integración o suma de las irradiancias en un periodo de tiempo determinado ($\text{Julio}/\text{m}^2/\text{hora}$).

La Irradiancia y la temperatura ambiental están íntimamente relacionadas con la temperatura de funcionamiento de algunos dispositivos como son las placas solares, también células solares. La temperatura de funcionamiento de un módulo fotovoltaico se determina a partir de un balance energético, haciendo que parte de la energía solar absorbida sea convertida en energía térmica y el resto en energía eléctrica, la energía térmica es disipada por una combinación de mecanismos de transferencia de calor. Esta relación se obtiene de la ecuación Ec.6.2[KLAUS,2014].

$$(\tau\alpha)G = \eta cG + h(Tc - Ta) \quad \text{Ec.6.2.}$$

Donde:

- $\tau\alpha$ es la transmitancia efectiva
- η_c es la eficiencia del módulo
- h Es el coeficiente de pérdidas que incluyen pérdidas por convección y radiación.
- T_c es la temperatura de trabajo de la célula o módulo (°C)
- T_a es la temperatura ambiente (°C)
- G es la irradiancia (W/m^2)

En condiciones tales que el nivel de radiación solar sea de $800 W/m^2$, la velocidad del viento de $1m/s$, la temperatura ambiente de $20\text{ }^\circ C$ y la operación sea sin carga (es decir, con $\eta_c = 0$), la temperatura que se alcanza en el módulo, cuando se monta en su forma normal, se denomina temperatura nominal de la célula operativa (TNOCT) [FESHARAKI,2011]

Sustituyendo estos valores nominales en Ec.6.2 podemos despejar la transmitancia efectiva ($\tau\alpha$) y sustituirla en la ecuación inicial de forma que tengamos las temperaturas en función de la irradiancia respecto a una célula normalizada [MIGAN,2013].

$$(\tau\alpha)G_{NOCT} = h_{NOCT} (T_{NOCT} - T_{a,NOCT})$$

$$(\tau\alpha) 800 = h_{NOCT} (T_{NOCT} - 20)$$

$$(\tau\alpha) = h_{NOCT} \frac{(T_{NOCT} - 20)}{800}$$

$$\eta_c G + h(T_c - T_a) = G h_{NOCT} \frac{(T_{NOCT} - 20)}{800}$$

$$(T_c - T_a) = G \frac{h_{NOCT} (T_{NOCT} - 20)}{h} - \frac{\eta_c}{h} G$$

$$(T_c - T_a) = G \left(\frac{h_{NOCT} (T_{NOCT} - 20)}{h} - \frac{\eta_c}{h} \right)$$

Además, teniendo en cuenta que las pérdidas por convección (h) fueron establecidas por McAdams [MCADAMS W,1954] del modo siguiente, con respecto a una superficie de $0.5m^2$:

$$h = 5.7 + 3.8v$$

siendo v la velocidad del viento en m/s

$$(T_c - T_a) = G \left(\frac{h_{NOCT} (T_{NOCT} - 20)}{5.7 + 3.8v} - \frac{\eta_c}{5.7 + 3.8v} \right)$$

Si calculamos para una velocidad de viento de 1m/s:

$$(T_c - T_a) = G \left(\frac{h, NOCT}{0.95} \frac{(T_{NOCT} - 20)}{800} - \frac{\eta_c}{0.95} \right)$$

$$(T_c - T_a) = G \left(h, NOCT \frac{(T_{NOCT} - 20)}{800} - \eta_c \right)$$

Ahora traslademos este resultado a un dispositivo conocido, como es el módulo ODU de una antena de comunicaciones. Si aplicamos los mismos términos, tenemos que el rendimiento en electricidad de la captación de energía solar por parte del ODU es cero. Las Pérdidas hNOCT tenderán al 100% y la Temperatura media normalizada de la zona donde se encuentran los ODU es de 22°C en caso de la capital de la isla de Gran Canaria

$$(T_c - T_a) = G \left(1 \frac{(22^\circ - 20^\circ)}{800} - 0 \right)$$

De forma simplificada la potencia de radiación recibida en el ODU en función de las temperaturas quedaría de la forma:

$$G = 400 (T_c - T_a) \tag{Ec.6.3.}$$

Siendo T_c la Temperatura debida a la Irradiancia solar y al funcionamiento del equipo, T_a la temperatura ambiente y G la Irradiancia para 0.5m². En el capítulo 5 ya se comentó como Overeem[OVEREEM,2013] estudiaba la posibilidad de calcular la temperatura del aire a partir del sensor de temperatura de la batería de un smartphones. Para ello utiliza un modelo de transferencia de calor como el de la Figura 6.1.

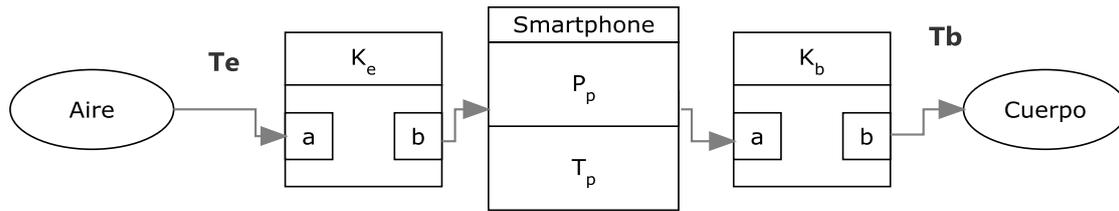


Figura 6.1. Modelo de transferencia de calor usado por Overeem.

En este modelo T_p es la Temperatura de la batería del Smartphone, que está influenciada por la temperatura del medioambiente T_e , por la temperatura del cuerpo T_b , también por el aislamiento de separación entre los distintos medios k_e y k_b . Siendo P_p La energía generada por el Smartphone por unidad de tiempo.

$$T_e = m_j(\overline{T_p} - T_0) + T_0 + \varepsilon_j \quad \text{Ec.6.4.}$$

Siendo

T_e : temperatura promedio de la capa de aire

$\overline{T_p}$: temperatura promedio de la temperatura de la batería

T_0 : temperatura constante de equilibrio

m_j : serie de coeficientes de ponderación

ε_j : ruido aleatorio.

Usando los promedios de temperatura observados, valores óptimos de m dependientes del lugar y del periodo de tiempo, y T_0 constante independiente de la zona geográfica y del tiempo, calculamos curvas de regresión cuadráticas que promediamos. Para cada periodo establecemos un modelo que utiliza un día de calibración y el siguiente de validación, y sucesivamente con el fin de reducir potenciales sesgos debidos a cambios drásticos o aberrantes.

Los datos de calibración se utilizan para el cálculo de los parámetros del modelo de transferencia de calor mientras que los datos de validación los utiliza para la verificación en días distintos.

6.2 Temperatura y capa de nubes

A la hora de realizar un cálculo de la irradianza, la relación entre la temperatura y la capa de nubes es otra de las interacciones a tener en cuenta. Como es de suponer una capa de nubes, que se interponga entre el sol y el instrumento de medida en cuestión, provoca que la cantidad de radiación incidente y por tanto el calor generado se vea reducido en una cantidad proporcional a la densidad de nubosidad. Es por ello que la nubosidad es uno de los parámetros que afectan a la cantidad de radiación, al igual que la calima, vapor de agua, salitre, polvo en suspensión, humo y otros aerosoles que puedan enturbiar la atmósfera, factores que pueden ser estimados a partir de las redes de radioenlace de microondas como se puede ver en [DAVID,2016] donde se centra en la detección de polución del aire. En la Figura 6.2 se puede ver la correlación entre los tres valores de nubosidad, temperatura e Irradiancia solar. Esta figura está basada en los datos de las estaciones meteorológicas de la universidad de Reading (UK), podemos observar cómo, en verde, la altura de la base de las nubes, la temperatura del aire, en rojo, y la Irradiancia Global solar en la superficie, color azul punteado[READING,2017], presentan una correlación casi perfecta entre ellas.

En la Figura 6.3 siguiente se puede comprobar con más detalle los ciclos y las relaciones, pero teniendo en cuenta la temperatura a nivel del suelo con hierba, al nivel de altura de la hierba y al nivel del suelo despejado. Se puede ver como a pequeñas diferencias de altura a la hora de medir la temperatura se pueden producir diferenciales de temperatura de varios grados. Este hecho es importante cuando comparemos las temperaturas entre distintos ODU instalados en la misma torre o mástil. Al igual que las diferencias entre temperaturas respecto a un suelo árido o a un suelo con hierba, que varían según la hora del día o ángulo de incidencia del sol.

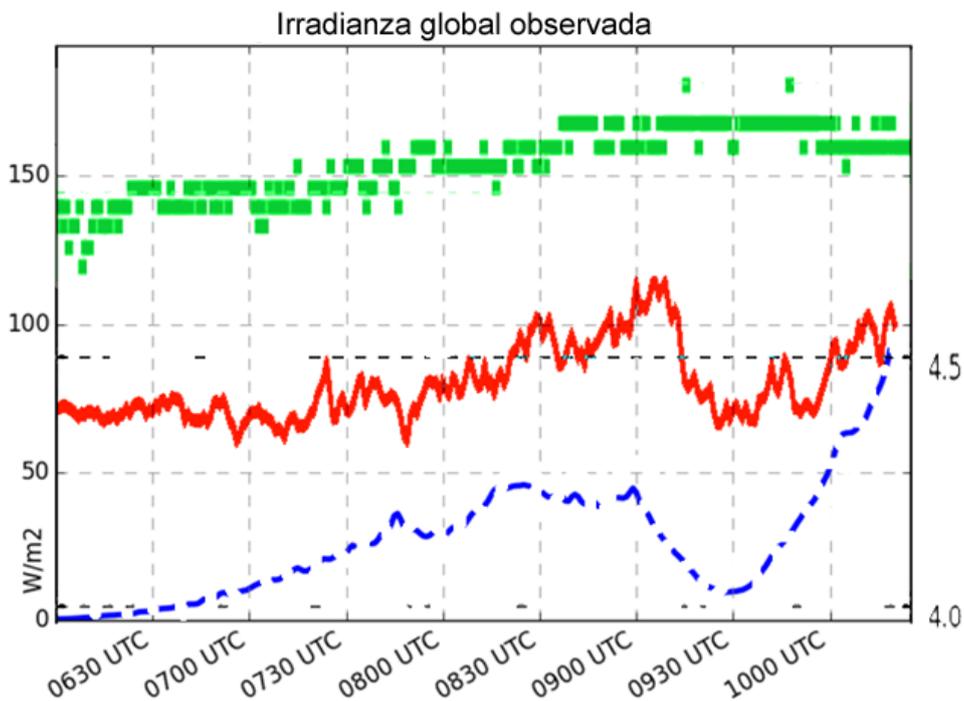


Figura 6.2. Relación entre capas de nubes (invertida), temperatura y radiación solar.

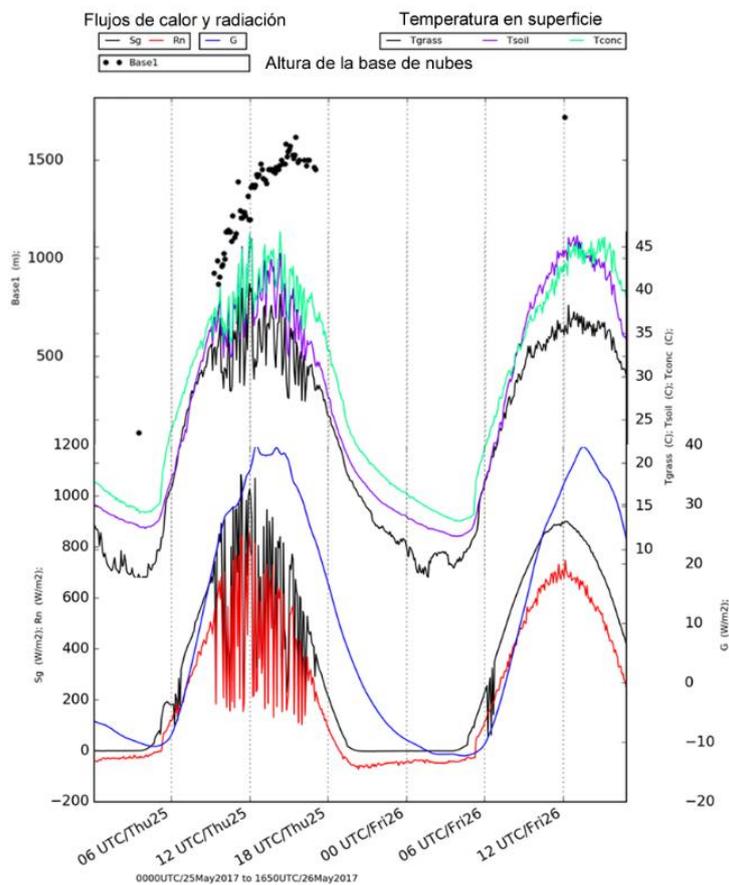


Figura 6.3 Relación entre temperaturas a distintos niveles del suelo y tipos de suelo respecto a la radiación y nubosidad. Siendo: Tgrass - Temperatura al nivel de hierba (°C); Tconc - Temperatura al nivel del suelo (°C); Tsoil - Temperatura al nivel del suelo desierto (°C); Base1 - Ceilometría medida de la capa de nubes más baja (m) Sg - irradiancia solar global (ondas cortas) (W/m²); Rn - irradiancia neta (W/m²); G - Densidad de flujo de calor de tierra (W/m²) [READING,2017]

Esas pequeñas diferencias en cuanto al ángulo de incidencia del sol y su altura respecto a cada ODU permiten, junto a la propia elevación y acimut de cada antena más ODU, cubrir gran parte del trayecto de los rayos solares sobre la ubicación del sistema de radiocomunicación. En la Figura 6.4 podemos ver un ejemplo de dos sistemas antena-ODU con distintos ángulos de elevación y acimut, así el sol incide directamente en la antena, dejando al ODU 2a en sombra y por lo tanto no recibiendo aporte de calor salvo el debido a la temperatura del aire y al funcionamiento del sistema, mientras que el sistema 2b recibe en el ODU gran cantidad e irradiancia. Debido a los movimientos del planeta, mientras va transcurriendo el día irán modificándose los ángulos de incidencia de los rayos solares, pudiendo incidir dicha radiación en el ODU 2b más que en el ODU 2a. En la figura 6.4b. mostramos las diferentes posiciones del amanecer respecto a una de las torres de comunicaciones con varios ODU, observando como en diferentes meses el sol incidirá de distinta manera en cada sistema. Este efecto ya ha sido estudiado en un campo muy diferente al nuestro, es el caso por ejemplo de del artículo de Sara Spayd [SPAYD2002] donde se investiga la relación entre la calidad del vino producido por viñedos según su orientación respecto al sol, creando y analizando dos caldos cada uno de ellos en función de la orientación de los frutos, como se puede observar en la figura 6.5 existen diferencias entre la temperatura medida en los frutos orientados al oeste frente a los frutos orientados al este dentro de la misma viña respecto de la cantidad de radiación solar incidente, concluyendo en que existe una relación directa entre la calidad de la uva, la temperatura de esta y la radiación solar incidente en los frutos.

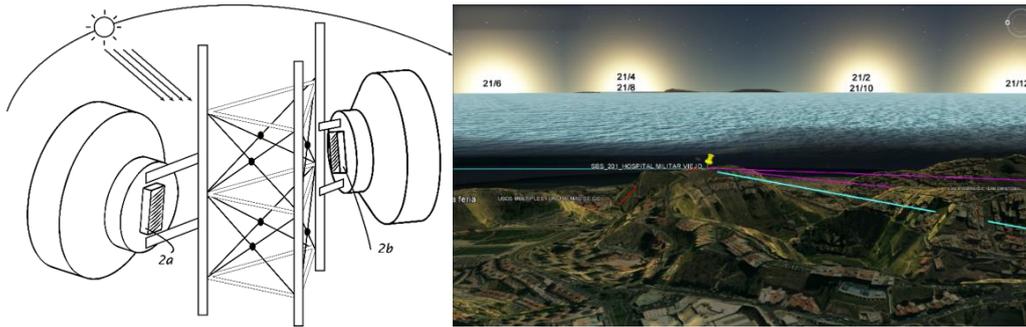


Figura 6.4. a) Ejemplo de torre de comunicaciones con dos antenas y ODU. 2a ODU en sombra. 2b ODU al sol y b) Amanecer en función del día y mes del año respecto a torre de comunicaciones

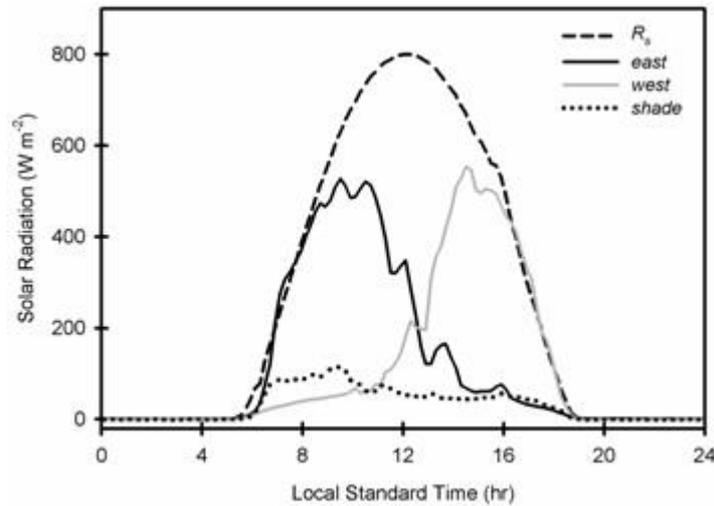


Figura 6.5. Radiación solar total (R_s ; en vatios por m^2 de superficie plana) y radiación recibida por racimos de uvas en los lados este y oeste de la vid. Con cielo despejado [TARARA,2011].

6.3 Calculo de clear sky

Para comenzar a identificar o estimar la cantidad de radiación solar incidente en un punto determinado a una fecha y hora determinada hay que definir el concepto de cielo claro (clear sky). Los modelos de cielo claro o clear sky estiman la radiación solar terrestre bajo un cielo sin nubes en función del ángulo de elevación solar, la altitud del sitio, la concentración de aerosol, el vapor de agua y diversas condiciones atmosféricas.

La validación de los modelos de cielo claro requiere la comparación de los resultados del modelo con la irradiancia medida durante los períodos de cielo

claro. Estos modelos de validación serán utilizados más adelante como sistemas de validación de la estimación que realicemos.

En términos de error promedio en todas las ubicaciones y tiempos, encontramos que los modelos complejos que representan correctamente todos los parámetros atmosféricos son ligeramente más precisos que otros modelos más simples. Esta diferencia entre modelos de clear sky se produce sobre todo a altas elevaciones mientras que para elevaciones medias y bajas se puede obtener una exactitud comparable de algunos modelos más simples con los más complejos [RENO,2012]. Sin embargo, los modelos más simples suelen presentar errores que varían con la hora del día y la estación, mientras que los errores de los modelos complejos varían con el tiempo.

Sin entrar en los propios modelos dado que es un tema estudiado muy en profundidad por otros autores[ACKERMAN,1998] [BIRD,1981] [RIGOLLIER,2000] [PRATA,1996].

Existen cinco criterios a tener en cuenta para determinar un periodo de Clear Sky.

El **primer criterio** se basa en medir el valor medio de la irradianza en un periodo de tiempo.

La irradianza media será significativamente menor si el cielo esta nuboso frente a un cielo claro.

$$\bar{G} = 1/n \sum_{i=1}^n G_i \quad \text{Ec.6.5.}$$

Un cielo parcialmente nublado puede presentar una irradianza media muy cercana a la irradianza promedio del cielo claro debido a las oscilaciones por encima y por debajo del valor del modelo. Esto es debido principalmente a que la aparición de una nube en ocasiones produce un incremento de radiación detectada en un punto antes de que esa misma nube se interponga entre el sol y el punto de medición[RENO,2012].

Por ello el **segundo criterio** consiste en detectar la irradianza máxima en la serie temporal.

$$M = \max[G_i] \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad \text{Ec.6.6.}$$

Se proponen otros tres criterios para examinar más de cerca las diferencias entre la forma de las series de tiempo de irradiancia medidas y el

correspondiente modelo de cielo claro cuantificando aspectos de la variabilidad con el fin de detectar la variabilidad resultante de diferentes tipos de nubes[BIRD,1981].

El **tercer criterio** propuesto mide la variabilidad en la irradiancia por la longitud L de la línea que conecta los puntos en las series de tiempo. Cualquier variabilidad en la irradiancia medida aumentará la longitud de la línea y será detectada. Sin embargo, la longitud de línea para una serie de tiempo con unos cambios grandes, o con muchos pequeños cambios, puede ser similar a la de una curva suave

$$L = \sum_{i=1}^n \sqrt{(G_{i+1} - G_i)^2 + (t_{i+1} - t_i)^2} \quad \text{Ec.6.7.}$$

El **cuarto criterio** es la varianza de los cambios en las series temporales; Específicamente, la desviación estándar normalizada σ de la pendiente (x) entre puntos secuenciales de la serie.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (S_i - \bar{S})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i} \quad \text{Ec.6.8.}$$

Siendo:

$$\bar{S} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} x_i$$

$$S = G_{i+1} - G_i \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

El último y **quinto criterio** para detectar variabilidad en la forma de las medidas de irradiancia es la desviación máxima de la pendiente del cielo claro, S. Durante un período de cielo claro, la pendiente entre cada medición debe ser similar a la pendiente bajo un cielo despejado[MIDC,2010].

$$S_i = G_{i+1} - G_i \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

$$S_i^{CS} = G_{i+1}^{CS} - G_i^{CS} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

$$S = \max\{|S_i - S_i^{CS}|\} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad \text{Ec.6.9.}$$

6.4 Calculo de radiación

Una vez definido el concepto de clear sky y de los criterios a tener en cuenta a la hora de determinar la calidad del modelo nos adentramos en la estimación propiamente dicha de la radiación solar incidente en la torre de comunicación. En el Capítulo 5 estudiamos en detalle la relación existente entre la temperatura ambiente, el calor que adquieren los dispositivos debidos a la radiación solar y el calor generado por el funcionamiento del equipo.

Basándonos en el método del capítulo 5 podemos determinar que mediante una serie de procesos lineales y no lineales y en base a los valores de temperatura históricos medidos en las coordenadas donde se encuentran los ODU, es posible crear una serie de curvas de regresión que se adapten al momento actual de medición y basándonos en la temperatura de ODU extraer la componente referida a la temperatura del aire. En el mismo proceso es extraída la componente de las temperaturas restantes, temperatura debida a la radiación solar y temperatura debida al propio funcionamiento del equipo. Este proceso nos devolvería la temperatura debida a la radiación incidente solo a unas horas determinadas y fechas determinadas dado que en ocasiones el ODU se encontraría en la sombra de su propia antena, es por ello que se repite el proceso de forma equivalente para cada uno de los ODU de la misma torre de comunicación con distintos ángulos u orientaciones Figura 6.6.

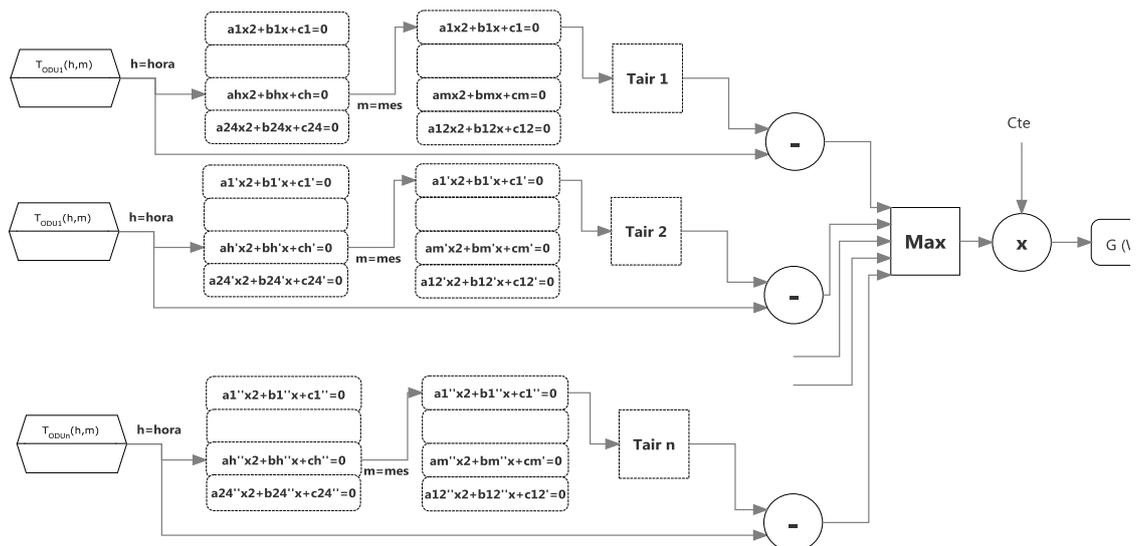


Figura 6.6. Esquema de funcionamiento del método.

En la patente de radiación hacemos hincapié en que debe haber dos dispositivos cercanos como mínimo. Esto es debido a que al extraer las componentes de varias temperaturas de ODU que se encuentren en el mismo mástil, figura 6.7., podemos afirmar que la temperatura del aire de ambos

dispositivos es el mismo o muy cercanos como podemos ver en la figura 6.8 donde se representan cinco temperaturas de ODU a lo largo de una semana y se puede comprobar como las cinco señales correlan entre sí con ciertos errores sobre todo y de mucho más nivel en las horas diurnas que las nocturnas debidas a las diferentes posiciones respecto al sol de cada uno de los sistemas y un valor constante de continua para cada señal dependiente de la potencia de trabajo del sistema.

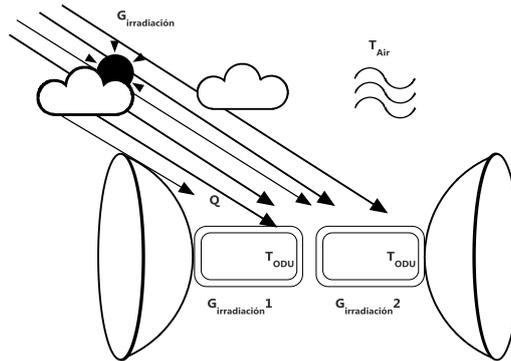


Figura 6.7. Sistema doble de antena y ODU respecto a los rayos solares.

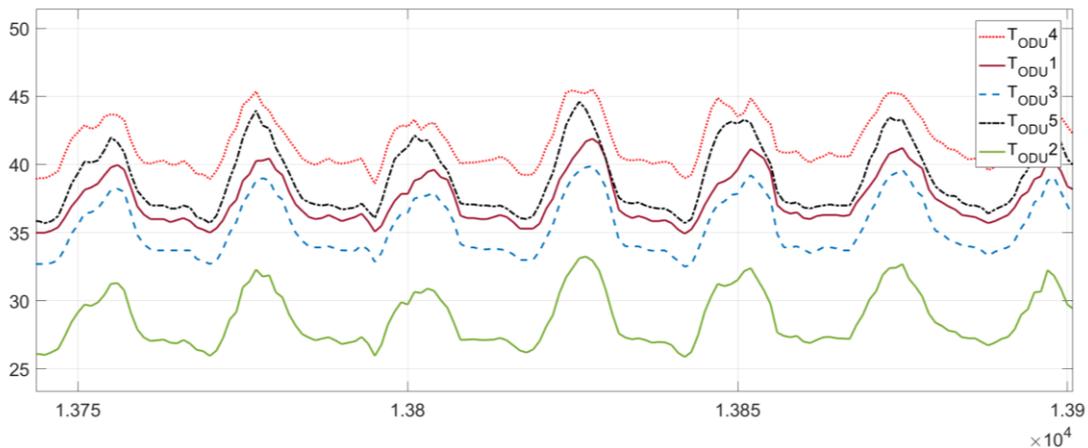


Figura 6.8. Cinco temperaturas de ODU de cinco antenas instaladas en el mismo mástil con distintas elevaciones y azimut.

Por ello al descomponer la temperatura de ODU de dos ODU's obtendremos 2 temperaturas del aire muy parecidas y dos temperaturas debidas a la transferencia de calor de cada uno de los equipos.

Debido a que los equipos se encuentran instalados con diferentes elevaciones y azimut respecto al sol en cada momento la radiación que reciben durante el día debería ser distinta de un dispositivo al otro, además, recordando que los

dispositivos ODU que estamos estudiando están físicamente instalados en la parte trasera de cada antena y que esta presenta diferentes tamaños dependiendo de la frecuencia y ganancia que se necesitaban para la correcta transmisión. La asombra ejercida por cada antena, así como el ángulo del sol respecto al sistema antena-ODU variará la temperatura interna del dispositivo. Este efecto se puede observar en detalle en la Figura 6.9. donde se observan las temperaturas de quince días de las temperaturas de ODU extraída a cada una su componente de temperatura del aire correspondiente. Los picos de las señales corresponden a los valores máximos de temperatura que se corresponden con los máximos solares del mediodía mientras que los picos mínimos corresponden a las etapas nocturnas donde la radiación solar es nula. Mientras que en la etapa nocturna las dos señales permanecen estables entre sí, en la etapa diurna se comprueba que entre el amanecer y el mediodía uno de los dispositivos presenta un mayor incremento que el otro dispositivo, mientras que al comenzar la tarde es el segundo dispositivo el que presenta mayores niveles de temperatura. Por lo tanto, un solo dispositivo no ofrecerá información suficiente para el cálculo de la radiación en la zona en todo el día, es por ello que podemos determinar que la temperatura debida a la radiación en ese espacio es función de las temperaturas máximas residuales de cada uno de los dispositivos siempre que entre ellos existan diferencias de elevación y azimut. Cuanto mayor sea el número de dispositivos mayor será el área y ángulo de radiación captada en la zona.

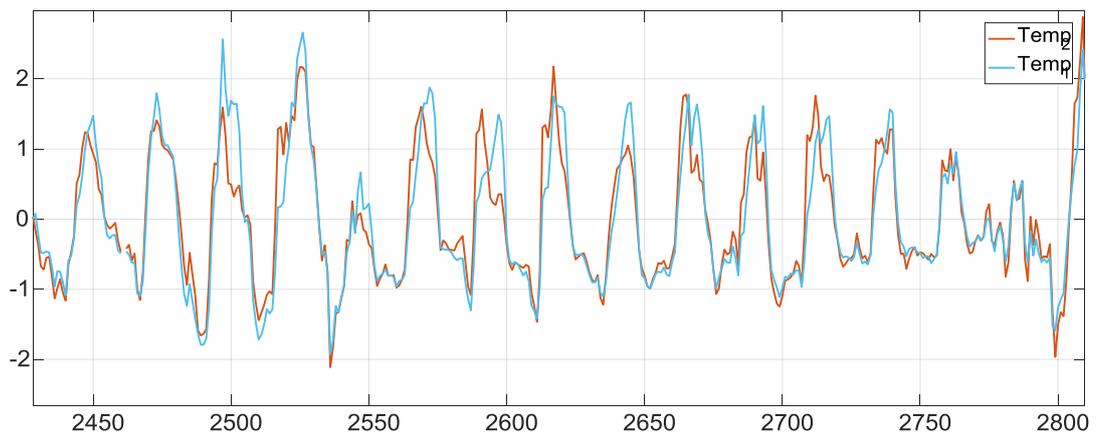


Figura 6.1. Dos temperaturas de ODU con su componente de temperatura del Aire extraída.

Por lo tanto cada temperatura de ODU (T_{odu}) se puede considerar la adición de la temperatura del aire común a los dispositivos instalados en el mismo mástil (T_{air}) mas una temperatura debida al calor producido por la radiación solar (T_{rad}) diferente para cada dispositivo en función de la fecha y hora, más una temperatura debida al propio funcionamiento del dispositivo (T_p) en cada uno de los dispositivos. Siendo n el número de ODU.

$$T_{odu}(n) = T_{air} + T_{rad}(n) + T_p(n) \quad \text{Ec.6.10.}$$

$$T_{rad}(n) = T_{odu}(n) - T_{air} - T_p(n) \quad \text{Ec.6.11.}$$

$$T_{odu}(n_1) - T_{odu}(n_2) = (T_{air} - T_{air}) + (T_{rad}(n_1) - T_{rad}(n_2)) + (T_p(n_1) - T_p(n_2))$$

$$(T_{rad}(n_1) - T_{rad}(n_2)) = T_{odu}(n_1) - T_{odu}(n_2) - (T_p(n_1) - T_p(n_2))$$

Ec.6.12.

Dado que los dos dispositivos se encuentran constantemente transmitiendo y recibiendo con una potencia aproximadamente igual y constante en el tiempo, al eliminar la componente continua de la temperatura el diferencial ΔT_p se aproxima a cero y es despreciable. Resultándonos que el diferencial entre las temperaturas de ODU es aproximadamente igual al diferencial entre las temperaturas debidas inducidas por la radiación solar de ambos dispositivos.

$$\Delta T_{odu} = \Delta T_{rad} \quad \text{Ec.6.13.}$$

El diferencial entre las temperaturas nos ofrece información sobre que dispositivo predomina sobre el otro y nos demuestra que existe una relación entre ambos conjuntos de valores. Esta relación es dependiente del tiempo por lo que en cada instante de tiempo solo uno de los ODU será el que mayor radiación reciba y por lo tanto calor. Esta relación se puede expresar mediante la ecuación donde la temperatura de radiación en cada instante de tiempo en la zona es una función de la temperatura máxima de cada una de las temperaturas de radiación individuales.

$$T_{radG}(t) = f(\max\{T_{rad}(n)(t)\}) \quad \text{Ec.6.14.}$$

Si recordamos que existe una relación directa entre la irradianza y la temperatura debida al calor añadido por el sol, ecuación 6.3, podemos expresar la Irradiancia ($G(t)$) como

$$G(t) = 400 \text{ Trad}G(t) \quad \text{Ec.6.15.}$$

Siendo $\text{Trad}G(t)$ El valor máximo en cada instante de tiempo t de entre cada una de las temperaturas debidas a la radiación solar de cada ODU.

6.5 Comprobación y tasa de error

Aplicando el método a los dispositivos de una zona cualquiera calculamos la radiación aproximada de esa zona donde se encuentran instalados dichos dispositivos. Presentando globalmente sobre las veinticuatro horas del día los 365 días del año la radiación calculada de clear sky, la detectada en una estación meteorológica y la calculada por nuestro método se observan las distintas distribuciones de radiación solar por cada técnica. Comparando una gráfica de radiación simulada perfecta y con cielo despejado (clear sky) frente a los datos reales medidos en una estación meteorológica cercana figura 6.10., teniendo en cuenta que el concepto de cercana es relativo ya que en nuestro caso solo se disponen de dos estaciones capaces de medir radiación solar de forma numérica situadas en los barrios de Alcaravaneras y Las Rehojas de la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria y tres en forma gráfica de estaciones de AEMET situadas en el Teide, Santa Cruz de Tenerife y Maspalomas en Gran Canaria, se puede comprobar como las gráficas presentan unas respuestas equivalentes lo que nos ofrece la primera aproximación visual al cálculo de la validez del método.

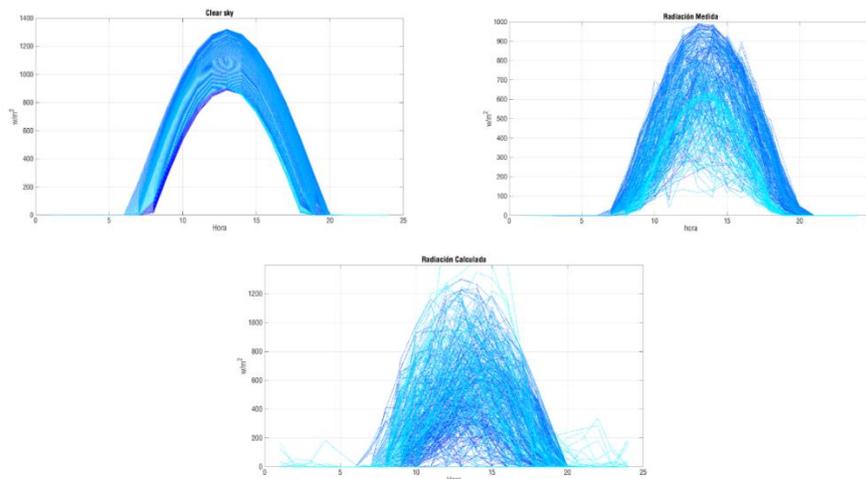


Figura 6.2. Radiación anual según hora del día de: clear sky, Estación de Alcaravaneras, Torre de comunicaciones de Hospital Militar Juan Carlos I.

Desde el punto de vista temporal como se puede comprobar en las Figuras 6.12 y 6.13 de tres sistemas con ODU, el dispositivo con la antena a 135° dirección suroeste presenta los valores máximos al comienzo del día, debemos tener en cuenta que el tener la antena a 135° suroeste implica que su ODU se encuentra al Noreste. A mediodía el sistema con la antena a 45° Noroeste (ODU Sureste) marca valores mayores que los otros dos sistemas, marcando el máximo para esa franja horaria y termina el día con los valores máximos en el sistema con la antena a 90° Este y ODU de cara al Oeste. Figura 6.11

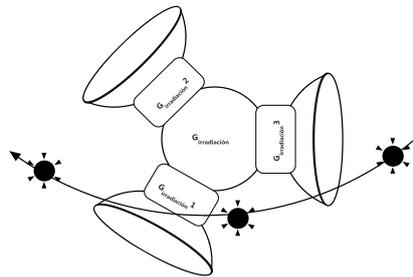


Figura 6.11. Disposición de sistemas Antenas-ODU respecto a tres posiciones del sol durante un día.

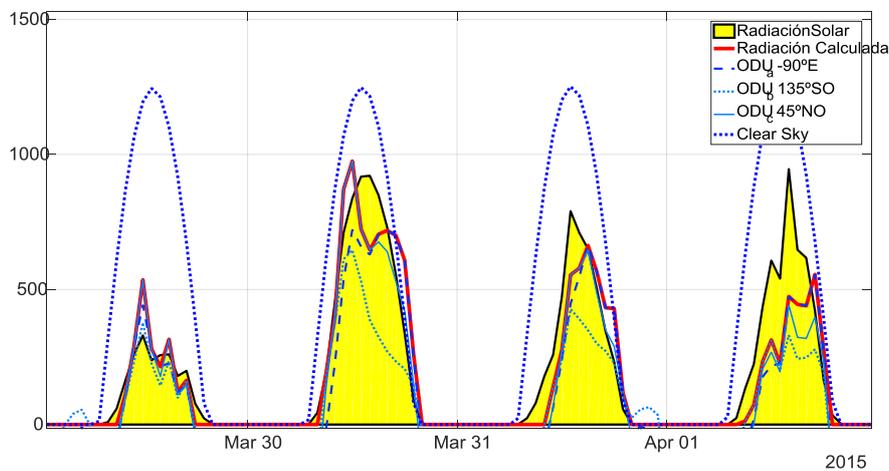


Figura 6.12. Representación temporal de clear sky, frente a Radiación de estación meteorológica , radiación calculada para cada ODU y radiación calculada total.

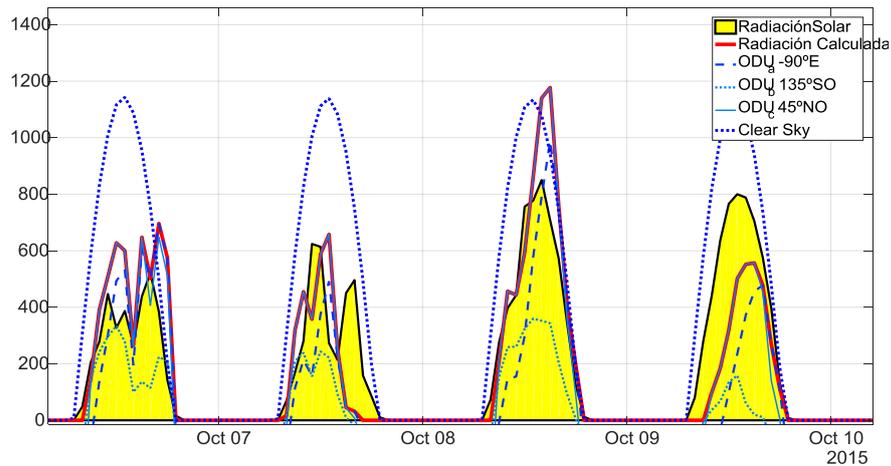


Figura 6.13. Representación temporal de clear sky, frente a Radiación de estación meteorológica , radiación calculada para cada ODU y radiación calculada total.

Tanto en la figura 6.12 como en la figura 6.13 podemos observar la línea azul punteada teórica de clear sky que marca a la perfección las horas diurnas y la radiación solar en w/m^2 medidos por la estación meteorológica cercana representada en área amarilla. El resto de líneas azules representan los distintos w/m^2 detectado por cada ODU y en rojo la función máxima de las anteriores radiaciones detectadas. Se puede comprobar cómo tanto el 30 de marzo de 2015 como el 9 de octubre del mismo año la estación meteorológica presenta formas de señal muy parecidas a clear sky, pero de amplitudes inferiores debido a escasas nubosidades, pero existencia de brumas o calima suave. Y que la respuesta del estimador es acorde a las señales de referencia con algunas diferencias principalmente debidas a la separación entre ambas tomas de unos 3 kilómetros en el caso de las estaciones arriba expuestas.

Si tomamos esa diferencia como si del error se tratase podemos determinar que por separado cada ODU presenta errores bastante amplios, algunos sistémicos ya que desplazan la curva gaussiana de error hacia los $300w/m^2$ aproximadamente. La aplicación del cálculo en función de los valores máximos por el contrario reduce considerablemente la tasa de error además de centrarla. Figura 6.14.

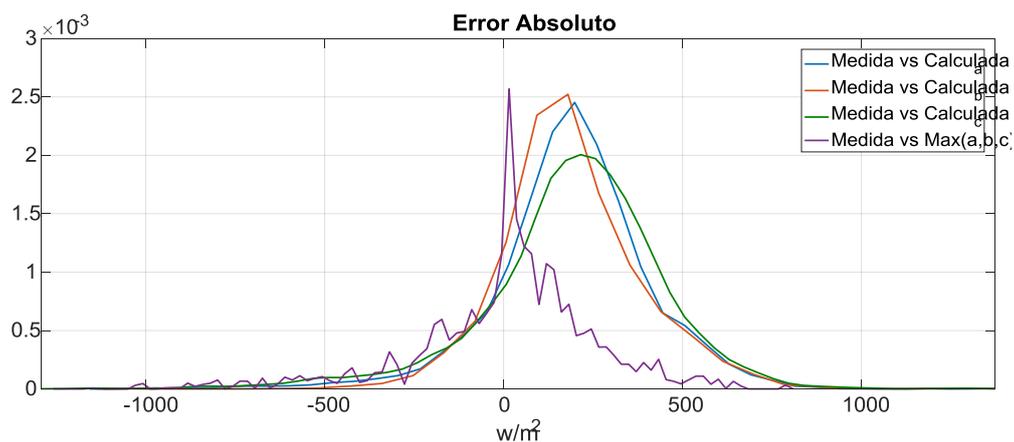


Figura 6.14. Error absoluto entre la radiación solar medida y la radiación solar calculada de varios ODU.

El error es una buena aproximación para conocer las bondades del método, pero como anteriormente hemos comentado existen más criterios que se pueden aplicar para el caso de detectar la bondad de los modelos.

Como se ha comentado en el apartado 2 de este capítulo a la hora de valorar la bondad de un modelado de cielo claro además del error absoluto entre ellos se suelen aplicar una serie de criterios que estudian sus valores estadísticos, así como las variaciones y las pendientes de las distintas curvas.

Es por ello que hemos incluido el estudio de cuatro de los cinco criterios para comparar los resultados de la radiación calculada frente a la radiación medida en la estación más cercana. El quinto criterio dado que es el máximo de las diferencias entre cada una de las señales respecto al clear sky y nos ofrece datos de relación directa entre ellas ha sido obviado.

Para comprobar la validez de la señal de radiación solar calculada frente a los cálculos teóricos de clear sky y de las mediciones reales de radiación procedemos a evaluar cuatro de los cinco criterios anteriormente comentados.

El primer criterio a aplicar es el de la ecuación 6.5, mediante el cálculo a las tres señales de los niveles de medias de la medición de radiación de una estación meteorológica cercana frente a la radiación detectada mediante las diferentes temperaturas de ODU localizadas en la misma posición geográfica. Se comprueba como en el punto estudiado los valores medios por hora del día durante todo el año son bastante parecidos (Figura 6.15) y presenta un bajo error absoluto.

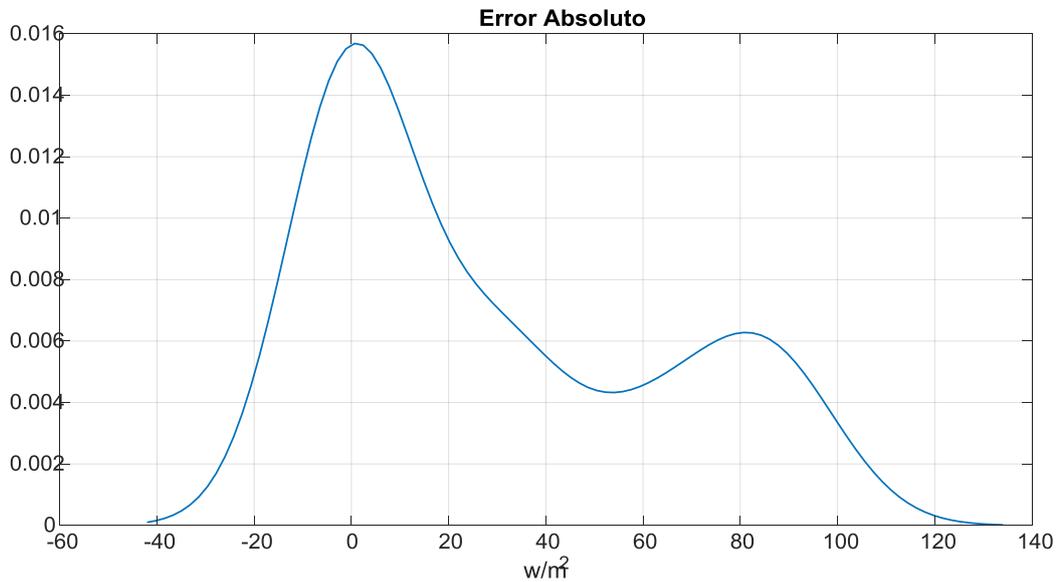
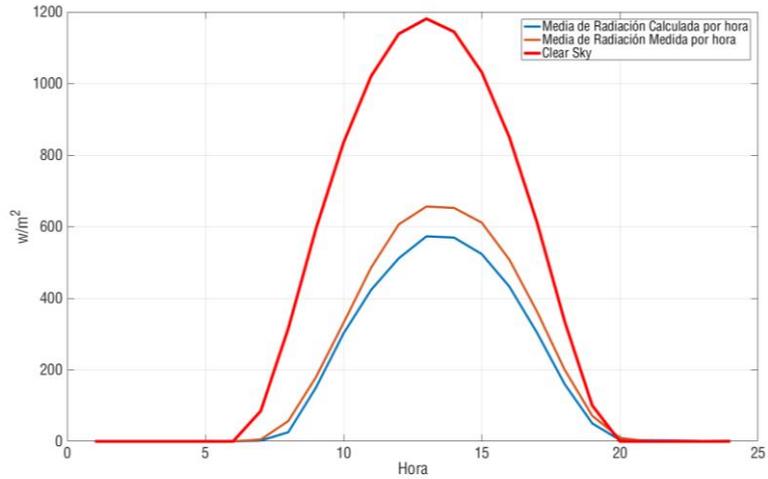


Figura 6.15. Cálculo de medias por hora del año completo y error absoluto de la media de la radiación calculada frente a la media de la radiación medida.

Como era de esperar el error absoluto presenta la respuesta de una doble gaussiana, estos errores corresponden a los máximos de temperaturas de día con errores sobre los 80w/m^2 .

Realizando el mismo criterio de comparación en función del promedio diario durante todo el año de ambas señales detectamos como existe cierto error relacionado con la estacionalidad desplazando la curva de error hacia los 50w/m^2 .

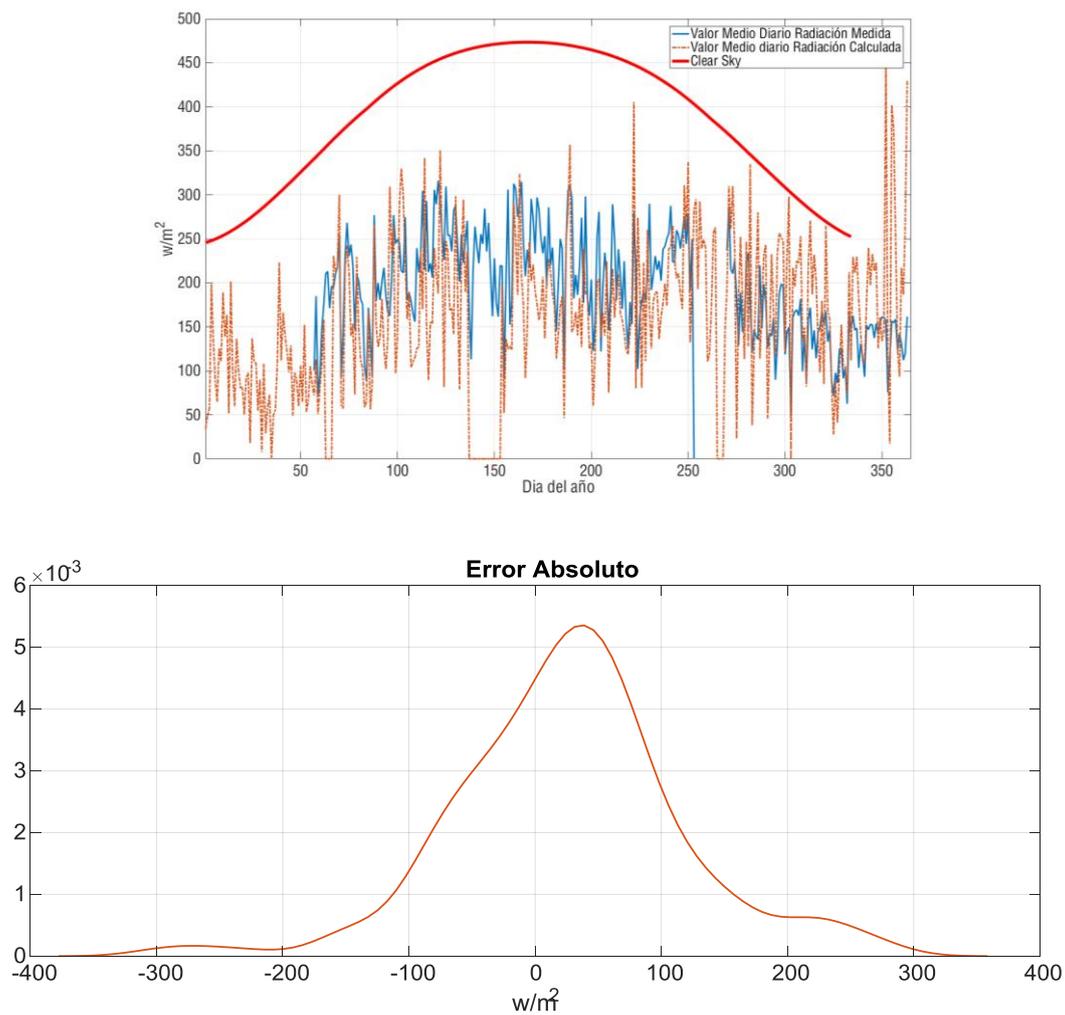


Figura 6.16. Valor medio por día y error absoluto Medida frente a calculada.

El segundo criterio consiste en calcular los valores máximos tanto horarios como diarios durante todo el año. Aplicando la ecuación 6.6 a las señales de radiación medidas, calculadas y clear sky podemos observar como respecto a los valores horarios de todo el año la señal calculada tiende a la clear sky a costa de alejarse de la medición real. Estas diferencias entre la medición real y la calculada están directamente relacionadas con las posiciones geográficas de los dispositivos. Mientras que la estación calculada se encuentra en lo alto de una colina sobre un edificio de varias plantas y sin nada que le pueda hacer sombra la estación meteorológica se encuentra en medio de la ciudad sobre un edificio bastante bajo (Un mercado) en relación a los edificios colindantes de más de diez plantas de altura. Esto provoca que varíe la componente difusa de la luz provocando un descenso de la radiación global (G) [WALL,1997] y [COMPAGNON,2004].

Así mismo en el estudio en escala diaria se puede ver como la envolvente de la señal calculada tiende hacia la señal teórica de clear sky.

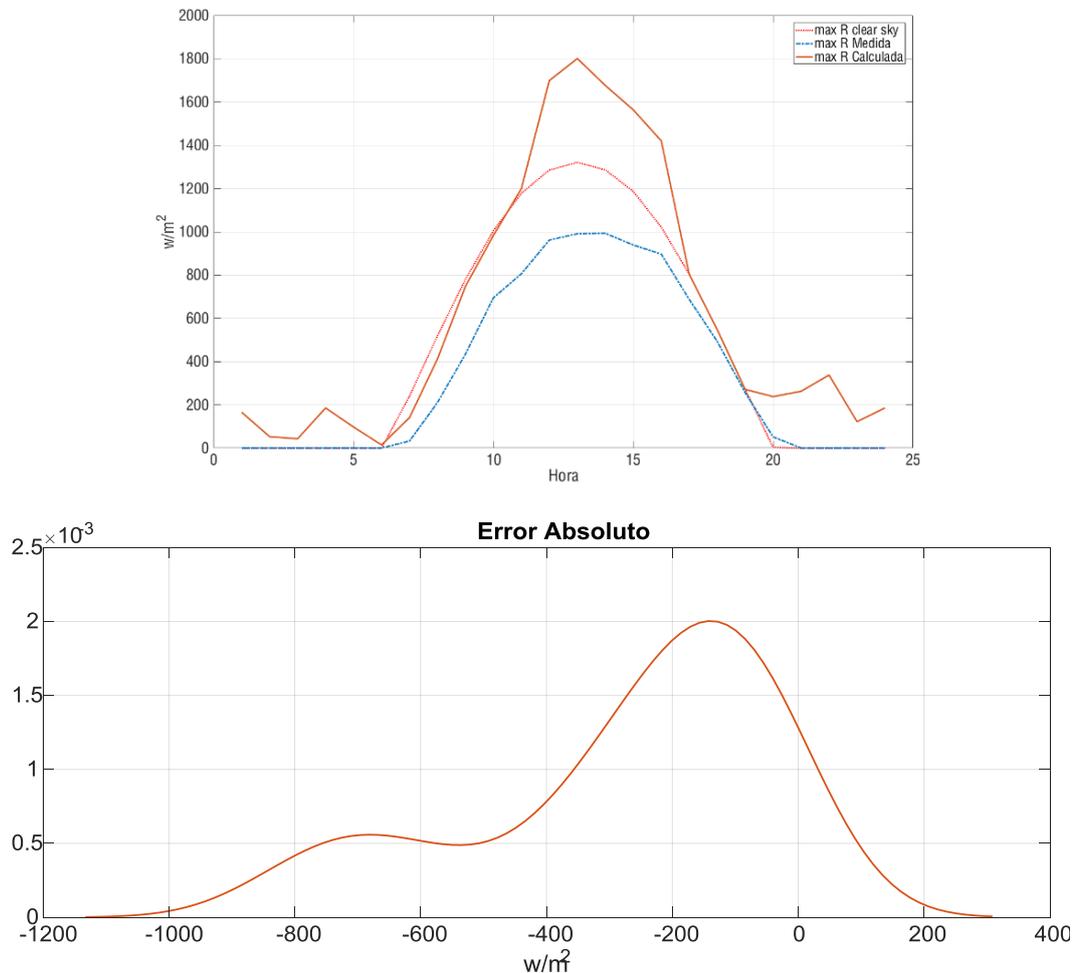


Figura 6.17. Cálculo de máximos por hora.

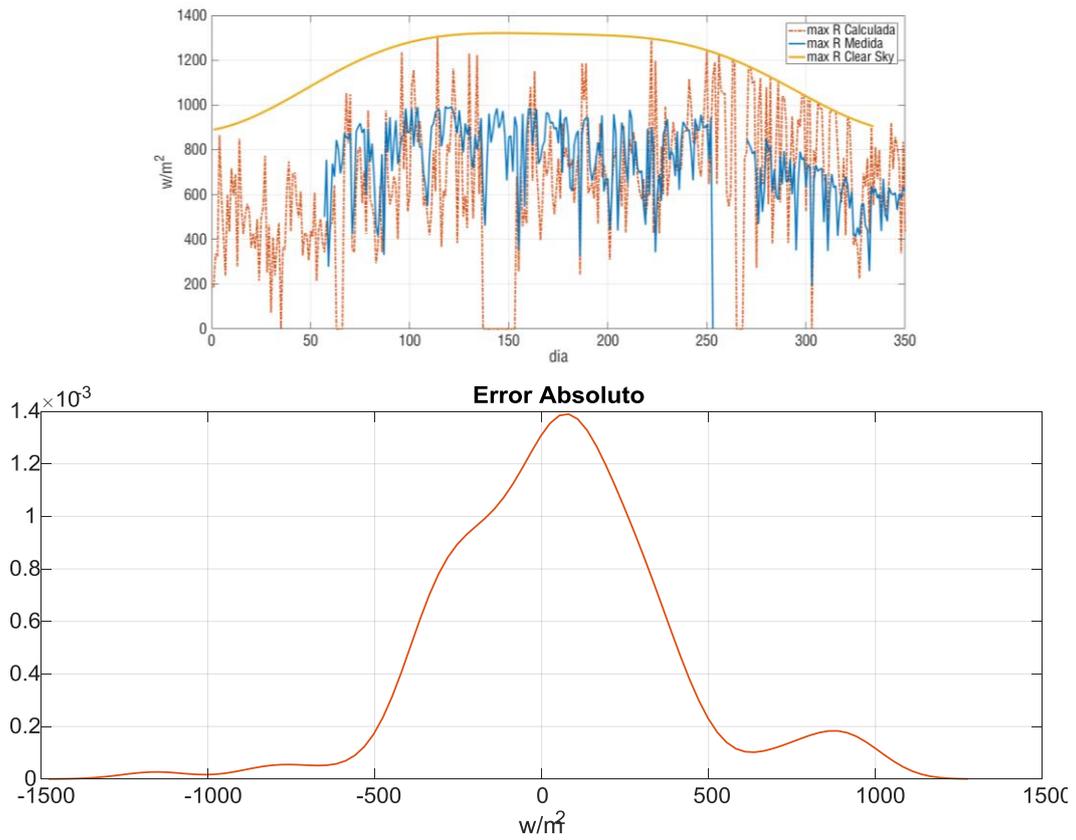


Figura 6.18. Calculo de máximos por día

El **tercer criterio** consiste en el estudio de la forma en referencia a la longitud. Es el equivalente a estirar ambas señales y calcular las longitudes de cada una. Una señal muy ruidosa presentará una longitud superior a otra señal con poco ruido o variaciones. Estas variaciones tienen en cuenta exclusivamente la integración de las longitudes de cada trama para devolver una longitud total que en nuestro caso será en función de cada hora durante todos los días del año y en función de cada hora respecto a un día medio.

Si estudiamos la variabilidad de la medición de radiación de una estación meteorológica cercana frente a la radiación detectada mediante las diferentes temperaturas de ODU localizadas en la misma posición geográfica podemos comprobar como en los tres puntos estudiados la variabilidad de cada una de las dos señales está correlada. Figura 6.19a y 6.19b

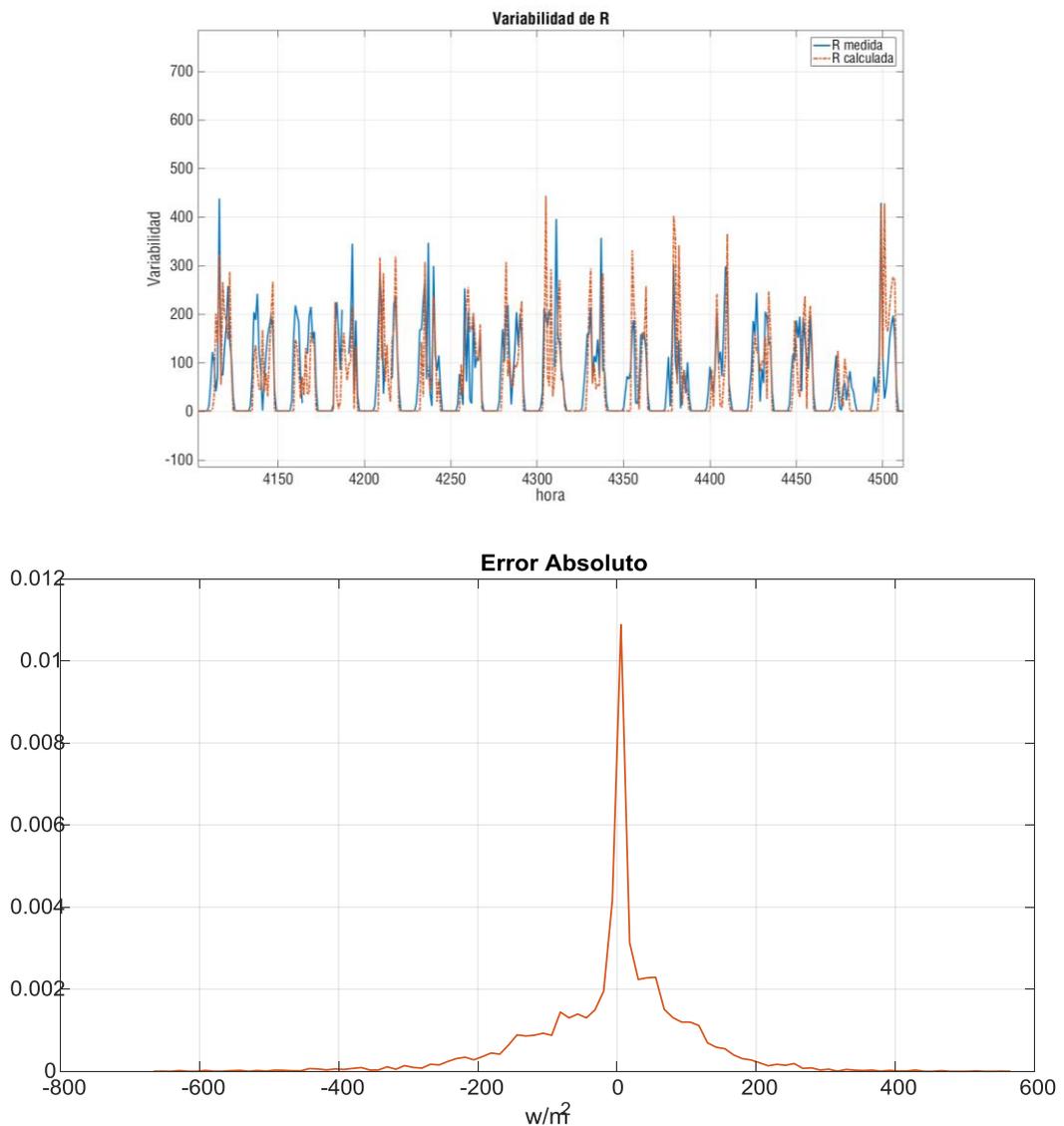


Figura 6.19. Variabilidad Horaria durante un año.

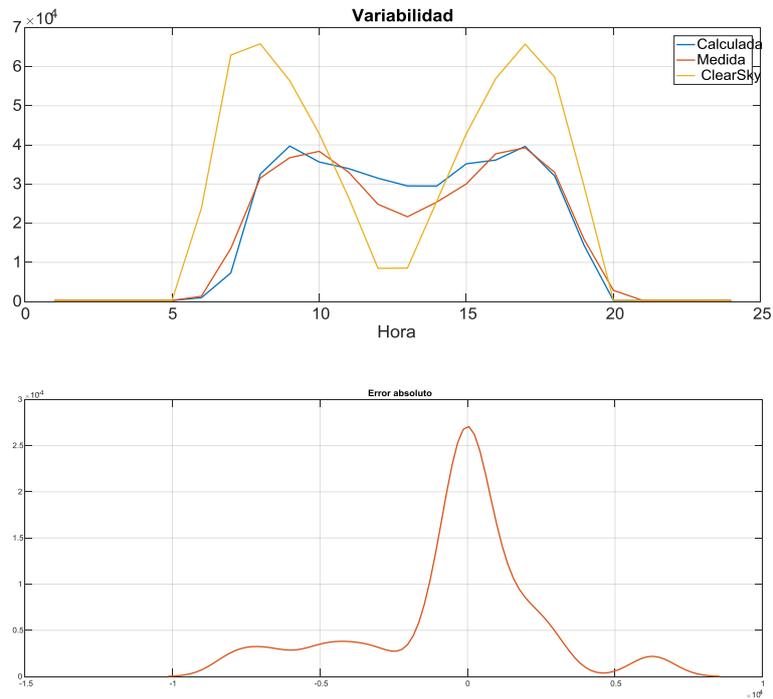


Figura 6.20. Variabilidad horaria media durante un año.

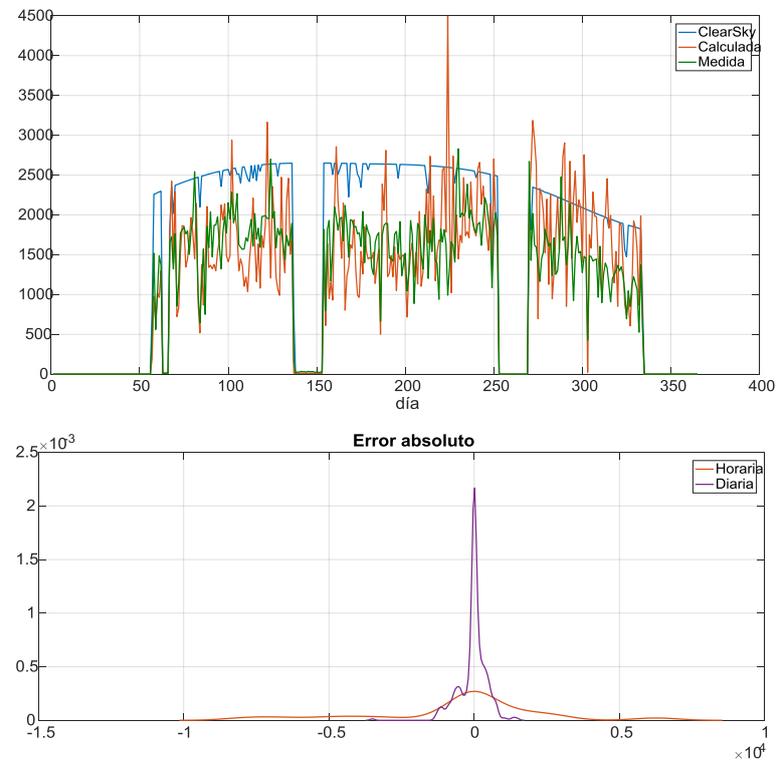


Figura 6.21. Variabilidad diaria media anual.

El **cuarto criterio**, segundo morfológico es el encargado de estudiar las pendientes de las señales. Si estudiamos la pendiente de la medición de radiación de una estación meteorológica cercana frente a la radiación detectada mediante las diferentes temperaturas de ODU localizadas en la misma posición geográfica podemos comprobar como en los tres puntos estudiados la variabilidad de cada una de las dos señales está correlada y con un error muy bajo.

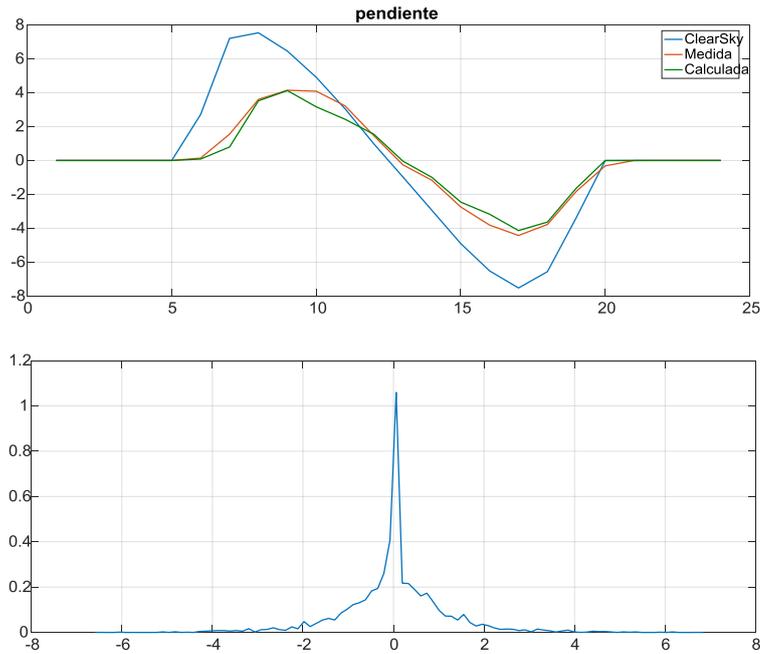


Figura 6.22. Cálculo de la pendiente horaria media en todo el año.

Una vez realizados los estudios pertinentes podemos concluir que la estimación y cálculo de la radiación solar incidente en una torre de radiocomunicaciones con varios sistemas ODU es viable, destacando sobre todo el carácter morfológico donde la forma de la señal de radiación calculada presenta muy poco error respecto a la forma de la señal medida.

Conclusiones

El presente trabajo presenta varias innovaciones cinético-tecnológicas al utilizar los radioenlaces y sus dispositivos para la detección y estimación de algunas variables meteorológicas y abre la posibilidad de estudiar varias variables más con la finalidad de mejorar el conocimiento de las distintas regiones climáticas y meteorológicas.

La conclusión fundamental es que se ha comprobado factible el uso de este tipo de radioenlaces para la detección y cuantificación de la precipitación, así como de los dispositivos ODU para la estimación y cálculo de la temperatura y de la radiación solar. Conseguimos así tener unos datos en relación a las estaciones meteorológicas bastante estables y con errores bajos. Esto da un valor añadido a los radioenlaces de microondas que hasta la fecha no tenías.

En el desarrollo del trabajo puede apreciarse cómo se comenzó con la adquisición de la fuente de datos tal y, tal como vimos en el capítulo 3, permitiendo la consecución del objetivo consistente en crear una base de datos de parámetros de calidad y control de las señales de radioenlace que fuesen lo suficientemente amplias para permitir estudios a largo plazo. Como añadidura, esta tesis ha permitido la salvaguarda de una serie de datos que de otra forma hubieran desaparecido a los 45 días dado que los dispositivos no guardan más cantidad de datos.

En la predicción y estimación de la precipitación hemos demostrado que es posible determinar la cantidad de lluvia que se produce en el vano con distintas técnicas y con tasas de errores equivalentes a las que se podrían producir entre diferentes pluviómetros separados unos pocos kilómetros. Destacando el sistema basado en redes neuronales que gracias a los preprocesados permiten una buena cuantificación independientemente de la polarización y frecuencia.

Por otro lado, las novedades respecto a la cuantificación de la temperatura del aire y de la radiación solar han permitido la presentación de dos patentes. Esto fue debido principalmente a la falta de artículos o escritos donde se realizarán este tipo de cálculos basados en radioenlaces u otros dispositivos que no fueran diseñados para ese fin. Hasta donde llega nuestro conocimiento, nuestras aportaciones sobre medición indirecta de temperatura ambiente y de radiación son novedosas, no existen referencias que evidencien trabajos

similares. Así las aportaciones que hemos realizado son una vía de trabajo científico-técnico en estas dos áreas.

Hemos comprobado que las temperaturas medidas y las temperaturas calculadas presentan errores muy bajos como hemos visto en el capítulo 5 gracias a las correcciones horarias y mensuales que se realizan a la temperatura del ODU.

De la misma forma en el capítulo 6 sobre radiación aportamos una nueva fuente de información que aumentará en gran manera la resolución de los mapas de radiación solar dado la escasa cantidad de medidores existentes actualmente.

Líneas futuras

Entre las líneas futuras destacamos una serie de ramas principales de estudios que deberán y serán estudiados.

En referencia a la detección y estimación de precipitaciones somos conscientes de que existen infinidad de algoritmos y tratamientos posibles a la hora de detectar y cuantificar la cantidad de lluvia existente en un vano de radioenlace. Es por ello que se buscarán nuevas técnicas y métodos para comparar con los métodos expuestos en este documento. También se deberá tratar la mejora de las predicciones de precipitación y la distinción entre precipitación de lluvia y de nieve en función de la temperatura y de la cubierta de nubes. Posibilitando reducir el número de falsos positivos si se produjeran en días despejados. De la misma forma controlando la precipitación en altitudes y la temperatura se podría investigar la separación de los tipos de precipitación. En el mismo campo de detección estaría la localización y distribución de la precipitación a lo largo del vano por lo que otra de las líneas futuras será la localización dentro del vano de la precipitación principalmente en función de los cambios bruscos de la temperatura del ODU. Al producirse precipitación sobre el ODU, este se enfría más rápido que los ODU vecinos por lo que se podría intentar discernir en que zona del radioenlace está produciéndose la precipitación.

En referencia al cálculo de la temperatura ambiente y a la cantidad de radiación se intentará conseguir mayor número de estaciones meteorológicas para ajustar mejor los modelos a la geografía variante y probar nuevas técnicas de filtrados y tratamientos de datos como por el ejemplo incluir el uso de redes neuronales también en estos dos apartados.

En referencia a otros fenómenos tenemos en cuenta la posible detección y cuantificación de la calima o polvo en suspensión. La detección del polvo en suspensión es un hecho factible dado que hemos visto patrones en las señales que coinciden en tiempo con grandes niveles de polvo en suspensión, se ha observado como cuando sucede este evento la señal de RSL pierde gran parte de su componente de alta frecuencia durante las horas que sucede.

Otra línea será la puesta en marcha dentro del proyecto europeo POMAC de un sistema de seguimiento de la precipitación torrencial apoyado tanto en estaciones meteorológicas como en los radioenlaces.

Por último, el pasado 1 de septiembre de 2014 se produjo un eclipse anular de sol sobre Canarias, el máximo se produjo a las 08:18 horas y terminó a las 08:40 horas. para comprobar el descenso de temperatura y de radiación solar se procedió a estudiar esa franja horaria, pero para nuestra sorpresa los radioenlaces fallaron durante ese periodo de tiempo en los radioenlaces de la isla de Gran canaria a más de mil metros de altitud, mientras que el resto de radioenlace siguió funcionando correctamente inclusive los que conectaban con los enlaces caídos en altura solo fallando la transmisión desde la altura hacia antenas de menor altitud.

RSL Mean Vs Time	Hierbahuert pico ii	pico i hospital	Moriscos terora	pico i pico ii	pico ii hierbahuert	pico ii moriscos	moriscos galdar
01/09/2016 8:00	-74.2	-54.73	-60.78	-29.15	-74.76	-64.38	-52.84
01/09/2016 8:15	-74.27	-54.84	-60.79	-29.14	-74.81	-62.81	-52.75
01/09/2016 8:30	-74.29	x	x	x	x	x	x
01/09/2016 8:45	-74.3	x	x	x	x	x	x
01/09/2016 9:00	-74.27	x	x	x	x	x	x
01/09/2016 9:15	-74.2	x	x	x	x	x	x
01/09/2016 9:30	-74.13	-49.2	-60.88	-38.76	-75.03	-64.86	-52.83
01/09/2016 9:45	-74.06	-54.76	-60.74	-29.13	-75	-66.24	-52.92
01/09/2016 10:00	-73.91	-54.82	-60.84	-29.01	-75.02	-65.51	-53.05

El próximo eclipse solar sobre Canarias se producirá el 21 de agosto de 2017 por lo que deberíamos estar muy atentos e intentar capturar mayor número de parámetros por si se produjera el mismo fenómeno que sucederá de 19:51:43 a 20:32 pero con tan solo un 39.43% de ocultación.

Referencias bibliográficas generales

- [ACKERMAN,1998] ACKERMAN, Steven A., et al. Discriminating clear sky from clouds with MODIS. *Journal of geophysical research*, 1998, vol. 103, no D24, p. 32,141-32,157.
- [AEMET,2002] AEMET. Clasificación de los Meteoros, http://www.aemet.es/es/noticias/2002/03/clasificacion_meteoros, 2002
- [AEMET,2017a] AEMET. Sistema Radar. <http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/radar/ayuda>
- [AEMET,2017b] AEMET. Nota Legal, http://www.aemet.es/es/nota_legal
<https://sede.aemet.gob.es/AEMET/es/GestionPeticones/consultaEstaciones>
- [AMMAR,2006] AMMAR, Danny F., et al. Highly integrated microwave outdoor unit (ODU). U.S. Patent No 7,050,765, 23 mayo 2006.
- [ANDERSON,1999] ANDERSON, Jay. Meteorological changes during a solar eclipse. *Weather*, 1999, vol. 54, no 7, p. 207-215.
- [APLIN,2003] APLIN, K., & Harrison, R. (2003). Meteorological Effects of the Eclipse of 11 August 1999 in Cloudy and Clear Conditions. *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 459(2030), 353-371.
- [ARANDA,1984] ARANDA, Daniel Fco Campos. Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. UASLP, 1984.
- [ATLAS,1977] ATLAS, David; ULBRICH, Carlton W. Path-and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1–3 cm band. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, vol. 16, no 12, p. 1322-1331.
- [AVIAT,2015] AVIAT networks. Unidades de radiofrecuencia. <http://aviatnetworks.com/products/split-mount-rf-units/>
- [BARRETO,2008] BARRETO, José Antonio García. Radiación de un Cuerpo Negro. Ley de Emisión de Planck. Una Breve Introducción. 2008.
- [BIANCHI,2013a] BIANCHI, Blandine; RIECKERMANN, Joerg; BERNE, Alexis. Quality control of rain gauge measurements using telecommunication microwave links. *Journal of Hydrology*, 2013, vol. 492, p. 15-23.
- [BIPM,2017] Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), Sèvres (París). <http://www.bipm.org>.
- [BIRD,1981] BIRD, Richard E.; HULSTROM, Roland L. Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA), 1981.
- [CARTER,2003] CARTER, B, and M.S, Carter, 2003, "Latitude, How American Astronomers Solved the Mystery of Variation", Naval Institute Press, Annapolis.
- [CASTILLO,1999] CASTILLO, M. Carmen Casas; JORDÁN, Marta Alarcón. Meteorología y clima. Univ. Politèc. de Catalunya, 1999.
- [CHWALA,2012] CHWALA, Christian, et al. Precipitation observation using microwave backhaul links in the alpine and pre-alpine region of Southern Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, vol. 16, no 8, p. 2647-2661.
- [COMPAGNON,2004] COMPAGNON, Raphaël. Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and buildings*, 2004, vol. 36, no 4, p. 321-328.

- [COULTER,1999] COULTER, R. L.; KALLISTRATOVA, M. A. The role of acoustic sounding in a high-technology era. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1999, vol. 71, no 1, p. 3-13.
- [CRANE,1971] CRANE, R. K., Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in the centimeter and millimeter wavelength bands, *Proc. IEEE*, 59, 173–188. 1971
- [CRANE,1980] CRANE, R. K. Prediction of attenuation by rain, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 28, No. 9, September, 1980, pp. 1717–1733.
- [CRANE,2003b] CRANE, R. K., *Propagation Handbook for Wireless Communication System Design*, CRC Press LLC, Boca Raton, FL, 2003.
- [CRESCENTI,1997] CRESCENTI, Gennaro H. A look back on two decades of Doppler sodar comparison studies. *Bulletin of the American Meteorological society*, 1997, vol. 78, no 4, p. 651-673.
- [D'AMICO,2016] M. D'AMICO, A. Manzoni and G. L. Solazzi, "Use of Operational Microwave Link Measurements for the Tomographic Reconstruction of 2-D Maps of Accumulated Rainfall," in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 13, no. 12, pp. 1827-1831, Dec. 2016.
- [DAVID,2009] DAVID, N.; ALPERT, P.; MESSER, H. Technical Note: Novel method for water vapour monitoring using wireless communication networks measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, vol. 9, no 7, p. 2413-2418.
- [DAVID,2016] DAVID, Noam; GAO, H. Oliver. Using Cellular Communication Networks To Detect Air Pollution. *Environmental Science & Technology*, 2016, vol. 50, no 17, p. 9442-9451.
- [DING,2013] DING, Ming; LUO, Hanwen. *Multi-point cooperative communication systems: theory and applications*. Springer, 2013.
- [DOUMOUNIA,2014] DOUMOUNIA, Ali, et al. Rainfall monitoring based on microwave links from cellular telecommunication networks: First results from a West African test bed. *Geophysical Research Letters*, 2014, vol. 41, no 16, p. 6016-6022.
- [DRUILHET,1997] DRUILHET, Aimé; DURAND, Pierre. Experimental investigation of atmospheric boundary layer turbulence. *Atmospheric research*, 1997, vol. 43, no 4, p. 345-388.
- [DUFFIE,2013] DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, 2013.
- [ELMAN,1993] ELMAN, Jeffrey L. Learning and development in neural networks: The importance of starting small. *Cognition*, 1993, vol. 48, no 1, p. 71-99.
- [ENRÍQUEZ,2011] ENRÍQUEZ, David Galadí, et al. *Astronomía fundamental*. Universitat de València, 2011.
- [FENCL, 2017] FENCL, Martin, et al. Gauge-adjusted rainfall estimates from commercial microwave links. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, vol. 21, no 1, p. 617.
- [FESHARAKI,2011] FESHARAKI, V. Jafari, et al. The effect of temperature on photovoltaic cell efficiency. *En Proceedings of the 1st International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation–ETEC*, Tehran, Iran. 2011. p. 20-21.
- [FRISS,1946] FRIIS, Harald T. A note on a simple transmission formula. *Proceedings of the IRE*, 1946, vol. 34, no 5, p. 254-256.
- [GARCÍA,2007] GARCÍA, Manuel A. Sellés. *Introducción a la historia de la cosmología*. Editorial UNED, 2007.
- [GOBCAN,2017a] Gobierno de Canarias. Servicio de Opendata. <http://opendata.gobiernodecanarias.org/opendata/inicio/index.html> 01/06/2017
- [GOBCAN,2017b] Gobierno de Canarias. Calidad del aire. <http://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/calidaddelaire/> 01/06/2017
- [GOBCAN,2017c] Gobierno de Canarias. RESCAN. <http://www.gobiernodecanarias.org/cpj/temas/tnt/rescan/rescan.html>
- [GOLSHAN N,1999] GOLSHAN N., HO C., 1999. Proceeding of the 2Yd NASA Propagation Experimenters Meeting (NAPEX XXZZZ) and the Advanced Communications Technology Satellite

- (ACTS) Propagation Studies Workshop, edited, JPL Publication 99-16, Falls Church, Virginia, June 2-4.
- [GONZALEZ,2017] P. GONZALEZ Gomez. PFC. Diseño de técnicas de estimación de lluvias a partir de niveles de potencias de radioenlaces. Tutores. J.L Navarro Mesa, I.D. Guerra Moreno. 2017
- [GUERRA,2016] I.D. GUERRA-MORENO; J.L. Navarro Mesa; E. Hernández Pérez; S. Páiz Casanova; A. Ravelo García. "Localización libre de dispositivo de elementos móviles en exteriores mediante WSN de baja densidad y técnicas de clasificación".URSI2016 XXXI. ISBN 978-84-608-9674-6. 2016
- [GUERRA,2017Pa] I.D. GUERRA-MORENO. J.L. Navarro-Mesa, E. Hernandez-Perez, A. Ravelo García. "Método de medición de temperatura del ambiente basado en dispositivos externos con medidores de temperatura de funcionamiento del dispositivo" Patente P201700134.
- [GUERRA,2017Pb] I.D. GUERRA-MORENO. J.L. Navarro-Mesa, E. Hernandez-Perez, A. Ravelo García. "Método de estimación de radiación solar mediante agrupaciones de equipos en exteriores", Patente P201700135.
- [GUERRA,2017] I.D. GUERRA-MORENO. J.L. Navarro-Mesa, E. Hernandez-Perez, P. Gonzalez-Gomez. "An approach to rainfall activity detection with characteristics extracted from microwave communication links and classification by means of SVM". The 3rd International Conference on Intelligent Signal Processing, ISP 2017. 4 - 5 December 2017. IET London. Pendiente de aceptación.
- [HAGAN,1996] HAGAN, M.T., H.B. Demuth, and M.H. Beale, Neural Network Design, Boston, MA: PWS Publishing, 1996.
- [HAGAN,1999] HAGAN, M.T., and M. Menhaj, "Training feed-forward networks with the Marquardt algorithm," IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 5, No. 6, 1999, pp. 989–993, 1994.
- [HARRIS,2009] HARRIS stratex. Eclipse Microwave Radio System. Eclipse 4.6 User Manual 260-668066-001 Rev 024 February 2009 1 www.harrisstratex.com
- [HASTIE,2001] T. Hastie, R. Tibshirani, J. Firedman. "The Elements of Statistical Learning. Data Minig, Inference and Prediction". Springer Series in Statistics. 2001. ISBN 0-387-95284-5.
- [HENAREJOS,2008] HENAREJOS, Philippe. Guía de astronomía. Ediciones AKAL, 2008.
- [HOGG,1968] HOGG, D. C. (1968), Millimeter-wave communication through the atmosphere, Science, 159, 39–46.
- [HOLLAND,1992] HOLLAND, Greg J.; MCGEER, Tad; YOUNGREN, Harold. Autonomous aerosondes for economical atmospheric soundings anywhere on the globe. Bulletin of the American Meteorological Society, 1992, vol. 73, no 12, p. 1987-1998.
- [IASSAMEN,2009] IASSAMEN, Alia, et al. Distribution of tropospheric water vapor in clear and cloudy conditions from microwave radiometric profiling. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2009, vol. 48, no 3, p. 600-615.
- [IPPOLITO,1981] IPPOLITO, L.J., KAUL, R. and WALLACE, R., 1981. Propagation effects handbook for satellite systems design. National Aeronautics and Space Administration.
- [IPPOLITO,2000] IPPOLITO, L.J., KAUL, R. and WALLACE, R., 2000. Propagation Efects Handbook for Satellite Systems Design, A Summary of Propagation Impairments to 10 to 100 GHz Satellite Links With Techniques for System Design., NASA Reference Publication 1 182(04).
- [ITU-R P, 525 -3] ITU-R P.525 Cálculo de la atenuación en el espacio libre
- [ITU-R P, 526 -13] ITU-R P.526-13. Propagación por difracción
- [ITU-R P, 836-6] ITU-R P.836. Vapor de agua: densidad en la superficie y contenido de una columna de aire
- [ITU-R P, 837 -6] ITU-R P.837 Características de la precipitación para establecer modelos de propagación

- [ITU-R P,530-13] ITU-R P.530-13. Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa.
- [ITU-R P,676] ITU-R P.676. Atenuación debida a los gases atmosféricos
- [ITU-R P,833] ITU-R P.833 Atenuación debida a la vegetación
- [ITU-R P,838-3] ITU-R P.838-3. Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción
- [ITU-R P,840-6] ITU-R P. 840-6. Atenuación debida a las nubes y a la niebla.(09/2013)
- [ITU-R V,431-8] ITU-R V.431-8, 2015. Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones
- [JPL,2000] JPL. Jet propulsion laboratory. California institute of technology national aeronautics and space administration. "A mystery of earth's wobble solved: it's the ocean". 2000
- [KARMAKAR,2013] KARMAKAR, Pranab Kumar. Ground-based microwave radiometry and remote sensing: methods and applications. CRC Press, 2013.
- [KLAUS,2014] KLAUS Jäger, Olindo Isabella, Arno H.M. Smets, René A.C.M.M. van Swaaij, Miro Zeman. Solar Energy, Fundamentals, Technology, and Systems. Delft University of Technology, 2014
- [KRÖPELIN,2008] KRÖPELIN, Stefan, et al. Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: the past 6000 years. *science*, 2008, vol. 320, no 5877, p. 765-768.
- [LANDAU,1973] LANDAU, Lev Davidovich; LIFSHITZ, Eugenii Mikhailovich. Teoría clásica de los campos. Reverté, 1973.
- [LARRASOÑA,2013] LARRASOÑA, Juan C.; ROBERTS, Andrew P.; ROHLING, Eelco J. Dynamics of green Sahara periods and their role in hominin evolution. *PloS one*, 2013, vol. 8, no 10, p. e76514.
- [LEIJNSE,2007a] LEIJNSE, H.; UIJLENHOET, R.; STRICKER, J. N. M. Rainfall measurement using radio links from cellular communication networks. *Water Resources Research*, 2007, vol. 43, no 3.
- [LEIJNSE,2007b] LEIJNSE, H.; UIJLENHOET, R.; STRICKER, J. N. M. Hydrometeorological application of a microwave link: 2. Precipitation. *Water resources research*, 2007, vol. 43, no 4.
- [LIBERMAN,2014] LIBERMAN, Y., Samuels, R., Alpert, P., and Messer, H.: New algorithm for integration between wireless microwave sensor network and radar for improved rainfall measurement and mapping, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 3549-3563, doi:10.5194/amt-7-3549-2014, 2014.
- [MARQUARDT,1963] MARQUARDT, D., "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," *SIAM Journal on Applied Mathematics*, Vol. 11, No. 2, June 1963, pp. 431-441
- [MCADAMS,1954] MCADAMS W. H. (1954) *Heat Transmission*, 3rd edition. McGraw-Hill, New York.
- [MCADIE,1911] MCADIE, Alexander G. *Heating the Atmosphere*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1911, vol. 23, no 139, p. 253-257.
- [MCCARTNEY,1976] MCCARTNEY, Earl J. *Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles*. New York, John Wiley and Sons, Inc., 1976. 421 p., 1976.
- [MESSER,2006] MESSER, Hagit; ZINEVICH, Artem; ALPERT, Pinhas. Environmental monitoring by wireless communication networks. *Science*, 2006, vol. 312, no 5774, p. 713-713.
- [MESSER,2015] Hagit Messer, Omry Sendik, "A New Approach to Precipitation Monitoring: A critical survey of existing technologies and challenges", *Signal Processing Magazine IEEE*, vol. 32, pp. 110-122, 2015, ISSN 1053-5888.
- [MIDC,2010] MIDC, NREL. National Renewable Energy Laboratory Measurement and Instrumentation Data Center (NREL MIDC) Solar Position and Intensity (SOLPOS) Calculator. Online at <http://www.nrel.gov/midc/solpos/solpos.html>, 2010.
- [MIGAN,2013] MIGAN, Gail-Angee. Study of the operating temperature of a PV module. Project Report, 2013 MVK160 Heat and Mass Transfer, 2013.

- [OLSEN R,1978] OLSEN R, Rogers D, Hodge D. The aRb relation in the calculation of rain attenuation. *IEEE Trans Antennas Propag* 1978;26(2):318–29.
- [OSTROMETZKY, 2015] OSTROMETZKY, Jonatan; CHERKASSKY, Dani; MESSER, Hagit. Accumulated mixed precipitation estimation using measurements from multiple microwave links. *Advances in Meteorology*, 2015, vol. 2015.
- [OVEREEM,2011] OVEREEM, A. LEIJNSE, H. UIJLENHOET, R. Measuring urban rainfall using microwave links from commercial cellular communication networks. *Water Resources Research*, 2011, vol. 47, no 12.
- [OVEREEM,2013] (Overeem, A., J. C. R. Robinson, H. Leijnse, G. J. Steeneveld, B. K. P. Horn, and R. Uijlenhoet (2013), Crowdsourcing urban air temperatures from smartphone battery temperatures, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4081–4085, doi:10.1002/grl.50786.)
- [OVEREEM,2016] A. OVEREEM, H. Leijnse, R. Uijlenhoet1. "Retrieval algorithm for rainfall mapping from microwave links in a cellular communication network". *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 2425–2444, 2016
- [PRATA,1996] PRATA, A. J. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1996, vol. 122, no 533, p. 1127-1151.
- [RAYITSFELD,2012] RAYITSFELD, Asaf, et al. Comparison of two methodologies for long term rainfall monitoring using a commercial microwave communication system. *Atmospheric Research*, 2012, vol. 104, p. 119-127.
- [READING,2017] University of Reading. <http://www.met.reading.ac.uk/weatherdata/> University of Reading METFiDAS weather observations
- [RENO,2012] RENO, Matthew J.; HANSEN, Clifford W.; STEIN, Joshua S. Global horizontal irradiance clear sky models: Implementation and analysis. SAND2012-2389, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2012.
- [RICHARDSON,1994] Jim RICHARDSON. Minimum design loads for buildings and other structures. Amer Society of Civil Engineers, 1994. University of Alabama. Design of Wind-Resistant Structures. Chapter 6.
- [RIGOLLIER,2000] RIGOLLIER, Christelle; BAUER, Olivier; WALD, Lucien. On the clear sky model of the ESRA—European Solar Radiation Atlas—with respect to the Heliosat method. *Solar energy*, 2000, vol. 68, no 1, p. 33-48.
- [ROBLEDO,2007] ROBLEDO, Fernando Henao. Riesgos físicos I: ruido, vibraciones y presiones anormales. Ecoe Ediciones, 2007.
- [SCHEMENAUER,1994] SCHEMENAUER, Robert S.; CERECEDA, Pilar. A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, vol. 33, no 11, p. 1313-1322..
- [SEMPPLAK,1969] SEMPLAK, R. A., and R. H. Turrin (1969), Some measurements of attenuation by rainfall at 18.5 GHz, *Bell Syst. Technol. J.*, 48, 1767–1787.
- [SEYBOLD,2002] J. S. SEYBOLD, Performance prediction for fixed microwave data links, *RF Design Magazine*, May 2002, pp. 58–66.
- [SIMAC,2017] SIMAC. Sistema de informacion de medioambiente de Canarias. Gobierno de Canarias. <http://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/piac/temas/atmosfera/medidas-y-factores/calidad-del-aire/medidas-sobre-calidad-aire/normativa-calidad-del-aire/>
- [SMITH,1999] SMITH, KOLTE, Priyadarshan;, Roger; SU, Wen. A fast median filter using AltiVec. En *Computer Design, 1999.(ICCD'99) International Conference on*. IEEE, 1999. p. 384-391.
- [SPAYD,2002] SPAYD, Sara E., et al. Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot berries. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2002, vol. 53, no 3, p. 171-182.
- [TARARA,2011] TARARA, Julie; LEE, Jungmin. An Introduction to Environmental Influences on Ripening in Grapes: Focus on wine grapes and phenolics. Cooperative Extension System <http://www.extension.org/grapes>. Accessed, 2011, vol. 4.

- [THINGLINK,2017] <https://www.thinglink.com/scene/487665315040198659>
- [VENKAT,2010] M. VENKAT Ratnam, M. Shraavan Kumar, Ghouse Basha, V.K. Anandan, A. Jayaraman, Effect of the annular solar eclipse of 15 January 2010 on the lower atmospheric boundary layer over a tropical rural station, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 72, Issue 18, December 2010, Pages 1393-1400, ISSN 1364-6826, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.10.009>.
- [VOGEL,1968] VOGEL, Steven. " Sun Leaves" and" Shade Leaves": Differences in Convective Heat Dissipation. *Ecology*, 1968, vol. 49, no 6, p. 1203-1204.
- [WALL,1997] WALL, Maria. Distribution of solar radiation in glazed spaces and adjacent buildings. A comparison of simulation programs. *Energy and Buildings*, 1997, vol. 26, no 2, p. 129-135.
- [WALLACE,1977] WALLACE, John M.; HOBBS, Peter Victor. *Atmospheric science: an introduction survey*. Academic Press, 1977
- [WEITKAMP,2006] WEITKAMP, Claus (ed.). *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. Springer Science & Business, 2006.
- [WHITEMAN,1999] WHITEMAN, David N.; MELFI, S. Harvey. Cloud liquid water, mean droplet radius, and number density measurements using a Raman lidar. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, vol. 104, no D24, p. 31411-31419.
- [WINET,2014] wireless-networks. <http://www.wireless-networks.co.uk/wireless-equipment/aviat-networks/dual-hybridpacket-microwave/eclipse-odu-300.html>
- [WMO,1966] International meteorological vocabulary. WMO, No. 182. TP. 91. Geneva (Secretariat of the World Meteorological Organization) 1966. Pp. xvi, 276. Sw. fr. 40
- [WMO,2013] Guide to the Global Observing System. World Meteorological Organization. ublished by: WMO ; 2013 (2010 edition updated in 2013) ISBN: 978-92-63-10488-5
- [WMO,2014] Book Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: (CIMO guide). World Meteorological Organization. Published by: WMO ; 2014 (2014 edition)
- [WMO,2015] Manual on the Global Observing System, Volume I - Global aspects: Annex V to the WMO Technical Regulations. Published by: WMO ; 2015. ISBN: 978-92-63-10544-8
- [WMO,2017] Guide to Hydrological Practices, Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. Published by: WMO ; 2008
- [YU,2011] YU, Hao; WILAMOWSKI, Bogdan M. Levenberg–marquardt training. *Industrial Electronics Handbook*, 2011, vol. 5, no 12, p. 1.
- [ZINEVICH,2008] ZINEVICH, Artem; ALPERT, Pinhas; MESSER, Hagit. Estimation of rainfall fields using commercial microwave communication networks of variable density. *Advances in water resources*, 2008, vol. 31, no 11, p. 1470-1480.
- [ZINEVICH,2009] ZINEVICH, Artem; MESSER, Hagit; ALPERT, Pinhas. Frontal rainfall observation by a commercial microwave communication network. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, vol. 48, no 7, p. 1317-1334.

ANEXOS

Anexo I

Tablas de estaciones meteorológicas en la BBDD

Tabla	Filas	Tamaño
c029o	18810	2.5 MB
c038n	11019	1.5 MB
c048w	18109	2.5 MB
c117a	18609	2.5 MB
c117z	18483	2.5 MB
c126a	18321	2.5 MB
c129z	20831	2.5 MB
c139e	21184	8.5 MB
c148f	17176	2.5 MB
c229x	5837	1.5 MB
c239n	17440	2.5 MB
c248e	15365	4.4 MB
c249i	20601	2.5 MB
c258k	14148	2.4 MB
c259x	15059	6.4 MB
c314z	14707	2.5 MB
c315p	13938	2.5 MB
c317b	17463	2.5 MB
c319w	13526	2.3 MB
c328w	13368	2.2 MB
c329z	18380	2.5 MB
c406g	16831	2.4 MB
c419x	14541	2.4 MB
c428t	17907	2.5 MB
c429i	18706	2.5 MB
c430e	21241	2.5 MB
c438n	16750	2.5 MB
c446g	18783	2.5 MB
c447a	19704	2.5 MB
c449c	19632	2.5 MB
c449f	17592	2.5 MB
c457i	18518	2.5 MB
c458a	12591	2.3 MB
c459z	20878	2.5 MB
c468b	18782	2.5 MB

c469n	16862	2.5 MB
c611e	17200	2.5 MB
c612f	17184	2.5 MB
c619x	17504	2.5 MB
c619y	2490	224 KB
c623i	13866	2.3 MB
c625o	14225	2.3 MB
c628b	17164	2.5 MB
c629q	19127	2.5 MB
c629x	19833	2.5 MB
c635b	19808	2.5 MB
c639m	19042	2.5 MB
c639u	17467	2.5 MB
c648c	15627	2.4 MB
c648n	18212	2.5 MB
c649i	21509	2.5 MB
c649r	17605	2.5 MB
c656v	18594	2.5 MB
c658x	17280	2.5 MB
c659h	14821	2.5 MB
c659m	17952	2.5 MB
c665t	24	16 KB
c669b	16478	2.4 MB
c689e	19302	2.5 MB
c839i	24	16 KB
c916q	15726	2.5 MB
c925f	17284	2.5 MB
c929i	18894	2.5 MB
c939t	15295	2.4 MB
80 tablas	1E+06	161.7 MB

Tablas de Radioenlaces en la BBDD

Tabla	Filas	Tamaño MB
3_de_mayo_barrio_de_la_alegria_u	89716	8.5
3_de_mayo_huc_u	9136	7.5
adeje_guaza_i_a	26775	2.5
afoba_valle_gran_rey_a	58234	5.5
afoba_valle_gran_rey_b	1481	1.5

agaete_montana_galdar_a	87772	8.5
agaete_montana_galdar_b	45691	4.5
aguimes_cazadores_u	89251	7.5
aguimes_tabaiiba_u	84455	7.5
altos_adeje_guaza_ii_u	40856	3.5
anocheza_birmagen_u	8627	8.5
anocheza_el_gaitero_u	90622	7.5
anocheza_el_reveron_u	90008	7.5
anocheza_huc_u	88183	7.5
arguayo_adeje_u	10309	1.5
arguayo_cruz_de_gala_a	87412	8.5
arguayo_cruz_de_gala_b	48692	5.5
bailadero_suculum_a	90405	8.5
bailadero_suculum_b	4979	4.5
barrio_de_la_alegria_3_de_mayo_u	91651	7.5
barrio_de_la_alegria_casas_cumbre_u	91027	9.5
birmagen_anocheza_u	90358	8.5
birmagen_huc_u	90952	7.5
canadas_del_gato_castillete_a	85208	8.5
canadas_del_gato_roque_pernal_a	88493	8.5
casas_cumbre_barrio_de_la_alegria_u	88358	8.5
casas_cumbre_pico_del_ingles_u	90213	9.5
casas_cumbre_suculum_a	9046	9.5
casas_cumbre_suculum_b	42225	4.5
castillete_canadas_del_gato_a	86046	9.5
castillete_puerto_rico_a	89122	8.5
cazadores_aguimes_u	91038	8.5
cazadores_hospital_u	97827	9.5
cazadores_monteluz_u	100451	8.5
centro_de_salud_las_tabladas_a	9038	9.5
centro_de_salud_las_tabladas_b	49582	4.5
cortadores_puerto_rico_u	86319	8.5
cortadores_salobre_golf_u	89891	8.5
cruz_de_gala_arguayo_a	84952	8.5
cruz_de_gala_arguayo_b	48043	4.5
cruz_de_gala_guaza_ii_u	72825	6.5
cruz_de_gala_guaza_i_u	5421	0.448
cruz_de_gala_la_corona_u	91321	8.5
cruz_de_gala_los_silos_u	88608	8.5
el_espanol_la_corona_u	88532	8.5
el_espanol_montana_guerra_a	90347	8.5
el_espanol_montana_guerra_b	41183	4.5
el_espanol_pico_del_ingles_u	80591	8.5
el_espanol_san_roque_u	86608	8.5
el_gaitero_anocheza_u	87402	7.5

el_reveron_anocheza_u	89416	8.5
el_reveron_montana_gorda_u	90792	8.5
guaza_ii_altos_adeje_u	41387	4.5
guaza_ii_cruz_de_gala_u	77136	7.5
guaza_ii_guaza_i_u	38706	3.5
guaza_ii_montana_gorda_u	78425	7.5
guaza_i_adeje_u	34976	3.5
guaza_i_altos_adeje_u	5421	0.448
guaza_i_guaza_ii_u	34743	3.5
hierba_huerto_pico_ii_u	89513	9.5
hierba_huerto_roque_pernal_u	84656	8.5
hospital_cazadores_u	9576	8.5
hospital_la_isleta_u	85299	8.5
hospital_monteluz_u	92355	9.5
hospital_pico_i_u	84524	8.5
hospital_usos_multiples_a	91146	9.5
hospital_usos_multiples_b	47537	4.5
huc_3_de_mayo_u	80539	7.5
huc_anocheza_u	86153	7.5
huc_birmagen_u	90706	7.5
huc_san_roque_u	90396	7.5
las_tabladas_centro_de_salud_a	9005	9.5
las_tabladas_centro_de_salud_b	47478	4.5
la_corona_cruz_de_gala_u	88877	8.5
la_corona_el_espanol_u	8973	8.5
la_corona_la_vega_a	91192	8.5
la_corona_la_vega_b	41694	3.5
la_isleta_hospital_u	8956	9.5
la_isleta_montana_galdar_a	7887	8.5
la_isleta_montana_galdar_b	55588	5.5
la_isleta_usos_multiples_iii_u	91129	8.5
la_vega_la_corona_a	88644	8.5
la_vega_la_corona_b	29755	3.5
los_silos_cruz_de_gala_u	91187	8.5
maspalomas_tabaiba_a	89956	8.5
maspalomas_tabaiba_b	49955	4.5
montana_galdar_agaete_a	82878	8.5
montana_galdar_agaete_b	48436	4.5
montana_galdar_la_isleta_a	78696	7.5
montana_galdar_la_isleta_b	33204	3.5
montana_galdar_moriscos_u	85522	9.5
montana_gorda_el_reveron_u	87491	8.5
montana_gorda_guaza_ii_u	80416	7.5
montana_gorda_teleferico_u	86145	8.5
montana_guerra_el_espanol_a	82566	8.5

montana_guerra_el_espanol_b	48813	4.5
montana_guerra_punta_hidalgo_a	72047	7.5
montana_guerra_punta_hidalgo_b	44803	4.5
monteluz_cazadores_u	97691	8.5
monteluz_hospital_u	94158	9.5
moriscos_montana_galdar_u	88986	9.5
moriscos_pico_i_u	96288	9.5
moriscos_teror_a	90919	8.5
pico_del_ingles_casas_cumbre_u	88647	9.5
pico_del_ingles_el_espanol_u	90859	8.5
pico_ii_hierba_huerto_u	8537	7.5
pico_ii_moriscos_u	98378	8.5
pico_ii_pico_i_u	80064	6.5
pico_i_hospital_u	93911	10.5
pico_i_pico_ii_u	88087	7.5
puerto_rico_castillete_a	82878	8.5
puerto_rico_cortadores_a	89481	8.5
punta_hidalgo_montana_guerra_a	89812	9.5
punta_hidalgo_montana_guerra_b	4581	4.5
roque_pernal_canadas_del_gato_u	81577	8.5
roque_pernal_hierba_huerto_u	85711	7.5
salobre_golf_cortadores_u	55877	6.5
salobre_golf_tabaiba_u	64271	5.5
san_roque_el_espanol_u	87721	8.5
san_roque_huc_u	86107	7.5
suculum_bailadero_a	90787	8.5
suculum_bailadero_b	42488	3.5
suculum_casas_cumbre_a	85414	8.5
suculum_casas_cumbre_b	42044	4.5
tabaiba_aguimes_u	84851	7.5
tabaiba_maspalomas_a	90181	8.5
tabaiba_maspalomas_b	4998	4.5
tabaiba_salobre_golf_a	90294	8.5
teleferico_montana_gorda_u	89846	8.5
teror_moriscos_a	21784	2.5
usos_multiples_hospital_a	8997	9.5
usos_multiples_hospital_b	45805	4.5
usos_multiples_iii_la_isleta_u	74265	6.5
valle_gran_rey_afoba_u	7376	6.5
134 tablas	8963648	0.9 GB

Anexo II

Derechos de uso de la información

Nota Legal AEMET. http://www.aemet.es/es/nota_legal

Nota Legal AEMET

Uso y reutilización

La información obtenida y elaborada por la Agencia Estatal de Meteorología (en lo sucesivo, AEMET) como consecuencia de su actividad científica y técnica se realiza con la mayor fiabilidad que posibilita el nivel tecnológico actual. En particular, las predicciones meteorológicas describen las evoluciones más probables del estado de la atmósfera en función de los conocimientos técnicos y científicos de esta materia.

aemet.es es un dominio de internet propiedad de AEMET, con domicilio en C/Leonardo Prieto Castro, 8 28071 Madrid España, bajo el que están disponibles diversos canales de difusión de información, su sitio web (www.aemet.es) y otros como AEMET OpenData, MeteoRuta, MeteoNav, Sinobas, Arcimís, AMA... Además, AEMET dispone de otros canales no ubicados en aemet.es, como apps nativas, aemetblog.es, Twitter, Facebook... Todos ellos, sus códigos fuente y los contenidos de los mismos pertenecen a AEMET y están protegidos por los correspondientes derechos de propiedad intelectual.

La obtención, la elaboración y los medios de presentación de la información meteorológica y climatológica de AEMET, constituyen una modalidad de la propiedad intelectual regulada en el artículo 10 del Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia. Corresponde a AEMET la

titularidad y el ejercicio de los derechos de autor, que configuran el derecho exclusivo de la explotación y divulgación de dicha información.

Los canales de difusión de AEMET cumplen la función de información general y atención al ciudadano en los términos establecidos en el Real Decreto, 186/2008, de 8 de febrero, por el que se aprueba el Estatuto, la Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente, en particular en su artículo 8; la Ley 18/2015, de 9 de julio, por la que se modifica la Ley 37/2007, de 16 de noviembre, sobre reutilización de la información del sector público y su reglamento de desarrollo, el Real Decreto 1495/2011, en particular su artículo 7; así como, el artículo 4 del Real Decreto 208/1996, de 9 de febrero, por el que se regulan los servicios de información administrativa y de atención al ciudadano.

El acceso y el uso de los canales de difusión de AEMET, así como los servicios o contenidos que a través de ellos se puedan obtener, están sujetos a los términos que se detallan en esta Nota Legal, sin perjuicio de que alguno de dichos canales, servicios o contenidos pueda precisar de la aceptación de unas condiciones adicionales.

Los contenidos y servicios que AEMET ofrece se actualizan periódicamente; se sugiere la comprobación de la vigencia y de la exactitud de la información, servicios y contenidos, así como de los términos legales vigentes en cada momento.

Términos y condiciones de acceso a la web u otras modalidades por parte de los diferentes usuarios

El acceso a este sitio web y a cualquiera de sus páginas supone conocer y aceptar las advertencias legales, condiciones y términos de uso que figuran a continuación:

El acceso a este portal web, así como el uso de la información que contiene, son de la exclusiva responsabilidad del usuario. AEMET no es responsable de ningún perjuicio que pudiera derivarse de estos hechos, ni tampoco puede garantizar que el acceso no se vea interrumpido o que el contenido o software al que pueda accederse esté libre de error o de causar daño.

AEMET se reserva el derecho a realizar los cambios que procedan sin previo aviso, al objeto de actualizar, modificar o eliminar la información, y a realizar cuantos cambios y modificaciones estime pertinentes sobre el sitio web.

AEMET se reserva la facultad de modificar unilateralmente las condiciones y términos de uso de este sitio web. Cualquier modificación de los mismos se

anunciará convenientemente a través de esta página, y será efectiva desde el momento de su publicación.

Autorización de reutilización y cesión no exclusiva de derechos de propiedad intelectual

Las condiciones generales recogidas en la presente nota legal permiten la reutilización de los documentos sometidos a ellas para fines comerciales y no comerciales. Se entiende por reutilización el uso de documentos que obran en poder de AEMET de acuerdo con lo establecido en el artículo 3 de la Ley 18/2015, de 9 de julio, por la que se modifica la Ley 37/2007, de 16 de noviembre, sobre reutilización de la información del sector público.

Esta autorización conlleva, asimismo, la cesión gratuita y no exclusiva de los derechos de propiedad intelectual, en su caso, correspondientes a tales documentos, autorizándose la realización de actividades de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación, necesarias para desarrollar la actividad de reutilización autorizada, en cualquier modalidad y bajo cualquier formato, y por el plazo máximo permitido por la citada Ley.

Condiciones generales para la reutilización

El ejercicio de la reutilización está sujeto a:

1. Está prohibido desnaturalizar el sentido de la información.
2. Se debe citar a AEMET como fuente de la información objeto de la reutilización en una de las siguientes formas:

En el caso de que la información sea difundida o suministrada a terceros sin más modificaciones que las de su presentación, sin haberse alterado el contenido técnico, se ha de:

Respetar su contenido técnico de forma que no pueda dar lugar a errores de interpretación por parte de terceros, pudiendo efectuarse su presentación en la forma más adecuada al USUARIO.

Incluir el Copyright de AEMET (© AEMET) o en su lugar el texto: "Información elaborada por la Agencia Estatal de Meteorología".

Mantener el logotipo de AEMET en todos aquellos productos que lo lleven integrado.

En caso, de realizar con ella servicios de valor añadido en base a la información meteorológica y climatológica suministrada por AEMET para su difusión o suministro a terceros, se debe mencionar explícitamente a AEMET como propietaria de dicha información, incluyendo la referencia "Fuente:

AEMET" o en su lugar el texto: "Información elaborada utilizando, entre otras, la obtenida de la Agencia Estatal de Meteorología".

3. Debe mencionarse la fecha de la última actualización de los documentos objeto de la reutilización, siempre cuando estuviera incluida en el documento original.

4. No se puede indicar, insinuar o sugerir que AEMET como titular de la información reutilizada participa, patrocina, o apoya la reutilización que se lleve a cabo con ella.

5. Debe conservarse la integridad de los metadatos sobre la fecha de actualización y las condiciones de reutilización aplicables que, en su caso, estuvieran incluidos en el documento puesto a disposición por AEMET para su reutilización.

Exclusión de responsabilidad

AEMET no será responsable del uso o interpretación que de su información hagan los agentes reutilizadores ni tampoco de los daños sufridos o pérdidas económicas que, de forma directa o indirecta, produzcan o puedan producir perjuicios económicos, materiales o sobre datos, provocados por el uso de la información reutilizada.

Los canales de difusión de AEMET pueden referenciar a sistemas externos sujetos a condiciones particulares de uso. AEMET declina cualquier responsabilidad con respecto a la información que se halle fuera de sus canales de difusión.

Obligaciones y responsabilidad del usuario

El agente reutilizador se halla sometido a la normativa aplicable en materia de reutilización de la información del sector público, incluyendo el régimen sancionador previsto en el artículo 11 de la Ley 18/2015, de 9 de julio, por la que se modifica la Ley 37/2007, de 16 de noviembre, sobre reutilización de la información del sector público.

El usuario se compromete a utilizar esta página o las diferentes formas de acceso, sin incurrir en actividades que puedan ser consideradas ilícitas o ilegales, que infrinjan los derechos de AEMET o de terceros, o que puedan dañar, inutilizar, sobrecargar o deteriorar el sitio web u otras formas de acceso o impedir la normal utilización del mismo.

El usuario deberá abstenerse de obtener los contenidos utilizando por ello medios o procedimientos distintos de los que se hayan puesto a su disposición a este efecto, se hayan indicado en este Sitio Web o se empleen habitualmente

en internet y, en este último caso, siempre que no entrañen un riesgo de daño o inutilización del sitio web y sus contenidos.

El usuario será el único responsable de las infracciones en que pueda incurrir o de los perjuicios que se puedan causar a terceros por la indebida e ilegítima utilización del web u otras formas de acceso previstas

Noviembre de 2016

© AEMET. Autorizado el uso de la información y su reproducción citando a AEMET como autora de la misma.

Aviso Legal Open Data del Gobierno de Canarias

<http://opendata.gobiernodecanarias.org/opendata/aviso-legal/>

Este aviso legal recoge las condiciones generales que rigen la reutilización de la información del sector público de la Comunidad Autónoma de Canarias que se regirá, con carácter general, por la Ley estatal 37/2007, de 16 de noviembre, sobre reutilización de la información del sector público. El acceso a los conjuntos de datos que el Gobierno de Canarias publica en este sitio Web supone la aceptación de los presentes Términos de Uso, cuyo objeto es la protección y promoción del compromiso que el Gobierno de Canarias tiene con la reutilización de información del sector público.

Si tiene dudas o desea realizar comentarios sobre los Términos de Uso, por favor, póngase en contacto con nosotros cumplimentando el siguiente formulario.

A los efectos del presente documento se entiende por:

Reutilización: el uso de documentos que obran en poder de la Comunidad Autónoma de Canarias, por personas físicas o jurídicas, con fines comerciales o no comerciales, siempre que dicho uso no constituya una actividad administrativa pública.

Documento: toda información cualquiera que sea su soporte material o electrónico, así como su forma de expresión gráfica, sonora o en imagen utilizada.

Agente reutilizador: toda persona física o jurídica que reutilice información del sector público con fines comerciales o no comerciales.

Términos de uso

Todos los conjuntos de datos que ofrece el Gobierno de Canarias, si no se indica lo contrario, se publican bajo los términos de la licencia Creative Commons-Reconocimiento (CC-by 3.0), y permite:

Copiar, distribuir y divulgar públicamente.

Servir como base a obras derivadas como resultado de su análisis o estudio.

Utilizar con fines comerciales o no comerciales.

Modificar, transformar y adaptar, haciéndose públicos dichos cambios.

Asimismo, la reutilización de la información contenida en los conjuntos de datos está sometida a las siguientes condiciones generales:

Está prohibido desnaturalizar el sentido de la información.

Debe citarse la fuente de los documentos objeto de la reutilización. Esta cita podrá realizarse de la siguiente manera genérica: “Fuente: Gobierno de Canarias”.

Debe mencionarse la fecha de la última actualización de los documentos objeto de la reutilización, siempre cuando estuviera incluida en el documento original.

No se podrá indicar, insinuar o sugerir que el Gobierno de Canarias, patrocina o apoya la reutilización que se lleve a cabo con ella.

Deben conservarse, no alterarse ni suprimirse los metadatos sobre la fecha de actualización y las condiciones de reutilización aplicables incluidos, en su caso, en el documento puesto a disposición para su reutilización.

Propiedad intelectual

La información proporcionada a través del portal es propiedad de la Administración Pública de la Comunidad Autónoma de Canarias o de otros organismos que hayan autorizado el uso y difusión de estos contenidos, o una modificación, adaptación, extracción, reordenación o combinación de los mismos, en este portal.

Las marcas, fotografías, imágenes, signos distintivos y logotipos que aparecen en este sitio web son propiedad exclusiva de la Administración Pública de la Comunidad Autónoma de Canarias, siempre que no se indique una titularidad diferente, están protegidos por la legislación vigente aplicable y no pueden ser reproducidos sin la autorización expresa.

La aceptación de los Términos de Uso no supone la concesión de los derechos de autor ni propiedad intelectual sobre los conjuntos de datos.

Exclusión de responsabilidad

La utilización de los conjuntos de datos se realizará por parte de los usuarios o agentes de la reutilización bajo su propia cuenta y riesgo, correspondiéndoles en exclusiva a ellos responder frente a terceros por daños que pudieran derivarse de ella.

El Gobierno de Canarias no será responsable del uso que de su información hagan los agentes reutilizadores ni tampoco de los daños sufridos o pérdidas económicas que, de forma directa o indirecta, produzcan o puedan producir

perjuicios económicos, materiales o sobre datos, provocados por el uso de la información reutilizada.

El Gobierno de Canarias no garantiza la continuidad en la puesta a disposición de los documentos reutilizables, ni en contenido ni en forma, ni asume responsabilidades por cualquier error u omisión contenido en ellos.

Responsabilidad del agente reutilizador

El agente reutilizador se halla sometido a la normativa aplicable en materia de reutilización de la información del sector público, incluyendo el régimen sancionador previsto en el artículo 11 de la Ley 37/2007, de 16 de noviembre, sobre reutilización de la información del sector público.

Aplicaciones y enlaces externos

El portal puede facilitar enlaces a páginas externas sobre las que no se tiene ningún control, y respecto de las cuales el Gobierno de Canarias declina toda responsabilidad, debiendo el usuario de este sitio web, en todo caso, atenerse a las condiciones de uso específicas de dichos enlaces.

Protección de datos de carácter personal.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal, el Gobierno de Canarias se compromete al cumplimiento de su obligación de secreto con respecto a los datos de carácter personal y al deber de tratarlos con confidencialidad. A estos efectos, adoptará las medidas necesarias para evitar su alteración, pérdida, tratamiento o acceso no autorizado.

La recogida y tratamiento automatizado de los datos personales tiene como finalidad la gestión, prestación, ampliación y mejora de los servicios al usuario y el seguimiento de consultas planteadas por los usuarios.

El usuario podrá ejercer en cualquier momento los derechos de acceso, rectificación, cancelación u oposición con respecto a los datos por él suministrados, a través de la Sede electrónica <https://sede.gobcan.es>

Modificaciones

Con el fin de mejorar las prestaciones del sitio web, el Gobierno de Canarias se reserva el derecho, en cualquier momento y sin previa notificación al usuario, a modificar ampliar o suspender temporalmente la presentación, configuración, especificaciones técnicas y servicios del sitio web, de forma unilateral.

Asimismo, se reserva el derecho a modificar en cualquier momento las presentes condiciones de uso, así como cualesquiera otras condiciones particulares.

© Gobierno de Canarias





UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Departamento de Señales y Comunicaciones