



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

ELABORACIÓN DE UN MAPA DE COBERTURA DE LA ISLA DE GRAN CANARIA EN LAS BANDAS DE FRECUENCIA MILITARES DE VHF Y HF

Raúl Fernández Sánchez

Director académico: Dra. Dña. María Teresa Lamelas García

Director militar: Tte. D. Javier Murillo Aragón

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2021



Agradecimientos

A continuación, quiero acordarme de todos aquellos que han formado parte de mi círculo cercano especialmente durante los últimos 5 años. Por consiguiente, no quiero olvidarme de todos los que, de un modo u otro, han colaborado en mi formación como ingeniero y militar a lo largo de este trayecto. En esta misma línea, quiero hacer especial mención sobre aquellas personas con las que he podido crecer como persona a lo largo de mi estancia en la Academia General Militar (AGM). A todos ellos, gracias de corazón.

Adicionalmente, me gustaría dar las gracias a mi director militar, el Tte. Don Javier Murillo Aragón. No sólo he tenido la gran suerte de poder aprender de un gran militar, sino que además de una excelente persona. Gracias por el inmejorable trato recibido y por todo lo que he podido aprender de usted.

Por otro lado, también quiero agradecer el apoyo recibido por parte de mi familia y amigos durante todos estos años, siendo una fuente de energía vital para conseguir superar aquellos baches que han formado parte de este camino.

No me quiero olvidar del Cap. Don Indalecio Cazorla Aguirre, jefe de Sc. durante mi último año de estancia en la AGM, por todo lo que me ha enseñado y aportado, tanto en el ámbito militar como en el personal. He sido un privilegiado.

Asimismo, gracias además al Cte. Don Juan Manuel Lopera López, profesor de la AGM, por la disponibilidad y ayuda que me brindó sobre diversas cuestiones referentes a este Trabajo de Fin de Grado (TFG) y por todo lo enseñado en la AGM. Gracias también al Dr. D. Andrés Miguel Cosialls Ubach y al Dr. D. Fernando López Pérez, profesores de la AGM, también por su colaboración respecto a algún tema en particular referente a este trabajo.

Quiero agradecer también la comprensión y seguimiento recibido por parte de mi directora académica, la Dra. Dña. María Teresa Lamelas García, y por ayudarme a organizar y mejorar este trabajo.

En último lugar, mis agradecimientos a todo el personal de la Cía. 16 de Transmisiones (CIATRANS 16) de la Brigada Canarias XVI (BRICAN XVI) que me ha brindado de su ayuda, medios y tiempo.

Con total y absoluta sinceridad, GRACIAS. Sin todos vosotros, esto no hubiera podido ser posible.



RESUMEN

Ejercer el Mando y Control (C2) dentro del Ejército de Tierra (ET) de la manera más eficiente, efectiva y eficaz se convierte en una tarea completamente fundamental dentro de las Fuerzas Armadas (FAS) españolas. Por consiguiente, es completamente imprescindible realizar un empleo óptimo de los diferentes medios de los Sistemas de Información y Telecomunicación (CIS) de los que dispone el Ejército, pues la continua transferencia de información entre sus miembros a través de la explotación de estos equipos es imprescindible para permitir, facilitar y favorecer el C2.

De esta forma, cobra una vital importancia analizar la conectividad y enlace existente sobre aquellas áreas o situaciones que sean consideradas de especial relevancia para el Ejército español, incluyendo desde territorios en zona de operaciones (ZO) en el exterior, hasta en los diferentes campos de maniobras del país. Por este motivo, se ha llevado a cabo un estudio de cobertura radioeléctrica en las principales bandas de frecuencia de uso militar sobre la Isla de Gran Canaria, siendo estas, la banda de *High Frequency* (HF) y *Very High Frequency* (VHF).

La finalidad por tanto de este Trabajo Final de Grado (TFG) ha sido analizar la conectividad existente en toda la isla a través de estas bandas de frecuencia ante la inexistencia con anterioridad de un estudio de ese tipo. Para la consecución de dicho objetivo, se han llevado a cabo dos estudios con la colaboración de la CIATRANS 16 de la BRICAN XVI.

En primer lugar, se ha realizado un estudio teórico donde se han analizado las diferentes formas en las que se propagan las ondas en cada banda, los equipos radioeléctricos empleados para su explotación, un análisis de terreno y la orografía de la isla, y por último, a través del empleo de los software de Xirio Online en su versión gratuita, Radio Mobile y VOACAP, se ha obtenido la simulación de mapas de cobertura teóricos de la isla.

En segundo lugar, se ha llevado a cabo un estudio empírico-práctico con el objetivo de validar los resultados teóricos obtenidos previamente. De este modo, se establecieron una serie de puntos de medición a lo largo de la isla con los que contrastar físicamente la cobertura teórica con la real.

Finalmente, en lo que respecta a la banda de VHF se ha podido concluir la necesidad de establecer al menos 2 repetidores con el objetivo de solucionar los problemas existentes de cobertura en la isla, mientras que por el otro lado, la cobertura en la banda de HF mediante enlaces Near Vertical Incidence Skywave (NVIS) ha sido excepcional.

De este modo, en base a los resultados obtenidos en la banda de VHF, con un 56,3% de precisión por parte de Xirio Online freeware, frente al 81,3% obtenido por Radio Mobile, sólo puede ser considerado como confiable el software de Radio Mobile para la explotación de esta banda. Por el otro lado, en cuanto a la banda de HF, VOACAP ha sido considerada como una herramienta totalmente fidedigna para ser empleada en la planificación y gestión de los medios CIS de cualquier ejercicio o maniobra, mientras que la versión gratuita de Xirio Online no ha podido llevar a cabo este estudio, restringiéndolo única y exclusivamente a su versión de pago.

Palabras clave

Mapa de cobertura, VHF, HF, repetidor



ABSTRACT

The efficient and effective Lead and Control (C2) within the Spanish Army is a fundamental task of the Spanish Armed Forces. Therefore, it is indispensable to employ the resources of the Information and Telecommunication Systems (CIS) in order to ensure a continuous flow of information between the members of the Army. This is essential to allow, facilitate and encourage the C2.

It is then especially important to analyse the existent connectivity between those areas or situations which are highly regarded by the Spanish Army. These may include territories in operational zones (ZO) abroad as well as manoeuvre fields within the country. For this reason, in this project, we have studied the radio-electric coverage of the main bandwidths used by the army in Gran Canary Island: the Very High Frequency (VHF) and High Frequency (HF) bandwidths. This is the first study of these characteristics, and it has been achieved with the collaboration of the CIATRANS 16 from the BRICAN XVI.

Firstly, we carried out a theoretical study in which we analysed the different ways in which the waves from each bandwidth are transmitted. We also reviewed the radio-electric devices used for their exploitation and explored the island's terrain and orography. Finally, we simulated the maps of theoretical network coverage with the use of Xirio Online, Radio Mobile and VOACAP. An empirical comparison of our model followed. We established a set of measurement points along the island in order to compare the theoretical coverage with the real one.

We could draw two main conclusions from our project. There exist coverage problems in the range of VHF, so at least two repeaters must be installed in order to solve this issue. On the other hand, the coverage of the HF bandwidth is satisfactory. The "Near Vertical Incidence Skywave" link has proven to be exceptional.

Moreover, when comparing the theoretical and empirical results, we found some issues with the mapping softwares. In the VHF bandwidth, Xirio Online had an agreement of 56.3%, while Radio Mobile results presented a compatibility of 81.3%. We can see that only the latter is a reliable tool. On the contrary, for the HF band, VOACAP has been considered as a very reliable tool to be used in the planning and management of the CIS means of any exercise or manoeuvre, while the free version of Xirio Online could not carry out this study, restricting it solely and exclusively to its paid version.

KEYWORDS

Coverage map, VHF, HF, booster.



ÍNDICE DE CONTENIDO

<i>Agradecimientos</i>	<i>I</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>II</i>
<i>Palabras clave</i>	<i>II</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>III</i>
KEYWORDS	III
<i>ÍNDICE DE CONTENIDO</i>	<i>IV</i>
<i>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</i>	<i>VI</i>
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	<i>IX</i>
<i>ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS</i>	<i>X</i>
<i>1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES</i>	<i>1</i>
<i>2 OBJETIVOS, ALCANCE Y METODOLOGÍA</i>	<i>2</i>
2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE	2
2.2 METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA	3
<i>3 DESARROLLO: ESTUDIO TEÓRICO</i>	<i>3</i>
3.1 ANÁLISIS DE LA FORMA DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS RADIOELÉCTRICAS EN LAS BANDAS DE FRECUENCIA DE VHF Y HF	4
3.1.1 Propagación de las ondas radioeléctricas en la banda de VHF	4
3.1.2 Propagación de las ondas radioeléctricas en la banda de HF	6
3.2 ANÁLISIS DEL MATERIAL HARDWARE EMPLEADO EN EL ESTUDIO.....	9
3.2.1 Equipos hardware empleados en la banda de VHF	9
3.2.2 Equipos hardware empleados en la banda de HF.....	11
3.3 ESTUDIO DEL TERRENO	13
3.3.1 Análisis de la orografía y relieve de la isla de Gran Canaria.....	13



3.3.2	Establecimiento de repetidores	14
3.4	MODELIZACIÓN DE LOS MAPAS DE COBERTURA RADIOELÉCTRICOS	18
3.4.1	Modelización cartográfica radioeléctrica en la banda de VHF.....	18
3.4.2	Modelización cartográfica radioeléctrica en la banda de HF.....	22
4	DESARROLLO: ESTUDIO EMPÍRICO-PRÁCTICO.....	27
4.1	FASE DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS	27
4.2	SELECCIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN DE LA COBERTURA	28
4.3	SELECCIÓN DE FRECUENCIAS.....	30
4.4	RESULTADOS.....	31
4.4.1	Resultados banda de VHF	31
4.4.1.1	Elección de repetidores para la banda de VHF	34
4.4.2	Resultados banda de HF.....	36
5	CONCLUSIONES	37
5.1	CONCLUSIONES DEL PROYECTO	38
5.2	LÍNEAS DE ACCIÓN FUTURAS	39
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
	Anexo A.....	46
	Anexo B.....	52
	Anexo C.....	54



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Propagación en VHF (Santos Reyes, 2015)	6
Ilustración 2 Formas de propagación en HF. Dónde: f (frecuencia), MUF (frecuencia máxima utilizable), LUF (frecuencia mínima utilizable)	8
Ilustración 3 Configuración portátil RT-9210 (infodenfensa.com, 2018).....	10
Ilustración 4 Configuración vehicular RT-9310 (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2016) ...	10
Ilustración 5 Configuración portátil RF 5800H-MP (Harris, 2006).....	12
Ilustración 6 Configuración vehicular RF 5800H-MP (Harris Corporation, 2003)	12
Ilustración 7 Esquema repetidor de VHF (repetidor Pico)	15
Ilustración 8 Conexión de RT PR4G en el interior del vehículo que conforma el repetidor Pico 17	
Ilustración 9 Repetidor Pico	18
Ilustración 10 Posicionamiento de los 3 supuestos repetidores (Radio Mobile).....	18
Ilustración 11 Mapa de cobertura repetidor Pico (Radio Mobile).....	21
Ilustración 12 Mapa de cobertura repetidor Camaleón (Radio Mobile)	21
Ilustración 13 Mapa de cobertura repetidor Harry (Radio Mobile)	21
Ilustración 14 Mapa de cobertura repetidor Pico (Xirio Online freeware)	21
Ilustración 15 Mapa de cobertura repetidor Camaleón (Xirio Online freeware).....	21
Ilustración 16 Mapa de cobertura repetidor Harry (Xirio Online freeware)	21
Ilustración 17 Mapa de cobertura con la probabilidad de establecer enlace (VOACAP)	24
Ilustración 18 Mapa de cobertura ampliado con la probabilidad de establecer enlace (VOACAP)	24
Ilustración 19 Diagrama de viabilidad del enlace según la frecuencia y tramo horario (VOACAP)	25
Ilustración 20 Mapa de cobertura del repetidor Pico con itinerario y puntos de medición sobre Google Earth Pro.....	29
Ilustración 21 Mapa de cobertura del repetidor Pico con división de la isla y principales carreteras de Gran Canaria	29
Ilustración 22 Perfil topográfico entre los repetidores Pico y Camaleón (Radio Mobile)	34
Ilustración 23 Mapa de cobertura combinación repetidores Camaleón y Harry (Radio Mobile)	35



Ilustración 24 Mapa de cobertura combinación repetidores Pico y Harry (Radio Mobile)	35
Ilustración 25 Mapa de cobertura combinación repetidores Camaleón y Pico (Radio Mobile) ..	35
Ilustración 26 Mapa de cobertura combinación de los 3 repetidores (Radio Mobile)	35
Ilustración 27 Envío de datos RF 5800H-MP con Tactical Chat [Fuente: Cabo 1º Moguel].....	37
Ilustración 28 Prueba envío de datos mediante la aplicación Tactical Chat.....	37
Ilustración 29 Antena de VHF LERC LB3088AG sobre mástil (COMROD, 2010)	47
Ilustración 30 Antena de VHF LERC LB3088AG perteneciente al repetidor Pico	47
Ilustración 31 Diagrama de radiación vertical de antena de plano de tierra (Orr, 1981)	47
Ilustración 32 Ganancia de la antena VHF3088VM (COMROD, 2020)	48
Ilustración 33 Relación entre la impedancia de carga y la impedancia (COMROD, 2020)	48
Ilustración 34 Diagrama de radiación de la antena VHF3088VM (COMROD, 2020)	48
Ilustración 35 Dimensiones antena VHF3088VM (COMROD, 2020)	49
Ilustración 36 Antenas VHF3088VM en un primer plano Antena NVIS Chelton al fondo.....	49
Ilustración 37 Antena NVIS en semibucle Chelton sobre estación vehicular SORIA	51
Ilustración 38 Antena NVIS en semibucle Chelton sobre estación vehicular Mercurio 2000 IP. 51	
Ilustración 39 Diagrama de radiación antena NVIS en simibucle Chelton (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2021b)	51
Ilustración 40 Método de cálculo <i>Rec. UIT-R P.526 (1/9)</i> (Xirio Online, 2021a)	54
Ilustración 41 Método de cálculo <i>Rec. UIT-R P.526 (2/9)</i> (Xirio Online, 2021a)	55
Ilustración 42 Método de cálculo <i>Rec. UIT-R P.526 (3/9)</i> (Xirio Online, 2021a)	56
Ilustración 43 Método de cálculo <i>Rec. UIT-R P.526 (4/9)</i> (Xirio Online, 2021a)	56
Ilustración 44 Método de cálculo <i>Rec. UIT-R P.526 (5/9)</i> (Xirio Online, 2021a)	57
Ilustración 45 Método de cálculo <i>Rec. UIT-R P.526 (6/9)</i> (Xirio Online, 2021a)	58
Ilustración 46 Método de cálculo <i>Rec. UIT-R P.526 (7/9)</i> (Xirio Online, 2021a)	58
Ilustración 47 Método de cálculo <i>Rec. UIT-R P.526 (8/9)</i> (Xirio Online, 2021a)	59
Ilustración 48 Método de cálculo <i>Rec. UIT-R P.526 (9/9)</i> (Xirio Online, 2021a)	60
Ilustración 49 Método de cálculo <i>Rec. UIT-R P.533</i> (Xirio Online, 2021b).....	61



Ilustración 50 Método de cálculo *Longley-Rice* (Longley-Rice, 2021) 62



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Abreviaturas, siglas y acrónimos por orden alfabético	X
Tabla 2 Leyenda de colores de los mapas de cobertura	20
Tabla 3 Resumen de los principales parámetros que definen un enlace en HF (VOACAP). Dónde: SDBW (nivel medio de la señal), REL (probabilidad de establecer enlace), SNR (relación señal a ruido), MUFday (porcentaje de días del mes a una hora determinada en que la frecuencia de trabajo está por debajo de la MUF), MUF (frecuencia mediana máxima utilizable para un mes, hora y SSN determinados), HPF (frecuencia máxima no superable el 10% de los días del mes sin que se pierda el enlace)	26
Tabla 4 Comparación de resultados teóricos y reales de la calidad de la señal	32
Tabla 5 Matriz de confusión Xirio Online versión gratuita.....	33
Tabla 6 Matriz de confusión Radio Mobile	33
Tabla 7 Scores RF-5800H-MP con plan frecuencial y medición diurna	36
Tabla 8 Scores RF-5800H-MP con plan frecuencial y medición nocturna	37
Tabla 9 Coordinadas puntos de medición de la cobertura (Google, 2021; Instituto Geográfico Nacional, 2021b)	52



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Tabla 1 Abreviaturas, siglas y acrónimos por orden alfabético

Nombre	Abreviatura
Academia General Militar	AGM
Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio	NASA
Boletín Oficial del Estado	BOE
Brigada Canarias XVI	BRICAN XVI
Búsqueda de canal libre	BCL
Capitán	Cap.
Compañía	Cía.
Compañía 16 de Transmisiones	CIATRANS 16
Comandante	Cte.
Doctor	Dr.
Don	D.
Ejército de Tierra	ET
<i>Electronic Counter Countermeasures</i>	ECCM
Error por bit	BER



Establecimiento Automático de Enlace	ALE
Fijo	FIX
Frecuencia digital	FD
Frecuencia fija de canal	FFC
Frecuencia fija general	FFG
Frecuencia máxima utilizable	MUF
Frecuencia modulada	FM
Frecuencia óptima de trabajo	FOT
<i>High Frequency</i>	HF
Instrucción y adiestramiento	I/A
Jefatura de los Sistemas de Información, Telecomunicaciones y Asistencia Técnica	JCISAT
Libre Hidalgo	L/H
<i>Line of Sight</i>	LOS
<i>Link Quality Analysis</i>	LQA
Número de manchas solares	SSN
Mando y Control	C2
Mínima frecuencia utilizable	LUF



Mixto	MIX
Modelo Digital del Terreno	MDT
Modelo de Terreno Irregular	ITM
Nacional de Inteligencia-Geoespacial	NGA
<i>Near Vertical Incidence Skywave</i>	NVIS
Onda electromagnética	OEM
Pequeña unidad	PU
Probabilidad de establecer enlace	REL
Puesto de mando	PC
Radioteléfono	RT
Relación señal a ruido	SNR
Salto de frecuencia	SFR
Sección	Sec.
Sistemas de Información y Telecomunicación	CIS
Teniente	Tte.
Trabajo de Fin de Grado	TFG
Versión 3	V3



<i>Very High Frequency</i>	VHF
Zona de operaciones	ZO



1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Tal y como nos exponen en la Revista del Ejército de Tierra Español, el Cap. D. Carlos Baselga Mateo y la Tte. Dña. Lidia Martínez Saura, ambos pertenecientes a la especialidad fundamental de Transmisiones del Ejército de Tierra (ET), la sociedad está cada vez más y más influenciada por el desarrollo de las TIC. Tanto es así, que la hiperconectividad que exige nuestro mundo actual nos obliga a llevar a cabo una continua evolución del desarrollo y explotación de los Sistemas de Información y Telecomunicación (CIS) (Ejército de Tierra, 2021). Es por ello por lo que, en quizás demasiadas ocasiones, esta tecnología y demás sistemas pueden llegar a desempeñar un papel vital e imprescindible en nuestras vidas, llegando incluso a desembocar en situaciones extremas de vida o muerte, muchas de ellas aplicadas al ámbito militar.

Permitir al escalón superior de mando asegurar el enlace y comunicación con sus tropas desplegadas sobre el campo de batalla, disponer de un mapa actualizado de la situación táctica de una unidad sobre el terreno, o establecer determinados servicios tales como mensajería instantánea, correo electrónico, voz, telefonía, videoconferencia o WAN PG, todos ellos tanto en territorio nacional como en las numerosas Zonas de Operaciones (ZO) donde están desplegadas las Fuerzas Armadas (FAS), marcan la diferencia entre la delgada línea que separa el fracaso del éxito de la misión. Es por ello que es de vital importancia establecer una cobertura y enlace óptimo con el fin de favorecer el C2 dentro del Ejército español y la comunicación entre sus diferentes integrantes.

Este trabajo está íntimamente ligado a todo lo anteriormente mencionado, sólo que en este caso se establecerá como área de estudio la isla de Gran Canaria. Bien es sabido que esta isla española, perteneciente al archipiélago canario, está situada en el Océano Atlántico a más de 1.000 Km de distancia de la Península Ibérica, lo cual puede llegar a suponer un verdadero inconveniente para las FAS españolas. A continuación, se dispone a explicar el porqué.

Como antecedentes, es importante destacar que la gran distancia que separa Gran Canaria de la Península Ibérica ha sido considerada hasta la fecha actual como un gran problema logístico y económico para la comunicación y trabajo conjunto entre los diferentes miembros de las FAS ubicados en la isla y Península Ibérica. Esto implica que la interacción mutua entre dichos miembros como parte de su instrucción y adiestramiento está limitada por la lejanía entre ambos, cobrando por tanto una mayor relevancia los enlaces a larga distancia entre la isla y la península. Adicionalmente, esto implica que el área fundamental de trabajo en la instrucción diaria de las tropas se restrinja principalmente a la propia isla, cobrando así un valor fundamental el enlace y cobertura dentro de la propia región.

Esto, sumado a la particular orografía y relieve de esta isla de origen volcánico, convierte en completamente imprescindible la elaboración de un estudio de la cobertura y enlace de las ondas de radio en las principales bandas de frecuencia donde trabaja y se comunica el ET. Es por ello que, ante la inexistencia de un estudio de este tipo en Gran Canaria, se pretende estudiar y analizar el enlace a través de la propagación de las ondas radioeléctricas en las bandas de VHF y HF en Gran Canaria, solucionando y resolviendo además los principales problemas de conectividad presentes, a fin de optimizar la cobertura para cualquier tipo de ejercicio estratégico o táctico dentro de la propia isla (utilizando tanto la banda VHF como la HF) o incluso con la península (únicamente banda HF).

Por consiguiente, se pretende llevar a cabo un estudio de cobertura con el objetivo de discernir aquellas zonas con una buena o mala conectividad, o, dicho de otra forma, analizar en qué zonas se podría establecer una comunicación de voz o datos de manera eficiente y efectiva.



A través de ello, se permite al usuario conocer aquellas localizaciones donde podría tener problemas de conectividad, aportándole además soluciones para la resolución de estos, como por ejemplo empleando repetidores que amplifiquen y den continuidad a la señal.

A tales efectos, este trabajo va a estar estructurado en dos partes bien diferenciadas. Una primera parte, basada en un estudio teórico donde se va a analizar y simular la cobertura teórica de la isla a través de diversas herramientas software, y una segunda parte, fundamentada sobre un estudio empírico-práctico, en el que se van a contrastar estos resultados teóricos con los resultados físicos obtenidos a través de diversas mediciones sobre una serie de puntos sensibles establecidos en la isla. A través de este análisis, se pretende posibilitar el establecimiento de una comunicación lo más fluida, fuerte y clara posible entre las distintas unidades militares que trabajan diariamente en Gran Canaria e incluso entre el conjunto isla-península.

2 OBJETIVOS, ALCANCE Y METODOLOGÍA

2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo principal de este trabajo es analizar la cobertura en las bandas de VHF y HF en la isla de Gran Canaria, apoyándose en el empleo de mapas de cobertura radioeléctrica.

De este modo, para la óptima consecución de este propósito, se van a llevar a cabo los siguientes objetivos específicos:

- Conocer las diferentes características y modos de propagación de las ondas de radio en las bandas de frecuencia de VHF y HF.
- Analizar, recabar información y comprender el funcionamiento de los diferentes radioteléfonos (RT) y equipos hardware que dispone la CIATRANS 16, perteneciente al Batallón de Cuartel General de la BRICAN XVI, ubicado en la Base General Alemán Ramírez, y que van a ser empleados para la realización de este TFG.
- Estudiar el relieve y la orografía de la isla de Gran Canaria.
- Elaborar la modelización teórica de cobertura de Gran Canaria a través de diversas aplicaciones software de cálculo de enlaces y propagación radioeléctrica.
- Realizar *in situ* mediciones de cobertura en determinados puntos sensibles de la isla a través de un itinerario marcado, tanto con los equipos que operan en la banda de VHF, como con los de HF. Se establecerán un itinerario en una serie de puntos de paso donde se procederán a tomar medidas en la calidad de la señal.
- Contrastar los resultados obtenidos del estudio teórico con el empírico-práctico.

Asimismo, el objetivo secundario del presente estudio es servir como modelo para realizar cualquier estudio de cobertura radioeléctrica en cualquier situación geográfica. Finalmente, se pretende concienciar de la importancia que este puede llegar a tener, ya sea tanto para operaciones en el ámbito militar, como en el mundo civil.

Los objetivos específicos para la consecución de este objetivo secundario son:

- Explicar de manera clara, sencilla y concisa las diferentes partes en las que se va a componer el estudio cartográfico.
- Destacar los puntos de mayor relevancia, puntualizando aquellas cuestiones de mayor



importancia.

2.2 METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA

Para la consecución de los objetivos del proyecto, los procedimientos que se van a emplear tanto para la recopilación de la información necesaria, como para su correcto tratamiento, incluyen una serie de métodos cuantitativos, cualitativos y mixtos.

En una primera fase, se va a realizar una investigación y revisión documental con la que extraer aquella información relevante, por un lado, acerca del funcionamiento de la propagación radioeléctrica en las bandas de frecuencia de explotación militar VHF y HF, y por el otro, sobre los equipos y material proporcionados por la Unidad militar (CIATRANS 16) para el desarrollo del trabajo. Existen una serie de cuestiones que resultan de interés para este estudio, como son: ¿las ondas se propagan de la misma forma en cada banda de frecuencias?, ¿se emplean los mismos equipos y herramientas para su explotación?, ¿cuáles son sus principales características? A estas cuestiones se dará respuesta a lo largo de los apartados 3.1 y 3.2.

Acto seguido, se efectuará un análisis del terreno de la isla de Gran Canaria, a través de una revisión documental y bibliográfica, de la cual se extraerán las conclusiones pertinentes. En este caso las cuestiones de interés son: ¿cómo es la orografía y relieve de esta isla de origen volcánico?, ¿en qué afecta a la propagación de las ondas?, ¿se puede establecer un repetidor de señal en cualquier parte de la isla? Estas y otras cuestiones estarán expuestas y analizadas en el apartado 3.3 del trabajo.

Posteriormente, se llevará a cabo un estudio teórico de cobertura basado en el empleo de distintas herramientas software. En primer lugar, se va a emplear la versión gratuita de Xirio Online, ya que es una herramienta polivalente para el estudio de ambas bandas y que ya es conocida en un número considerable de Unidades del ET. En segundo lugar, como alternativa al software de Xirio Online y a fin de mejorar la eficiencia del estudio, se va a utilizar la aplicación de Radio Mobile para la banda de VHF, y VOACAP para el estudio específico de HF. El empleo de estas herramientas alternativas se basa en su gran reconocimiento como softwares profesionales de gran precisión y eficacia en sus respectivas bandas. Estos resultados están expuestos en el apartado 3.4.

Seguidamente, se va a efectuar la fase de validación de resultados. En ella, se analizará *in situ*, a través los equipos proporcionados por la Unidad militar, la coherencia del estudio teórico realizado con anterioridad frente a la cobertura real medida sobre el terreno. En otras palabras, se comparará y contrastará la cobertura teórica obtenida mediante modelización con la cobertura real existente en la isla. Para ello, se diseñará un itinerario que discurra por una serie de puntos sensibles preestablecidos en los que se realizarán mediciones de enlace y cobertura. Los resultados obtenidos se presentarán en una matriz de confusión, siendo esta una herramienta de análisis en forma de tabla, a través de la cual se evalúa el rendimiento del estudio mediante el acierto en las predicciones (Recuerdo de los Santos, 2021). Dichos resultados se incluyen en el apartado 4.

3 DESARROLLO: ESTUDIO TEÓRICO

A lo largo de este apartado, se va a analizar en un primer lugar la forma en que se propagan las ondas de radio en las bandas de VHF y HF. En un segundo lugar, se van a estudiar los diferentes equipos que se emplearán a lo largo de este trabajo para la explotación de las bandas



de frecuencia citadas anteriormente. En tercer lugar, se va a realizar un estudio del terreno de la isla. Y en cuarto y último lugar, se va a llevar a cabo la modelización teórica de la señal a través de mapas radioeléctricos de cobertura.

3.1 ANÁLISIS DE LA FORMA DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS RADIOELÉCTRICAS EN LAS BANDAS DE FRECUENCIA DE VHF Y HF

Las bandas de VHF y HF son dos de los principales rangos de frecuencia que emplean las FAS para desarrollar una ingente cantidad de sus radiocomunicaciones a nivel táctico y estratégico, por lo que cobra una vital importancia conocer el funcionamiento y demás particularidades por las que se rigen, como son: ¿las ondas en cada banda de frecuencias se propagan de la misma forma?, ¿cómo lo hacen?, ¿cuáles son las principales ventajas e inconvenientes de cada banda?, ¿se utilizan los mismos equipos físicos para la explotación de cada una de ellas?

A continuación, se va a dar respuesta a estas cuestiones consideradas de gran relevancia para la correcta comprensión y desarrollo de este trabajo. Primeramente, se comenzará con el análisis de la propagación radioeléctrica en la banda de VHF y, posteriormente, se continuará con el análisis de HF.

3.1.1 Propagación de las ondas radioeléctricas en la banda de VHF

Esta banda de frecuencias abarca el espacio del espectro electromagnético comprendido entre los 30 y los 300 MHz, intervalo en el cual también está incluida la banda comercial de FM (87,5 MHz a 108 MHz). La banda de VHF se caracteriza principalmente por una excelente calidad de sonido en la recepción, uno de los principales motivos por el que se utiliza en diversos ámbitos, tales como radiodifusión, televisión, enlaces tácticos o radionavegación (Luque Ordóñez, 2012). No obstante, su alcance es relativamente limitado, normalmente decenas de kilómetros, y está fuertemente influenciado por los obstáculos existentes entre la antena emisora y receptora, siendo este su mayor inconveniente.

¿Cómo se propaga la energía en esta banda frecuencial? Resulta que este tipo de ondas con frecuencias tan altas, se transmiten de una manera similar a como lo hace la luz, lo cual significa que están fuertemente influenciadas por los obstáculos que le rodean, a partir de los cuales se reflejan, difractan o detienen (Cardama Aznar *et al.*, 2002). Por consiguiente, pueden propagarse mediante diferentes modos (ver ilustración 1). Su forma de propagación principal es a través de las ondas de espacio y mediante un fenómeno denominado difracción, aunque también podrían llegar a transmitirse por reflexión en las regiones más altas de la troposfera en condiciones muy excepcionales (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2021a). ¿Por qué se caracterizan entonces cada uno de estos modos de propagación?

En lo que respecta a las ondas de espacio o troposféricas, como ya se mencionó anteriormente, son su forma de propagación más común. Este tipo de ondas están formadas por la superposición de una onda directa y otra onda reflejada, ambas transmitidas bajo la troposfera (Universidad Rey Juan Carlos, 2014).

En la línea de lo anterior, por un lado, se encuentra la onda de visión directa, donde la energía se transmite entre el emisor y receptor a través de una línea recta por el camino más corto a través del denominado enlace *Line of Sight* (LOS) (Denisowski, 2020). En este caso, es absoluta y completamente imprescindible la existencia de una buena visibilidad entre la antena



emisora y la antena receptora (Salmerón, 1990).

Justo aquí, es donde juegan un papel protagonista los obstáculos existentes entre ambas fuentes, puesto que pueden llegar a atenuar la señal hasta interrumpirla, siendo por tanto la orografía, el terreno y la forma esférica de la Tierra, factores muy determinantes e influyentes en este tipo de propagación. Es por ello que una gran parte del estudio de este tipo de enlaces se cimienta sobre los elipsoides de Fresnel, considerándose un enlace con visión directa aquel que tenga despejado de obstáculos más de un 60 % del primer elipsoide, región donde se concentra la mayor parte de la energía del enlace (Cardama Aznar *et al.*, 2002).

Por otro lado, se encuentra la onda reflejada, cuya energía se propaga a través de la reflexión que sufre la onda electromagnética (OEM) con el suelo, el cual actúa como si de un espejo se tratara. Sin embargo, las ondas que se elevan hacia la troposfera se pierden finalmente en el espacio, puesto que se emplean frecuencias tan altas en esta banda, que no son capaces de reflejarse en ninguna de las capas que componen la atmósfera.

La onda reflejada puede llegar a ser muy útil, puesto que reflexiones en obstáculos que se encuentren despejados, pueden hacer posible que la señal se siga propagando cuando la línea de visión directa entre emisor y receptor está obstruida. De este modo, finalmente al receptor llega un frente de ondas directo (enlace LOS) y uno o varios desfasados procedente de las ondas reflejadas en montañas, edificios, etc., lo cual puede generar pequeños desvanecimientos rápidos (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2021a).

Los principales factores que afectan a este tipo de propagación son, por tanto, a parte de los obstáculos entre emisor y receptor, las pérdidas por absorción del suelo, el desfase entre la onda directa y la reflejada, y la atenuación que sufre la señal en aire. Y es que la presencia de gases y concentración de diferentes tipos de partículas atmosféricas, pueden provocar una cierta curvatura y cambios en la trayectoria de las ondas, llegando incluso a refractarse. Adicionalmente, otros fenómenos de carácter meteorológico, como por ejemplo las precipitaciones, también añaden una atenuación adicional (Salmerón, 1990).

Una vez analizadas las ondas espaciales, es importante tener en cuenta la propagación mediante difracción, puesto que está íntimamente ligada a las ondas espaciales analizadas anteriormente. Cuando una onda se encuentra con un obstáculo, este vuelve a radiar parte de la energía que le llega, es decir, una onda aun viendo su trayectoria obstaculizada, puede seguir propagándose a través de una desviación de parte de su energía con un nuevo frente de ondas, aunque agregando una evidente atenuación añadida (Cardama Aznar *et al.*, 2002).

Por último, se encuentra la propagación menos común en esta banda, la difusión/dispersión troposférica. Consiste en una serie de reflexiones difusas en la troposfera que se producen por discontinuidades ocasionadas a causa de fuertes variaciones físicas en la misma. Es el único enlace en la banda de VHF en llegar a grandes distancias, entre 300 y 500 km, sin embargo, sufre grandes desvanecimientos que aumentan con la distancia, motivados por las condiciones atmosféricas. Esto, sumado a las grandes potencias de emisión que se necesitan, hace que este tipo de enlace sea poco efectivo y esté practicante en desuso (Cardama Aznar *et al.*, 2002).

De lo anteriormente comentado, se puede concluir por tanto que en la banda de VHF las ondas pueden llegar a conseguir un alcance teórico máximo de hasta 50 km (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2016), distancia que depende de los diversos factores mencionados y del tipo de antena empleada. Este alcance, en la práctica se ve mucho más reducido, y si se tiene en cuenta que la isla de Gran Canaria, bajo su forma circular con diámetros que superan los 50 km en algunos puntos, permite deducir la necesidad de implantar repetidores que amplifique la señal y permitan asegurar el enlace en la mayor extensión de la isla. Adicionalmente, la particular orografía canaria, estudiada en el apartado 3.3, limitará y dificultará



aún más el enlace, acrecentando la necesidad de la implantación de estos dispositivos. Por consiguiente, el establecer la máxima cobertura con el menor número de repetidores posibles, será uno de los principales objetivos en esta banda de frecuencias.

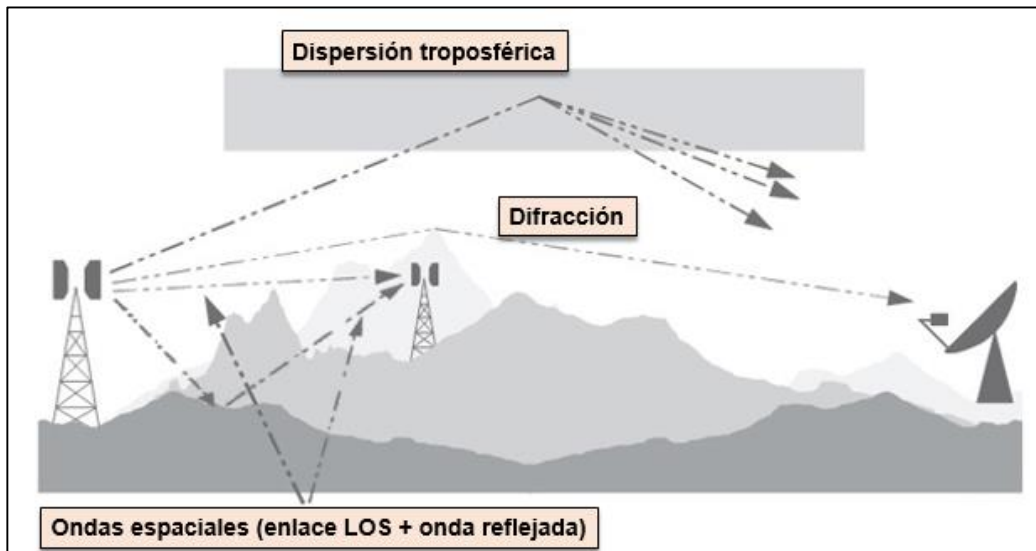


Ilustración 1 Propagación en VHF (Santos Reyes, 2015)

3.1.2 Propagación de las ondas radioeléctricas en la banda de HF

La banda de HF se engloba en el intervalo de frecuencias comprendido entre 3 y 30 MHz. Dicho rango de frecuencias se caracteriza fundamentalmente, a diferencia de la banda de VHF, por tener un gran alcance, siendo empleado en radio fusión, comunicaciones navales y enlaces tácticos y estratégicos punto a punto (Universidad Rey Juan Carlos, 2014). Pero ¿cómo se propagan entonces este tipo de ondas radioeléctricas? Pueden transmitirse esencialmente de dos maneras diferentes (ver ilustración 2). Una de ellas mediante ondas de superficie, y la otra, basada en ondas de cielo.

En cuanto a las ondas de superficie/tierra, es importante destacar que tienen su aplicación práctica más eficiente en frecuencias inferiores a 10 MHz (aunque pueden llegar a ser efectivas hasta los 30 MHz), permitiendo alcanzar una distancia de hasta un centenar de kilómetros en función de la altura de la antena, conductividad del suelo y frecuencia empleada (Denisowski, 2020; Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2021b). En ellas, una parte de la energía transmitida se difracta, rodeando los obstáculos que se va encontrando a su paso a la vez que se propaga siguiendo la curvatura terrestre a una pequeña distancia del suelo (Cardama Aznar *et al.*, 2002).

Su empleo está destinado principalmente a radio fusión y enlaces militares de HF de media y corta distancia. Es relevante tener en cuenta que este tipo de propagación se ve fuertemente influenciada por varios factores bien diferenciados, siendo estos la potencia de emisión, el tipo de polarización de la onda, la conductividad del suelo y la frecuencia. Asimismo, cuanto mayor sea la conductividad del suelo, la cual mejora notablemente con el empleo de bajas frecuencias, mayor será el alcance que pueda recorrer la OEM (Denisowski, 2020). Además, hay que resaltar que la polarización de la onda debe ser vertical para evitar fuertes absorciones del suelo y que cuanto mayor sea la potencia de emisión, mayor será el alcance que pueda conseguir dicha onda.



Por otra parte, la energía en la banda de HF también puede propagarse a través de las ondas de cielo, que representan aquellas OEM que se reflejan superiormente en las capas ionizadas que forman la ionosfera, principalmente las capas E y F, e inferiormente son reflejadas en la superficie de la Tierra, hasta establecer enlace entre el emisor y receptor, tras una o varias reflexiones entre ionosfera y superficie terrestre (Pellejero Ibáñez, 2014).

Es de vital relevancia conocer una serie de particularidades y condiciones necesarias para que pueda llevarse a cabo el enlace en esta banda. En primer lugar, es imprescindible que la frecuencia con la que se va a trabajar sea inferior a la frecuencia máxima utilizable (MUF). La MUF es un valor que depende principalmente de dos factores: por un lado, del grado de ionización de la capa de la ionosfera donde se produzca la reflexión de la onda, y por el otro, de la geometría del enlace. Esto implica que la MUF no es un valor fijo, sino que varía dependiendo del ángulo con el que la onda sale de la antena (geometría) y de las condiciones de la ionosfera, la cuales están estrechamente ligadas a la actividad del sol. Por consiguiente, es condición indispensable que la frecuencia que se emplee sea inferior a este valor para la efectividad del enlace (ver ilustración 2) (Denisowski, 2020).

En esta misma línea, es relevante tener en consideración que la MUF puede variar en cada una de las reflexiones ionosféricas que se produzcan, siendo establecida como la MUF de todo el enlace, aquella que es la menor. Sin embargo, no solo es suficiente con que la frecuencia de trabajo sea inferior a la MUF para asegurar el enlace, además se debe tener en cuenta la atenuación y, por consiguiente, la denominada mínima frecuencia utilizable (LUF). La señal se va atenuando conforme va atravesando las diferentes capas que conforman la ionosfera, dependiendo, por un lado, del grado de ionización de ionosfera, y por el otro, de la frecuencia. Concretamente, el grado de ionización aumenta durante el día a causa de la actividad solar, mientras que, con relación a la frecuencia, generalmente cuanto menor es la frecuencia, menor es la atenuación, permitiendo así enlaces con una mejor cobertura y un mayor alcance (Luque Ordóñez, 2012; Pellejero Ibáñez, 2014).

Por consiguiente, durante el día, bajo la influencia del sol, la atenuación es tan alta, especialmente en la capa D, que dificulta y deteriora la calidad de los enlaces, destacando aquellos con frecuencias bajas, hasta el punto de llegar a interrumpirlos. Por ello, es necesario el empleo de frecuencias más altas que durante la noche, consiguiendo así superar la relación señal a ruido (SNR) necesaria para el establecimiento del enlace. Esto se refleja en un valor variable, denominado LUF, el cual debe ser inferior a nuestra frecuencia de trabajo (ver ilustración 2). Para destacar más aún la magnitud e influencia de la actividad solar en este tipo de enlaces, la densidad de ionización en las capas ionosféricas E y F por el día, es aproximadamente 100 veces mayor que por la noche (Pellejero Ibáñez, 2014; Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2021b).

De esta forma, la actividad solar tiene una influencia absolutamente determinante en el grado de ionización de la ionosfera, y por ende en el correcto funcionamiento del enlace HF. El sol tiene ciclos de actividad magnética de duración aproximada de unos 11 años, dentro de los cuales existen periodos de mayor actividad, donde el número de manchas solares (SSN) se incrementa, acrecentando la ionización de las partículas en la ionosfera. Dicha actividad a efectos prácticos se ve reflejada en variaciones de la propagación, la cual fluctúa dependiendo de la estación del año, hora del día y momento del ciclo solar en el que se realice el enlace (Pellejero Ibáñez, 2014).

Una vez analizado todo esto, es importante añadir que este tipo de propagación está diseñada para grandes distancias, de hasta 4.000 km, con tan solo una sola reflexión entre ionosfera y superficie terrestre, y hasta 10.000 kilómetros si se emplean varios saltos (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2021b; Unión de Radioaficionados Españoles, 2021).



No obstante, también puede utilizarse para cortas y medias distancias (inferiores a 300 km). en comunicaciones tácticas militares (Pellejero Ibáñez, 2008), como es el caso del presente estudio de cobertura en la isla de Gran Canaria. Este tipo específico de enlace ionosférico se denomina NVIS, propagación por onda ionosférica de incidencia casi vertical.

Por tanto, el enlace NVIS será la forma de propagación ionosférica empleada en la banda de HF para el desarrollo de este trabajo. La principal diferencia de este tipo de propagación con la propagación por reflexión ionosférica normal reside en el ángulo de incidencia con el que el rayo llega a la ionosfera. Lo que se pretende en este tipo de enlace es forzar a la onda, a través de un tipo específico de antena, a propagarse con un ángulo de salida respecto a la superficie terrestre mucho mayor de lo que haría mediante una reflexión ionosférica normal, empleándose ángulos de salida comprendidos entre 70° y 90° , cuando lo usual son ángulos de despegue aproximados de 3° (Pellejero Ibáñez, 2008; Denisowski, 2020). De este modo, el rayo incide sobre la capa de la ionosfera en la que se va a reflejar de una manera prácticamente vertical, consiguiendo así disminuir la longitud existente entre cada salto que se produzca en la reflexión, mejorando la cobertura y enlace en pequeñas distancias, eliminando completamente o minimizando las zonas de sombra donde no habría cobertura (ver ilustración 2) (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2021b).

Adicionalmente, este tipo de enlace se caracteriza por utilizar las frecuencias más bajas de la banda de HF, presentando así una baja probabilidad de perturbación o interceptación enemiga como punto positivo, pero teniendo niveles de ruido considerablemente elevados. También es interesante explicar que, cuando el emisor recibe energía tanto de la onda de superficie como de la onda de la reflexión ionosférica, pueden existir problemas de desvanecimiento, puesto que estas suelen llegar desfasadas. En esta misma línea, se producen otros desvanecimientos repentinos, pero estos son motivados por las variaciones en la ionización de las distintas subcapas, fenómeno que se denomina fading (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2021b).

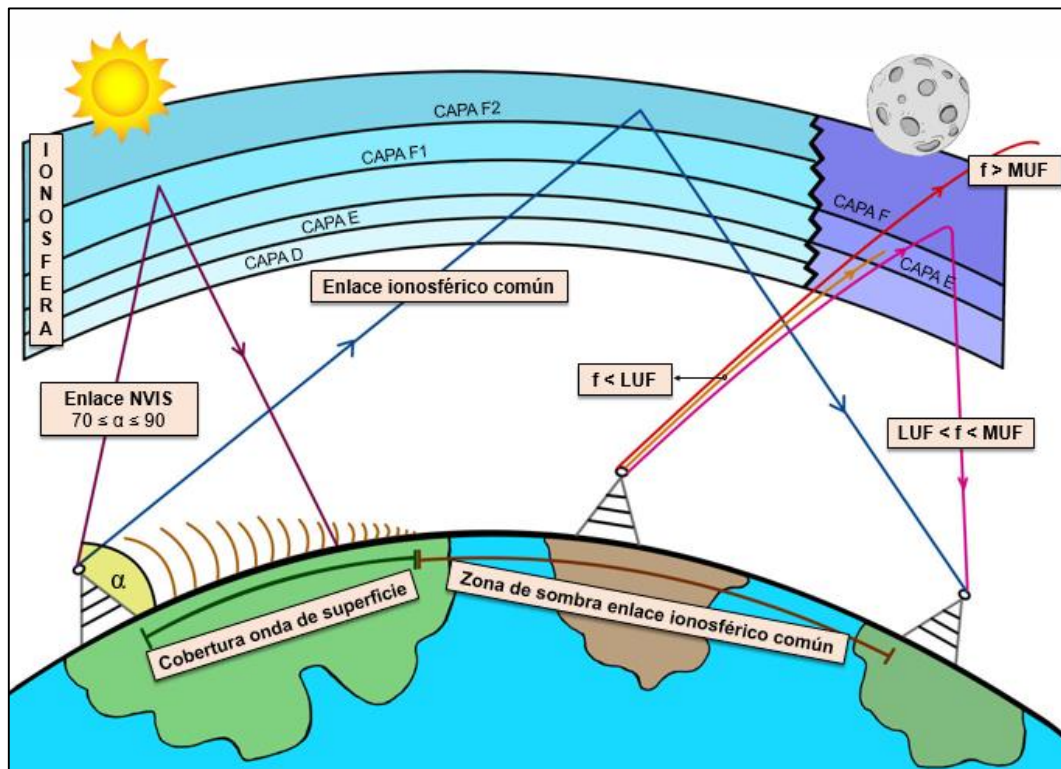


Ilustración 2 Formas de propagación en HF. Dónde: f (frecuencia), MUF (frecuencia máxima utilizable), LUF (frecuencia mínima utilizable)



Como conclusión, la energía se propaga de modos diferentes dependiendo del tipo de banda de frecuencia que se explote. Es por ello por lo que cada banda adquiere unas características diferentes en cuanto a su alcance, calidad en la señal, modo en el que le afectan factores como la atenuación, interferencias, etc.

Por consiguiente, se utilizan diferentes equipos para la correcta explotación de la banda de VHF y HF, medios adaptados a sus diferentes modos de propagación y funcionamiento. No obstante, algunos de estos equipos radioeléctricos pueden llegar a presentar ciertas compatibilidades entre ambas bandas, aunque en la práctica estas compatibilidades son insuficientes para su óptima explotación.

3.2 ANÁLISIS DEL MATERIAL HARDWARE EMPLEADO EN EL ESTUDIO

Una vez analizadas las diferentes formas en las que se propagan las ondas de radio en la banda de VHF y HF, es conveniente tener en cuenta que a lo largo de este proyecto se va a trabajar tanto con herramientas hardware, como software. Primeramente, a lo largo de la parte final de este estudio teórico, será cuando se vayan a utilizar una serie de herramientas software de simulación de cobertura (ver apartado 3.4.1), mientras que, por otro lado, será en el transcurso del estudio empírico-práctico de validación de resultados (ver apartado 4) donde se van a emplear de manera física los equipos hardware proporcionados.

Por consiguiente, en este apartado se van a analizar los diferentes equipos hardware proporcionados por la CIATRANS 16 de la BRICAN XVI para el desarrollo de este trabajo. La utilidad de este análisis es única e inequívoca, y es que esta parte del estudio se apropia de una relevancia enorme, fundamentada principalmente en dos motivos. El primero de ellos se basa en la necesidad de conocer las especificaciones técnicas y demás particularidades que caracterizan a los diferentes equipos que se van a emplear. Las herramientas software de simulación de cobertura que se van a utilizar precisan necesariamente de estas características que definen a cada equipo (ganancia, potencia de emisión, frecuencias, etc.). El segundo motivo conecta con el menester de conocer adecuadamente cada uno de los dispositivos con los que posteriormente, en el estudio empírico-práctico, se va a trabajar, siendo importante un buen conocimiento de estos para así ejercer una correcta explotación de ellos.

De este modo, se va a disponer de 2 modelos diferentes de RT, además de 3 tipos de antenas. El radioteléfono se define como un “teléfono sin hilos, en el que la comunicación se establece por ondas electromagnéticas” (Real Academia Española, 2021b), mientras que una antena es un “dispositivo de los aparatos emisores o receptores que, con formas muy diversas, sirve para emitir o recibir ondas electromagnéticas” (Real Academia Española, 2021a).

En resumen, partiendo de lo general a lo particular, se va a proceder a realizar un análisis específico de los siguientes medios físicos. En ámbito de los RT, se va a emplear el transceptor PR4GE F@stnet para la banda de VHF y el RF 5800H-MP para la banda de HF. Mientras que en el campo de las antenas se utilizará, por un lado, la antena LERC LB3088AG y la antena VHF3088VM para la banda de VHF, y por otro lado, la antena NVIS en semibucle Chelton para HF.

3.2.1 Equipos hardware empleados en la banda de VHF

El transceptor PR4GE F@stnet es un RT capaz de trabajar tanto en la banda de VHF como en la de frecuencia modulada (FM), no obstante, a lo largo de este trabajo va a ser utilizado



exclusivamente la banda de VHF (30-87,975 MHz). Su denominación de uso cotidiano es "PR4G", nombre con el que también va a ser identificado a lo largo de este trabajo. En este proyecto se va a utilizar concretamente su versión 3 (V3).

Las principales características por las que se define este RT son su elevado nivel de protección electrónica *Electronic Counter Countermeasures* (ECCM), el cual posibilita llevar a cabo transmisiones seguras donde los ambientes electromagnéticos son adversos, y su flexibilidad y fiabilidad, permitiendo mantener de forma efectiva una comunicación en movimiento. Este RT es empleado principalmente en pequeñas unidades (PU) (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2016).

En cuanto a sus modalidades, el RT PR4G cuenta con 2 configuraciones distintas, y a pesar del hecho de que ambas emplean el mismo transceptor, cada configuración cuenta con una serie de accesorios diferentes que permiten modificar sus capacidades. De esto modo, en un primer lugar se encuentra la configuración portátil, denominada RT-9210 (ver ilustración 3), mientras que en segundo lugar aparece la configuración vehicular, designada como RT-9310 (ver ilustración 4). En este trabajo, se va a utilizar la configuración vehicular, ya que ofrece una mayor potencia de emisión y, por consiguiente, un mayor alcance de la señal gracias a su amplificador de potencia de 50 W.



Ilustración 3 Configuración portátil RT-9210
(infoddefensa.com, 2018)



Ilustración 4 Configuración vehicular RT-9310
(Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2016)

En lo que respecta a su funcionamiento, es importante destacar que este RT emplea diferentes modos de trabajo. Por un lado, se encuentran los modos de frecuencia fija analógica, donde el RT opera en una frecuencia fija y no se cifra la información que se transmite. Sin embargo, a través de este modo existe la posibilidad de establecer enlace con otros RT que no pertenezcan a la familia PR4G. Los modos de frecuencia fija analógica son: frecuencia fija general (FFG) y frecuencia fija de canal (FFC).

Por otro lado, se presentan los modos digitales, modos de trabajo que, a diferencia de los anteriores, sí cifran la información mediante las claves TRANSEC y COMSEC. Dentro de los modos digitales se pueden encontrar los siguientes tipos: frecuencia digital (FD), salto de frecuencia (SFR), búsqueda de canal libre (BCL) y mixto (MIX), siendo estos 3 últimos interoperables entre sí (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2016). Para el desarrollo de este estudio se va a emplear el modo digital de SFR. Este es el modo de trabajo más empleado, ya que ejecuta 300 saltos de frecuencia por segundo, empleando una secuencia pseudoaleatoria dentro del limitado margen de frecuencias del que se dispone, ofreciendo así una gran protección frente a posibles ataques de interceptación enemiga (Amper Programas, 2012).

Una vez concluido el modo de funcionamiento a emplear, es importante especificar que dentro del modo digital de SFR, el RT puede ser empleado para transmitir voz (fonía), datos (por ejemplo, unas coordenadas GPS o un archivo de texto) o como relé (repetidor), incorporando diferentes modos IP de comunicación, los cuales se agrupan en 3 categorías: IP-SAP, IP-MUX



y SUPER-MUX (estos 2 últimos necesitan trabajar previamente en SFR) (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2016).

Resumidamente, el modo IP-SAP tolera solo el envío y recibo de datos, el modo IP-MUX permite compatibilizar voz y datos simultáneamente en una misma transmisión/recepción (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2016), y el modo SUPER-MUX es una evolución del IP-MUX que realiza una gestión más eficiente del ancho de banda de voz y datos, utiliza sincronismo por GPS y trabaja con mayores velocidades de transferencia (Marín Aguilera, 2019).

Una vez aclaradas las principales diferencias de los modos IP de comunicación, sin duda alguna, el modo SUPER-MUX es el modo ideal de trabajo en base a todas las ventajas que presenta respecto al resto de modos, sin embargo, no todas las radios PR4G V3 que van a ser empleadas a lo largo de este ejercicio están actualizadas a él, quedando descartado por tanto por este motivo. Sin embargo, esto no va a suponer ningún tipo de inconveniente en la consecución de los objetivos previamente marcados, puesto que, en la posterior fase práctica de validación de resultados, se va a analizar la calidad de la señal a través de enlaces por voz, empleando por tanto el modo IP-MUX.

Una vez analizado el radioteléfono, únicamente queda por analizar el tipo de antena que se va a emplear. En este caso, se van a utilizar 2 tipos. Por un lado, la antena VHF sobre mástil HC-30 denominada LERC LB3088AG, y por el otro, la antena vehicular VHF3088VM.

Ambas se tratan de antenas omnidireccionales, lo cual significa que la antena radia la energía que transmite de manera similar en todas las direcciones. En otras palabras, consigue que la onda se propague en todos los sentidos por igual. ¿Tendría sentido emplear una antena no omnidireccional, es decir, que sea directiva en este trabajo? La respuesta es no, ya que concentraría la mayor parte de su energía en una región muy concentrada y limitada, cuando en este caso, lo que realmente interesa es que las ondas se propaguen en todas las direcciones bajo la misma forma, con el objetivo de conseguir la máxima cobertura en la mayor extensión y rango de direcciones posible.

Para un mayor detalle de las especificaciones técnicas tanto del RT PR4G V3, como de estas 2 antenas se puede consultar el Anexo A.

3.2.2 Equipos hardware empleados en la banda de HF

Para la explotación de la banda de HF se va a emplear el sistema de comunicación RF-5800H MP, también denominado como “5800” en su empleo cotidiano. Se trata de un transceptor multibanda táctico de origen americano que presenta la capacidad de operar tanto en la banda de frecuencias de VHF como en la de HF, siendo esta última banda (3-30 MHz) en la cual será empleado. Al igual que el RT PR4G V3, permite tanto la emisión y recepción de datos como de voz.

En lo que respecta a sus diferentes configuraciones, utiliza dos tipos (ver ilustraciones 5 y 6). Primeramente, una configuración portátil o *manpack* que garantiza una movilidad plena, destacando por sus misiones de reconocimiento a largo alcance. En segundo lugar, una configuración vehicular que permite obtener una mayor potencia de emisión gracias al empleo de su correspondiente amplificador. Adicionalmente, también puede utilizarse de un modo fijo o transportable, óptimo para su establecimiento en Cuarteles Generales o a bordo de buques.

En este estudio se va a emplear la configuración de tipo vehicular, decisión fundamentada en dos motivos. El primero de ellos, se basa en el tipo concreto de enlace que se va a llevar a cabo, el enlace NVIS. Y es que resulta, que, con el objetivo de conseguir una mejor cobertura en



pequeñas y medias distancias, como es el caso de la isla de Gran Canaria, se va a emplear este tipo específico de enlace ionosférico en el que son necesarias un determinado tipo de antenas vehiculares. Y el segundo motivo, reside en la particular orografía volcánica de la isla, caracterizada por sus grandes barrancos, calderas y macizos que desembocan en venerables acantilados sobre la costa. Ante este tipo de entornos montañosos e irregularidades, el enlace NVIS se presenta como una forma de propagación óptima para mejorar las características de la común propagación por reflexión ionosférica (Denisowski, 2020).



Ilustración 5 Configuración portátil RF 5800H-MP (Harris Corporation, 2006)



Ilustración 6 Configuración vehicular RF 5800H-MP (Harris Corporation, 2003)

Por consiguiente, en base al anterior párrafo, es completamente necesaria la configuración vehicular de la 5800. Esto se debe en primer lugar, a que para establecer un enlace NVIS son necesarias un tipo específico de antenas que consiguen radiar la energía en ángulos de salida comprendidos entre 70° y 90° (Pellejero Ibáñez, 2008). En este caso se empleará la antena en simibucle NVIS Chelton, dispositivo que debe montarse sobre un vehículo, siendo por tanto definitivamente necesaria la configuración vehicular del RT. Y, en segundo lugar, debido a que gracias al amplificador vehicular de 150 W de potencia que se va a emplear, se obtendrá una potencia de emisión mayor que permitirá aumentar el alcance de la señal.

En cuanto a la seguridad de este RT, emplea claves de encriptación *Citadiel* y *Dadotek* para asegurar la protección en sus comunicaciones (Harris Corporation, 2006). En base a estas, permite trabajar con distintos modos de trabajo y diferentes tipos de modulación.

Respecto a sus modos de funcionamiento, la 5800 puede trabajar con cinco tipos diferentes: Fijo (FIX), Establecimiento Automático de Enlace (ALE), Hop, 3G y 3G+. En función del modo que se emplee, se va a utilizar un tipo de modulación u otra (LSB, USB, AME, CW y FM). En este trabajo, el RT va a ser explotado a través del modo 3G. Este modo de trabajo es una versión evolucionada del modo ALE, el cual permite establecer enlaces en red o punto a punto de manera rápida y eficiente. Las principales ventajas de este modo frente a otros se pueden resumir en enlaces más rápidos con mejor SNR, mayor eficiencia en el protocolo de acceso a los canales, uso de diferentes planes de frecuencia para mejorar la seguridad y establecimiento de enlace y tráfico de datos bajo el mismo tipo de modulación (USB) (Harris Corporation, 2003).

Adicionalmente, el modo 3G permite escoger automáticamente de entre sus 72 canales, aquellos que presenten una mayor calidad en la señal dentro del plan de frecuencias establecido. Esto es posible gracias al denominado *Link Quality Analysis* (LQA), sistema que realiza un análisis de la calidad del enlace, evaluando diferentes parámetros de este, tales como la Tasa de Error por Bit (BER) o la SNR. Dicho análisis, se refleja en la pantalla de la Harris 5800 a través de los denominados "*scores*", siendo estos unos valores enteros comprendidos entre el número 0 y el 100, que miden la calidad de la señal (RT-21, 2012). De esta forma, el 0 hace referencia al enlace con peor calidad posible, mientras que el 100 se corresponde con la mayor calidad



posible. Estos *scores* o puntuaciones van a ser empleadas en el posterior estudio práctico de validación de resultados.

Para un mayor detalle de las principales especificaciones técnicas, tanto del RF 5800H-MP, como de la antena NVIS de semibucle Chelton, se puede consultar el Anexo A.

3.3 ESTUDIO DEL TERRENO

Una vez analizada la forma en la que se propaga la señal junto con los diferentes equipos hardware empleados para su explotación, se va a realizar un estudio del terreno de la isla de Gran Canaria. Concretamente, en primer lugar, se va a llevar a cabo un análisis de la orografía y relieve insular, y seguidamente se va a estudiar dónde se pueden establecer repetidores como solución a los teóricos problemas de conectividad presentes en la banda de VHF.

Es imprescindible llevar a cabo un estudio sobre el relieve de la zona donde se pretende realizar un estudio de cobertura, si bien es cierto que la relevancia de un estudio de este tipo varía en función de la banda frecuencia con la que se trabaje. De esta forma, la incidencia que presente la topografía sobre la señal puede afectar al enlace en mayor o menor medida. A continuación, se procede a llevar a cabo este análisis.

3.3.1 Análisis de la orografía y relieve de la isla de Gran Canaria

Es interesante plantearse si afecta del mismo modo la orografía y el relieve de Gran Canaria a las bandas de VHF y HF. Mientras que en la banda de VHF estos factores adquieren un papel completamente protagonista, en la banda de HF su influencia pasa a un plano secundario.

Tal y como se indicó en el apartado 3.1.1, el modo en el que se propagan las OEM en la banda de VHF hace que los obstáculos presentes entre el emisor y el receptor, tales como formas montañosas, depresiones del terreno, etc., sean considerados como el principal problema para establecer enlace en esta banda. Por tanto, estos pueden llegar a condicionar la conectividad de este enlace a causa de los problemas de visibilidad existentes entre la antena emisora y receptora, principio fundamental en este tipo de propagación.

Por consiguiente, es muy importante conocer los diferentes accidentes que caracterizan el terreno con la finalidad de minimizar los posibles problemas de enlace existentes y maximizar el número y posicionamiento de los repetidores que se consideren oportunos.

Sin embargo, en lo que respecta a la banda de HF, la orografía y el relieve se posicionan en un papel secundario, pasando a tener una influencia mucho menor en comparación a VHF. Esto es debido a que en la propagación por reflexión ionosférica de tipo NVIS, la importancia de estos factores es prácticamente irrelevante. No obstante, no hay que olvidar que de forma secundaria parte de la energía radiada en esta banda de HF se puede propagar a través de ondas de superficie, donde la conductividad eléctrica y la forma del terreno sí que cobran un papel más principal, siendo por tanto relevante tenerlo en cuenta en este sentido.

De esta forma, a continuación, se presenta la isla de Gran Canaria como la región sometida a estudio a lo largo de este proyecto. Esta isla de origen volcánico situada en el archipiélago canario, concretamente en el océano Atlántico, presenta una forma circular que abarca un diámetro medio de 46 km (Instituto Geográfico Nacional, 2021a).

Una vez aclarado esto, ¿cuáles son los principales accidentes del terreno que pueden hacer fluctuar el enlace en la isla? Sin entrar a analizar la variada y pintoresca biodiversidad de la isla, ecosistema que conforma un paraje único y excepcional en todo el mundo, Gran Canaria



presenta un relieve variado y complejo donde predominan tanto sus numerosas formas positivas como negativas. Sea como fuere, tanto unas como otras juegan un papel determinante a la hora de conseguir un enlace con buena visibilidad.

En lo que respecta a las formas positivas del relieve, es esencial tener en cuenta sus extensos macizos, con alturas por encima de los 1.000 m, siendo el Pico de las Nieves el punto más elevado de toda la isla, con 1.949 m sobre el nivel del mar (Instituto Geográfico Nacional, 2021a). Estos macizos emergen principalmente del centro de la isla y desembocan en el litoral en forma de singulares y majestuosos acantilados que pueden llegar a alcanzar hasta los 700 m de altura. En esta línea, cabe destacar los macizos de Tamadaba-Altravista-Tirma, Inagua-Pajonales y los macizos del suroeste de la isla (GVIC, 2021).

Por el otro lado, en lo que se refiere a los accidentes negativos del relieve grancanario, hay que destacar de manera mayúscula sus grandes barrancos, formados por la fuerte actividad erosiva presente en la isla. Dentro de la zona noreste de la isla predominan los barrancos de Telde, Moya o Tenoya, mientras que, en la zona suroeste, destacan el de Tejada, Agaete y La Aldea. De igual manera, las calderas también cobran un papel importante en este mismo sentido (GVIC, 2021).

Por último, se debe añadir que la conductividad eléctrica del terreno es otro factor muy a tener en cuenta para la propagación de las ondas de radio. En esta misma línea, en lo que respecta a la composición del suelo grancanario, se trata de un terreno con presencia de sales y sodio (Rodríguez Rodríguez *et al.*, 2006), motivado por las escasas e irregulares precipitaciones, el viento procedente del Atlántico, el clima subtropical y la baja permeabilidad presente en el suelo de la isla. Todos estos ingredientes son caldo de cultivo suficiente para obtener un suelo con grandes propiedades eléctricas que facilitan y favorecen la propagación de las ondas de radio cuando se reflejan en este o se propagan sobre él.

Finalmente, teniendo en cuenta el corto alcance que caracteriza la banda VHF, sumado a la mencionada presencia de estos grandes accidentes geográficos que dificultan aún más el enlace por la falta de visibilidad, se presupone necesaria la utilización de repetidores en la banda de VHF como solución a estos problemas de enlace y conectividad. Concretamente, en base a los análisis ya realizados y con el apoyo del personal de la CIATRANS 16, se ha concluido inicialmente como necesaria la utilización de entre 1 y 3 repetidores con la finalidad de solucionar dichas dificultades.

3.3.2 Establecimiento de repetidores

Una vez analizada la orografía de Gran Canaria y concluida la necesidad de establecer repetidores para la banda de VHF como principal solución a los problemas de enlace, cobra una especial relevancia el someter a juicio una serie de cuestiones. ¿Se van a utilizar repetidores en la banda de VHF o en la banda de HF? ¿Cuál es el sitio óptimo para su establecimiento y correcto funcionamiento? ¿Se pueden desplegar libremente este tipo de dispositivos en cualquier zona sin necesidad de autorización alguna? A continuación, se dará respuesta a estas cuestiones.

En primer lugar, es importante tener presente que un repetidor de radiocomunicación es un sistema formado por una serie de dispositivos que reciben una serie de OEM que son retransmitidas y amplificadas para permitir la supervivencia y continuación de la propagación de la señal.

Por consiguiente, se van a emplear este tipo de dispositivos cuando las ondas de radio no puedan llegar a la distancia suficiente donde se quiera establecer enlace, imposibilitando la conexión entre emisor y receptor, bien por limitaciones de alcance de la propia banda de



frecuencias, o bien por la presencia de algún accidente geográfico como, por ejemplo, una montaña que obstaculice la visibilidad. Por tanto, en este estudio se van a emplear repetidores única y exclusivamente en la banda de VHF, mientras que en la banda de HF sería algo totalmente superfluo e innecesario debido a su gran alcance en la propagación.

El repetidor que se va a desplegar en la fase de validación va a estar compuesto básicamente por los siguientes elementos (ver ilustración 7): un vehículo Mercurio 2000 IP, con 2 RT PR4G V3 conectados entre sí en el interior de su bastidor, y 2 antenas exteriores de VHF sobre mástil. La antena captará la señal emisora y se transmitirá por el cable de bajada de antena hasta el amplificador del correspondiente RT PR4G V3 al que esté conectada. Posteriormente, la señal será conducida hasta el filtro paso banda del propio RT, el cual filtra las frecuencias compatibles con el equipo, conduciendo esta señal filtrada hasta el segundo RT PR4G V3, a través del cable de relé al que ambos RT están conectados. Por último, el segundo RT envía la señal resultante a su correspondiente amplificador, encargado de amplificarla y enviarla a su antena homóloga, la cual transmitirá la señal de manera omnidireccional.

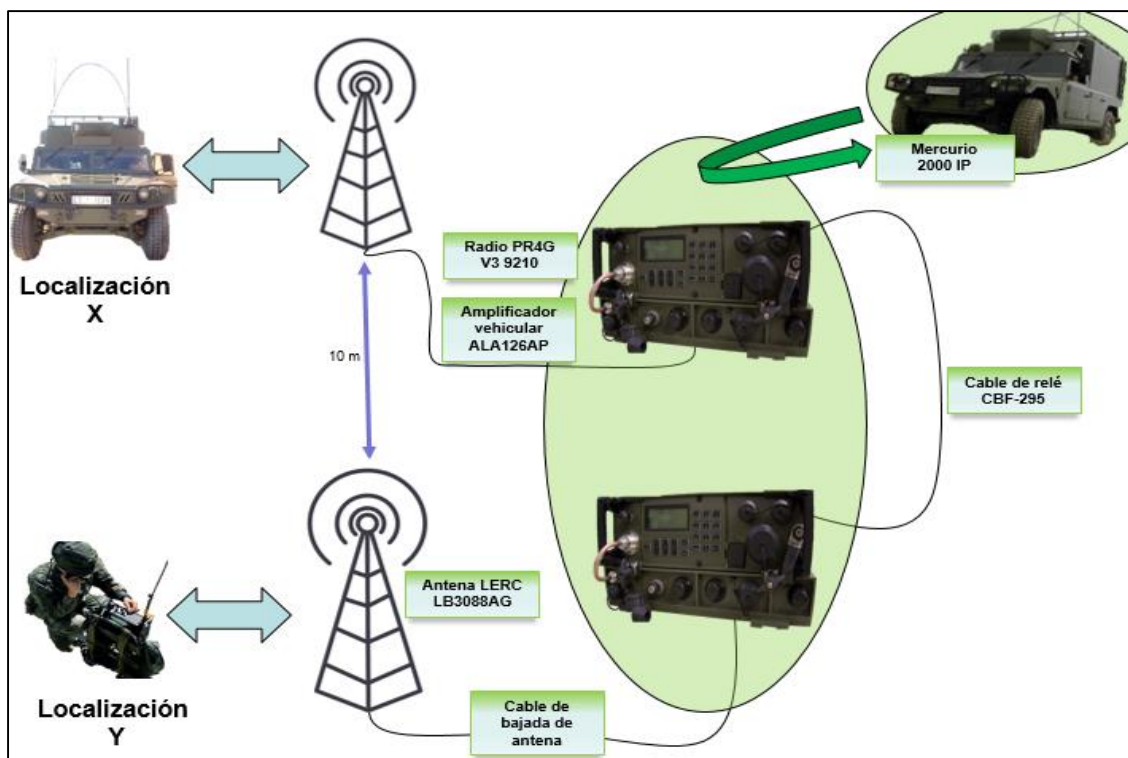


Ilustración 7 Esquema repetidor de VHF (repetidor Pico)

De esta forma, se conseguirá establecer conexión de voz (16 Kbits/s) (Amper Programas, 2012) entre un supuesto "punto Y" y un punto "X" que no tienen conectividad entre sí, aunque sin embargo sí que tienen enlace con el repetidor, el cual recibe esta señal, la amplifica y la vuelve a transmitir hasta el otro punto.

Una vez entendido lo anterior, el siguiente paso es estudiar el posicionamiento óptimo de una estación repetidora. En definitiva, se tiene que posicionar sobre zonas de gran altitud, con el fin de resolver o minimizar los dos problemas de visibilidad citados anteriormente, librando de este modo la mayor cantidad posible de obstáculos que interfieran en la señal. Es por ello por lo que, adicionalmente, se emplean antenas exteriores sobre mástil, ya que además de ofrecer mejores alcances y diagramas de radiación, aportan una altura extra.



No obstante, el correcto posicionamiento de un repetidor no se basa únicamente en la altura a la que se encuentre, sino que, además, es necesario tener en cuenta dos factores más. Por un lado, la accesibilidad a la estación a través de un vehículo, y por otro lado, el estudio de la región donde se pretende desplegar. En primer lugar, en cuanto a la accesibilidad al repetidor, es vital considerar que de poco sirve la intención de desplegar un dispositivo de este tipo sobre el punto más alto posible, si no se puede acceder a dicha ubicación a través del vehículo que lo conforma y alimenta eléctricamente. Por consiguiente, es condición imprescindible tener en cuenta que, debiendo estar ubicado en el punto de interés más elevado posible, presente también un acceso vehicular factible a través de algún tipo de vía, ya sea carretera, carril, etc.

Por último, adquiere una importancia mayúscula analizar aquella zona en la que se pretende desplegar. En otras palabras, estudiar si se tiene la autoridad competente o libertad completa de ubicar este sistema sobre cualquier zona de la isla.

Por un lado, el terreno puede tener consideración de propiedad privada, siendo necesaria la realización de un trámite expropiatorio. Asimismo, si la adquisición de dicho territorio es de carácter definitivo para la instalación permanente del repetidor, la Administración tiene que contraer dicho terreno a través de una expropiación. Por otro lado, si la instalación del repetidor es solo de manera temporal o coyuntural, sería necesaria la autorización por escrito de su propietario, y ante su posible negación, se tendría que llevar a cabo un trámite de “ocupación temporal” acorde a la Ley. En tiempo de guerra, las FAS podrán utilizar este terreno sin necesidad de todos estos trámites, siempre y cuando sirva para fines militares, tal y como indica el artículo 101 de la Ley de 16 de diciembre de 1954 sobre la expropiación forzosa (Ministerio de la Presidencia, 1954).

Estos procedimientos están recogidos en el Boletín Oficial del Estado (BOE), a través de la Ley de 16 de diciembre de 1954 sobre la expropiación forzosa, concretamente en la Sección 1ª. De las expropiaciones por necesidades militares del apartado VIII, relativo a “La expropiación por razones de defensa nacional y seguridad del Estado”. Y concretamente, en lo que respecta a las “ocupaciones temporales”, es importante tener en cuenta el Capítulo I relativo a las ocupaciones temporales, desde el artículo 108 al 119, todos ellos pertenecientes a la misma ley (Ministerio de la Presidencia, 1954).

Adicionalmente, siempre que se construye una instalación radioeléctrica, son necesarios una serie de permisos de carácter administrativo, solicitados con carácter general a las autoridades de Urbanismo. Asimismo, es fundamental tener en cuenta los espacios naturales que conforman la isla, es decir, ¿se puede hacer uso de una porción de terreno situada en ellos sin necesidad de autorización previa? ¿Qué habría que tener en cuenta en estos casos?

En este sentido, sería necesaria la aplicación de la Ley 4/2017, de 13 de julio, del Suelo y de los Espacios Naturales Protegidos de Canarias, la cual divide en su artículo 107, los espacios naturales según sus usos (permitidos, prohibidos y autorizables). De esta forma, autoriza la utilización del terreno o construcción de diferentes tipos de edificaciones, acorde a sus particulares características y posibles amenazas (información relativa a los artículos 58-63 de esta misma Ley). De esta forma, se concluye que no se puede hacer un uso libre de este tipo de espacios sin cumplir y aplicar las oportunas normas que suscribe dicha ley (Ministerio de la Presidencia, 2017).

Asimismo, siguiendo el hilo anterior, también se debe tener en cuenta la Ley Estatal del Suelo (Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana), concretamente la Disposición adicional segunda, la cual relaciona los bienes afectados a la Defensa Nacional, al Ministerio de Defensa o al uso de las FAS; la Disposición Adicional Décima, Apartado 3º, que hace referencia a aquellas



obras que afectan directamente a la Defensa Nacional; y la Disposición Final Segunda, Apartado Séptimo, donde se atribuye al Estado la competencia en Defensa y FAS (Ministerio de la Presidencia, 2015).

Por último, también es relevante tener en cuenta la Ley General de Telecomunicaciones, concretamente el artículo 4, Servicios de telecomunicaciones para la defensa nacional, la seguridad pública, la seguridad vial y la protección civil destinado a la Defensa Nacional. En ella, adicionalmente se hace referencia a la exención de determinadas obligaciones que derivan de las necesidades del servicio para ejercer Defensa Nacional, artículo 8, y exenciones de determinadas tasas, como la tasa por reserva del dominio público radioeléctrico, anexo I (Ministerio de la Presidencia, 2014).

Una vez analizados estos factores, en lo que concierne a este trabajo, y tal y como se va a explicar a lo largo del posterior estudio empírico-práctico, por limitación de tiempo y medios solo se va a desplegar físicamente uno de los tres repetidores considerados para el desarrollo de este estudio, el repetidor Pico (ver ilustraciones 8 y 9). Este va a ser ubicado cerca del Pico de las Nieves, sobre una pequeña parcela de uso exclusivo militar, evitando así de este modo la mayor cantidad de procedimientos y solicitudes administrativas indicadas con anterioridad



Ilustración 8 Conexión de RT PR4G en el interior del vehículo que conforma el repetidor Pico

La ubicación de los 3 supuestos repetidores (ver ilustración 10), denominados como Pico, Harry y Camaleón, ha sido establecida sobre determinados puntos clave estudiados a conciencia en base a las anteriores premisas, siendo posicionados sobre los principales sistemas montañosos que se localizan en el centro de la isla. Sus coordenadas están recogidas en el Anexo B.



Ilustración 9 Repetidor Pico

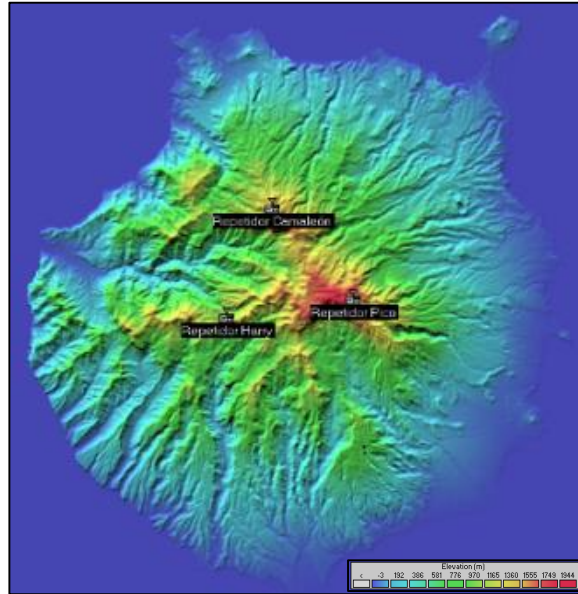


Ilustración 10 Posicionamiento de los 3 supuestos repetidores (Radio Mobile)

3.4 MODELIZACIÓN DE LOS MAPAS DE COBERTURA RADIOELÉCTRICOS

Con este apartado se pone punto final al estudio teórico del que se compone este proyecto. En los apartados anteriores se ha ido de lo general a lo particular, con la misión principal de llegar a esta parte final con la información y conocimientos necesarios lo más asentados y estructurados posibles para su óptimo desarrollo, aplicación y comprensión.

A continuación, en un primer lugar se va a llevar a cabo la modelización cartográfica en la banda de VHF, y seguidamente, la modelización en la banda de HF mediante el empleo de diferentes aplicaciones informáticas.

3.4.1 Modelización cartográfica radioeléctrica en la banda de VHF

Una vez concluida la necesidad de establecer hasta un máximo de 3 repetidores para la modelización en la banda de VHF, a fin de poder conseguir una cobertura completa en toda la isla se van a analizar diferentes aspectos. En un primer lugar, se van a comparar brevemente las dos herramientas software de simulación de cobertura radioeléctrica que van a ser empleadas para la elaboración de los mapas de cobertura correspondientes a cada uno de los 3 supuestos repetidores. En segundo lugar, se van a mostrar los resultados obtenidos por cada aplicación. Y en último lugar, se van a extraer una serie de conclusiones generales en base a los resultados obtenidos.

En base a ello, se van a poder concluir cuestiones tales como, cuál de las 2 aplicaciones es más precisa, dónde concentran sus principales errores o si son softwares lo suficientemente confiables como para poder ser empleados como una herramienta más de trabajo a la hora de planificar y gestionar cualquier tipo de ejercicio donde estén implicados los medio CIS. Como objeto final, se pretende tener la capacidad de determinar cuántos y cuáles de estos 3 repetidores



serían necesarios de manera imprescindible.

Las 2 aplicaciones que van a ser utilizadas en este estudio son, por un lado, Xirio Online en su versión gratuita, y por el otro, Radio Mobile en su versión de escritorio 11.4.1. Xirio Online ya es una herramienta conocida y empleada en una gran variedad de Unidades del ET, sin embargo, esta se divide en una versión de pago y otra gratuita con ciertas restricciones o limitaciones. Por este motivo, y para enriquecer el estudio al dotarlo de una mayor precisión, se ha decidido utilizar simultáneamente otra aplicación de simulación, a fin de dotar a las Unidades de una alternativa a Xirio, que sea gratuita, que no presente ninguna limitación y que obtenga al menos la misma precisión en sus resultados.

En lo que respecta a Xirio Online, se trata de una herramienta capaz de llevar a cabo cálculos radioeléctricos de una manera rápida sobre cualquier tipo de entorno, tanto rural como urbano y sin necesidad de disponer de cartografía digital propia. En cuanto a su organización, esta herramienta se divide en dos grandes módulos. El primero de ellos, se denomina *PlanningTool*, módulo donde se van a llevar a cabo simulaciones punto a punto, coberturas radioeléctricas y demás tipos de planificaciones. Y el segundo módulo, se define como *SharePlace*, permitiendo examinar y compartir los estudios y resultados obtenidos. Además, se trata de una herramienta polivalente que incluye hasta 19 métodos de cálculo diferentes, permitiendo así llevar a cabo en esta aplicación, tanto el estudio de VHF, como el de HF (Xirio Online, 2022a).

No obstante, a pesar de ser una herramienta muy rápida e intuitiva, la versión gratuita, que es la que va a ser utilizada en este estudio, posee algunas limitaciones frente a la versión de pago que no permiten explotar la herramienta al completo, pudiendo llegar a limitar o deteriorar la calidad del estudio en determinadas ocasiones. De este modo, la misma aplicación recomienda que los resultados de Xirio sean tomados de una manera orientativa.

Entre sus principales restricciones es importante destacar el empleo de cartografía de baja resolución y limitaciones en el número de capas cartográficas con las que se puede trabajar. Adicionalmente, los resultados obtenidos solo permanecerán durante un mes en la plataforma y no se permite compartirlas con otros usuarios (Xirio Online, 2022a).

La alternativa a la versión gratuita de Xirio Online es Radio Mobile. Esta herramienta de simulación de radioenlaces, sistemas de radio y áreas de cobertura, a diferencia de la anterior, es una aplicación de escritorio que no necesita de conexión a internet. Además, es un software de libre distribución que trabaja a través del Modelo Irregular del Terreno (ITM), entre el intervalo de frecuencias comprendido entre 20 MHz y 40 GHz, a distancias desde 1 hasta 2.000 km (García Garrancho, 2006). Como posible inconveniente, se podría destacar su interfaz poco amigable e intuitiva y la necesidad de descargar diferentes tipos de datos para poder construir las bases de datos de elevación y otras características relacionadas con el terreno.

No obstante, esta herramienta presenta una gran variedad de posibilidades muy útiles, como por ejemplo la capacidad de exportar la capa de cobertura obtenida a Google Earth Pro, permitiendo así tener sobre esta aplicación una vista en 3D de la señal sobre el terreno, tarea que Xirio Online sólo permite a través de su versión de pago (Camanioni Morfi, Rivera López y De la Concepción Bacallao Vidal, 2021). Radio Mobile también presenta una versión online mucho más simple, pero el hecho de que esta dependa de la velocidad a la conexión de internet, que esté limitada a sólo uso de frecuencias para radioaficionados y que no permita exportar las capas de cobertura obtenidas a Google Earth Pro, han sido considerados motivos suficientes para la utilización de su versión freeware para ordenador.

Una vez presentadas ambas aplicaciones, se va a mostrar los resultados obtenidos (ver ilustraciones 11-16). No obstante, antes de ello es importante interpretar y comprender



correctamente el código de colores por el que se rigen. De esta manera, cada uno de los colores que aparece en el mapa hace referencia a una determinada calidad de la señal, correspondiente a la región sobre la que aparece sombreada (ver Tabla 2).

Tabla 2 Leyenda de colores de los mapas de cobertura

Color	Cobertura	Descripción
Verde	[-90.00, -60.00) dBm	Buena cobertura
Amarillo	[-95.00, -90.00) dBm	Media cobertura
Rojo	[-120.00, -95.00) dBm	Mala cobertura

Con relación a la tabla 2 y a efectos prácticos, en primer lugar, se considera una buena cobertura como aquella en la que la señal se recibe de una manera fuerte, clara y sin interferencias. En segundo lugar, se define como media cobertura, aquella que se recibe de una forma débil y con interferencias, pero de forma inteligible. Y en último lugar, una señal de mala cobertura es aquella en la que no existe enlace o este es ininteligible entre emisor y receptor.

Tal y como se puede comprobar en las ilustraciones de la siguiente página (ver ilustraciones 11-16), se han obtenido en líneas generales resultados similares en la modelización teórica de la cobertura radioeléctrica llevada a cabo tanto por Xirio Online como con Radio Mobile. Por tanto, bajo un primer análisis global, se puede concluir que ambas herramientas arrojan unos resultados parecidos a grandes rasgos en cada repetidor.

Sea como fuere, la realidad es que objetivamente los resultados obtenidos por parte de cada aplicación no son idénticos. *A priori*, al introducir de forma individualizada los mismos parámetros de enlace en cada aplicación, se podría deducir que los dos mapas de cobertura obtenidos para cada repetidor deberían ser completamente análogos, sin embargo, no ocurre así. ¿A qué se deben entonces estas diferencias en la modelización teórica de cobertura?

La respuesta se cimenta fundamentalmente sobre dos pilares. Uno de ellos es el modelo de elevación del terreno que utiliza como referencia cada aplicación, y el otro, su modo específico de funcionamiento. Por consiguiente, estos son considerados como los principales responsables de las diferencias extraídas en los resultados obtenidos.

Primeramente, hablar del modelo de elevación del terreno es sinónimo de hacer referencia a las capas de cartografía que utiliza cada herramienta software. Y es que resulta, que para desarrollar los distintos cálculos de los que se compone cada estudio, cobra una vital importancia la información detallada del terreno sobre el que se están realizando dichos cálculos, especialmente de la información referente a la altura que tiene cada punto.

En el caso de Xirio Online, se utiliza una capa del tipo Modelo Digital del Terreno (MDT) correspondiente al año 2006, con una resolución de 100 m y procedente de la empresa *Aptica*. Esta capa se caracteriza por asignar a cada píxel una determinada altura respecto del nivel del mar y, además de proporcionar una gran resolución y precisión, en ella se van a eliminar digitalmente determinados elementos del terreno, como pueden ser carreteras, edificios y vegetación (Xirio Online, 2022a).

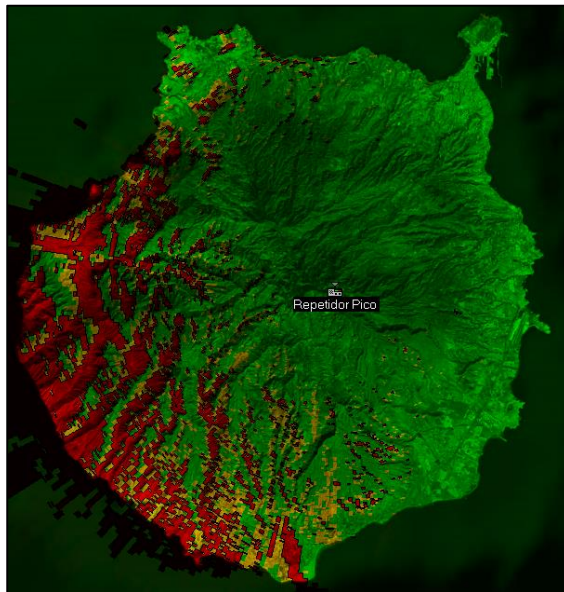


Ilustración 11 Mapa de cobertura repetidor Pico (Radio Mobile)

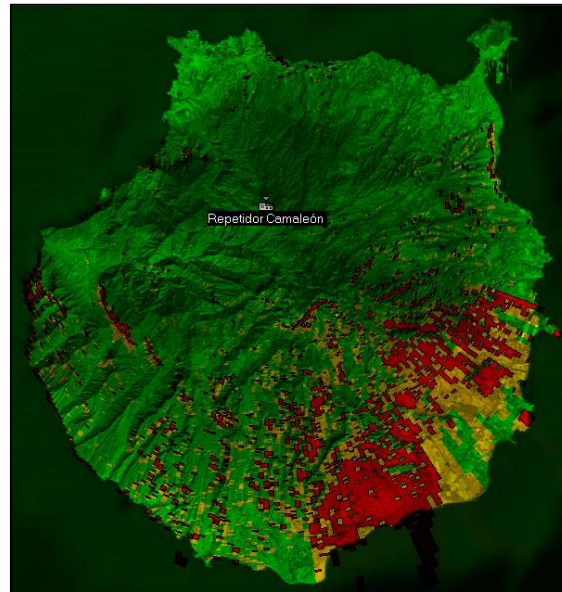


Ilustración 12 Mapa de cobertura repetidor Camaleón (Radio Mobile)

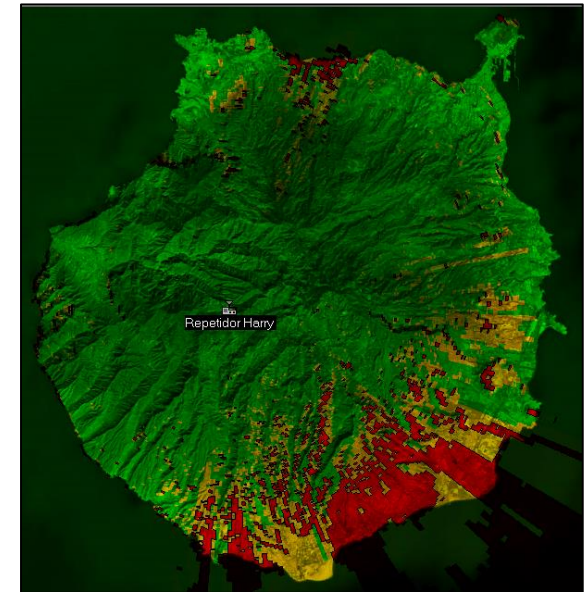


Ilustración 13 Mapa de cobertura repetidor Harry (Radio Mobile)

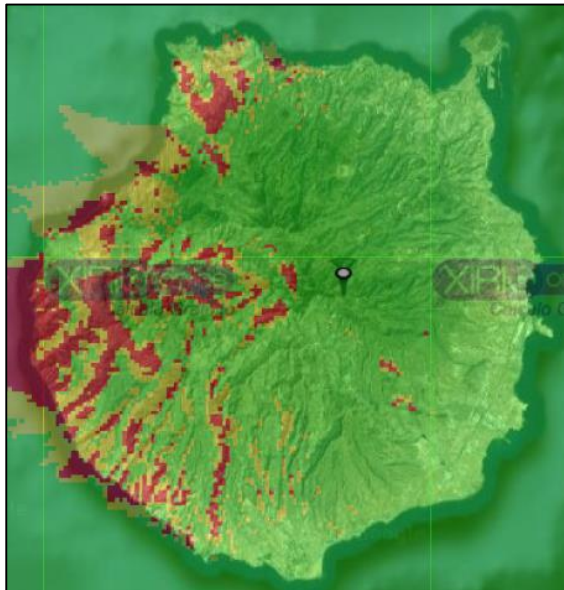


Ilustración 14 Mapa de cobertura repetidor Pico (Xirio Online freeware)

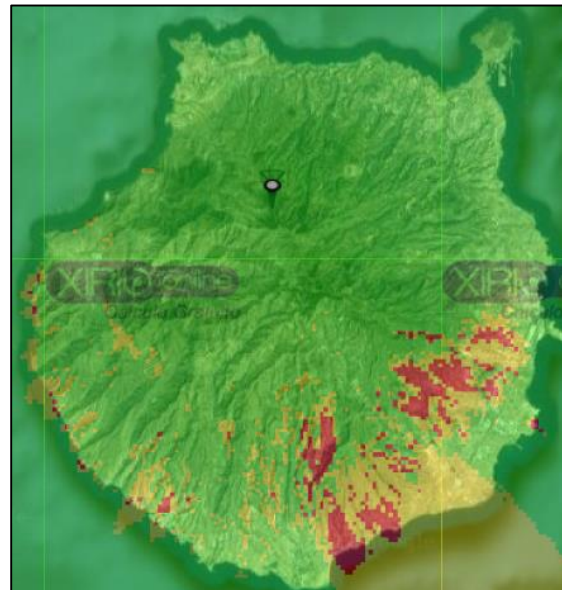


Ilustración 15 Mapa de cobertura repetidor Camaleón (Xirio Online freeware)

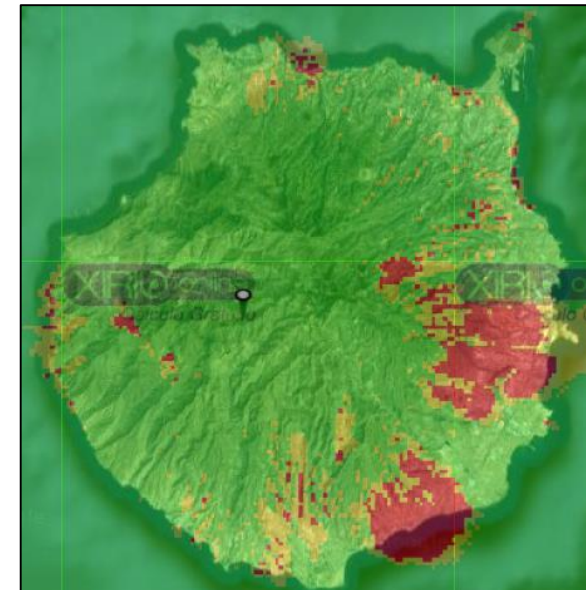


Ilustración 16 Mapa de cobertura repetidor Harry (Xirio Online freeware)



Por otro lado, Radio Mobile emplea también una capa MDT, pero que procede concretamente de la *Misión Topográfica Shuttle Radar* (SRTM) llevada a cabo por la Agencia Nacional de Inteligencia-Geoespacial (NGA) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) de los Estados Unidos de América en el año 2000 (Camanión Morfi, Rivera López y De la Concepción Bacallao Vidal, 2021).

En segundo y último lugar, el otro factor por el que pueden diferir los resultados de ambas aplicaciones se basa en el modo concreto de trabajo y realización de cálculos de cada herramienta. En el caso de Xirio Online, el método de cálculo empleado es el denominado Rec. UIT-R P.526: “Método determinístico basado en difracción. Válido para frecuencias mayores de 30 MHz. Empleado en todos los servicios radioeléctricos en entornos rurales y mixtos siempre que se disponga de cartografía de media o alta resolución” (Xirio Online, 2022b). Este método se detalla más específicamente en el Anexo C.

Por el otro lado, Radio Mobile emplea el algoritmo *Longley-Rice* o también conocido como ITM, el cual, bajo la teoría del electromagnetismo y el estudio estadístico de las características, singularidades del terreno y enlace, calcula la atenuación media de la señal radioeléctrica sobre un terreno irregular en la Troposfera en función de la distancia y de cómo varía la señal a lo largo del tiempo y espacio (Camanión Morfi, Rivera López y De la Concepción Bacallao Vidal, 2021). Xirio Online incluye también este método de cálculo, sin embargo, al emplear la versión gratuita de este software, sólo permite analizar pequeñas zonas de terreno, no consintiendo por tanto el estudio de la isla de Gran Canaria en toda su extensión y restringiendo este cálculo exclusivamente a la versión de pago. Por este motivo, finalmente se empleó el ya nombrado método Rec. UIT-R P.526.

3.4.2 Modelización cartográfica radioeléctrica en la banda de HF

En este apartado se va a analizar la banda de HF, empleada como ya bien es sabido en comunicaciones de media y larga distancia. Para ello, se pretende utilizar 2 herramientas diferentes de simulación de cobertura radioeléctrica. Por un lado, el ya conocido software de Xirio Online en su versión gratuita, y, por el otro, la herramienta de predicción radioeléctrica de VOACAP.

Primeramente, en lo que respecta a la versión gratuita de Xirio Online, tal y como ya se ha analizado en el apartado anterior (ver apartado 3.4.1), se trata de una herramienta de simulación radioeléctrica versátil, con diferentes métodos de cálculo en función de la banda y características que definen el enlace. En este caso, el método de cálculo idóneo es el Rec. UIT-R P.533, procedimiento que predice el comportamiento de los equipos radioeléctricos de transmisión y recepción en la banda de altas frecuencias, siendo definido como un “método empírico de predicción de frecuencias disponibles, de niveles de la señal y de la fiabilidad prevista para los sistemas con modulación analógica y digital en ondas decamétricas” (Xirio Online, 2022b).

Sin embargo, la versión gratuita de esta aplicación no permite llevar a cabo estudios de cobertura a través de este método de cálculo, restringiéndolo únicamente a la versión de pago. ¿Existe alguna posible solución ante este problema? La respuesta es afirmativa, y es que, en vez de realizar un estudio de cobertura, se podría llevar a cabo en su lugar un estudio de enlace donde se evaluaría únicamente la calidad de la señal a través de la propagación directa punto a punto, solo entre emisor y receptor. ¿Repercutiría este cambio de estudio negativamente sobre la calidad del análisis correspondiente a esta banda?

No, sería una opción completamente correcta y válida fundamentada en la principal forma en que se propagan estas ondas (a través de reflexiones entre la ionosfera y la superficie



terrestre). Resulta que, mientras las capas de la ionosfera donde se va a reflejar la señal están a una altura muy elevada, entre 100 y 400 km de altitud (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2021b), los puntos de medición de cobertura están muy próximos entre sí, concretamente a una distancia tan pequeña en comparación con la altura a la que se van a reflejar las ondas en esas capas ionosféricas, que los resultados obtenidos con un simple enlace entre dos puntos situados en la isla van a ser prácticamente idénticos y extrapolables a cualquier otro enlace ionosférico dentro de Gran Canaria.

No obstante, se ha podido comprobar que Xirio Online en su versión freeware tampoco permite realizar estudio de enlace de este tipo, ya que estos también utilizan el mismo método de cálculo, limitando su aplicación con indiferencia del tipo estudio que se lleve a cabo. ¿Existiría entonces alguna otra posible alternativa? Sí, podría emplearse otro método de cálculo distinto que se ajuste lo máximo posible a las particularidades del estudio que se pretende llevar a cabo.

En este sentido, es importante recordar que las OEM en HF también pueden propagarse a través de ondas de superficie a distancias de hasta 100 km, siempre y cuando se empleen frecuencias por debajo de los 30 MHz, tal y como ocurre en este caso. De esta forma, se podría analizar alternativamente la cobertura con este tipo de propagación a través de Xirio Online. En cambio, una vez más la versión gratuita de Xirio vuelve a limitar esta posibilidad, pues a pesar de que incorpora un método denominado *Curvas de superficie*, el cual analiza la propagación de la señal a través de las ya citadas ondas de superficie, vuelve a restringirlo exclusivamente a la versión de pago (Xirio Online, 2022b). Por consiguiente, ante tales limitaciones, el estudio en la banda de HF va a ser llevado a cabo únicamente por la aplicación de VOACAP.

A diferencia del anterior software, VOACAP se trata de un software online profesional, gratuito y exclusivo para la predicción referente a la propagación radioeléctrica en la banda de HF. Es por ello que, además del cálculo de mapas de cobertura radioeléctrica, también permite analizar un variado abanico de diferentes factores y parámetros que intervienen en el enlace, nivel al que Xirio Online no llega ni en su versión de pago (Perkiömäki, 2021a).

VOACAP se singulariza por calcular la predicción para un enlace determinado (localización geográfica del transmisor y receptor, potencia, antena de transmisión, antena de recepción, modo y ruido en la recepción), a una hora determinada (horas exactas comprendidas entre 01 y 24 horas), en determinado mes y sobre un número de SSN concreto, con la peculiaridad de que no fija un día exacto dentro del mes (Butragueños Sánchez, Guio Berguizas y Fernández Rodríguez, 2019). En otras palabras, la predicción sería la misma para, por ejemplo, el día 1 de septiembre, que para el 30 de septiembre, siempre y cuando se mantengan el resto de los parámetros. Por lo tanto, es importante tener claro que los parámetros que extrae el programa (MUF, LUF, REL, SDBW, etc.) son calculados para un día "típico" de ese mes y para la hora, enlace y valor del SSN especificados. Con relación al SSN, también es relevante tener en cuenta que no es un valor diario, sino uno promediado y extrapolado que es extraído automáticamente por la aplicación salvo configuración manual.

Por lo tanto, a pesar de que los resultados deben ser tomados en un sentido estadístico y que los valores reales naturalmente van a variar de un día para otro acorde al comportamiento de la ionosfera, la propia herramienta proporciona un margen previsible de variación dentro del cual es probable que se encuentre el valor real respecto al valor calculado promedio, tal y como ocurre con el porcentaje de fiabilidad en una previsión de precipitaciones.

Por ejemplo, cuando se realiza una predicción meteorológica de lluvia para el día siguiente, no se asegura con total certeza que mañana lloverá, a lo sumo se podrá calcular que lloverá con una probabilidad determinada. Esto mismo es lo que sucede con VOACAP y las comunicaciones a través de la ionosfera. Por esta razón los americanos llaman comúnmente a las previsiones



sobre la ionosfera "Space Weather". Por lo demás, VOACAP está basado en el ya citado método *Rec. UIT-R P.533* (ver anexo C), y se trata de una herramienta rápida, intuitiva y fácil de manejar.

A continuación, se presentan los principales resultados extraídos (ver ilustraciones 17-19 y tabla 3).

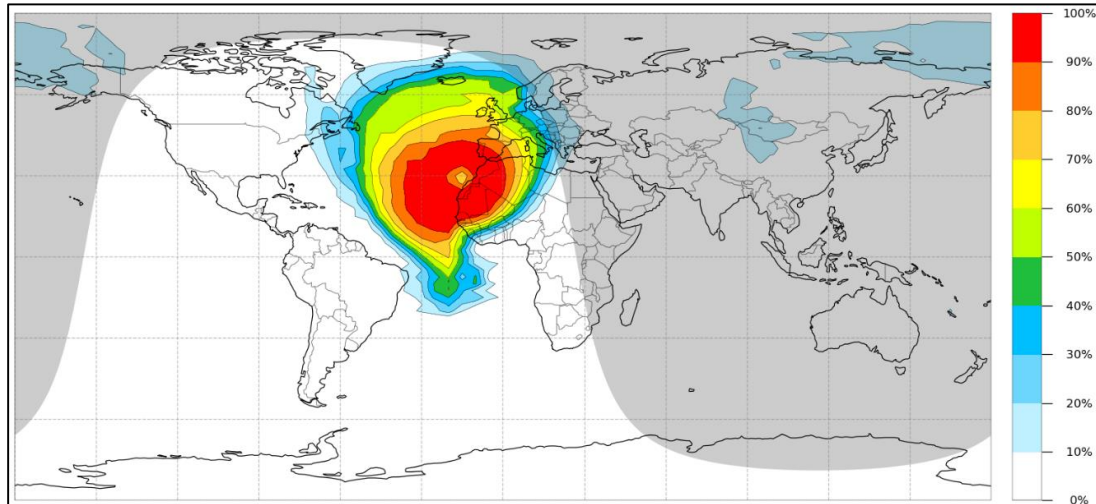


Ilustración 17 Mapa de cobertura con la probabilidad de establecer enlace (VOACAP)

En primer lugar, tanto en la ilustración 17, como en su correspondiente ampliación (ver ilustración 18), se puede observar el mapa de probabilidad de establecer enlace, situando el transmisor desde la isla Gran Canaria, concretamente desde el Puesto de Mando (PC) Halcón, punto fijo de medición establecido para el posterior estudio práctico (ver apartado 4.2).

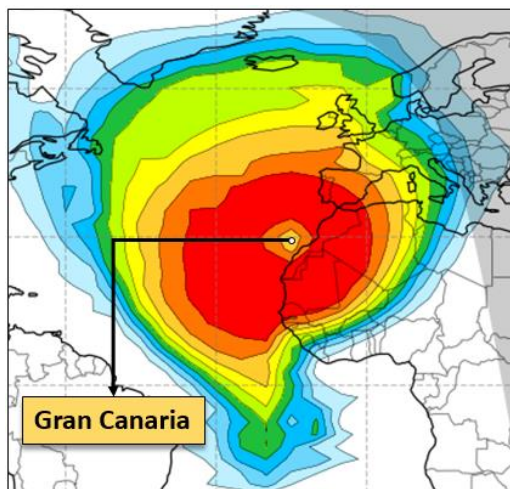


Ilustración 18 Mapa de cobertura ampliado con la probabilidad de establecer enlace (VOACAP)

A través del código de colores reflejado en este mapa, VOACAP representa la probabilidad en porcentaje de establecer comunicación en base al rango de frecuencias y demás características del enlace que se le ha asignado.

De esta forma, se puede concluir que, con el plan de frecuencias introducido, se va a poder establecer enlace dentro de la isla con una probabilidad del 70 %. No obstante, hay que tener en cuenta, tal y como se puede ver en la ilustración 19, que, dentro de este rango de frecuencias, el hecho de emplear las frecuencias ideales de trabajo en cada momento puede suponer un incremento notable de esta probabilidad de establecer enlace.

Adicionalmente, se puede observar cómo no sólo va a existir una buena conectividad dentro de toda la isla, sino que también se podría llegar a establecer teóricamente enlace con otras zonas a mayor distancia, como es el caso de la península Ibérica, gracias a la propagación de media y larga distancia por la que se caracteriza esta banda. Por consiguiente, en base a estos resultados obtenidos se prevé establecer comunicación casi con toda certeza en cualquier enlace que se lleve a cabo dentro de Gran Canaria.

En segundo lugar, a través de la ilustración 19, se puede observar la viabilidad que presenta



el enlace en función de la frecuencia de trabajo y la hora a la que se efectúe, representando la línea curva de color negro la frecuencia óptima de trabajo en cada momento. Por consiguiente, esta gráfica aporta una información de gran relevancia, ya que en base a la gran influencia que sufre este tipo de propagación a causa de los continuos cambios que se producen en la ionosfera, VOACAP analiza la viabilidad de uso de las mejores frecuencias con las que trabajar según el tramo horario en el que vaya a establecer el enlace.

En este caso, se puede comprobar en dicha ilustración, que al utilizar un enlace ionosférico de tipo NVIS, se emplean las frecuencias más bajas de la banda de HF, tal y como se ha analizado en el apartado 1.2.2. Específicamente, se puede observar como en las horas centrales del día, donde existe una mayor incidencia de la actividad solar, las frecuencias de trabajo son más altas, mientras que a medida que cae la noche y disminuye el grado de ionización, estas van disminuyendo de una manera notable. En esta línea, es importante tener en cuenta que, a pesar de que sea viable establecer enlace en un determinado rango de frecuencias, es recomendable utilizar la frecuencia más alta dentro de las condiciones establecidas por MUF y la LUF, tal y como se ve reflejado en la línea curva negra, ya que cuanto más baja es la frecuencia, mayor ruido y pérdidas interfieren en la señal, deteriorando de este modo su calidad.

Adicionalmente, en esta gráfica también se puede extraer al mismo tiempo la probabilidad de establecer un enlace en base a la hora y frecuencia empleadas. En este sentido, de acuerdo con la experiencia y la práctica, se empieza a considerar un enlace como efectivo siempre y cuando supere un porcentaje de viabilidad superior al 40% (representado a partir de la gama más oscura de tonos verdes en la ilustración 19). Por consiguiente, esta herramienta puede llegar a ser extremadamente útil a la hora de planificar, gestionar y seleccionar las frecuencias óptimas de empleo según el tramo horario.

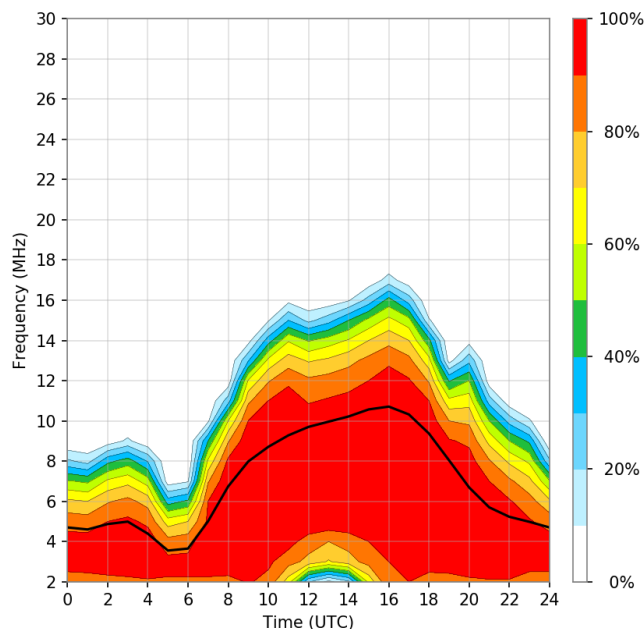


Ilustración 19 Diagrama de viabilidad del enlace según la frecuencia y tramo horario (VOACAP)

Por último, dentro de las numerosas herramientas de análisis que ofrece VOACAP, se presenta la tabla 3. En ella se pueden apreciar los principales parámetros que caracterizan un enlace dentro de la isla de Gran Canaria estructurados por tramos horarios.

A través de esta tabla, se llega a extraer una serie de información que puede llegar a ser considerada muy importante para entender correctamente los motivos por lo que se establece o



no conectividad, siendo por tanto una herramienta de gran precisión y relevancia para la planificación y configuración del enlace muy a tener en cuenta.

En ella, caben destacar fundamentalmente los siguiente factores: la frecuencia óptima de trabajo (FOT), la cual indica la frecuencia de trabajo con una SNR más alta que garantiza una probabilidad de enlace del 90% por debajo de la MUF; la probabilidad de establecer enlace (REL) con la FOT ya citada; la MUF y MUFday, donde por un lado la MUF representa la máxima frecuencia que no se puede superar el 50 % de los días del mes sin que se corte el enlace, mientras que por el otro, la MUFday para una frecuencia dada, indica el porcentaje de días del mes en que dicha frecuencia es inferior a la MUF calculada (Perkiömäki, 2021b); la frecuencia HPF, la cual hace referencia a la máxima frecuencia que no se puede superar el 10% de los días del mes sin que se corte el enlace, siendo un valor análogo a la MUF pero menos restrictivo (de exigir el cumplimiento para el 50% de los días se pasa sólo al 10%), de ahí que su valor sea mayor; el SDBW, valor que representa el nivel medio de la señal en dBW; y por último, la relación señal a ruido, SNR, siendo ideal que esta sea lo más elevada posible a fin de que la señal esté lo menos negativamente influenciada por el ruido generado.

Tabla 3 Resumen de los principales parámetros que definen un enlace en HF (VOACAP).

Dónde: SDBW (nivel medio de la señal), REL (probabilidad de establecer enlace), SNR (relación señal a ruido), MUFday (porcentaje de días del mes a una hora determinada en que la frecuencia de trabajo está por debajo de la MUF), MUF (frecuencia mediana máxima utilizable para un mes, hora y SSN determinados), HPF (frecuencia máxima no superable el 10% de los días del mes sin que se pierda el enlace)

HORA UTC	SDBW	REL	SNR	Δ SNR	MUFday	MUF	HPF
1	-89	95%	56	22,9	88%	4,6	5,7
2	-88	97%	57	21,9	94%	4,9	6
3	-88	97%	58	23	95%	5	6,1
4	-89	96%	58	24,9	87%	4,4	5,4
5	-95	87%	53	28,9	47%	3,6	4,4
6	-95	89%	54	29,3	56%	3,6	4,5
7	-89	97%	61	26,8	96%	5	6,2
8	-87	100%	69	22,2	93%	6,7	8,3
9	-88	100%	73	23	78%	8	9,8
10	-89	100%	74	21,5	91%	8,7	10,7
11	-91	100%	72	19,5	95%	9,3	11,4
12	-93	100%	69	19,5	94%	9,7	11,9
13	-95	100%	68	19,5	95%	10	12,2
14	-94	100%	69	19,5	96%	10,2	12,6
15	-91	100%	71	18,4	97%	10,6	13
16	-88	100%	73	18,2	99%	10,7	13,2
17	-86	100%	74	19,7	98%	10,3	21,7
18	-85	100%	72	20,7	95%	9,4	11,5
19	-85	100%	68	23,4	99%	8	9,9
20	-87	99%	65	24,2	84%	6,7	8,2
21	-87	98%	60	23,1	97%	5,7	7
22	-88	98%	58	22,3	94%	5,2	6,4
23	-89	96%	56	21,5	91%	5	6,1
24	-89	95%	56	22,6	91%	4,7	5,8

Todos estos conceptos (Perkiömäki, 1996), en una primera instancia pueden llegar a parecer enrevesados y de una difícil comprensión, pero son muy importantes a la hora de comprender el correcto funcionamiento de cualquier enlace. Sea como fuere, se puede concluir que VOACAP es un excelente software de análisis y simulación de cobertura en la banda de HF, con un variado abanico de herramientas de análisis, pronosticando la existencia de una buena



conectividad en cualquier enlace de la isla gracias a la propagación ionosférica NVIS. Por otro lado, queda demostrada la gran limitación que presenta Xirio Online en su versión gratuita, obligando y dirigiendo en todo momento al usuario a emplear la versión de pago debido a sus numerosas limitaciones y restricciones.

4 DESARROLLO: ESTUDIO EMPÍRICO-PRÁCTICO

Una vez finalizado el estudio teórico, es ocasión de llevar a cabo la fase empírico-práctico de la que se compone el proyecto. Para ello, es obligatorio plantearse cuál es la importancia que tiene este estudio empírico-práctico en el desarrollo global del trabajo. Este estudio se debe considerar como una pieza fundamental e imprescindible, puesto que a través de él se pretende tanto validar los resultados obtenidos en el anterior estudio teórico, como analizar la precisión que tienen las herramientas software empleadas.

En otras palabras, se plantean las siguientes preguntas a las que se quiere dar respuesta: ¿son estas aplicaciones lo suficientemente eficaces como para conseguir un mapa de cobertura preciso sin tener que realizar una fase de medición física para la toma de datos?, ¿cuál de ellas es más precisa?, ¿podría cualquier Unidad militar de las FAS hacer uso de ellas de un modo confiable con la finalidad de planear previamente un ejercicio o maniobra de forma precisa?

A continuación, en una primera instancia se va a explicar la forma en la que se organizará esta fase práctica de validación de resultados. En segundo lugar, se va a analizar la selección del itinerario y puntos seleccionados para la medición física de la cobertura. Acto seguido, se va a tratar la gestión de frecuencias que se va a seguir en el ejercicio. Y en último lugar, se van a exponer los resultados obtenidos.

4.1 FASE DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal es analizar la cobertura en diferentes zonas de la isla de Gran Canaria con la finalidad de contrastar dichos resultados con los obtenidos por las herramientas software a lo largo del estudio teórico, por lo que se seleccionarán una serie de puntos de paso (ver apartado 4.2) en los cuales se van a realizar mediciones de la calidad de la señal.

Esta medición de la cobertura se ha llevado a cabo el día 8 de octubre de 2021 con la colaboración del personal de la CIATRANS 16 y el apoyo del Contingente Libre Hidalgo (L/H) XXXVI, agrupación militar con personal de la Brigada que se encuentra finalizando su fase preparatoria de instrucción y adiestramiento (I/A) en la isla antes de partir de misión hacia Líbano como miembros de la OTAN. Para ello, se ha dispuesto de 2 vehículos de tipo Mercurio 2000 IP, proporcionados por la CIATRANS, además del apoyo de 3 vehículos Mercurio pertenecientes al Contingente L/H.

En primer lugar, por parte de la CIATRANS sólo se va a disponer de 2 vehículos. El primero de ellos se va a utilizar como repetidor sobre una posición fija, mientras que el segundo será utilizado como una estación móvil que será conducida hacia los diferentes puntos de medición de la cobertura. El vehículo que se establecerá como repetidor va a estar formado por 2 RT PR4G V3, 1 RT 5800H-MP, 1 antena vehicular NVIS de tipo Chelton en simibucle para HF y 2 antenas exteriores del tipo LERC LB3088AG para VHF. Por el otro lado, el vehículo empleado como estación móvil, va a contar al menos con 1 RT PR4G V3, 1 RT 5800H-MP, 1 antena



vehicular de tipo VHF3088VM para la banda de VHF y 1 antena Chelton para HF. Estos son los equipos mínimos e imprescindibles necesarios en cada vehículo para poder realizar un enlace en cada banda de frecuencias.

En segundo lugar, en lo que concierne al Contingente L/H, se va a contar con el apoyo de 3 vehículos que estarán posicionados fijamente sobre tres diferentes ubicaciones en la isla. Cada uno de ellos estará compuesto necesariamente por 1 RT PR4G V3, 1 RT 5800H-MP, 1 antena VHF3088VM para VHF y 1 antena Chelton para HF.

De forma objetiva y autocrítica, probablemente este no es el mejor modo de llevar a cabo el estudio empírico, aunque acorde al tiempo y medios de los que se dispone para el desarrollo de este estudio práctico, dichos recursos han sido gestionados de la forma más eficiente. Sin embargo, bien es cierto que finalmente solo se podrá desplegar uno (repetidor Pico) de los tres repetidores que se han planteado en el estudio teórico de la banda de VHF, a la vez que también sería ideal establecer una mayor cantidad de puntos de validación de la cobertura.

A pesar de las limitaciones citadas anteriormente, desplegando únicamente el repetidor Pico, junto con los puntos de medición de la cobertura que se van a establecer en el siguiente apartado (ver apartado 4.3), se obtendrá información más que suficiente para obtener unos resultados relevantes y concluyentes. Por consiguiente, al no poder desplegar tanto el repetidor Camaleón, como el repetidor Harry, se van a establecer dos puntos más de validación con ubicación en las coordenadas de estos dos hipotéticos repetidores.

Con ello se pretende comprobar si hubiese enlace entre el repetidor Pico y los otros dos supuestos repetidores, condición indispensable en el caso de realizar un hipotético relé multisalto, es decir, un sistema formado por varios repetidores con la finalidad de aumentar el área de cobertura, siempre y cuando el alcance total de la red no supere los 530 km para que esta funcione correctamente (Amper Programas, 2012). Por consiguiente, la eficacia, eficiencia y efectividad de estos dos hipotéticos repetidores será valorada en función de los resultados obtenidos con el repetidor Pico.

En este sentido, es importante recordar que cada vez que se haga referencia a un repetidor a lo largo de este trabajo, se estará haciendo referencia de forma intrínseca únicamente a la banda de frecuencia de VHF. En esta misma línea, los dos radioteléfonos que conforman el repetidor van a utilizar IP-MUX como modo IP de comunicación. Es absolutamente relevante puntualizar esto, puesto que lo ideal sería utilizar el modo SUPER-MUX al ofrecer mejores prestaciones, tal y como se especificó en el apartado 3.2.1. Resulta que cuando se trata de un repetidor formado por RT PR4G V3 en modo IP-MUX, sólo se puede retransmitir la señal que pase a través de él en forma voz, mientras que no de datos (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2016).

4.2 SELECCIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN DE LA COBERTURA

Una vez explicado el procedimiento que se va a llevar a cabo en esta fase práctica de validación de resultados, cobra una vital importancia prestar atención a la selección de aquellos puntos de la isla que van a ser empleados para la medición de la cobertura, tanto en la banda de VHF, como en la de HF. Es importante determinar cuál es el criterio que se va a emplear para seleccionar aquellos puntos donde se va a medir la cobertura y definir cuántos de ellos se van a establecer.

En respuesta a las anteriores cuestiones, acorde al limitado tiempo del que se dispone, se van a establecer un total de 17 puntos para la medición de la cobertura. Estos serán establecidos



en función de una serie de condiciones las cuales se van a indicar a continuación:

- Zonas donde difiere la calidad de la señal obtenida, procedente de los mapas teóricos de cobertura extraídos de Xirio Online y Radio Mobile. (Puntos: P1, P2, P3, P6, P8, P9, P10, P11).
- Asentamiento de los PC fijos pertenecientes al Contingente L/H XXXVI. (Puntos: PC Aníbal, PC Halcón y PC Lince).
- Ubicaciones, tanto del repetidor desplegado físicamente sobre el terreno (repetidor Pico), como de los hipotéticos otros dos repetidores no desplegados. (Puntos: repetidores Pico, Harry y Camaleón).
- Zonas especialmente negativas del terreno, en las cuales se sospecha o espera un nivel de cobertura diferente respecto al proporcionado por las aplicaciones software citadas anteriormente. (Puntos: P5, P6).
- Zonas limítrofes de cambio de cobertura en cualquiera de las dos aplicaciones. (Puntos: P1, P2, P4, P6, P7, P8, P10, P11).

Adicionalmente, se establece como una condición indispensable, la capacidad de poder acceder vehicularmente a todos y cada uno de los distintos puntos que se van a establecer para la medición de cobertura radioeléctrica. Esto se debe a que se va a emplear la configuración vehicular de los RT de cada banda para llevar a cabo la medición de la señal.

A continuación, en la ilustración 20 se muestra el mapa de cobertura del repetidor Pico extraído de Radio Mobile y exportado sobre la aplicación de Google Earth Pro a fin de tener una imagen satelital 3D más visual. Sobre él, quedan representados el itinerario y puntos de medición de cobertura para ambas bandas que se van a seguir. Adicionalmente, a su derecha se encuentra la ilustración 21, donde se divide la isla en dos partes bien diferenciadas, por un lado, la zona Oeste, y por el otro, la zona Este, sombreada por un color blanco translúcido. Esta partición se ha llevado a cabo debido a la gran extensión de Gran Canaria, sumada a la limitación de medios y tiempo del que se disponen.

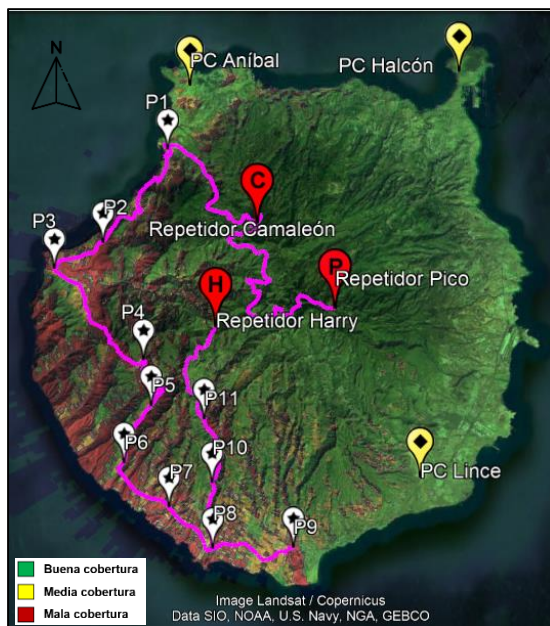


Ilustración 20 Mapa de cobertura del repetidor Pico con itinerario y puntos de medición sobre Google Earth Pro

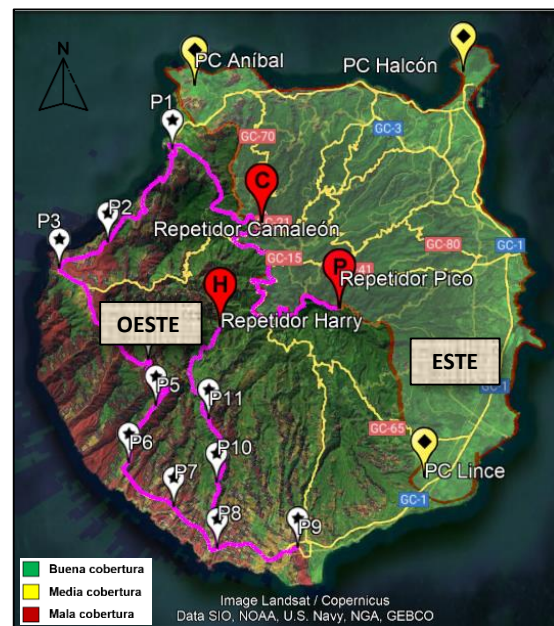


Ilustración 21 Mapa de cobertura del repetidor Pico con división de la isla y principales carreteras de Gran Canaria



De esta forma, la mayor parte de las mediciones van a ser llevadas a cabo sobre la zona oeste, región de mayor interés al ser donde se concentran los mayores problemas de cobertura, mientras que la zona Este, con una buena cobertura teórica en prácticamente toda su extensión, será evaluada a través de la información proporcionada por el contingente Líbano en sus respectivos PC Aníbal, PC Halcón y PC Lince.

Las coordenadas de cada uno de los puntos se encuentran recogidas en el Anexo B.

4.3 SELECCIÓN DE FRECUENCIAS

¿Se puede utilizar libremente cualquiera de las frecuencias de las que se compone el espectro electromagnético? Esta es una pregunta esencial que siempre se debe hacer cuando se va a utilizar un determinado rango de frecuencias, con independencia del uso que se le quiera hacer dentro del espectro electromagnético.

La respuesta es negativa. No se puede hacer uso de cualquier banda de frecuencias libremente tal y como se especifica en la orden IET/787/2013, de 25 de abril, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias. El motivo reside en que se reserva una parte del espectro electromagnético para una serie de servicios concretos, como pueden ser servicios de urgencias, para el uso propio de los menesteres del Ministerio de Defensa o para la utilización de bandas particulares, explotadas por ejemplo por compañías de telefonía privadas. De este modo, una interferencia perjudicial o uso inadecuado podría ser considerado como infracción (Ministerio de Industria Energía y Turismo, 2013).

No obstante, hay una serie de bandas de frecuencia de uso libre que no necesitan de un permiso específico por parte de la autoridad competente. Por ejemplo, es el caso de las bandas de 2,4 GHz o la de 5 GHz, donde se usa la tecnología WiFi. Son bandas no licenciadas cuyo uso es libre, exceptuando algunos casos puntuales en determinados países (Ubierna Yubero, 2016).

En el ámbito militar, dentro de la propia CIATRANS 16 de la BRICAN XVI, se debe realizar una solicitud de frecuencias al jefe de la propia unidad, jefe de la Brigada en este caso, solicitando aquellas frecuencias que se consideren oportunas para la realización de una determinada maniobra o ejercicio. Una vez solicitadas al jefe de Unidad, finalmente éste las elevará a la Jefatura de los Sistemas de Información, Telecomunicaciones y Asistencia Técnica (JCISAT) para conseguir la aprobación final de estas.

El plazo mínimo para una solicitud de frecuencias debe ser de al menos 30 días a la realización del ejercicio salvando ciertas excepciones. Esta solicitud se realiza a través de un documento oficial interno que consta de 14 apartados, entre los que además de la proposición de frecuencias que se solicitan, se añade la localización entre el emisor y receptor, tiempo de uso, clase de estación, etc. (Estado Mayor de la Defensa, 2010).

En lo que respecta a las frecuencias empleadas para el desarrollo de este ejercicio en ambas bandas, las frecuencias específicas de trabajo no serán expuestas a lo largo de este trabajo puesto que se trata de información de carácter confidencial que podría comprometer la seguridad de la propia Brigada.

No obstante, sí que se puede especificar que la banda de VHF (30-300 MHz), como bien es sabido, será explotada por el RT PR4G, el cual restringe las frecuencias de trabajo entre los 30 y 87.975 MHz, habiéndose solicitado un plan de frecuencia inferior a este con la finalidad de acotar y dejar frecuencias disponibles para que esta parte del espectro electromagnética también pueda ser explotada por otras entidades militares al mismo tiempo sin causar interferencias.

Por otro lado, la banda de HF (3-30MHz) va a ser explotada por el RF-5800H MP, el cual



puede trabajar entre las frecuencias comprendidas de 1,6 a 59,9999 MHz. En este caso, al utilizar un enlace del tipo NVIS, es indispensable para su correcto funcionamiento la utilización de las frecuencias más bajas de esta banda, siendo por tanto el intervalo aproximado de trabajo el concentrado entre 3 y 10 MHz.

En este caso, además es de vital importancia tener en cuenta que se van a establecer dos planes de frecuencias distintos, uno durante el día y otro durante la noche. Esto se fundamenta en la variación del grado de ionización que sufre la ionosfera, consiguiendo que frecuencias que establecen enlace durante el día, no lo consigan durante la noche y viceversa. Por consiguiente, durante el día se va a emplear un plan con frecuencias más altas que el plan de frecuencias que se emplee durante la noche.

Esto se debe principalmente a que, debido a la actividad solar, la ionosfera está fuertemente ionizada durante el día, permitiendo reflejar frecuencias más altas. Conforme se disminuye la frecuencia, la atenuación de la onda es mayor debido a que su interacción con los iones libres que conforman las capas de la ionosfera es cada vez mayor, empeorando cada vez más el nivel de recepción, siendo por tanto preferible utilizar las frecuencias más altas posibles, siempre entre los límites de la MUF y la LUF. Sin embargo, por la noche con el descenso de este grado de ionización, si se emplean frecuencias tan altas, la onda podría llegar a no reflejarse en la ionosfera y perderse en el espacio exterior, siendo este el motivo por el que durante la noche se deben usar frecuencias más bajas que durante el día (Pellejero Ibáñez, 2014).

4.4 RESULTADOS

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos tras las mediciones que se han llevado a cabo en ambas bandas de frecuencia. En primer lugar, se van a mostrar los resultados obtenidos en la banda de VHF, y seguidamente, los resultados extraídos de la banda de HF.

4.4.1 Resultados banda de VHF

En esta banda, para la obtención de estos se debe recordar que se va a utilizar el RT PR4G V3 en su versión vehicular, junto con su amplificador de 50 W, las 2 antenas LERC LB3088AG para el repetidor Pico y las antenas VHF3088VM para el resto de estaciones/vehículos.

En una primera instancia, a través de la tabla 4 se van a poder comparar de una manera sencilla y pragmática los resultados extraídos de las dos aplicaciones informáticas de simulación radioeléctrica frente a los obtenidos de las mediciones *in situ* llevadas a cabo sobre los diferentes puntos preestablecidos. En esta banda, se va a intentar establecer enlace desde cada uno de los diferentes puntos de medición hasta el repetidor Pico, existiendo por tanto 16 puntos de validación de la cobertura en este caso.

A partir de la información recogida en la tabla 4, donde se puede extraer que Radio Mobile ha conseguido un total de 13/16 aciertos, frente a los 9/16 aciertos obtenidos por Xirio Online en su versión gratuita, se va a emplear una matriz de confusión para cada una de las aplicaciones empleadas con la finalidad de comparar de un modo más explícito este contraste de resultados teóricos y reales.

Por consiguiente, a través de las tablas 5 y 6, se va a presentar la información predicha frente a la real, con el objetivo de mostrar cuándo el resultado que ha sido pronosticado por la aplicación de simulación coincide con el resultado real obtenido sobre el terreno, identificando de esta manera, cuando se ha producido algún tipo de desviación y de qué tipo.



Tabla 4 Comparación de resultados teóricos y reales de la calidad de la señal

PUNTOS	COBERTURA TEÓRICA		COBERTURA REAL
	XIRIO ONLINE	RADIO MOBILE	
P1	Buena cobertura	Media cobertura	Media cobertura
P2	Media cobertura	Mala cobertura	Mala cobertura
P3	Buena cobertura	Mala cobertura	Mala cobertura
P4	Mala cobertura	Mala cobertura	Mala cobertura
P5	Media cobertura	Media cobertura	Media cobertura
P6	Media cobertura	Mala cobertura	Mala cobertura
P7	Media cobertura	Media cobertura	Mala cobertura
P8	Media cobertura	Mala cobertura	Mala cobertura
P9	Buena cobertura	Mala cobertura	Mala cobertura
P10	Mala cobertura	Media cobertura	Mala cobertura
P11	Media cobertura	Mala cobertura	Media cobertura
Repetidor Harry	Buena cobertura	Buena cobertura	Buena cobertura
Repetidor Camaleón	Buena cobertura	Buena cobertura	Buena cobertura
PC Aníbal	Buena cobertura	Buena cobertura	Buena cobertura
PC Halcón	Buena cobertura	Buena cobertura	Buena cobertura
PC Lince	Buena cobertura	Buena cobertura	Buena cobertura

En cada matriz de confusión se van a establecer 3 categorías diferentes, siendo la letra A, una buena cobertura y representada con color verde; la letra B, una cobertura media y mostrada a través del color amarillo, y, por último, la letra C hará referencia a una mala cobertura simbolizada a través del color rojo. Asimismo, en la matriz van a aparecer tanto los casos de acierto, como los de error. Concretamente, los resultados que se han predicho van a ser las filas, mientras que los valores reales se van a ser presentados a través de las columnas.

Adicionalmente, en cada matriz se van a ver reflejados dos tipos de errores. Por un lado, se encuentran los errores de omisión. Estos van a hacer referencia a aquellos puntos que corresponden a una determinada clase de cobertura, pero que previamente no se clasificaron de esa forma por las herramientas software. Y por el otro lado, se encuentran los errores por comisión. Estos errores aluden a aquellos puntos que han sido clasificados dentro una clase de cobertura a la que luego realmente no pertenecen (Eastman, 2012). A continuación, se muestra



la matriz de confusión correspondiente a cada aplicación (ver tablas 5 y 6).

Tabla 5 Matriz de confusión Xirio Online versión gratuita

Predicho/Real	A	B	C	Total	Precisión del productor (%)	Error de omisión (%)
A	5	0	0	5	100,0	0,0
B	1	2	0	3	66,7	33,3
C	2	4	2	8	25,0	75,0
Total	8	6	2	16	63,9	36,1
Precisión del usuario (%)	62,5	33,3	100,0	65,3	56,3	
Error de comisión (%)	37,5	66,7	0,0	34,7		

Tabla 6 Matriz de confusión Radio Mobile

Predicho/Real	A	B	C	Total	Precisión del productor (%)	Error de omisión (%)
A	5	0	0	5	100,0	0,0
B	0	2	1	3	66,7	33,3
C	0	2	6	8	75,0	25,0
Total	5	4	7	16	80,6	19,4
Precisión del usuario (%)	100,0	50,0	85,7	78,6	81,3	
Error de comisión (%)	0,0	50,0	14,3	21,4		

Inicialmente, en base a los resultados obtenidos se puede concluir que Radio Mobile es una herramienta de simulación radioeléctrica más efectiva o precisa, obteniendo un 81,3% de eficacia, frente al 56,3% obtenido por la versión gratuita de Xirio Online.

Además, se puede concluir que tanto Radio Mobile como Xirio Online concentran la mayor cantidad de sus errores en la categoría B, es decir, en las zonas de media cobertura. Esto quiere decir que ambas aplicaciones son más eficaces a la hora de pronosticar si en una determinada región existe o una buena cobertura, o por el otro lado, una mala cobertura, siendo ambas considerablemente menos precisas a la hora de discriminar una región con una cobertura media. Esto puede ser considerado como un factor relativamente positivo puesto que normalmente a la hora de explotar un determinado medio radioeléctrico, se suele discriminar principalmente entre buena o mala cobertura, dando un mayor relevancia y prioridad a estas categorías frente a la categoría de cobertura media.

A la hora de trabajar con este tipo de herramientas de simulación, partiendo de la base de que lo ideal sería que no cometieran ningún tipo de error, situación que se convierte en utópica, parece que lo ideal sería que fuesen lo más restrictivas posible. En otras palabras, es preferible un modelo que prediga una mayor cantidad de zonas sin cobertura y que posteriormente sobre el terreno si haya cobertura, a un modelo que vaya a pronosticar zonas con una buena cobertura y que luego finalmente sobre el terreno no sea el caso. Por consiguiente, a la hora de llevar a



cabo cualquier tipo de ejercicio es preferible trabajar partiendo de una situación más adversa o restrictiva que desde una demasiado idealizada o positiva. De esta forma, posteriormente el punto sobre el que se va a partir en el terreno va a ser mucho más productivo y ventajoso.

En definitiva, en base a lo analizado anteriormente, se puede concluir que Radio Mobile es una herramienta más precisa y efectiva en comparación a Xirio Online en su versión gratuita, presentando un mayor número de aciertos, y un número de errores tanto de omisión como de comisión relativamente inferior en prácticamente cualquier categoría. Además, Radio Mobile es un software notablemente más restrictivo.

4.4.1.1 Elección de repetidores para la banda de VHF

En base a los buenos resultados arrojados por la aplicación de Radio Mobile a lo largo de este estudio, se va a emplear este software para determinar los repetidores que serían necesarios en Gran Canaria a fin de solucionar los problemas de cobertura ya mencionados.

De este modo, se van a estudiar todas las combinaciones posibles entre los 3 supuestos repetidores ya tomados en consideración, con el objetivo de evaluar la mejor opción. En los resultados obtenidos (ver ilustraciones 23-26), se muestra en un color de tono verdoso aquellas zonas donde existiría cobertura teóricamente, mientras que, por el otro lado, las zonas no sombreadas se presentan como áreas sin conectividad. Por consiguiente, en este tipo de mapas solo se va a discriminar si hay cobertura (con indiferencia de si la calidad es media o buena) o si no la hay.

Adicionalmente, es importante especificar el significado de las líneas que conectan cada repetidor. Estos segmentos de color verde indican la existencia de una buena visibilidad entre emisor y receptor, condición indispensable en la propagación de las ondas de VHF. El cálculo de la visibilidad está basado principalmente en los elipsoides de Fresnel, a partir de los cuales se considera un enlace con visión directa como aquel que tiene liberado de obstáculos más del 60% de la primera región del elipsoide, requisito que se cumple en todos los repetidores al ser situados sobre puntos estratégicos de gran altura y despejados de obstáculos.

Por consiguiente, en base a los resultados obtenidos, se concluye que se podría establecer una cobertura prácticamente completa en toda la isla a través de 2 hipótesis. Una de estas hipótesis se basa en el empleo simultáneo de los 3 repetidores ya presentados, mientras que la otra, se fundamenta en despliegue conjunto del repetidor Pico y Camaleón.

Finalmente, dado que los resultados obtenidos son muy similares en ambos casos, y siguiendo una política de economía y ahorro de medios, se concluye que lo ideal sería el despliegue de los repetidores Pico y Camaleón. De esta forma, se estaría utilizando el menor número posible de repetidores, mientras se ofrece una cobertura prácticamente completa en toda la isla. En la ilustración 22, se muestra el perfil topográfico correspondiente a dicha combinación. En ella, se presentan los ya mencionados elipsoides de Fresnel, apreciándose la existencia de un buen enlace de visión directa entre ambas antenas.

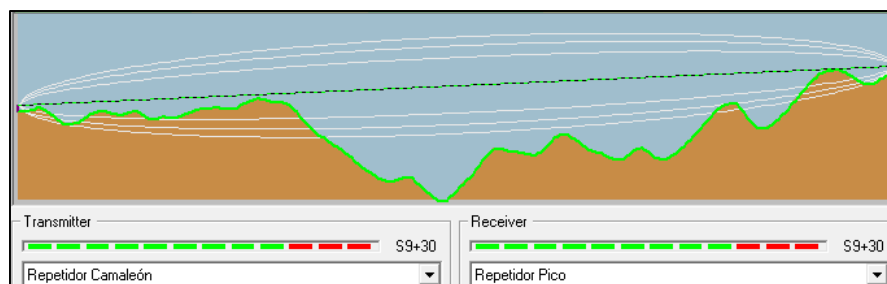


Ilustración 22 Perfil topográfico entre los repetidores Pico y Camaleón (Radio Mobile)

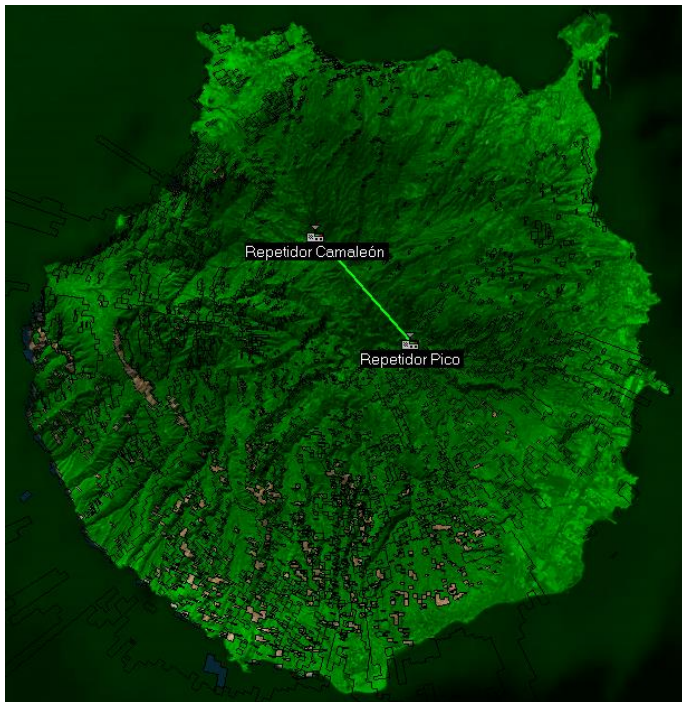


Ilustración 23 Mapa de cobertura combinación repetidores Camaleón y Pico (Radio Mobile)

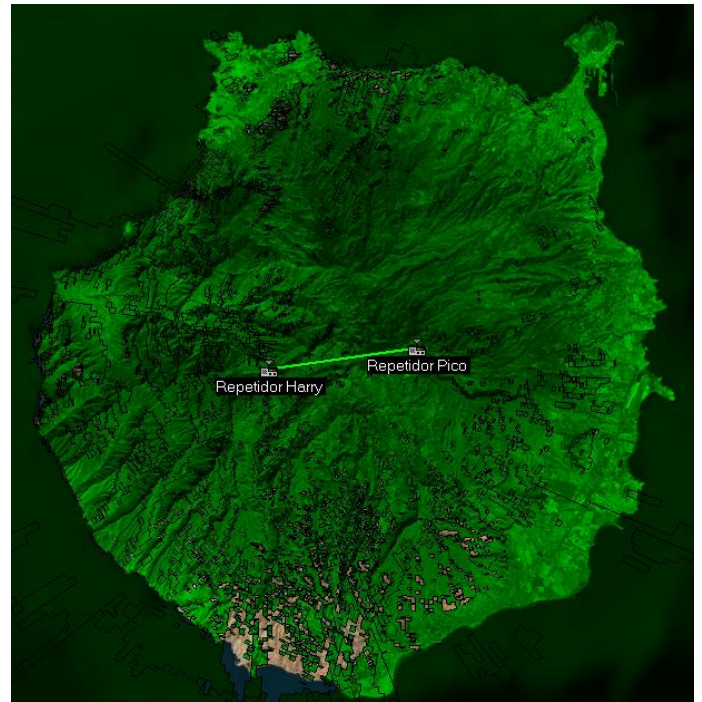


Ilustración 24 Mapa de cobertura combinación repetidores Pico y Harry (Radio Mobile)



Ilustración 25 Mapa de cobertura combinación repetidores Camaleón y Harry (Radio Mobile)

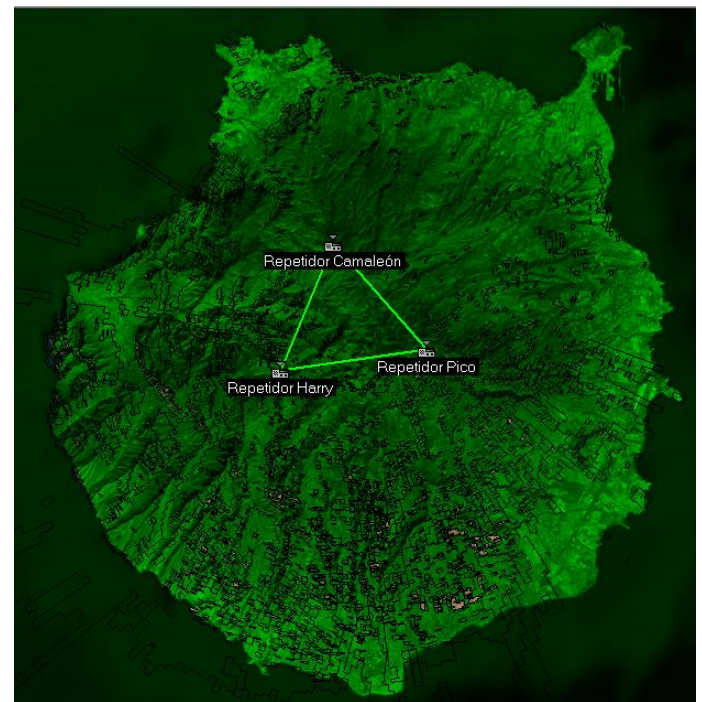


Ilustración 26 Mapa de cobertura combinación de los 3 repetidores (Radio Mobile)



4.4.2 Resultados banda de HF

A continuación, se van a exponer los resultados obtenidos en la banda de HF. En esta banda, es importante recordar que se va a utilizar el RF 5800H-MP en su versión vehicular, empleando su correspondiente amplificador de potencia de 150 W y una antena NVIS en simbulce Chelton.

En este caso, se va a establecer un enlace punto a punto, o, en otras palabras, un enlace direccional de radio a radio. Por consiguiente, se va a implantar una estación fija, el PC Halcón, con la que el resto de los puntos preestablecidos van a intentar establecer enlace y medir la calidad de este.

Para la medición de la calidad de la señal, se va a realizar en cada uno de los puntos de medición un LQA. A través de este análisis se obtendrán unas puntuaciones que van a cuantificar la calidad de la señal de los enlaces que se van a establecer entre el punto de medición X y el PC Halcón. Es relevante recordar que estas puntuaciones van de 0 a 100, siendo el 0 la peor calidad posible y el 100 la mejor. Adicionalmente, bajo la experiencia del personal de la Cía., con puntuaciones superiores a 30, en la mayoría de las ocasiones se va a establecer enlace de manera satisfactoria.

Tal y como se puede deducir de la tabla 7, los resultados obtenidos son muy positivos, habiendo conseguido establecer enlace en todos y cada uno de los puntos que se han estudiado. A esto hay que sumar, que la transmisión y la recepción ha sido excelente en todo momento, siendo prueba de ello los *scores* extraídos. En esta línea, todos ellos están muy por encima de 30, punto considerado como crítico o de inflexión en el enlace, siendo el Repetidor Pico con 88 puntos la posición con una mayor puntuación, y el P4 el menor con 59 puntos.

Tabla 7 Scores RF-5800H-MP con plan frecuencial y medición diurna

PUNTOS	SCORES	PUNTOS	SCORES
P1	81	P9	70
P2	60	P10	62
P3	67	P11	63
P4	59	Repetidor Pico	88
P5	71	Repetidor Harry	85
P6	68	Repetidor Camaleón	83
P7	65	PC Aníbal	79
P8	69	PC Lince	74

Adicionalmente y de manera excepcional, se va a utilizar una pequeña serie de puntos para medir la cobertura y calidad de la señal durante la noche en estas bandas de frecuencia, con el apoyo una vez más del Contingente L/H XXXVI. El objetivo no es otro que, someter a juicio el plan de bajas frecuencias nocturno diseñado. Con él se pretende comprobar que las frecuencias



empleadas durante el día no tienen por qué funcionar durante la noche, tal y como se analizó anteriormente.

Nuevamente, tal y como se puede concluir de los resultados obtenidos en la tabla 8, las mediciones nocturnas realizadas fueron igualmente exitosas, llegando a alcanzar scores con una elevada puntuación, existiendo una muy buena calidad en el enlace tanto en la transmisión, como en la recepción.

Tabla 8 Scores RF-5800H-MP con plan frecuencial y medición nocturna

PUNTOS	SCORES
Repetidor Pico	90
PC Lince	76
PC Aníbal	78

Adicionalmente, en algunos puntos de medición, además de la prueba de enlace por voz, también se ha llevado a cabo una prueba de enlace a través de transferencia de datos. Su finalidad no es otra que la de comprobar que tanto la transmisión de voz como la de datos en esta banda funcionan correctamente. Esto ha sido posible gracias a una aplicación denominada *Tactical Chat*, la cual, a través de la conexión entre la "5800" y un ordenador, permite transferir archivos de texto de poco peso (ver ilustraciones 27 y 28).



Ilustración 27 Envío de datos RF 5800H-MP con Tactical Chat [Fuente: Cabo 1º Moguel]

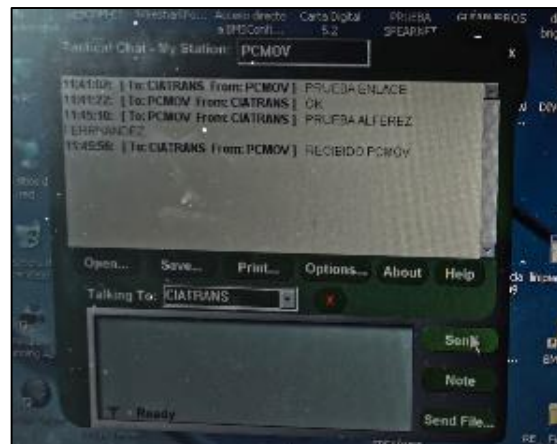


Ilustración 28 Prueba envío de datos mediante la aplicación Tactical Chat

5 CONCLUSIONES

En este apartado se van a exponer las principales conclusiones que han sido extraídas a partir de los estudios de los que se conforma este trabajo. De esta forma, en un primer lugar se va a tratar las principales conclusiones del proyecto, y en un segundo lugar se va a proponer una serie de líneas de acción futuras de mejora.



5.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO

Antes de comenzar a analizar las principales conclusiones que han sido obtenidas a lo largo de este proyecto, cobra una especial relevancia el adoptar un punto de vista autocrítico con el que poder discriminar si los objetivos que fueron propuestos al comienzo han sido conseguidos o no.

El objetivo principal de este proyecto consiste en analizar la cobertura en las bandas de frecuencia de uso militar de VHF y HF, apoyándose para ello en empleo de mapas de cobertura radioeléctrica. Este objetivo ha sido llevado a cabo de manera satisfactoria a través de un estudio teórico y un estudio empírico-práctico de validación de resultados. De esta forma, se han seguido cronológicamente todos y cada uno de los hitos que fueron establecidos inicialmente (ver apartado 2.1) con la finalidad de conseguir llevar a cabo los diferentes objetivos específicos de los que se compone este objetivo principal.

Por el otro lado, el objetivo secundario del presente proyecto se fundamentaba en servir de modelo para la elaboración de cualquier tipo de estudio de cobertura radioeléctrica, con independencia de la localización y la situación sometida a estudio, concienciando de la gran importancia que puede llegar a tener un estudio de este calibre y destacando aquellas partes que son consideradas más importantes. Por ello, han sido analizados todos y cada uno de los factores de los que debe componerse un estudio de esta índole, haciendo una especial relevancia sobre aquellos puntos donde se ha considerado que se debe exigir una mayor atención.

Se puede concluir asimismo que un estudio de este carácter presenta una trascendencia y utilidad fundamental para la propia Unidad e incluso para Defensa, puesto que permite conocer de antemano la calidad de la cobertura existente en la banda de VHF y HF en la isla de Gran Canaria, a través de los principales equipos que explotan cada banda. Esto va a permitir planificar cualquier tipo de ejercicio o maniobra de una manera mucho más eficiente, efectiva y eficaz, siendo capaces de identificar antes de realizar un despliegue sobre el terreno, aquellas zonas donde se podrá establecer enlace y aquellas en las cuales existirán problemas de cobertura. Asimismo, para estas citadas zonas que presentan una mala conectividad, se podrá ofrecer una serie de soluciones con las que ser capaces de resolver dichas dificultades, como por ejemplo mediante el despliegue de repetidores en la banda de VHF.

Además, en base al estudio teórico llevado a cabo, estudio respaldado por la posterior fase de validación de resultados llevada a cabo sobre el terreno, se puede concluir que tanto la herramienta de Radio Mobile como la de VOACAP, son aplicaciones software considerablemente más precisas que la limitada versión gratuita de Xirio Online. En este sentido, la importancia es mayúscula para la Unidad y para Defensa. Esto se fundamenta en que, de forma generalizada, en un gran porcentaje de Unidades Xirio Online es una de las principales herramientas empleadas para simulación de cobertura radioeléctrica, llegando a plantearse en ciertos casos el adquirir incluso su versión de pago.

Gracias a este estudio, se ofrecen dos alternativas de software libre que además presentan una mayor precisión, siendo por tanto capaces de pronosticar mejores resultados a la vez que ofrecer un estudio minucioso de los principales parámetros que intervienen en el enlace, como por ejemplo en VOACAP, a través de las diferentes gráficas y tablas que proporciona el propio software (frecuencias óptimas de trabajo por horas, probabilidad de establecer enlace, SNR, mapa de la MUF, etc.). De esta forma, se pretende dar a conocer Radio Mobile y VOACAP con la finalidad de que estas lleguen a ser empleadas como una herramienta más de trabajo en la labor diaria correspondiente a una Sección de radio perteneciente a cualquier CIATRANS.

En líneas generales las aplicaciones propuestas son confiables, aunque este grado de



confianza varía en función de la situación. Por ejemplo, en base a los resultados obtenidos en este trabajo, en lo que respecta a la banda de HF, Xirio Online en su versión libre no ha permitido llevar a cabo el estudio de cobertura, limitando en todo momento sus métodos de cálculo y tipos de estudio a su versión de pago, no habiendo sido por tanto posible trabajar con esta herramienta en esta banda. Por otro lado, VOACAP ha presentado una precisión prácticamente absoluta, siendo por tanto una excelente herramienta para la simulación y planificación radioeléctrica en HF. No obstante, en el caso de la banda de VHF los resultados no son tan positivos. La aplicación de Radio Mobile supera el 80% de precisión en sus simulaciones, siendo este un valor lo suficientemente elevado como para ser considerado un software confiable. En cambio, Xirio Online en su versión gratuita sólo llega a alcanzar un 56,3% de precisión, presentando un porcentaje de errores tanto de comisión, como de omisión demasiado elevado.

Por consiguiente, en base a estos resultados obtenidos, primeramente, para la banda de HF, sólo VOACAP es una herramienta software confiable frente a las grandes restricciones que Xirio Online establece sobre su versión freeware. Mientras que en lo que a la banda de VHF concierne, Xirio Online en su versión gratuita no puede ser catalogada como una aplicación fidedigna, todo lo contrario que Radio Mobile, sobre la cual sí que se puede depositar un gran grado de confiabilidad. ¿Interesaría por tanto al ET adquirir las licencias o pagos de la versión Premium de Xirio Online? La respuesta es no, mientras existan otras buenas alternativas como Radio Mobile o VOACAP.

En esta misma línea, además es importante destacar que en este tipo de aplicaciones es preferible pronosticar zonas sin cobertura donde luego finalmente sí la haya, a predecir zonas con buena cobertura donde posteriormente sobre el terreno no sea así, siendo deseable que sean lo más restrictivas posibles. Del mismo modo, es preferente pronosticar con una mayor precisión aquellas zonas con una buena o una mala cobertura, frente a aquellas regiones con una cobertura media, siendo esta última categoría menos relevante o trascendente. Radio Mobile es la aplicación que más se acerca a estas premisas.

En lo que respecta a la banda de HF, tal y como se podía esperar, se ha obtenido una cobertura excelente en todos y cada uno de los enlaces establecidos gracias a la propagación NVIS, existiendo por tanto una cobertura absoluta en esta banda, permitiendo incluso establecer un enlace efectivo a distancias mucho mayores, como podría ser el caso de la Península Ibérica. Aun así, se ha podido concluir la gran importancia que adquiere en esta banda el planificar al menos un plan diurno con frecuencias más altas, y un plan nocturno con frecuencias más bajas. Los cambios climáticos que tienen lugar en las distintas capas de la ionosfera son tan influyentes y variables, que hace imprescindible el reajuste de las frecuencias a lo largo del día.

Finalmente, en el caso de la banda de VHF, se ha podido corroborar como la cobertura se ve fuertemente influenciada por la orografía, obstáculos y corto alcance por el que se caracterizan este tipo de ondas. Por consiguiente, tras el estudio que se ha llevado a cabo, se puede concluir la obligación de colocar antenas a la mayor altura posible y que estén bien despejadas, además de la necesidad de establecer una serie de repetidores a lo largo de la isla con el objetivo de solucionar o mejorar estos problemas de alcance y conectividad.

5.2 LÍNEAS DE ACCIÓN FUTURAS

En este apartado final del trabajo se van a exponer una serie de líneas de acción futuras. Para ello se van a plantear soluciones frente a las limitaciones encontradas y propuestas de mejora o nuevas vías de desarrollo. Fundamentalmente se va a centrar el foco de atención sobre la banda de VHF, pues es esta la que presenta unas mayores limitaciones y un mayor margen de mejora.



En primer lugar, dado la gran relevancia que puede llegar a tener un estudio de este tipo, se podrían realizar mapas de cobertura sobre diferentes emplazamientos de gran interés para las FAS, sobre los diversos campos de maniobras en los que se instruyen y adiestran diariamente las tropas españolas, hasta en ZO de interés donde esté desplegado personal militar español en la actualidad. Esta información sería de un gran valor, facilitando el planeamiento CIS de cualquier operación o ejercicio, favoreciendo un despliegue de medios más rápido y permitiendo al combatiente saber de antemano y de una forma precisa, aquellas zonas donde podrá establecer o no enlace, dotándolo por ende de soluciones en aquellas zonas sin conectividad, ya sea a través de la implantación de repetidores, empleo de otros equipos CIS o bandas de frecuencia en esa región, etc. Todo esto con la misión principal de facilitar el C2 dentro del ET.

Además, en la misma línea del párrafo anterior, se deberían llevar a cabo estudios de cobertura en diferentes bandas de frecuencia y con diferentes medios radioeléctricos, analizando así diversos tipos de radioteléfonos, antenas y demás equipos con los que se conseguiría un divergente abanico con diferentes capacidades y prestaciones, permitiendo así la posibilidad de escoger la opción ideal acorde a la situación que tenga lugar.

En segundo lugar, situando ya el foco sobre la banda de VHF, se deberían terminar de actualizar todos los radioteléfonos del modelo PR4G V3 al modo SUPER-MUX. Y es que resulta que, a pesar de que este modo de trabajo ya se ha comenzado a implementar en algunas Unidades, son muchas las que aún no han llevado a cabo esta actualización del sistema. El salto de prestaciones y capacidades entre SUPER-MUX e IP-MUX es tan considerable, que este avance debería ser considerado como una prioridad CIS de primer nivel para adaptar al ET a las nuevas necesidades del combate.

Entre sus principales diferencias, podría destacarse que SUPER-MUX consigue que la señal llegue a propagarse a mayores distancias a la vez que gestiona de una forma más eficiente el ancho de banda dedicado para voz y datos, reutilizando el canal de voz para así conseguir un mayor ancho de banda destinado al envío de datos, siempre y cuando no se esté utilizando la voz. Esto no ocurre en el modo IP-MUX, donde se establece un ancho de banda fijo para datos y voz. Además, SUPER-MUX presenta mayores velocidades de transmisión, emplea el sincronismo por GPS mejorando la supervivencia de la red y mejora las capacidades y prestaciones de una configuración en modo repetidor.

En este trabajo, se ha empleado un repetidor de PR4G V3 con IP-MUX, ya que no todos los RT empleados en el ejercicio estaban actualizados a modo SUPER-MUX. Este repetidor, formado por 2 RT PR4G V3, sólo permite la retransmisión de voz mientras que no de datos, siendo esta una considerable limitación (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2016). Sin embargo, si se establece un repetidor con el modo SUPER-MUX, aparte de todas las ventajas citadas anteriormente, sólo sería necesario el uso de un radioteléfono para su funcionamiento, permitiendo además la transmisión tanto de voz como de datos (Marín Aguilera, 2019). Por tanto, el empleo de este evolucionado modo IP de comunicación, es de este modo una excelente herramienta de mejora a fin de poder corregir las limitaciones existentes en este equipo para la explotación de la banda de VHF.

Por último, se va a proponer el despliegue semipermanente de los repetidores analizados a lo largo de este TFG, a fin de que cada vez que sea necesaria la explotación de esta banda de frecuencia para cualquier tipo de ejercicio o maniobra en Gran Canaria, ya esté predefinido cuáles de ellos son necesarios en función de si se requiere una cobertura completa o parcial de la isla.



6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Amper Programas (2012) *Manual de Operación y Mantenimiento Orgánico de 1º y 2º Escalón de las configuraciones dotadas con el RT-9210 V3*. Amper Programas, Getafe (Madrid).
2. BRITRANS/RT-21 (2012) *Antenas de HF*. Regimiento de Transmisiones Nº 21, Valencia.
3. Butragueños Sánchez, E., Guio Berguizas, M. Á. y Fernández Rodríguez, V. (2019) *VOACAP: Análisis de predicción y propagación ionosférica*. Disponible en: https://www.academia.edu/32439162/PREDICCIÓN_IONOSFÉRICA (Accedido: 15 de septiembre de 2021).
4. Camanioni Morfi, S., Rivera López, M. M. y De la Concepción Bacallao Vidal, J. (2021) *Radio Mobile: Descripción y breves instrucciones para su empleo*. Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/348416866_RADIO_MOBILE_DESCRIPCION_Y_BREVES_INSTRUCCIONES_PARA_SU_EMPLEO (Accedido: 20 de septiembre de 2021).
5. Cardama Aznar, Á. *et al.* (2002) *Antenas*. EDICIONS UPC, Barcelona.
6. COMROD (2010) *Especificaciones antena LB3088AG & LB3088AG/E*. Comrod Communication AS, Tau (Noruega). Disponible en: <https://www.comrod.com/wp-content/uploads/LB3088-AG.pdf> (Accedido: 30 de diciembre de 2021).
7. COMROD (2020) *Especificaciones antena VHF3088VM*. Comrod Communication AS, Tau (Noruega). Disponible en: <https://www.comrod.com/wp-content/uploads/VHF3088VM.pdf> (Accedido: 19 de diciembre de 2021).
8. Denisowski, P. (2020) *Entendiendo NVIS*. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Múnich (Alemania). Disponible en: https://cdn.rohde-schwarz.com/lat/campaigns_37/documents/hf_doc/Rohde-Schwarz_Understanding-NVIS_v1_1_ESP.pdf (Accedido: 17 de Septiembre de 2021).
9. Dirección General de Protección Civil y Emergencias (2021a) *Fundamentos de propagación*. Disponible en: <https://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum17/vdm036.htm#03604d> (Accedido: 12 de noviembre de 2021).
10. Dirección General de Protección Civil y Emergencias (2021b) *Propagación en HF*. Disponible en: <https://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum17/vdm039.htm> (Accedido: 15 de noviembre de 2021).
11. Eastman, R. (2012) *Guía para SIG y procesamiento de imágenes*, Clark University, Ciudad de Córdoba (Argentina).
12. Ejército de Tierra (2021) «Revista del Ejército de Tierra español», Número 962, p. 88.
13. Estado Mayor de la Defensa, M. de D. (2010) *Instrucciones para la solicitud, asignación y registro de las frecuencias militares*. Estado Mayor de la Defensa, Madrid.
14. García Garrancho, P. (2006) *Manual de uso de Radio Mobile*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6989/anexos/Anexo_16.pdf



- (Accedido: 17 de noviembre de 2021).
15. Google (2021) «Google Earth Pro». Disponible en: <https://www.google.es/earth/download/gep/agree.html> (Accedido: 15 de diciembre de 2021).
 16. GVIC (2021) *Relieve - GRAN CANARIA - (GEVIC) Gran Enciclopedia Virtual Islas Canarias*. Disponible en: https://www.gevic.net/info/contenidos/mostrar_contenidos.php?idcat=37&idcap=74&idcon=380 (Accedido: 30 de diciembre de 2021).
 17. Harris Corporation (2003) *RF-5800H SISTEMA DE COMUNICACIONES DE 150 VATIOS*. RF Communications Division, Rochester (Nueva York).
 18. Harris Corporation (2006) «FALCON II RF-5800H-MP, Radio de Mochila en Alta Frecuencia». RF Communications Division, Rochester (Nueva York). Disponible en: <https://es.scribd.com/document/163580969/RF-5800H-MP-Spanishb-Tcm26-9416> (Accedido: 30 de diciembre de 2021).
 19. Harris Corporation (2009) *RF-5800H-MP Specifications for the RF-5800H-MP*. RF Communications Division, Rochester (Nueva York). Disponible en: <https://dtsheet.com/doc/640479/harris-rf-5800h-mp> (Accedido: 31 de diciembre de 2021).
 20. infodefensa.com (2018) *Thales actualizará las radios PR4G del Ejército*. Disponible en: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3074235/thales-actualizara-radios-pr4g-ejercito> (Accedido: 1 de diciembre de 2021).
 21. Instituto Geográfico Nacional (2021a) *Descripción geológica de Gran Canaria*. Disponible en: https://www.ign.es/web/resources/sismologia/tproximos/sismotectonica/pag_sismotectonicas/can_grancanaria.html (Accedido: 14 de octubre de 2021).
 22. Instituto Geográfico Nacional (2021b) *Instituto Geográfico Nacional*. Disponible en: <https://www.ign.es/web/ign/portal/calculadora-geodesica> (Accedido: 15 de diciembre de 2021).
 23. Longley-Rice (2021) *Métodos de Cálculo, Longley-Rice*. Disponible en: <https://www.xirio-online.com/web/help/es/longley-rice.htm> (Accedido: 28 de diciembre de 2021).
 24. Luque Ordóñez, J. (2012) «Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico», *Acta, Núm. 62*, pp. 19-23. Disponible en: <https://www.acta.es/recursos/revista-digital-manuales-formativos/13-062> (Accedido: 1 de diciembre de 2021).
 25. Mando de Adiestramiento y Doctrina (2016) *MI-500: Radioteléfono PR4G V3*. Mando de Adiestramiento y Doctrina, Granada.
 26. Marín Aguilera, D. (2019) *PR4G V3S. NUEVAS FUNCIONALIDADES FORMA DE ONDA SUPERMUX*. THALES PROGRAMAS de Electrónica y Comunicaciones, S.A.U., Leganés (Madrid).
 27. Ministerio de Industria Energía y Turismo, E. (2013) *Orden IET/787/2013 Por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias. Boletín Oficial del Estado, 9 mayo de 2013, núm. 111*.
 28. Ministerio de la Presidencia, E. (1954) *Ley de 16 de diciembre de 1954 sobre expropiación forzosa, Boletín Oficial del Estado, 17 de diciembre de 1954, núm. 351*.
 29. Ministerio de la Presidencia, E. (2014) *Ley 9/2014, de 9 de mayo, de*



- Telecomunicaciones, Boletín Oficial del Estado, 10 de mayo de 2014, núm. 114.*
30. Ministerio de la Presidencia, E. (2015) *Real Decreto-Ley 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana, Boletín Oficial del Estado, 31 de octubre de 2015, núm. 261.*
 31. Ministerio de la Presidencia, E. (2017) *Ley 4/2017, de 13 de julio, del Suelo y de los Espacios Naturales Protegidos de Canarias, Boletín Oficial del Estado, 8 de septiembre de 2017, núm. 216.*
 32. Orr, W. I. (1981) *Radio Handbook, Twenty Second edition.* Editors and Engineers, Ltd., California.
 33. Pellejero Ibáñez, I. (2008) «Comunicaciones NVIS en la banda de HF», *Revista URE, noviembre 2008*, pp. 12-15. Disponible en: <http://www.ipellejero.es/hf/NVIS/> (Accedido: 25 de octubre de 2021).
 34. Pellejero Ibáñez, I. (2014) «Planificación de enlaces radio en la banda de HF», *Memorial del Arma de Ingenieros, Núm. 92*, pp. 29-45. Disponible en: https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/m/e/memorial_ingenieros_92.pdf (Accedido: 25 de octubre de 2021).
 35. Perkiömäki, J. (1996) *VOACAP Quick Guide: VOACAP Frequently Asked Questions.* Disponible en: <https://www.voacap.com/itshfbc-help/voacap-faq.html> (Accedido: 2 de diciembre de 2021).
 36. Perkiömäki, J. (2021a) *VOACAP Quick Guide: HF Propagation Prediction and Ionospheric Communications Analysis.* Disponible en: <https://www.voacap.com/> (Accedido: 3 de enero de 2022).
 37. Perkiömäki, J. (2021b) *VOACAP Quick Guide: The MUF and SNR Distribution.* Disponible en: <https://www.voacap.com/muf.html> (Accedido: 1 de diciembre de 2021).
 38. Real Academia Española (2021a) *Definición de antena (Diccionario de la lengua española, RAE).* Disponible en: <https://dle.rae.es/antena?m=form> (Accedido: 14 de noviembre de 2021).
 39. Real Academia Española (2021b) *Definición de radioteléfono (Diccionario de la lengua española, RAE).* Disponible en: <https://dle.rae.es/radioteléfono> (Accedido: 14 de noviembre de 2021).
 40. Recuerdo de los Santos, P. (2021) *Cómo interpretar la matriz de confusión: ejemplo práctico.* Disponible en: <https://empresas.blogthinkbig.com/como-interpretar-la-matriz-de-confusion-ejemplo-practico/> (Accedido: 5 de diciembre de 2021).
 41. Rodríguez Rodríguez, A. *et al.* (2006) «Salinidad y alcalinidad en suelos de las zonas áridas de Tenerife (Islas Canarias)», *Edafología*, 13(3), pp. 171-179. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/260979320_Salinidad_y_alcalinidad_en_suelos_de_las_zonas_aridas_de_Tenerife_Islas_Canarias (Accedido: 2 de Noviembre de 2021).
 42. RT-21 (2012) *Guía de operación RF-5800 H.* Regimiento de Transmisiones Nº 21, Valencia.
 43. Salmerón, M. J. (1990) *Radiación, propagación y antenas.* Trillas, México.
 44. Santos Reyes, K. (2015) «Dispersión troposférica», en. Universidad Estatal Península



- de Santa Elena, La Libertad (Ecuador), pp. 0-2.
45. Ubierna Yubero, O. (2016) *Uso de Frecuencias no licenciadas*. Disponible en: <https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/wireless/uso-de-frecuencias-no-licenciadas/> (Accedido: 13 de diciembre de 2021).
 46. Unión de Radioaficionados Españoles (2021) *Preparándonos para el ciclo 25 con VOACAP por EA4FW - YouTube*. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=vp4XahZQVMw&t=2016s> (Accedido: 15 de diciembre de 2021).
 47. Universidad Rey Juan Carlos, E. (2014) «Radiopropagación». Universidad Rey Juan Carlos, Madrid. Disponible en: https://www.cartagena99.com/recursos/tuneapdf/index.php?archivo=alumnos/apuntes/Tema 3 Propagacion3_v3.pdf (Accedido: 27 de octubre de 2021).
 48. Xirio Online (2021a) *Métodos de Cálculo, Rec. UIT-R P.526-11*. Disponible en: https://www.xirio-online.com/web/help/es/rec_526.htm (Accedido: 30 de diciembre de 2021).
 49. Xirio Online (2021b) *Métodos de Cálculo, Rec. UIT-R P.533*. Disponible en: https://www.xirio-online.com/web/help/es/rec_533.htm (Accedido: 30 de diciembre de 2021).
 50. Xirio Online (2022a) *Manual XIRIO*. Disponible en: <https://www.xirio-online.com/web/help/es/index.htm> (Accedido: 3 de enero de 2022).
 51. Xirio Online (2022b) *Método de cálculo*. Disponible en: <https://www.xirio-online.com/web/help/es/propagationmethod.htm> (Accedido: 3 de enero de 2022).



ANEXOS



Anexo A

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EQUIPOS HARDWARE

RT PR4GE F@stnet V3

Las especificaciones técnicas del RT PR4G V3 son las siguientes (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2016):

Frecuencias. El radioteléfono puede trabajar en el siguiente rango de frecuencias con las siguientes características:

- Banda de frecuencias..... 30 a 87,975 MHz.
- Espaciado de canales por sintetizador en pasos de..... 25 kHz.
- Número de frecuencias de trabajo..... 2.320.
- Número de canales memorizados..... 7.

Potencia. La potencia de emisión según las diferentes configuraciones es la siguiente:

- Configuración portátil..... 0,5 W, 5 W y 10 W.
- Configuración vehicular..... 0,28 W, 5 W y 50 W.

Alimentación. Los márgenes de tensión dentro de los que la radio puede funcionar son:

- Configuración portátil..... 11 a 30 V.
- Configuración vehicular..... 18 a 33 V.

Alcance. Puesto que estamos trabajando en la banda de VHF, el alcance depende de diversos factores, tales como la potencia de transmisión, tipo de antena, orografía y obstáculos o climatología. Los datos orientativos bajo una emisión al máximo de potencia son los siguientes:

- Configuración portátil:
 - Antena de varilla o fleje..... 6-8 km.
 - Antena VHF sobre mástil HC-30..... 12-15 km.
- Configuración vehicular:
 - Antena vehicular 3088VM..... 20-25 km.
 - Antena VHF sobre mástil HC-30..... 45-50 km.

ANTENA EXTERIOR DE VHF LERC LB3088AG

Las especificaciones técnicas de la antena VHF omnidireccional de plano de tierra LERC LB3088AG (ver ilustraciones 29-31) son las siguientes (COMROD, 2010):



- Rango de frecuencias de uso..... 30-88 MHz.
- VSWR..... $\leq 3:1$.
- Ganancia..... 0 dB.
- Potencia..... 100 w.
- Peso..... 5 kg.
- Longitud (sección superior)..... 1300 mm.
- Longitud (sección inferior)..... 1175 mm.
- Velocidad máxima del viento..... 130 km/h.
- Temperatura de funcionamiento..... -40°C a +55°C.

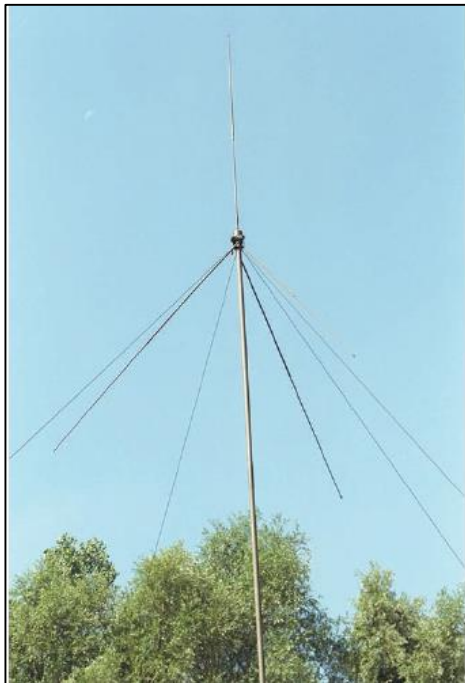


Ilustración 29 Antena de VHF LERC LB3088AG sobre mástil (COMROD, 2010)



Ilustración 30 Antena de VHF LERC LB3088AG perteneciente al repetidor Pico

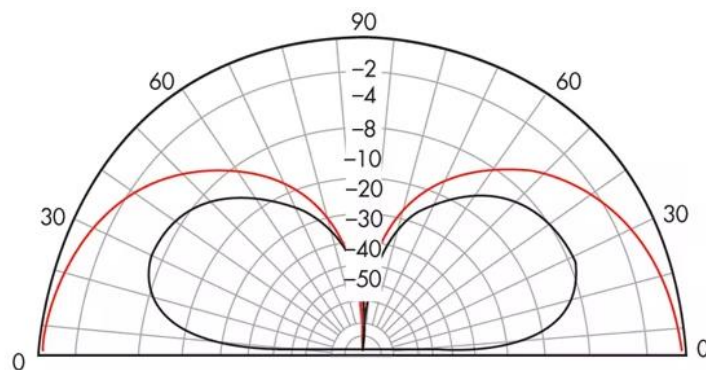


Ilustración 31 Diagrama de radiación vertical de antena de plano de tierra (Orr, 1981)



ANTENA VEHICULAR VHF3088VM

Las especificaciones técnicas de la antena dipolo VHF3088VM (ver ilustraciones 32-36) son las siguientes (COMROD, 2020):

- Rango de frecuencias de uso..... 30-88 MHz.
- VSWR..... ≤3:1.
- Impedancia nominal..... 50 ohm.
- Potencia..... 100 w.
- Conector..... BNC hembra.
- Peso antena completa..... 3,4 Kg.
- Velocidad máxima del viento..... 198 km/h.
- Temperatura de funcionamiento..... -55°C a +71°C.
- Polarización..... Vertical.

Gain

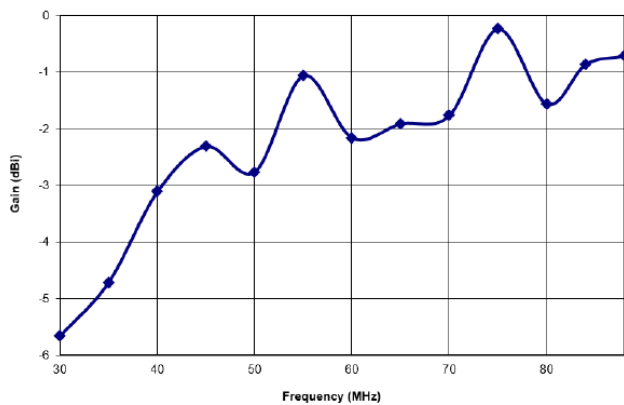


Ilustración 32 Ganancia de la antena VHF3088VM (COMROD, 2020)

VSWR

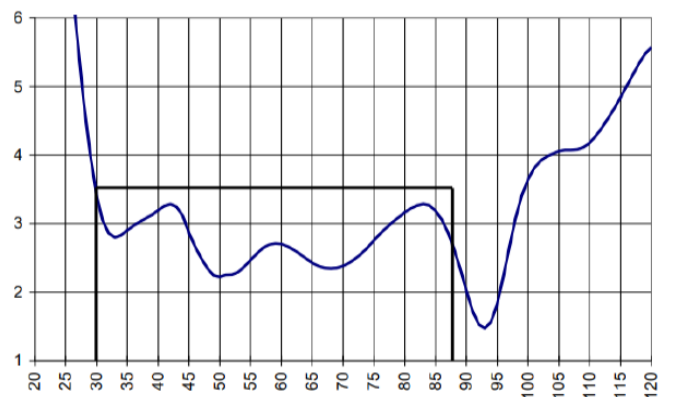


Ilustración 33 Relación entre la impedancia de carga y la impedancia (COMROD, 2020)

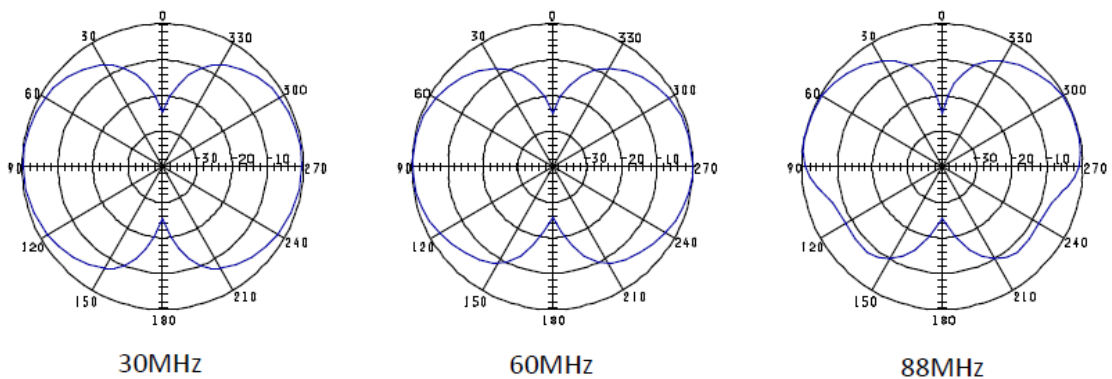


Ilustración 34 Diagrama de radiación de la antena VHF3088VM (COMROD, 2020)

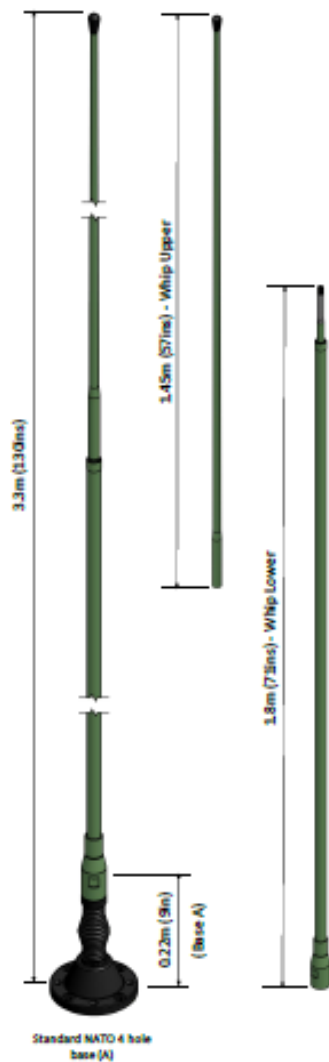


Ilustración 35 Dimensiones antena VHF3088VM (COMROD, 2020)



Ilustración 36 Antenas VHF3088VM en un primer plano junto a antena NVIS Chelton al fondo

RF 5800H-MP

Las especificaciones técnicas del RF 5800H-MP son las siguientes (Harris Corporation, 2003; Harris Corporation, 2009):

Frecuencias

- En la banda de HF (3-30MHz)..... Entre 1,6 MHz y 29,9999 MHz para modulaciones USB, LSB, CW y AME.
- En modulación FM..... Entre 20,0000 MHz y 59,9999 MHz.

Potencias

- Potencia de pico (PEP) / Media en HF..... 1, 5, 20 W.



- En modulación FM..... 1, 5, 10 W.
- Amplificador vehicular..... 150/400 W.

Alimentación

- Funcionamiento nominal..... 26 VDC.
- Operación normal..... 23 – 32 VDC.
- Apagado del RT..... Nivel de Tensión en la batería por debajo de 21 VDC.

Alcance. Depende de diversos factores relacionados con su modo de propagación. De manera aproximada serían los siguientes (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2021b; Unión de Radioaficionados Españoles, 2021):

- Por onda de superficie..... Inferior a 100 km (eficiente para frecuencias menores de 10 MHz).
- Por ondas de cielo (reflexión ionosférica con un solo salto)..... Hasta 4.000 km.
- Por ondas de cielo (reflexión ionosférica con varios saltos)..... Hasta 10.000 km.

Otros

- Modulaciones..... LSB, USB, AME, CW y FM.

ANTENA NVIS DE HF CHELTON

Las especificaciones técnicas de la antena HF de semibucle Chelton, de tipo NVIS (ver ilustraciones 37-39) se esquematizan seguidamente (BRITRANS/RT-21, 2012):

- Rango de frecuencias..... 2-30 MHz.
- Máxima potencia de RF..... 150 W + 1 dB.
- VSWR..... < 2.5:1.
- Ancho de banda..... > 3.5 kHz.
- Tiempo de sintonización..... ≤ 2 s.
- Tiempo de sintonización de frecuencias en memoria..... ≤ 250 ms.
- Ancho..... 1700 a 2400 mm.
- Alto..... 800 a 1000 mm.
- Viento..... Hasta 161 km/hora.
- Temperatura de funcionamiento..... -40°C a +70°C.
- Ganancia (dependiendo de la instalación):
 - 2.0 MHz..... ≥ -26 dBi.
 - 3.5 MHz..... ≥ -17 dBi.



- 10 MHz..... ≥ -10 dBi.
- 30 MHz..... ≥ -4 dBi.
- Entrada de alimentación..... +18 V a +32 VDC.
- Consumo de potencia..... < 25 W.



Ilustración 37 Antena NVIS en semibucle Chelton sobre estación vehicular Soria



Ilustración 38 Antena NVIS en semibucle Chelton sobre estación vehicular Mercurio 2000 IP

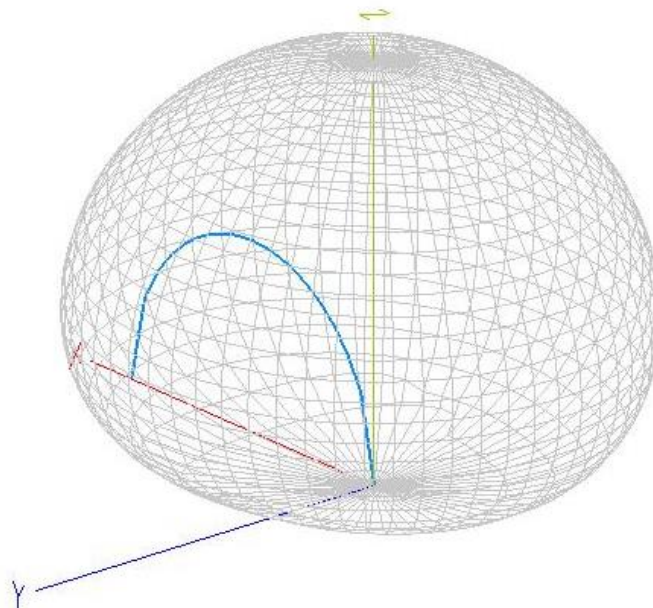


Ilustración 39 Diagrama de radiación antena NVIS en semibucle Chelton (Dirección General de Protección Civil y Emergencias, 2021b)



Anexo B

COORDENADAS

Tabla 9 Coordenadas puntos de medición de la cobertura (Google, 2021; Instituto Geográfico Nacional, 2021b)

PUNTOS	COORDENADAS			
	LATITUD	LONGITUD	UTM X (ETRS 89 HUSO 28)	UTM Y (ETRS 89 HUSO 28)
P1	28° 5'52.60"N	15°42'13.67"O	430862.576	3108252.254
P2	28° 1'15.46"N	15°45'51.48"O	424865.388	3099759.782
P3	28° 0'1.63"N	15°48'39.51"O	420261.725	097517.472
P4	27°55'26.67"N	15°43'38.61"O	428429.863	3089004.575
P5	27°53'10.21"N	15°43'17.43"O	428984.010	3084802.024
P6	27°50'20.59"N	15°44'51.51"O	426379.867	3079597.947
P7	27°48'8.26"N	15°42'21.89"O	430449.082	3075501.721
P8	27°46'3.17"N	15°39'57.44"O	434380.755	3071630.491
P9	27°46'2.59"N	15°35'26.67"O	441791.952	3071574.776
P10	27°49'19.41"N	15°39'56.49"O	434439.475	3077668.877
P11	27°52'28.97"N	15°40'20.21"O	433822.526	3083505.439
Repetidor Pico	27°57'49.10"N	15°32'56.79"O	445991.705	3093295.832



Repetidor Harry	27°57'2.42"N	15°39'35.15"O	435100.024	3091913.245
Repetidor Camaleón	28° 2'4.67"N	15°37'12.68"O	439040.300	3101193.654
PC Aníbal	28° 9'2.72"N	15°40'56.53"O	433000.434	3114090.756
PC Halcón	28° 9'33.35"N	15°25'48.22"O	457777.417	3114919.835
PC Lince	27°49'28.00"N	15°28'18.40"O	453538.361	3077844.716



Anexo C

MÉTODOS DE CÁLCULO

Rec. UIT-R P.526

DESCRIPCIÓN

La Recomendación UIT-R P.526 [1] presenta varios modelos que evalúan el efecto de la difracción en la intensidad de campo recibida. Los modelos se aplican a diferentes tipos de obstáculos y a diversas geometrías de trayecto.

DESARROLLO

Tipos de Terreno

Dependiendo del tamaño de las irregularidades del terreno, pueden distinguirse tres tipos de terreno:

- a) Terreno liso: La superficie de la Tierra puede considerarse lisa si las irregularidades del terreno son del orden de $0,1R$ o inferiores a ese valor, donde R corresponde al máximo valor del radio de la primera zona de Fresnel en el trayecto de propagación. En este caso, el modelo de predicción se basa en la difracción sobre Tierra esférica (ver Sección 3).
- b) Obstáculos aislados: El perfil del terreno del trayecto de propagación está compuesto de uno o más obstáculos aislados. En este caso, dependiendo del número de obstáculos y de la idealización utilizada para caracterizar los mismos, deben utilizarse los modelos de predicción descritos en las Secciones 4-7.
- c) Terreno ondulante: El perfil está compuesto de varias colinas pequeñas, ninguna de las cuales representa un obstáculo mayor. En esta gama de frecuencias, la [Rec. UIT R P.1546](#) es la más adecuada para predecir la intensidad de campo pero no sirve como método de propagación por difracción.

Ilustración 40 Método de cálculo Rec. UIT-R P.526 (1/9) (Xirio Online, 2021a)



Difracción sobre una Tierra esférica

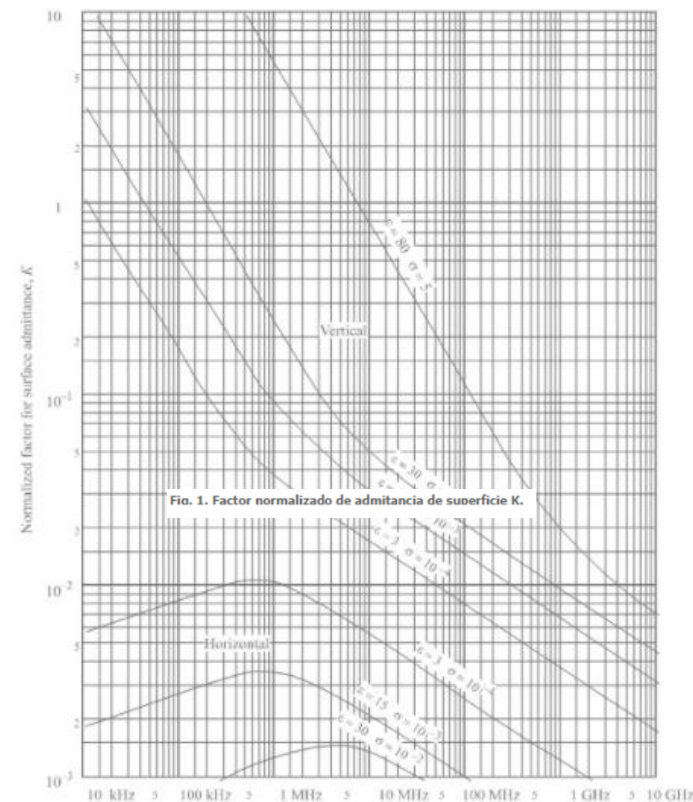
El cálculo depende del tipo de trayecto, su distancia, la frecuencia y las características eléctricas de la superficie de la Tierra.

Para largas distancias transhorizonte, el valor relativo de la intensidad de campo por difracción, E, con respecto a la intensidad de campo en el espacio libre, E₀, viene dado por la fórmula siguiente:

$$20 \log \frac{E}{E_0} = F(X) + G(Y_1) + G(Y_2) \quad \text{dB} \tag{1}$$

donde X es la longitud normalizada del trayecto entre las antenas de alturas normalizadas Y₁ y Y₂ (y donde 20 log E / E₀ es generalmente negativa).

Para este tipo de trayectos, el factor normalizado de admitancia de superficie K es relevante. Las fórmulas para el cálculo de este parámetro se encuentran en [1]. La Fig. 1 muestra una representación gráfica del mismo.





Los cálculos detallados para X, Y, F y G pueden encontrarse en [1]. Las expresiones no se reproducen en este documento debido a su complejidad y a la amplia disponibilidad de las recomendaciones de la UIT.

En el caso de trayectos con visibilidad directa (LOS) con difracción subtrayecto sobre Tierra esférica, puede utilizarse una interpolación lineal entre el límite de la zona de difracción (punto en que está libre de obstáculos el 60% del radio de la zona de Fresnel), donde la atenuación correspondiente al espacio libre es cero, y el horizonte radioeléctrico. Conforme a este procedimiento, las pérdidas por difracción se calculan en función del radio de la primera zona de Fresnel, R_1 , con la siguiente ecuación:

$$A(\text{dB}) = \left[1 - \frac{5}{3} \frac{h}{R_1} \right] A_h \quad (2)$$

donde:

h : trayecto libre de obstáculos entre 0 y $0,6 R_1$

A_h : pérdidas por difracción en el horizonte radioeléctrico

Ilustración 42 Método de cálculo Rec. UIT-R P.526 (3/9) (Xirio Online, 2021a)

Obstáculo único en arista en filo de cuchillo

En este caso extremadamente idealizado (ver Fig. 2), todos los parámetros geométricos se agrupan en un solo parámetro adimensional, que normalmente se designa por v y que puede tomar distintas formas equivalentes según los parámetros geométricos elegidos. Por ejemplo:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (3)$$

donde:

h : altura de la cima del obstáculo sobre la recta que une los dos extremos del trayecto. Si la cima queda por debajo de esa línea, h es negativa. El parámetro v tiene el mismo signo que h

d_1 y d_2 : distancias desde los dos extremos del trayecto a la cima del obstáculo

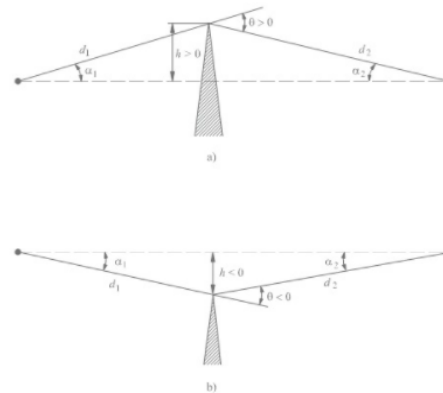


Fig. 2 Ilustración de un obstáculo idealizado con arista en filo de cuchillo.

Ilustración 43 Método de cálculo Rec. UIT-R P.526 (4/9) (Xirio Online, 2021a)



Puede observarse que $v = \sqrt{2} (h/R_1)$ donde R_1 es el radio de la primera zona de Fresnel. La pérdida provocada por la presencia del obstáculo, $J(v)$, depende únicamente de v . Para la mayor parte de los casos prácticos ($v > -0.78$) puede calcularse como:

$$J(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \quad (4)$$

La Fig. 3 representa una ilustración gráfica de $J(v)$.

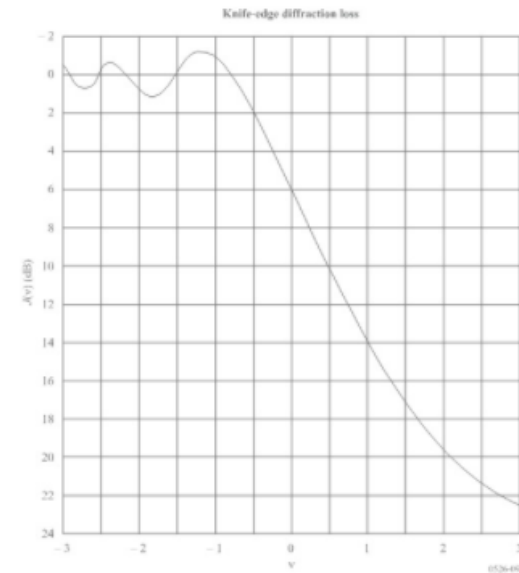


Fig. 3. Pérdidas por difracción en una arista en filo de cuchillo.

Ilustración 44 Método de cálculo Rec. UIT-R P.526 (5/9) (Xirio Online, 2021a)



Obstáculo único de forma redondeada

En la Fig. 4 se indica la geometría de un obstáculo de forma redondeada de radio R. Obsérvese que las distancias d_1 y d_2 , y la altura h por encima de la línea de base, se miden con respecto al vértice formado por la proyección de los rayos sobre el obstáculo. La pérdida por difracción de esta geometría puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$A = J(v) + T(m, n) \quad \text{dB} \quad (5)$$

donde $J(v)$ es la pérdida de Fresnel-Kirchoff debida a una arista en filo de cuchillo equivalente cuya cresta esté en el vértice y $T(m, n)$ es la atenuación adicional debida a la curvatura del obstáculo. Las expresiones para el cálculo completo pueden encontrarse en la Recomendación [1].

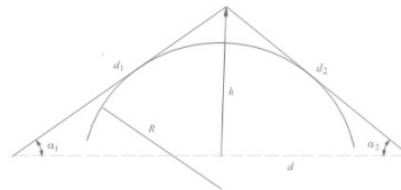


Fig. 4. Representación geométrica de un obstáculo redondeado.

Ilustración 45 Método de cálculo Rec. UIT-R P.526 (6/9) (Xirio Online, 2021a)

Dos aristas aisladas

Un primer método consiste en aplicar sucesivamente la teoría de la difracción en arista de filo de cuchillo a los dos obstáculos; la parte superior del primer obstáculo actúa como fuente de difracción sobre el segundo (ver Fig. 5). El primer trayecto de difracción, definido por las distancias a y b y la altura h_1 , produce una pérdida L_1 (dB); el segundo trayecto de difracción, definido por las distancias b y c y la altura h_2 , produce una pérdida L_2 (dB). L_1 y L_2 se calculan utilizando las fórmulas de la Sección 4.1. Adicionalmente, debe añadirse un término de corrección L_c (dB) para tener en cuenta la separación b entre las dos aristas. L_c puede estimarse por la siguiente fórmula:

$$L_c = 10 \log \left[\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right] \quad (6)$$

válida cuando L_1 y L_2 son ambas superiores a unos 15 dB. La pérdida por difracción total viene dada entonces por:

$$L = L_1 + L_2 + L_c \quad (7)$$

El método anterior es particularmente útil cuando ambas aristas producen pérdidas similares.

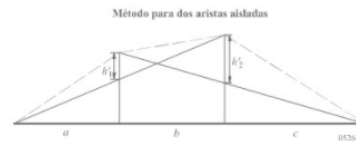


Fig. 5. Dos aristas aisladas con pérdidas similares.

Ilustración 46 Método de cálculo Rec. UIT-R P.526 (7/9) (Xirio Online, 2021a)



Si predomina una arista (ver Fig. 6), el primer trayecto de difracción viene definido por las distancias a y $b + c$ y la altura h_1 . El segundo trayecto de difracción viene definido por las distancias b y c y la altura h_2 .

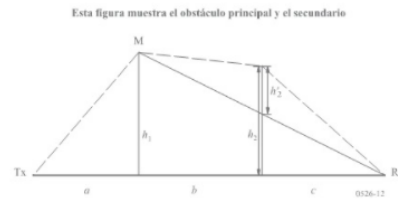


Fig. 6. Dos aristas aisladas con un obstáculo predominante

El método consiste en aplicar sucesivamente la teoría de la difracción en una arista en filo de cuchillo a los dos obstáculos. En primer lugar, la mayor relación h/R_1 determina el obstáculo principal, M, donde h es la altura de la arista medida desde el trayecto directo Tx-Rx como muestra la Fig. 6, y R_1 es el radio del primer elipsoide de Fresnel que viene dado por la ecuación (2). A continuación se utiliza h_2 que es la altura del segundo obstáculo desde el subtrayecto MR, para calcular las pérdidas causadas por este obstáculo secundario. Se debe restar un factor de corrección, T_c (dB), para tener en cuenta la separación entre las dos aristas así como su altura [1]. Por tanto, las pérdidas por difracción total vienen dadas por:

$$\tilde{L} = L_1 + L_2 - T_c \quad (8)$$

Este mismo método puede aplicarse a los obstáculos de forma redondeada, con las fórmulas correspondientes a este tipo de obstáculos.

Ilustración 47 Método de cálculo Rec. UIT-R P.526 (8/9) (Xirio Online, 2021a)



Método de cilindros en cascada

Para calcular la pérdida por difracción sobre obstáculos múltiples, el método parte del supuesto de que cada obstáculo puede representarse mediante un cilindro cuyo radio es igual al radio de curvatura de la parte superior del obstáculo; este método es el que conviene utilizar cuando se dispone del perfil vertical detallado de la cumbre. La Fig. 7 muestra una representación gráfica del método.

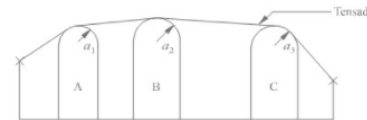


Fig. 7. Representación del método de cilindro en cascada.

Tras haber modelado el perfil de esta manera, las pérdidas por difracción para el trayecto se calculan como la suma de tres términos:

- la suma de las pérdidas por difracción en los cilindros;
- la suma de la difracción del subtrayecto entre cilindros (y entre cilindros y terminales adyacentes);
- un término de corrección.

Método de aristas en filo de cuchillo en cascada

Este método se basa en el [método Devoout](#) limitado a un máximo de tres aristas. La arista principal p en el trayecto define a su vez dos subtrayectos, con aristas dominantes t y r. El exceso de pérdida por difracción en el trayecto viene dado por:

$$L = J(v_p) + T [J(v_t) + J(v_r) + C] \quad \text{for } v_p > -0.78 \quad (9)$$

donde:

$J(v_p)$: pérdida por difracción en arista en filo de cuchillo en el obstáculo dominante p

$J(v_p), J(v_r)$: pérdidas por difracción en aristas en filo de cuchillo en los obstáculos dominantes t y r, en los dos subtrayectos

C: corrección empírica

$$C = 10.0 + 0.04 D$$

D: longitud total del trayecto (km)

y

$$T = 1.0 - \exp [-J(v_p) / 6.0]$$

Ilustración 48 Método de cálculo Rec. UIT-R P.526 (9/9) (Xirio Online, 2021a)



Rec. UIT-R P.533

DESCRIPCIÓN

La Recomendación 533 de la UIT-R proporciona un método de predicción de la calidad de funcionamiento de circuitos HF, que puede utilizarse tanto para enlaces punto a punto como para coberturas zonales, realizando los cálculos sucesivamente para un cierto número de puntos dentro de la zona de estudio. Para cada enlace entre dos puntos pueden existir varios modos de propagación, caracterizados por un número de saltos ionosféricos y por la capa (E ó F2) en que se produce la reflexión. Por ejemplo un cierto trayecto podría establecerse mediante dos modos: uno con tres saltos en capa E y otro dos saltos en capa F2. Los cálculos que se presentan a continuación se harían para los dos modos, combinando los resultados. La identificación de los modos relevantes depende de la distancia del enlace.

DESARROLLO

El método de predicción que se explica en la Recomendación consta de tres partes. En la primera se evalúa la disponibilidad de frecuencias para el enlace, calculando la MUF (frecuencia máxima utilizable) básica de cada uno de los modos de propagación disponibles, la MUF básica del trayecto, que será la mayor de las anteriores, y la probabilidad de que la frecuencia de trabajo sea inferior a la MUF del trayecto, y por lo tanto pueda establecerse el circuito. Dadas las características de la propagación ionosférica, que depende del grado de ionización, diferente según el nivel de actividad solar y la iluminación de la ionosfera, en este cálculo se utilizan como datos de entrada el índice de actividad solar R12, también denominado número de Wolf o simplemente número de manchas solares, además de la fecha y hora.

En la segunda parte del procedimiento se calcula el valor mediano de la intensidad de campo de la onda ionosférica en el punto o puntos de recepción. Se aplica un modelo de propagación que, para cada uno de los modos posibles, calcula la pérdida básica de propagación combinando la pérdida básica en espacio libre para la distancia virtual recorrida, las pérdidas por reflexión en el suelo en los modos con más de un salto, y las pérdidas por diferentes fenómenos de absorción en la ionosfera. A partir de la intensidad de campo se calcula la potencia recibida por cada uno de los modos, y la potencia total como suma de las anteriores. En esta etapa del cálculo son necesarios los datos de los equipos que conforman el sistema, en concreto la potencia de transmisión y las ganancias y diagramas de radiación de las antenas transmisora y receptora.

En la tercera parte se evalúa la calidad del enlace, comenzando por una evaluación de la relación señal a ruido (S/N) mediana mensual. En la banda de HF el ruido dominante es el que capta la antena del exterior, representado por un factor de ruido de antena F_a , que combina el ruido atmosférico (el principal en la parte baja de la banda), el ruido artificial (dependiente del entorno) y otras fuentes como ruido térmico y ruido cósmico. El usuario debe indicar aquí el entorno para el cálculo del ruido artificial, de entre las opciones: "ciudad", "residencial", "rural", "rural tranquilo", "tranquilo" y "ruidoso".

Se aplica a continuación un modelo log-normal de variabilidad de la relación S/N, que permite calcular la probabilidad de superar el valor umbral especificado. La fiabilidad básica del circuito analógico se calcula de esta manera, y se compara con el valor objetivo de fiabilidad (%) que debe suministrar el usuario como parámetro del receptor.

Para calcular la fiabilidad de los circuitos digitales, además de la relación S/N requerida, es necesario utilizar los siguientes parámetros de recepción, que se solicitan como datos de entrada al usuario:

Ventana de tiempo, T_w (ms): Intervalo de tiempo dentro del cual los modos de la señal contribuyen a la calidad de funcionamiento del sistema y fuera del cual provocan la reducción de dicha calidad.

Ventana de frecuencia, F_w (Hz): Intervalo de frecuencia dentro del cual los modos de la señal contribuyen a la calidad de funcionamiento del sistema y fuera del cual provocan la reducción de dicha calidad.

Relación de amplitudes, A (dB): Máxima relación entre la intensidad del modo dominante y la de un modo subdominante, que sólo afectará a la calidad de funcionamiento del sistema si llega con un retardo de tiempo superior a T_w o una dispersión de frecuencia mayor que F_w . Los modos cuya intensidad de campo sea inferior a la del modo dominante en más de A dB se considera que no provocan distorsión aunque estén fuera de la ventana de tiempo o de la de frecuencia.

Ilustración 49 Método de cálculo Rec. UIT-R P.533 (Xirio Online, 2021b)



Longley-Rice

El modelo Longley-Rice, también conocido como "ITS irregular terrain model", es un modelo de propósito general que pretende ser útil en un amplio abanico de problemas. Es flexible en su aplicación y puede ser aplicado como modelo para predicción de coberturas zonales o para enlaces punto a punto.

Los principales parámetros de entrada son los siguientes:

- Frecuencia: 20 MHz a 20 GHz.
- Distancia: 1 km a 2000 km
- Alturas de antena: 0.5 m a 3000 m
- Polarización: Vertical o horizontal.
- Irregularidad del terreno Δh , que es el recorrido inter-decilio de las alturas del terreno – es decir, el margen total de las alturas una vez que se han retirado el 10% más alto y el 10% más bajo.
- Constante dieléctrica y conductividad del suelo.
- Co-índice de refracción en superficie: 250 400 unidades N.
- Clima.

El modelo calcula en primer lugar una atenuación de referencia, que es un cierto valor mediano de atenuación relativa a espacio libre. Tal como se considera en el modelo, esta atenuación de referencia se entiende de forma natural como una función continua con la distancia. Se define en tres tramos, denominados las regiones de espacio libre, difracción y scattering. La región de "espacio libre" está en parte mal denominada; se define como la región en que la curvatura geal de la Tierra no bloquea la señal de radio directa, pero puede ocurrir que las montañas y otros obstáculos sí la bloqueen. En otras palabras, esta región se extiende hasta el horizonte determinado por la curvatura de la Tierra, que puede estar situado más lejos que la distancia real de horizonte. En esta región la atenuación de referencia se calcula como una combinación de una función lineal y una función logarítmica con la distancia; a continuación, en la región de difracción hay un incremento lineal rápido de la atenuación, seguido en la región de scattering por un incremento lineal mucho más lento. Otros parámetros además de la distancia entran en los cálculos para determinar donde caen estas tres regiones y qué valores toman los diferentes coeficientes.

A partir de esta atenuación mediana se restan diferentes márgenes para tener en cuenta la variabilidad en el tiempo, con las localizaciones y con las situaciones. La variabilidad temporal tiene en cuenta las variaciones esperadas del nivel de señal en el tiempo, debido a diferentes condiciones de propagación que se asocian fundamentalmente a cambios en la atmósfera. La variabilidad con localizaciones representa los cambios que se producen cuando el terminal radio se mueve entre diferentes emplazamientos. Finalmente, la variabilidad con las situaciones modela las diferencias entre enlaces desplegados en áreas similares.

Ilustración 50 Método de cálculo Longley-Rice (Longley-Rice, 2021)