



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Empleo de RPAS en apoyo a operaciones de Infantería de Marina

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Ignacio Álvarez Santos

DIRECTOR: Iván Puente Luna

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Empleo de RPAS en apoyo a operaciones de Infantería de
Marina*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

Desde hace unos años, el empleo de vehículos aéreos no tripulados se ha incrementado exponencialmente. Concebidos en un principio para uso exclusivo en operaciones militares, son cada vez más numerosas sus aplicaciones en el ámbito civil. Esto ha propiciado la necesidad de crear una legislación específica aplicable en ambos casos y que afecta de manera muy diversa a las operaciones y ejercicios.

Con el presente Trabajo de Fin de Grado se persigue estudiar la legislación vigente y las diferentes plataformas, sensores y aplicaciones actuales en las que las Fuerzas Armadas en general, y la Infantería de Marina en particular, utilizan estas aeronaves. Además, se plantean otros usos que podrían ser de interés para el Ministerio de Defensa, haciendo especial hincapié en la incorporación de sensores LiDAR topo-batimétrico que servirán de apoyo a labores de reconocimiento y elaboración de cartografía en detalle en aguas someras, evaluando asimismo, sus costes y las mejoras asociadas.

PALABRAS CLAVE

UAV, RPAS, LIDAR, Drone, Batimetría

AGRADECIMIENTOS

Hay demasiada gente a la que le tengo que agradecer su apoyo y ayuda a lo largo de esta carrera de fondo, que si los mencionase a todos me quedaría sin espacio. Voy a intentar no dejarme a nadie en el tintero...

En primer lugar, a mi tutor, Iván Puente, por guiarme, orientarme y corregirme a lo largo de este proyecto.

A aquellos a los que pregunté dudas y supieron respondérmelas de la mejor manera posible y sin poner nunca una mala cara, en especial a mis amigos los tenientes Pablo Villabrille e Iván Quirós de la Guardia Civil por su incondicional apoyo desde hace años animándome a seguir siempre adelante y no desistir. A todos los que han contribuido para que este trabajo saliese adelante aportándome la mejor información y respondiendo a todas mis dudas, especialmente merecen ser nombrados los capitanes Albert Sánchez y Morillo Martín, del Tercio de Armada, el TN Pita Leira de la Undécima Escuadrilla, el CC Florido Villegas del Grupo de Medios Aéreos de la UME y la Sección de Capacidades del GAR.

Para finalizar, agradecer a mi grupo de amigos y compañeros de la Escuela a todos aquellos que me enseñaron el valor de las pequeñas cosas y el compañerismo, por soportarme en los momentos más duros y por apoyarme siempre, sin olvidar a mi padrino y ahijados. Sin todos vosotros el paso por esta Escuela no hubiese sido lo mismo, echaré de menos los ratos junto con todos vosotros.

Todo esto va por los que más han sentido mis ausencias por la carrera que he elegido, a mis padres Fernando y Elisa por educarme tal y como lo han hecho con estos valores, a mi hermano Guille, abuela Elisa, a toda mi familia y a mi novia.

Y en especial a mi auténtico referente: mi abuelo. Sé que te hubiera encantado y hubiera sido tu mayor orgullo verme vestido de uniforme.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas.....	7
Lista de abreviaturas.....	9
1 Introducción y objetivos	13
1.1 Introducción	13
1.1.1 Terminología.....	13
1.2 Clasificación.....	14
1.2.1 Tablas de clasificación según las características físicas	14
1.2.2 Resto de clasificaciones	15
1.3 Motivación	15
1.4 Objetivos del proyecto	16
2 Desarrollo del TFG.....	17
2.1 Reseña histórica	17
2.1.1 Introducción	17
2.1.2 Desde mediados del siglo XIX hasta principios del siglo XX.....	17
2.1.3 Primera mitad del siglo XX	19
2.1.4 La Guerra Fría.....	19
2.1.5 A partir de los años 70 hasta la actualidad	20
2.2 Uso de drones en España a nivel civil.....	21
2.2.1 El sector civil: numerosos actores	21
2.2.2 Aplicaciones profesionales de drones a nivel civil.....	22
2.2.3 Transición a la nueva normativa	22
2.2.4 La Normativa comunitaria sobre operaciones con UAS	23
2.2.5 Requisitos exigidos para el vuelo de drones	23
2.2.6 Elementos claves de la nueva normativa	24
2.2.7 Categorías de operaciones con UAS.....	25
2.3 Drones en el Ministerio de Defensa	28
2.3.1 Propósito de empleo	28
2.3.2 Cronología	28
2.3.3 Marco jurídico específico	29
2.3.4 Formación	30
2.4 Características de los sistemas empleados en Defensa	30
2.4.1 Partes de un sistema UAS.....	30

2.5 Sistemas no tripulados: indispensables en operaciones de Infantería de Marina	33
2.5.1 Sistemas Nano	34
2.5.2 Sistemas Micro	36
2.5.3 Sistemas Mini	37
2.5.4 Sistemas Small.....	38
2.6 ¿Cómo completar los sistemas existentes?	41
2.6.1 Sensores GPR	42
2.6.2 Radar de apertura sintética.....	43
2.6.3 Fotogrametría.....	44
2.6.4 Sensores LiDAR	45
2.6.5 Sensores ViDAR.....	46
2.6.6 Otro tipo de sensores	47
2.7 La UME como banco de pruebas	48
2.8 Problemas en el empleo de UAV	49
2.8.1 Problemas técnicos	50
2.8.2 Problemas éticos	50
2.8.3 Problemas económicos	50
2.8.4 Problemas de gestión del espacio aéreo.....	50
2.8.5 Problemas de seguridad	51
3 Resultados	55
3.1 Factores por considerar a la hora de proponer un sistema	55
3.2 Sensores LiDAR y su aplicación al mundo militar.....	55
3.2.1 Funcionamiento del LiDAR	56
3.2.2 Ventajas del sistema LiDAR UAV.....	58
3.2.3 Aplicaciones en el ámbito militar	58
3.2.4 Un sensor multipropósito: estudio de las opciones existentes.....	61
3.2.5 Conclusiones del estudio previo	65
3.3 Trabajo de campo.....	66
3.3.1 Primer caso de estudio	66
3.3.2 Segundo caso de estudio.....	68
4 Conclusiones y líneas futuras	81
4.1 Conclusiones del proyecto	81
4.2 Líneas futuras de investigación.....	82
4.2.1 Evaluación real de un sensor LiDAR topo batimétrico	82
4.2.2 Evaluación del sistema GPR montado en UAV	82
4.2.3 Nano drones	82

4.2.4 Sistemas C-UAV	82
5 Bibliografía.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Terminología referente a los vehículos aéreos no tripulados. Elaboración propia.....	14
Figura 2-1 El Curtis-Sperry Aerial Torpedo en 1918 [6]	18
Figura 2-2 QH-50 (izquierda) y D-21 (derecha). Elaboración propia.....	20
Figura 2-3 Actores en el sector civil. Elaboración propia	22
Figura 2-4 Zonas restringidas al vuelo en Galicia. Elaboración propia	25
Figura 2-5 INTA SIVA empleado por el Ejército de Tierra [12].....	28
Figura 2-6 MQ9B Predator del Ejército del Aire [13]	29
Figura 2-7 Elementos de un sistema UAS. Elaboración propia	30
Figura 2-8 Estación de control del sistema Scan Eagle a bordo del BAA Galicia [16]	32
Figura 2-9 Sistemas Clase I empleados por la Armada. Elaboración propia	34
Figura 2-10 Sistema Blackhornet. Elaboración propia.....	35
Figura 2-11 Empleo en Infantería de Marina de los sistemas Micro. Elaboración propia.....	36
Figura 2-12 WASP AE (izquierda) y HUGINN X1 (derecha). Elaboración propia	37
Figura 2-13 Lanzamiento del RPAS SEEKER [18].....	38
Figura 2-14 Lanzamiento del Scan Eagle durante su despliegue en Irak [20]	39
Figura 2-15 Imagen IR tomada desde el Scan Eagle en Irak [20].....	41
Figura 2-16 Sistema GPR montado en RPAS y producto final [23].....	42
Figura 2-17 MDT obtenido usando un RPAS [26]	44
Figura 2-18 Visión global del sistema ViDAR. Elaboración propia.....	47
Figura 2-19 Diversos RPAS empleados por la UME [28]	48
Figura 2-20 Desinfección empleando un RPAS [29]	49
Figura 2-21 Ejemplo de diversas zonas aéreas y NOTAM [11]	51
Figura 2-22 Neutralización de la amenaza con equipamiento específico. Elaboración propia.....	52
Figura 3-1 Ejemplo de un producto obtenido mediante escaneo LiDAR desde un UAV [31].....	56
Figura 3-2 Explicación gráfica del funcionamiento del LiDAR batimétrico [32]	57
Figura 3-3 Diversas fases de un reconocimiento de playa empleando buceadores. Elaboración propia	59
Figura 3-4 Reconocimiento de una playa y su zona de costa. Elaboración propia	60
Figura 3-5 Mini VUX-1UAV (izquierda) y BDF-1 (derecha). Obtenido de [43].....	62
Figura 3-6 RIEGL VQ-840-G montado sobre un RPAS. Obtenido de [44]	63
Figura 3-7 ASTRALite montado en RPAS. Obtenido de [47].....	64
Figura 3-8 Comparativa de densidades de puntos [38]	65
Figura 3-9 Representación esquemática de un escaneo con LiDAR batimétrico en función del fondo marino. Obtenido de [51]	66
Figura 3-10 Comparación de datos [51]	68

Figura 3-11 Mapa topográfico (superior) y carta náutica (inferior) del área de estudio. Elaboración propia	69
Figura 3-12 Área de estudio en detalle. Elaboración propia	70
Figura 3-13 Imagen satélite de la playa de estudio. Elaboración propia.....	70
Figura 3-14 Imagen aérea de la playa de estudio. Elaboración propia.....	71
Figura 3-15 Vista de la zona costera obtenida con un LiDAR topo-batimétrico. Elaboración propia	71
Figura 3-16 Perfil transversal de una zona cercana a la costa. Elaboración propia	72
Figura 3-17 Campo escalar obtenido a partir de la nube de puntos. Elaboración propia.....	72
Figura 3-18 Diferencia entre segmentos terrestre y marino. Elaboración propia.....	73
Figura 3-19 Área de estudio. Elaboración propia.....	73
Figura 3-20 Campo escalar del fondo marino. Elaboración propia.....	74
Figura 3-21 Creación de veriles. Elaboración propia	74
Figura 3-22 Curvas de nivel superpuestas en imagen satélite, en la derecha en detalle. Elaboración propia	75
Figura 3-23 Modelo digital del terreno obtenido en base a los puntos. Elaboración propia	76
Figura 3-24 Perfil obtenido en base a un MDT. Elaboración propia	76
Figura 3-25 Creación de curvas de nivel. Elaboración propia	77
Figura 3-26 Curvas de nivel superpuestas sobre imagen satélite. Elaboración propia	78
Figura 3-27 Resumen del producto obtenido. Elaboración propia.....	79
Figura 3-28 Cortes transversales del estudio de un río [40]	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Clasificación de los RPAS según la NATO. Elaboración propia	15
Tabla 2-1 Subcategorías recogidas en la categoría abierta. Elaboración propia	26
Tabla 2-2 Requisitos técnicos de la Clase 5 [11]	27
Tabla 2-3 Requisitos técnicos de la Clase 6 [4]	27
Tabla 2-4 Tabla de características del Scan Eagle [10].....	40
Tabla 3-1 Comparación de sensores (tomada de [38], [39], [40], [41] y [42])	61
Tabla 3-2 Comparativa de método de batimetría [38].....	67

LISTA DE ABREVIATURAS

ACS: Estación de control en el aire (*Air control Station*)

AESA: Agencia Estatal de seguridad aérea

AGL: Sobre el nivel del suelo (*Above ground level*)

ALB: Batimetría Lidar Aérea (*Airborne Lidar Bathymetry*)

ALH: Hidrografía Laser Aérea (*Airborne Lidar Hydrography*)

ARD: Agrupación Reforzada de Desembarco

ASW: Guerra antisubmarina (*Anti-submarine warfare*)

BAM: Buque de Acción Marítima

BCG: Batallón de Cuartel General

BLOS: Sin visión directa (*Beyond line of sight*)

BON: Batallón

BRIMAR: Brigada de Infantería de Marina

C2: Mando y Control (*Command and Control*)

CAD: Diseño asistido por ordenador (*Computer-aided design*)

CIA: Compañía

C-IED: Contra IED (*Counter IED*)

COMINT: Inteligencia de las comunicaciones (*Communications intelligence*)

COMJAM: Interferencia de comunicaciones (*Communications Jamming*)

CS: Estación de control (*Control Station*)

CSAR: Búsqueda y rescate en combate (*Combat search and rescue*)

DGAM: Dirección General de Armamento y Material

DGPS: GPS diferencial

DoD: Departamento de Defensa (*Department of Defense*)

DUO: Piloto de UAS (*Designated UAS Operator*)

EA: Ataque electrónico (*Electronic Attack*)

ECM: Contramedidas electrónicas (*Electronic Counter Measures*)

ELINT: Inteligencia electrónica (*Electronic Intelligence*)

EOD: Desactivador de explosivos (*Explosive Ordnance Disposal*)

EO-IR: Electroóptico/Infrarrojo

ESM: Medidas de apoyo a Guerra electrónica (*Electronic Support Measures*)

ESM: Medidas de apoyo electrónico (*Electronic Support Measures*)

EW: Guerra Electrónica (*Electronic Warfare*)

FCSE: Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado

FGNE: Fuerza de Guerra Naval Especial

FL: Nivel de vuelo (*Flight level*)

FW: Ala fija (*Fixed Wing*)

GAR: Grupo de Acción Rápida

GCS: Estación de control en tierra (*Ground control station*)

GEDE: Grupo Especialista en Desactivación de Explosivos

GIS: Sistema de Información Geográfica (*Geographical Information System*)

GPR: Radar de penetración terrestre (georradar) (*Ground penetrating radar*)

GPS: Sistema de posicionamiento global (*Global positioning system*)

HALE: Gran altitud y amplia autonomía (*High altitude, long endurance*)

IED: Artefacto explosivo improvisado (*Improvised Explosive Device*)

INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

IPOE: Análisis de inteligencia del entorno operativo (*Intelligence Preparation of the Operational Environment*)

ISR: Inteligencia, vigilancia y reconocimiento (*Intelligence, surveillance and reconnaissance*)

ISTAR: Inteligencia, vigilancia y adquisición de blancos (*Intelligence, surveillance and target*)

LORAN: Navegación de largo alcance (*Long Range Navigation*)

LOS: Visión directa (*Line of sight*)

MALE: Media altitud y amplia autonomía (*Medium altitude, long endurance*)

MDT: Modelo Digital del Terreno

MIO: Operación de Interdicción Marítima (*Maritime Interdiction Operation*)

MTOW: Peso máximo al despegue (*Maximum take-off weight*)

NATO: Organización del Tratado Atlántico Norte (*North Atlantic Treaty Organization*)

NOTAM: Aviso a navegantes (*Notice to Airmen*)

NRBQ: Nuclear, Radiológico, Biológico y Químico

OACI: Organización de Aviación Civil Internacional

OTH: Mas allá del horizonte (*Over the Horizon*)

PEGASO: Policía especialista en gestión aeronáutica y seguridad operacional

RHIB: Embarcación semirrígida hinchable (*Rigid Hull Inflatable Boat*)

RPAS: Sistema aéreo pilotado por control remoto (*Remoted pilot aircraft system*)

RW: Ala rotatoria (*Rotary wing*)

SAR: Búsqueda y rescate (*Search and Rescue*)

SCC: Sección

SCS: Estación de control a bordo de un barco (*Ship control station*)

SERECO: Sección de reconocimiento

SIGINT: Inteligencia de señales (*Signal intelligence*)

STANAG: Acuerdo de normalización (*Standardization Agreement*)

TACAN: Sistema de navegación aérea táctica (*Tactical air navigation system*)

TEAR: Tercio de Armada

UAS: Sistema aéreo no tripulado (*Unmanned aerial system*)

UAV: Vehículo aéreo no tripulado (*Unmanned aerial vehicle*)

UCAS: Sistema aéreo de combate no tripulado (*Unmanned Combat Aerial System*)

UHF: Muy alta frecuencia (*Ultra High Frequency*)

UME: Unidad Militar de Emergencias

USAR: Búsqueda y rescate en entornos urbanos (*Urban Search and Rescue*)

USGS: Servicio geológico de Estados Unidos (*United States Geological Survey*)

USV: Embarcación no tripulada (*Unmanned Surface Vessel*)

UXO: Munición sin detonar (*Unexploded ordnance*)

VAMTAC: Vehículo de alta movilidad táctico

VANT: Vehículo aéreo no tripulado

VTOL: Despegue y aterrizaje vertical (*Vertical take-off and landing*)

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Los UAS son comúnmente conocidos por el público general como “*drones*”, habiéndose popularizado este término entre la población y siendo aceptado y recogido en el diccionario de la Real Academia Española. Las características fundamentales radican en que son vehículos aéreos no tripulados, manejados por control remoto o de manera automática, capaces de mantenerse en vuelo por medios aerodinámicos de forma sostenida, además de ser reutilizables. Estas características permiten diferenciar los UAV de los misiles, blancos aéreos o armas guiadas.

1.1.1 Terminología

Como se ha comentado en el apartado anterior, actualmente hay un gran desconocimiento entre el público general debido a la gran variedad de nombres con los cuales se denominan a este tipo de sistemas. La gran mayoría de la población los denomina dron, variación aceptada y recogida en el diccionario de la palabra inglesa *drone* y cuya traducción literal es *zángano*. Si se quiere profundizar en el campo hay que hacer distinciones en función del equipamiento o del tamaño. El término global es UAS, que abarca el resto de los conceptos, puesto que todos los RPAS y UAV se engloban dentro de los UAS, pero un RPAS no es lo mismo que un UAV. En caso de que nos encontremos con un sistema definido como UCAS o UCAV interpretaremos que porta armas y está capacitado para participar en combate. La terminología en español se refiere a este tipo de artefactos como VANT en caso de que sea un Vehículo Aéreo No Tripulado o ANT si nos referimos a la Aeronave No Tripulada. Esta nomenclatura no es demasiado popular.

Un RPAS es toda aeronave capaz de ser manejada de manera remota por un piloto, y este término abarca tanto la aeronave como el sistema de control, independientemente de su tamaño. Si nos referimos al sistema como UAV la definición es parecida, aunque es este caso el sistema no tiene por qué estar necesariamente manejado por un piloto, sino que puede estar totalmente automatizado. Este término se acuñó en un origen en el mundo militar y ha estado ligado al mismo, aunque tradicionalmente solo para nombrar a la propia aeronave y no al sistema en su conjunto y actualmente tiende al desuso. A lo largo de este proyecto se empleará principalmente el término RPAS debido a que detrás del mismo siempre hay un operador.

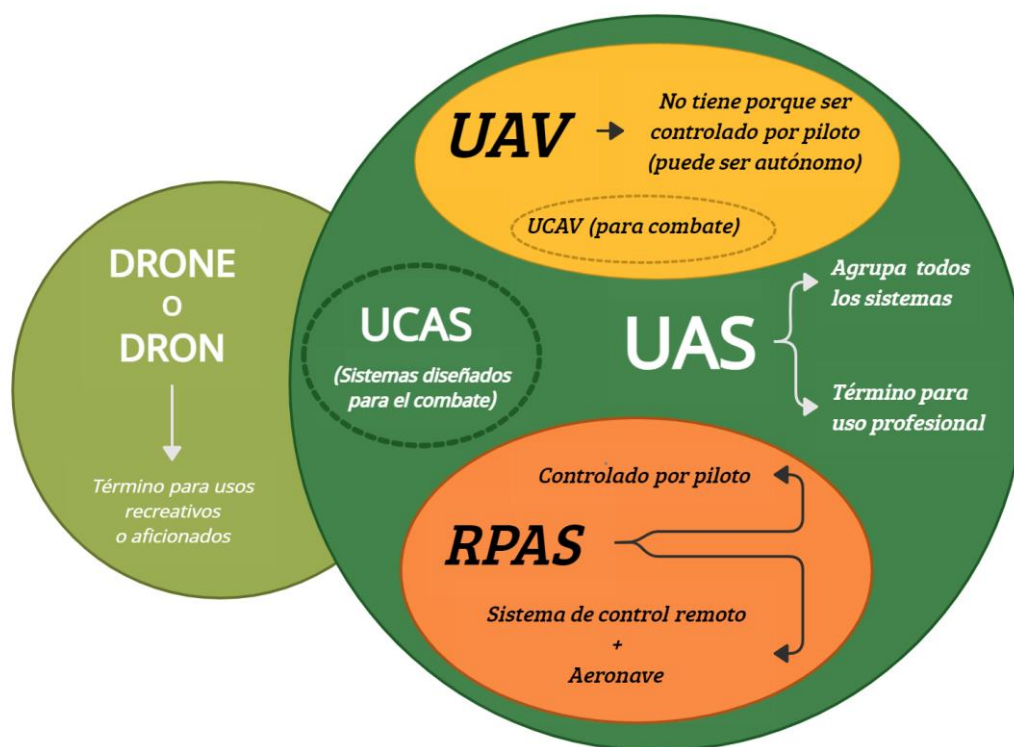


Figura 1-1 Terminología referente a los vehículos aéreos no tripulados. Elaboración propia

1.2 Clasificación

No existe una clasificación aceptada universalmente para los UAS debido a la diversidad de modelos existentes y las distintas funciones que cada uno puede realizar. Las formas de clasificación más usadas son las siguientes:

1.2.1 Tablas de clasificación según las características físicas

Hay diversas clasificaciones según el organismo, destacando las clasificaciones del Departamento de Defensa (DoD) de los Estados Unidos, que se divide en cinco grupos en función del peso del UAV, el tamaño, la autonomía, la forma de sustentación (ala fija, rotatoria, VTOL), siendo el orden más habitual según el peso máximo al despegue (MTOW). Esta característica es la que tiene en cuenta la clasificación estandarizada de la NATO al igual que el peso del aparato, su empleo, su altitud o rango.

Actualmente en España existen diversas clasificaciones para drones de uso civil realizadas por la AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea) que serán explicadas en el apartado de legislación.

A la hora de trabajar con drones y definir sus usos y empleos, se trabajará con la tabla de clasificación NATO, que está vigente para los UAS de uso militar en España.

Clase	Categoría	Unidad que lo emplea	Altitud de operación	Alcance
Clase I (menos de 150 kg)	SMALL >20 kg	Unidades nivel táctico (con sistema de lanzamiento)	Hasta 5000 ft AGL	50 km (LOS)
	MINI 2-20 kg	Unidades por debajo de nivel táctico (lanzamiento manual)	Hasta 3000 ft AGL	25 km (LOS)
	MICRO <2 kg	Sección o nivel individual	Hasta 200 ft AGL	5 km (LOS)
Clase II (de 150 kg a 600 kg)	TACTICAL	Unidades nivel táctico	Hasta 10000 ft AGL	200 km (LOS)
Clase III (mas de 600 kg)	STRIKE/COMBAT	Nivel estratégico	Hasta 65000 ft	ILIMITADO (BLOS)
	HALE	Nivel estratégico	Hasta 65000 ft	ILIMITADO (BLOS)
	MALE	Nivel operacional	Hasta 45000 ft MSL	ILIMITADO (BLOS)

Tabla 1-1 Clasificación de los RPAS según la NATO. Elaboración propia

Existe una categoría más, incluida dentro de la Clase I, que es la denominada Nano, dentro de la cual se integran los aparatos de menor tamaño, con un alcance inferior a 1 kilómetro, una altitud de vuelo de menos de 100m y un MTOW inferior a 0.025 kg. Este tipo de aparatos aún se están probando y desarrollando y su uso no está tan extendido como el resto de las categorías.

1.2.2 Resto de clasificaciones

Según la misión para la cual vaya a ser empleado el UAS se le dotará de diversos sensores y herramientas específicas. En el ámbito militar destaca la clasificación entre UCAS (UAS de combate) y UAS ISTAR (obtención de inteligencia).

Otro tipo de orden que se puede seguir, y que el criterio NATO de clasificación tiene en cuenta, es en función del tipo de operación que vaya a desarrollar y al nivel al que vaya a servir, ya sea nivel Táctico, Operacional o Estratégico, y dentro de cada uno de estos niveles, podemos diferenciar los UAS en función de la unidad que los emplee, de forma que no es extraño encontrar aparatos referenciados como “UAS nivel Sección” o “UAS nivel Pelotón”.

1.3 Motivación

El empleo a nivel profesional de los RPAS, los popularmente conocidos como drones, ha experimentado un crecimiento exponencial en el último lustro, tanto en el ámbito civil como en el militar. La disminución del precio de coste, los avances tecnológicos empleados en su producción y la reducción del tamaño de los componentes ha facilitado en gran medida el uso de este tipo de sistemas.

Cada vez con más frecuencia, aparecen en diversos medios de comunicación especializados en Defensa y en diversas páginas web, informaciones relativas al empleo de RPAS por las diversas FCSE y por parte del Ministerio de Defensa, como por ejemplo en la Operación “Balmis” (durante la pandemia del COVID-19 [1] y [2]) y en las diversas campañas de la Operación “Centinela Gallego” (dedicada a la prevención de los incendios forestales durante la campaña estival en Galicia, como aparece reflejado en [3], [4] y en [5]). Esto ha puesto de manifiesto la importancia de este tipo de sistemas, no solo para su uso exclusivo en operaciones militares, sino como apoyo a las organizaciones civiles.

La creación de nuevas unidades destinadas a manejar este tipo de plataformas y su empleo, cada vez más extendido, de estos sistemas en operaciones en el extranjero, así como la creación de planes a nivel nacional y la llegada de nuevas aeronaves, ha propiciado toda una nueva normativa para coordinar la formación, las actuaciones y el espacio aéreo compartido con las aeronaves tripuladas.

1.4 Objetivos del proyecto

El principal objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado consiste en realizar una revisión de los sistemas RPAS existentes, además de las formas en que pueden ser completados, introduciendo al lector al mundo de la aviación no tripulada, reseñando su historia, legislación actual y destacando los usos a nivel civil y militar. En particular, se han investigado los sistemas empleados en la actualidad por la Armada Española y se ha estudiado la manera de completarlos empleando diversos sensores utilizados en el mundo civil.

El estudio se focalizará concretamente en los sensores que pueden ser de empleo en apoyo a las operaciones de Infantería de Marina, específicamente en los LiDAR topo-batimétricos que pueden ir montados sobre un RPAS, estudiando en profundidad las opciones existentes en el mercado, comparándolas y revisando datos obtenidos.

El propósito es lograr aumentar las capacidades de la Armada y dotar a la misma de la posibilidad de enfrentarse a problemas existentes, desde un punto de vista distinto ya que el uso de estas plataformas aún sigue centrado de una manera casi exclusiva en misiones de obtención de inteligencia y visualización de imágenes.

2 DESARROLLO DEL TFG

2.1 Reseña histórica

2.1.1 Introducción

El uso militar de los RPAS comenzó a generalizarse en la década de 1970. Durante esta época, en Israel, se emplearon diversos sistemas como los Tadiran Mastiff o el IAI Scout con el fin de aprovecharlos en labores de vigilancia y reconocimiento.

Con la primera guerra del Golfo (1990-1991) su uso se extendió, evolucionando desde las misiones ISTAR (siglas en inglés de inteligencia, vigilancia, adquisición de blancos y reconocimiento) hasta otras con cometidos más tácticos y con capacidad para portar y utilizar armamento.

Aunque el desarrollo de este tipo de sistemas corresponde principalmente a las últimas décadas del siglo XX, su origen se podría remontar al siglo anterior, evolucionando desde entonces hasta los dispositivos que se emplean hoy en día.

2.1.2 Desde mediados del siglo XIX hasta principios del siglo XX.

Antes de que el 17 de diciembre de 1903 los hermanos Wright lograsen realizar el primer vuelo a motor de manera controlada y sostenida, los seres humanos ya habían experimentado la sensación de elevarse por los cielos gracias a los globos aerostáticos. Estos ingenios permiten volar mediante el principio de los fluidos de Arquímedes, debido al aire caliente que está contenido dentro de la vela y que permite el vuelo sin ningún tipo de propulsión, dejándose llevar simplemente por las corrientes de aire.

Aunque aparecieron en el siglo XVIII no fue hasta el año 1849 cuando fueron usados de una manera “remota”, siendo el origen de la navegación aérea de manera no tripulada. En este año se emplearon globos con explosivos para bombardear la ciudad de Venecia.

No fue hasta febrero de 1863 cuando un inventor de Nueva York llamado Charles Perley, patentó un dispositivo similar al empleado catorce años antes en Italia, consistente en un primitivo dispositivo con un temporizador que dejaba caer la carga explosiva.

Los primeros intentos de obtención de inteligencia mediante el uso de aeronaves no tripuladas datan del año 1883, cuando se lograron obtener fotografías tomadas de manera remota desde una cometa. Esta técnica fue empleada en la guerra hispano-estadounidense por el bando americano, logrando información crucial de las posiciones y fortificaciones españolas.

Hubo que esperar hasta 1898 para obtener un dispositivo capaz de ser controlado a distancia: el “Teleautomaton”. Este artefacto naval, inventado por Nikola Tesla, era capaz de desplazarse, detenerse y girar por control remoto. Durante la última década del siglo XIX y la primera del Siglo XX se desarrollaron diversos ingenios controlados de manera remota, como un torpedo filoguiado, y se

proyectaron otros como una bomba voladora a reacción, idea que sería desarrollada en décadas posteriores por ingenieros alemanes.

Los americanos Elmer Sperry, Lawrence Sperry y Peter Cooper Hewitt se centraron en mejorar las primitivas tecnologías de radiocontrol y guiado inercial, destacando la invención del giróscopo estabilizador automático, el cual permitía a los aparatos voladores mantenerse estables, nivelados y rectos mientras estaban en el aire. Los Sperry no solo inventaron el giróscopo. En combinación con el inventor eléctrico Peter Cooper Hewitt, fueron capaces de guiar de manera automática un avión en 1916. El Hewitt-Sperry era un aeroplano pilotado, con la única modificación de portar un piloto automático, que permitía seguir rutas programadas y variaciones en la altitud. Estos avances fueron empleados en modificar aeronaves de entrenamiento de la US Navy, siendo bautizados como Curtiss N-9, logrando convertirla en el primer UAV con radiocontrol, que sería bautizado como “Sperry Aerial Torpedo”.



Figura 2-1 El Curtiss-Sperry Aerial Torpedo en 1918 [6]

Este primitivo UAV logró levantar el vuelo el 6 de marzo de 1918, impulsado por un motor de fabricación Ford de 40 CV y con un peso de 270 kg (siendo la carga útil de la aeronave la mitad del peso). El método de guiado requería conocer el viento y la distancia existente hasta el objetivo, de forma que se calculaba la velocidad necesaria para el vuelo, que estaba estabilizado por el giróscopo. Una vez que la aeronave alcanzaba el objetivo, las alas se separaban de la carga, por lo que caía con la carga explosiva. A pesar de haber sido probado numerosas veces, jamás fue empleado en una misión real de combate.

De esta época destacan artefactos similares como el Kattering Bug, una bomba volante con un alcance de 64 kilómetros y que lograba acertar en el blanco con cierta precisión. Era similar al Sperry, pero podía llevar una menor carga útil. O el blanco aéreo A.T. que demostró su viabilidad en el empleo de señales radio para guiar una aeronave hacia un destino.

A pesar de haberse desarrollado en los años anteriores a la Primera Guerra Mundial, ningún sistema de este tipo fue empleado en la contienda. Tras la misma hubo ciertos países que mostraron interés en crear sistemas similares. En la década de 1920, en Reino Unido, se desarrolló un monoplano capaz de transportar cargas de aproximadamente 110 kg a una distancia de 480 kilómetros mediante un control de radio en los primeros instantes del vuelo, para posteriormente seguir una ruta establecida previamente. Se bautizó como LARNYX y se construyeron doce unidades.

2.1.3 Primera mitad del siglo XX

Durante estos años, el Reino Unido se centró en el desarrollo de blancos aéreos reutilizables y radiocontrolados mientras que otras potencias como Alemania se decantaron por la propulsión a reacción y el campo de los misiles de crucero.

Los británicos produjeron, entre los años 1934 y 1943, unos cuatrocientos veinte modelos de un blanco pilotado por radiocontrol que se basaba en un De Havilland DH.82 Tiger Moth. A este blanco se le denominó “Queen bee” y se empleaba para el adiestramiento de la artillería del ejército y de la marina. Paralelamente en Estados Unidos se desarrollaron blancos similares, con empresas como la Radioplane Company, que posteriormente se convertiría en Northrop-Grumman. Junto con ingenieros de Lockheed perfeccionaron la tecnología de control remoto creando entre otros los OQ Targets y el RP4.

Los alemanes desarrollaron bombas volantes (el germen de los actuales misiles de crucero) como la Vergeltungswaffe-1, comúnmente conocida como V-1. Este fue el primer misil de crucero con un sistema a reacción, con un sistema de guiado barométrico para regular la velocidad y altitud, y un anemómetro para aproximar la distancia, pudiendo portar hasta 2000 libras de explosivo a una velocidad máxima de 630 km/h emitiendo un peculiar zumbido. Estaba pensada para ser usada contra objetivos “no militares” y el sistema de lanzamiento consistía en una rampa estilo catapulta, y aunque era autónoma, no era guiada por radiocontrol por lo que rara vez alcanzaba el objetivo con precisión. De las treinta mil unidades construidas se lanzaron más de veinte mil contra objetivos en Inglaterra y Bélgica.

Como respuesta a la estrategia alemana, la US Navy impulsó la creación del equipo SAU-1, encargado de convertir bombarderos pesados B-17 y PB4Y-1 en aeronaves capaces de ser guiadas por control remoto y contar con un sistema de televisión para, mediante el empleo de hasta 25000 libras de explosivos, destruir las rampas de lanzamiento de los V-1. La única rémora de estos aviones era que tenían que ser despegados por pilotos que, tras elevar el avión hasta unos 2000 pies de altitud, programaban los datos para el ataque y saltaban en paracaídas. De esta manera se emplearon por primera vez en la historia, vehículos no tripulados para atacar a otros UAV.

2.1.4 La Guerra Fría

Las tensiones entre la URSS y los Estados Unidos hacían necesario el desarrollo por parte de ambas naciones de nuevos sistemas de espionaje y ataque. La tecnología desarrollada en años anteriores, principalmente la alemana relacionada con los motores a reacción de las bombas V-1, dieron paso a nuevos sistemas como el SD1 Observer, equipados con cámaras para realizar reconocimientos fotográficos y que se controlaban desde estaciones en tierra o desde aeronaves tripuladas que volaban a altitudes superiores. Estas aeronaves espía “autónomas” volaban a baja altitud y eran muy difíciles de detectar, recolectando gran cantidad de inteligencia y evitando los problemas asociados a ir tripuladas, tales como el derribo y la captura del piloto. Se desplegaron sistemas como el Firebee y el Lightning Bug sobre China, Vietnam o Corea del Norte a mediados de la década de los 60, realizando misiones de reconocimiento, SIGINT o ELINT. Destacan de esta época el QH-50 Dash, que fue el primer RPAS de ala rotatoria capaz de aterrizar y despegar de un barco, siendo empleada en misiones ASW portando cargas de profundidad y torpedos, o el Northrop “Chukar” un blanco aéreo a reacción, que ha evolucionado a lo largo de estos años y que sigue siendo usado hoy en día por las Fuerzas Armadas de diversos países, entre ellos España.



Figura 2-2 QH-50 (izquierda) y D-21 (derecha). Elaboración propia

Del otro lado del telón de acero se desarrollaron aeronaves como el La17, las series DBR o el VR3, que realizaron misiones de reconocimiento sobre países europeos y que llegaron a ser suministrados a países afines.

Durante esta época y para evitar ser detectado, hubo un especial interés por parte de ambos bloques para desarrollar aeronaves muy veloces e “invisibles” al radar. La empresa Lockheed desarrolló en 1965 el D-21, siendo el UAV más rápido de la historia debido a que podía alcanzar Mach 4, operando a 80000 pies de altitud y cubriendo un rango de unos 5500 kilómetros. Solo fue fabricada una unidad, que se perdió en un accidente.

2.1.5 A partir de los años 70 hasta la actualidad

El ejército de Estados Unidos buscaba desarrollar sistemas capaces de volar a gran altitud para evitar los misiles enemigos y que a la vez fuesen capaces de recolectar inteligencia, dando origen a los UAS “HALE” (Gran altitud y distancia por sus siglas en inglés). Este tipo de sistemas fueron probados durante los primeros años de la década de los 70 pero nunca llegaron a ser usados realmente, por lo que los diversos proyectos fueron abandonados o sufrieron accidentes. A este tipo de plataformas se les dotó de avanzados sistemas de comunicaciones y reconocimiento, sentando la base para el desarrollo décadas después de los UAV de última generación como el “Global Hawk”.

Si los anteriores UAS se centraban en labores a gran altitud, durante esta época también fueron desarrollados los “MALE” que volaban a menor altitud y cuyo coste, obviamente, era menor. La evolución de este tipo de sistemas desembocó en los sistemas actuales como el “Predator”, en uso por numerosos países, entre ellos España, donde es operado desde el año 2019 por el Ala 23 del Ejército del Aire [6].

No solo los americanos se centraron en este campo. El desarrollo de nuevos sistemas por parte de Israel, o la adaptación y modificación de algunos ya existentes, contribuyeron en las contiendas en las que se vio inmerso este país durante la década de 1970. En un principio se modificaron blancos aéreos “Chukar” para emplearlos en misiones de reconocimiento desarrollándose posteriormente los “Tadiran Mastiff” o el “IAI Scout”, ambos empleados para labores de reconocimiento y seguimiento en tiempo real de operaciones y que han sido empleados por numerosas naciones a lo largo de estos años. La principal ventaja de estos sistemas radicaba en el material del que estaban contruidos: fibra de vidrio, que hacía que el sistema fuese casi inapreciable a la señal radar, y que, unido a su pequeño tamaño, dificultaba su interceptación.

Las contiendas de la última década del siglo XX demostraron la eficacia en el empleo de drones, siendo la Primera Guerra del Golfo el lugar donde se empezaron a usar de manera generalizada, llegando a emplearse sistemas cada vez más pequeños y económicos, como el FQM-151 Pointer, de tan solo 4 kilogramos de peso. Posteriormente en otros conflictos como la guerra de los Balcanes se emplearon sistemas MALE como el “Predator” [7].

Los nuevos conflictos de diferente tipo, los avances tecnológicos que se han ido desarrollando, la integración de nuevos sensores y sistemas, la miniaturización de cámaras y componentes y el

abaratamiento de este tipo de plataformas han permitido la implantación de los drones en las Fuerzas Armadas de casi todos los países desde la Guerra de Irak o la de Afganistán.

Las más recientes intervenciones en Mali o en la República Centroafricana han demostrado la importancia de contar con estos medios [8], ya sea para labores de reconocimiento o bien portando armamento, los conocidos como UCAS (sistemas aéreos no tripulados de combate). La primera acción de este tipo tuvo lugar el 3 de noviembre de 2002 en Yemen cuando se lanzó un misil Hellfire desde un Predator contra un vehículo en el cual viajaba un miembro de Al Qaeda.

2.2 Uso de drones en España a nivel civil

El creciente número de usuarios ha hecho necesaria la creación de una normativa específica, tanto a nivel europeo como nacional, así como la creación de diversos Planes estratégicos a nivel nacional. Aunque en su origen los drones fueron usados exclusivamente en el ámbito militar, desde los años 80 su uso se ha extendido al ámbito civil. Desde su inicio en Japón, en tareas de fumigación de cultivos hasta hoy en día, donde existe un parque estimado en la Unión Europea de más de 1,5 millones de drones para uso civil, y particularmente recreativo. El auge de los RPAS está motivado en parte por:

- La reducción del coste de estas plataformas, tanto a nivel de adquisición como de mantenimiento.
- Permite realizar trabajos calificados como peligrosos sin poner en riesgo al operador.
- El impacto ambiental que genera en comparación con una aeronave pilotada es menor.
- Tienen gran flexibilidad a la hora de despegar o tomar, pudiendo ser VTOL y sin requerir infraestructura especial.
- Permite realizar nuevas tareas, imposibles de realizar con aeronaves tripuladas, tales como la inspección en detalle de construcciones.

En estos últimos años la gran capacidad productiva de China ha hecho posible que los drones sean incluso empleados como juguetes o herramientas usadas por los aficionados para grabar.

2.2.1 El sector civil: numerosos actores

Múltiples actores juegan diversos papeles en el sector civil, desde los fabricantes de aeronaves a las agencias reguladoras del espacio aéreo, pasando por las formadoras de pilotos. Las agencias gubernamentales encargadas de redactar las normativas específicas y las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado velan por que el uso de los drones a nivel recreativo se realice en áreas distintas a las destinadas a usos profesionales o aquellas de uso restringido.

Las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado no solo se encargan de la supervisión del cumplimiento de la normativa, sino que también juegan un papel fundamental evitando que las aeronaves no tripuladas sean empleadas con fines ilícitos, terroristas o que violen nuestra intimidad. En los últimos años se han creado grupos específicos para detectar amenazas, identificar los infractores y posibles contramedidas para tales actividades ilícitas. Destaca dentro de la Guardia Civil, el equipo de Drones del Grupo de Acción Rápida (GAR), los equipos PEGASO dentro del Servicio Fiscal y Fronteras y los equipos anti drones del Cuerpo Nacional de Policía.

La gestión del espacio aéreo y del espectro radioeléctrico debe de ser eficiente, permitiendo así la coordinación entre los diversos usuarios y los datos obtenidos por sus aparatos, estando estos integrados en el sistema de gestión del espacio aéreo sin provocar interferencias con las aeronaves tripuladas, con los riesgos asociados que conlleva.

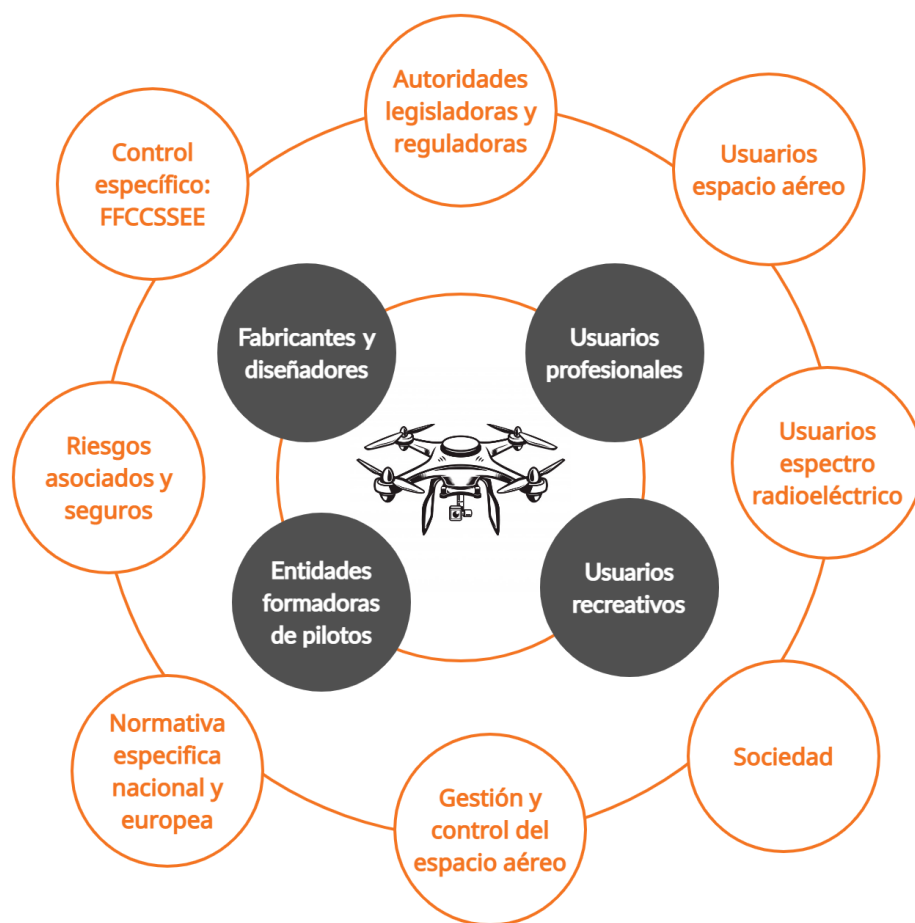


Figura 2-3 Actores en el sector civil. Elaboración propia

2.2.2 Aplicaciones profesionales de drones a nivel civil

- Agricultura y medioambiente: Seguimiento de cultivos, gestión del riego, detección de características del terreno, combinación para trabajos con maquinaria, control de actividades ilícitas o detección de vertidos, cartografía y catalogación de masas forestales.
- Obra civil, minería e ingeniería: Levantamientos topográficos 3D, empleo para creación de cartografía o control y seguimiento de excavaciones y obras.
- Mantenimientos: preventivo y correctivo (especialmente en ambientes peligrosos como torres de alta tensión), inspección de zonas de difícil acceso, inventario de activos de una empresa y seguimiento o reconocimiento de instalaciones.
- Filmación: Grabación de video a nivel profesional a diversa altura y obtención de imágenes en alta resolución (4K), todo ello de forma más silenciosa y polivalente que si se empleasen medios aéreos tripulados.
- Seguros: Inventario de seguros, evaluaciones de daños y seguimiento de prevención de fraude.
- Agencias gubernamentales: Vigilancia y protección de instalaciones críticas o fronteras, seguimiento y persecución de actividades ilícitas, búsqueda y localización de personas desaparecidas o apoyo en catástrofes y desastres naturales, entre otros.

2.2.3 Transición a la nueva normativa

Los primeros inicios de regulación se encuentran recogidos en la Ley 18/2014 [9] con la que se resolvió la falta de un régimen jurídico inicial aplicable a los RPAS, estableciendo

las primeras zonas de operación de estos aparatos y una serie de limitaciones legales y obligaciones del operador a nivel genérico.

Con el Real Decreto 1036/2017 [10] se abren nuevos escenarios de vuelo en zonas urbanas, sobre grupos de personas o en condiciones especiales como es el caso del vuelo nocturno, recogiendo los requisitos para un vuelo profesional: la necesidad de un registro y un título de piloto de drones. Esta es la normativa actual en vigor hasta el 2023, conviviendo asimismo en este periodo transitorio con la normativa comunitaria sobre operaciones con UAS.

2.2.4 La Normativa comunitaria sobre operaciones con UAS

Aprobada el 19 de Julio de 2019, regula el uso de drones en todo el territorio de la UE, respondiendo a muchos de los aspectos que las diversas normativas nacionales dejaban sin cubrir y profesionalizando este sector.

Esta nueva legislación europea se basa en el riesgo y naturaleza de las operaciones, adaptado a las características operacionales y del entorno de operaciones, difiriendo con la anterior normativa en la formación de los pilotos, registro de operadores y usuarios además de las características técnicas de las aeronaves.

Este marco jurídico no aplica a las aeronaves, personal u organizaciones que lleven a cabo actividades o servicios militares, de aduanas, policía, SAR, lucha contra incendios, control fronterizo, vigilancia costera o similares, bajo el control y la responsabilidad de un Estado miembro de la Unión Europea, emprendidas en el interés general por un organismo investido de autoridad pública o en nombre de este [10].

Las dos normas en las que se basa el nuevo reglamento son:

- Reglamento Delegado 2019/945 [12], del 12 de marzo de 2019, que regula los requerimientos y especificaciones para fabricantes de UAS.
- Reglamento de Ejecución 2019/947 [13], de 24 de mayo de 2019, que contextualiza el marco de uso de los UAS por parte de los operadores y pilotos independientemente de su uso. Esta norma ha sido modificada por el Reglamento de Ejecución 2020/746 del 4 de junio de 2020, que adecúa las fechas al marco de la pandemia del COVID-19.

2.2.5 Requisitos exigidos para el vuelo de drones

Desde el pasado 31 de diciembre de 2020 es de aplicación la normativa europea de UAS. Esta norma afecta a todos los drones, con independencia de su uso (ya sea recreativo o profesional) o tamaño/peso [9]. Es necesario cumplir una serie de requisitos antes de volar cualquier vehículo no tripulado en España:

- Registrarse como operador, salvo en los casos que la ley estipula como “Operaciones de categoría abierta” correctamente definidos. Con el registro se obtiene un número de operador que debe incluirse en el drone de forma visible.
- Formarse como piloto, en función de la categoría del drone. Dicha formación es telemática, gratuita y puede realizarse a través de la web de la AESA.
- Conocer las reglas de vuelo para drones, condicionadas por su categoría, la zona de vuelo y la presencia de personas o infraestructura, además de conocer las zonas de exclusión para el vuelo: en las cercanías de aeropuertos, zonas críticas, instalaciones militares...
- Tener una edad mínima de 16 años, salvo para drones de juguete con peso inferior a 250 gramos o aquellos de construcción privada en los cuales se reduce a 12 años.

2.2.6 Elementos claves de la nueva normativa

2.2.6.1 La Identificación Electrónica Remota Directa

Este nuevo sistema se aplica en los nuevos UAS que estén en el mercado y consiste en la emisión de una señal en tiempo real durante el vuelo que incluya:

- El número de registro del operador y el número de serie del UAS.
- La posición geográfica y altura sobre el suelo.
- La dirección y velocidad del UAS.
- Las coordenadas del despegue.

El número de registro de operador se compone de 11 caracteres alfanuméricos, los tres primeros correspondientes al país de registro, y los ocho siguientes números asignados al operador.

2.2.6.2 El Registro Electrónico

Aplicable a todos los UAS cuyo diseño esté sujeto a registro en base al Anexo 7 del OACI [15], especificando además la nacionalidad y la matrícula del aparato.

Todos los operadores de las categorías certificada y específica deberán estar registrados, además de aquellos de categoría abierta especialmente definidos en su apartado.

2.2.6.3 Las Zonas Geográficas UAS

Se establecen ciertas zonas geográficas donde se permiten, restringen o excluyen las operaciones con UAS, de forma que se controlen y minimizan los riesgos asociados (seguridad pública, protección de datos y privacidad). El conocimiento de estas zonas debe ser público y estar disponible en formato digital para que pueda ser empleado por los sistemas geo-awareness de los aparatos. Una vez definidas estas zonas cada Estado puede:

- Prohibir o restringir operaciones en ellas o bien requerir una autorización o cumplir ciertas condiciones.
- Definir normas ambientales específicas.
- Permitir el vuelo de aquellos aparatos que cuenten con determinados sistemas inteligentes.
- Modificar los requisitos operacionales de la categoría abierta en base a evaluaciones de riesgo.

Por ejemplo, en Galicia actualmente hay más de una treintena de zonas donde no se puede realizar el vuelo de drones. La sola presencia de un aeropuerto genera una zona restringida asociada, denominada CTR, de grandes dimensiones para evitar las interferencias con otras aeronaves en la fase final de toma de tierra o en el despegue. Otras posibles áreas van asociadas a la presencia de zonas de ejercicios militares, zonas restringidas por la ubicación de instalaciones sensibles o bien debido a criterios medioambientales. Se adjuntan, como ejemplo, las diversas zonas restringidas al vuelo en Galicia.

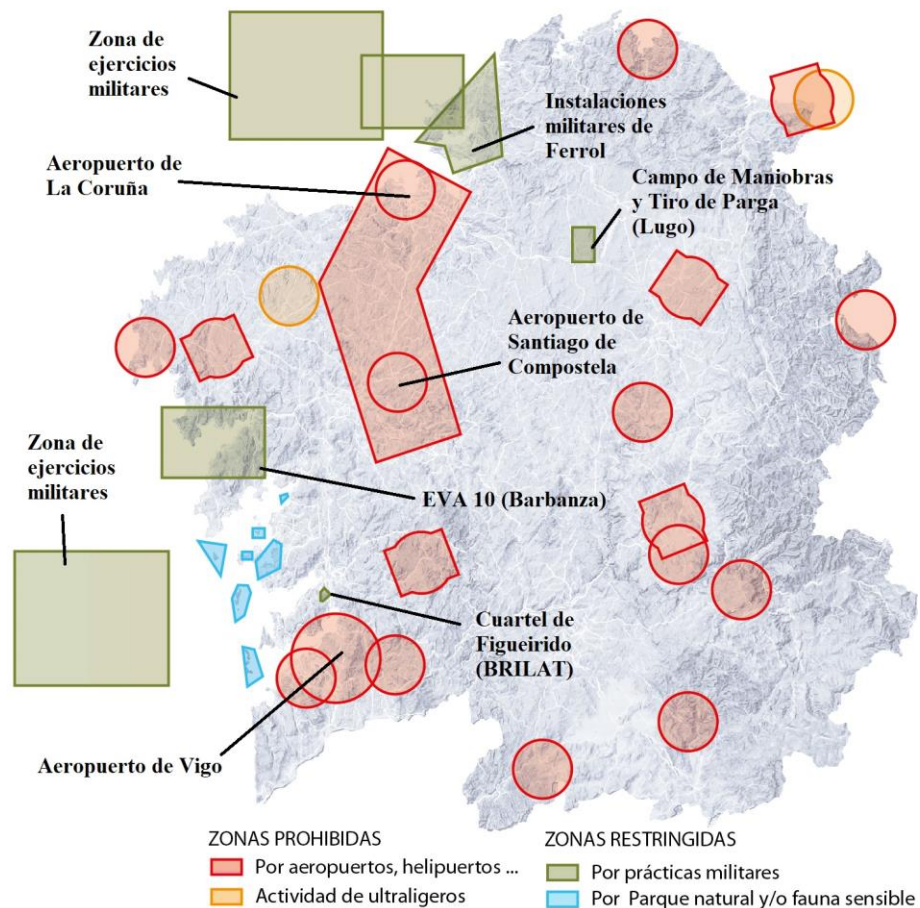


Figura 2-4 Zonas restringidas al vuelo en Galicia. Elaboración propia

Este mapa puede ser consultado en [11], de manera interactiva, modificando los parámetros de operación y consultando la disponibilidad para cualquier zona geográfica del Territorio Nacional. Es posible trazar el área donde se tiene previsto realizar un vuelo para ver si interfiere con alguna zona prohibida o restringida.

2.2.7 Categorías de operaciones con UAS

La nueva normativa del Reglamento Delegado 2019/945 [12] establece 7 clases (C0, C1, C2, C3, C4, C5, C6 y C7) en función del peso al despegue (MTOW) y de otros requisitos. Estas clases se enmarcan en tres categorías genéricas que están recogidas en el RE 2019/947 [13]:

- Abierta: Bajo riesgo, en ella se enmarcan los cuadricópteros de juguete, por ejemplo. No requiere autorización ni declaración por parte del operador.
- Específica: Entraña un mayor riesgo siendo necesario un “Estudio aeronáutico de seguridad” (SORA) y una declaración del operador o una autorización AESA.
- Certificada: Riesgo alto, precisan de un operador y un UAS certificado además de un piloto con licencia basándose en el Reglamento delegado (UE) 2019/945.

2.2.7.1 Categoría abierta

Se divide en tres subcategorías basadas en las limitaciones operacionales en función de las personas presentes en la operación, en los requerimientos formativos de pilotos y en los requisitos técnicos de los UAS en función de sus clases.

Esta categoría es aplicable a drones de hasta 25 kg y no requiere solicitud ni aprobación de las operaciones por parte de la AESA, aunque sí exige estar dado de alta de forma telemática como operador a través de la sede electrónica de la AESA. La mayoría de los escenarios son a nivel recreativo (registrado como persona física), aunque también puede afectar a nivel profesional (mediante un registro como persona jurídica). Este registro no es necesario en aparatos de subcategoría A1, salvo para aquellos de clase C1 y para los que tengan un sensor capaz de capturar datos personales y que sea conforme con la Directiva 2009/48/CE (Directiva de juguetes) [17]. En ciertas ocasiones, y comprobando previamente la zona en la que se va a volar la aeronave, puede ser necesario avisar con antelación a la autoridad encargada de la gestión del espacio aéreo para coordinar el vuelo de los RPAS.

Todos los drones deberían llevar el marcado CE y la clase (C0, C1, C2, C3 o C4) del mismo en función de sus características y requisitos de seguridad, manteniendo en todo momento VLOS durante el vuelo a una altura máxima de 120 metros.

Subcategoría	¿Qué permite realizar?	Requisitos de aeronaves	Requisitos de pilotos
A1	Se permite sobrevolar personas ajenas a la operación	Construcción privada o previa a la norma de menos de 250 g y menos de 19 m/s	Familiarizarse con el manual de usuario del fabricante
		Clase C0 (<250 g)	Familiarizarse con el manual de usuario del fabricante
		Clase C1 (<900 g y <80 J con e-ID y Geo-awareness)	Familiarizarse con el manual de usuario del fabricante Completar un curso online y superar un examen teórico online
A2	Se permite el vuelo sobre personas ajenas a la operación (manteniendo una distancia de seguridad 5-30 metros)	Clase C2 (<4 kg con low-speed, e-ID y Geo-awareness)	Familiarizarse con el manual de usuario del fabricante Poseer un certificado de competencia de piloto remoto, que se obtiene por formación unido a examen online, práctico y presencial
A3	Operaciones en áreas donde no se ponga en peligro a personal ajeno a la operación (mínimo a 150 metros de áreas residenciales, comerciales, industriales o recreacionales)	Construcción privada o previa a la norma de <25 kg	Familiarizarse con el manual de usuario del fabricante
		Clase C2 (<4 kg con e-ID y Geo-awareness)	Completar un curso online y superar un examen teórico online
		Clase C3 (<25 kg con e-ID y Geo-awareness)	
		Clase C4 (<25 kg)	

Tabla 2-1 Subcategorías recogidas en la categoría abierta. Elaboración propia

Comprende las operaciones con UAS de riesgo medio, que no cumplen los requisitos operacionales de la categoría abierta, como pueden ser:

- Vuelo en BLOS.
- Vuelo a una altura mayor de 120 metros.
- Peso de más de 25 kg.
- Capacidad de arrojar material o sobrevolar aglomeraciones de gente.

Todas estas operaciones requieren una autorización por parte de la AESA además de una evaluación de riesgo operacional, salvo cuando el vuelo se realice en un entorno estándar en cuyo caso es necesaria una declaración responsable por parte del operador del UAS o contar con un certificado del operador de UAS ligero “LUC”.

Se distinguen dos escenarios estándar:

- Escenario estándar 1 (STS-01): Operaciones VLOS sobre zona terrestre controlada en un entorno urbano con drones con etiqueta de clase C5.

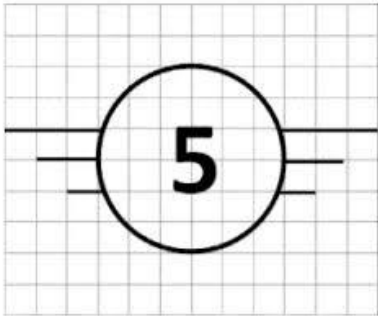
Clase	Requisitos técnicos
	MTOW inferior a 25 kilogramos y no contar con ala fija. Contar con un sistema que proporcione altura del UAV. Tener un modo de baja velocidad (con máximo de 5 m/s) Método de recuperación en caso de pérdida de enlace. Posibilidad de terminar el vuelo en caso de pérdida de enlace, estando este protegido. Estar alimentado con electricidad. Tener un número de serie único. Contar con sistema de identificación a distancia directa, geocontrol y aviso de batería baja para el UAV y la CS. Disponer de luces de control de actitud y vuelo nocturno.

Tabla 2-2 Requisitos técnicos de la Clase 5 [11]

Algunos UAS de clase C3 pueden convertirse en clase C5 mediante un kit de accesorios siempre que no se cambie el software. Además, el UA de esta clase puede disponer de una función que limita el acceso a determinadas zonas del espacio aéreo, siendo interoperable con el sistema de control de vuelo al igual que ocurre en la clase C6.

- Escenario estándar 2 (STS-02): Operaciones BLOS sobre zona terrestre controlada, pero con escasa población. Los drones dispondrán de etiqueta de clase C6.

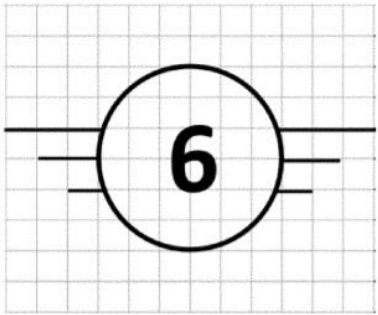
Clase	Requisitos técnicos
	MTOW inferior a 25 kilogramos. Contar con un sistema que proporcione altura del UAV de forma que no supere los límites establecidos. Velocidad máxima respecto al suelo en vuelo horizontal de 50 m/s. Método de recuperación en caso de pérdida de enlace. Posibilidad de terminar el vuelo en caso de pérdida de enlace. Contar con un enlace protegido a las funciones C2. Estar alimentado con electricidad. Tener sistemas de identificación a distancia directa, geoconsciencia y aviso de batería baja para el UA y la CS. Contar con luces de control de actitud y vuelo nocturno. Tener un número de serie único.

Tabla 2-3 Requisitos técnicos de la Clase 6 [4]

2.2.7.2 Categoría certificada

Para aquellos aparatos certificados bajo el Reglamento Delegado UE 2019/945 [12], cuando se realicen operaciones con aparatos de 3 o más metros de dimensión que vuelen sobre grupos de personas, o aquellos diseñados para transportar personas o mercancías peligrosas que en general impliquen un riesgo alto. Para mitigar esta circunstancia es necesario contar con una certificación para el UAS y su operador, que se consigue con las licencias de piloto.

Las normas relativas a la categoría certificada aún están en desarrollo por las autoridades europeas.

2.3 Drones en el Ministerio de Defensa

2.3.1 Propósito de empleo

A nivel militar, este tipo de aparatos cumplen actualmente con las misiones de la regla de las 3D:

- *Dull* (aburrido): Tareas que impliquen una larga duración, ya sea de horas o de días y que, por lo tanto, no sean recomendadas para una tripulación, como puede ser permanecer con un objetivo fijado durante horas para realizar un seguimiento.
- *Dirty* (sucio): Trabajo en ambientes contaminados o en los que la sola presencia es un riesgo para la salud. Pueden ser zonas con riesgos NRBQ o con presencia de humos tóxicos.
- *Dangerous* (peligroso): Misiones que impliquen un riesgo para la integridad física de una tripulación, tales como reconocimientos a media o baja cota de zonas en territorio no amigo.

2.3.2 Cronología

El primer proyecto de diseño y construcción de un UAV nacional para el Ministerio de Defensa comenzó a gestarse en 1988 de mano de la empresa INDRA y no sería hasta 2006 cuando fueron entregadas las primeras unidades del INTA SIVA al Ejército de Tierra y posteriormente al Ejército del Aire. A partir de la Estrategia de Seguridad Nacional del año 2013, el diseño y fabricación de plataformas aéreas no tripuladas pasa a considerarse como sector estratégico por la DGAM por el componente tecnológico de este tipo de plataformas.



Figura 2-5 INTA SIVA empleado por el Ejército de Tierra [12]

En el año 2015 se publica el primer Plan Director de RPAS, que buscaba marcar las pautas temporales de las necesidades de las Fuerzas Armadas en el ámbito de los UAS. En Julio de 2015 se puso en marcha el proyecto “RAPAZ” para buscar empresas que cumpliesen los requisitos del Plan Director y que presentasen aparatos para su uso por parte de las Fuerzas Armadas. En este mismo año

comenzó el despliegue de la primera unidad de la Armada en hacer uso de drones: la Undécima Escuadrilla.

En el 2016 comienza la andadura del Grupo de Reconocimiento y Observación por Sistemas Aéreos IV/1 (GROSA) con base en León. Esta es la primera unidad en emplear drones dentro del Ejército de Tierra. Actualmente emplean principalmente el Searcher MK J-II, que ha sido desplegado en Afganistán.

Posteriormente diversas unidades del Ejército de Tierra, Infantería de Marina, la UME o la Guardia Civil se han ido equipando con pequeños dispositivos de Clase I para apoyar sus operaciones, no siendo hasta el año 2019 cuando el Ejército del Aire recibió el MQ-9 Predator B, el UAS más grande en servicio en las Fuerzas Armadas.



Figura 2-6 MQ9B Predator del Ejército del Aire [13]

Actualmente en las Fuerzas Armadas encontramos en uso más de una decena de tipos de UAV que son empleados en ejercicios, despliegues en el exterior y apoyo a los organismos civiles.

2.3.3 Marco jurídico específico

A la hora de volar un RPAS militar en territorio nacional es preciso seguir una serie de normas específicas que se aplican a las operaciones no EASA. Estos procedimientos se tratarán en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de problemas que afectan a las operaciones con RPAS hoy en día. Estos trámites pueden agilizarse y llevarse a cabo de una manera más rápida en caso de que se trate de una situación de emergencia o de catástrofe.

Entre las publicaciones de referencia destacan:

- Reglamento de circulación aérea (RCA) y Reglamento de circulación área operativa (RCAO).
- AIP's (publicaciones de información aeronáutica).
- Orden ministerial 18/2012 de creación de la titulación de operadores DUO para las FAS.
- Leyes de Navegación y Seguridad Aérea.
- Real decreto 866/2015 de aprobación del Reglamento de Aeronavegabilidad de la Defensa (RAD).
- Normas del jefe de Estado Mayor del Aire, autoridad competente militar, sobre la operación, sobre la gestión del uso del espacio aéreo.
- Normas para sistemas aéreos no tripulados (UAS) militares en espacio aéreo segregado. Estado Mayor del Aire. División de Operaciones. Sección espacio aéreo. (Feb. 2011).

- STANAGS:
 - STANAG 4703, aplicable RPAS de ala fija y con MTOW igual o inferior a los 150 Kg.
 - STANAG 4746, aplicable a RPAS de ala rotatoria y con MTOW igual o inferior a los 150 Kg.

2.3.4 Formación

Actualmente para volar un RPAS dentro de las Fuerzas Armadas y en cumplimiento de la Orden Ministerial 18/2012 [20] es necesario habilitarse y formarse como DUO. Esta formación varía en función de la clase de sistema que vaya a ser pilotado y la parte presencial se realiza en el Grupo de Escuelas de Maticán, siendo responsable de impartirla el Ejército del Aire. Una vez completado el periodo formativo, los pilotos obtienen unas tarjetas de aptitud que pueden ser de color marrón (para sistemas de Tipo I) o bien de color naranja (para los de Tipo II). En algunos casos se exigía a los alumnos realizar un curso de habilitación para un cierto modelo, que generalmente es impartido por el fabricante.

2.4 Características de los sistemas empleados en Defensa

Antes de centrarse en los propios sistemas y aplicaciones en los distintos campos hay que diferenciar las partes que conforman un sistema UAS, ya que este tipo de sistemas no solo están formados por la propia aeronave.

2.4.1 Partes de un sistema UAS

Se diferencia un segmento aéreo y uno terrestre, cada uno compuesto de múltiples elementos, para posibilitar la misión del UAS.

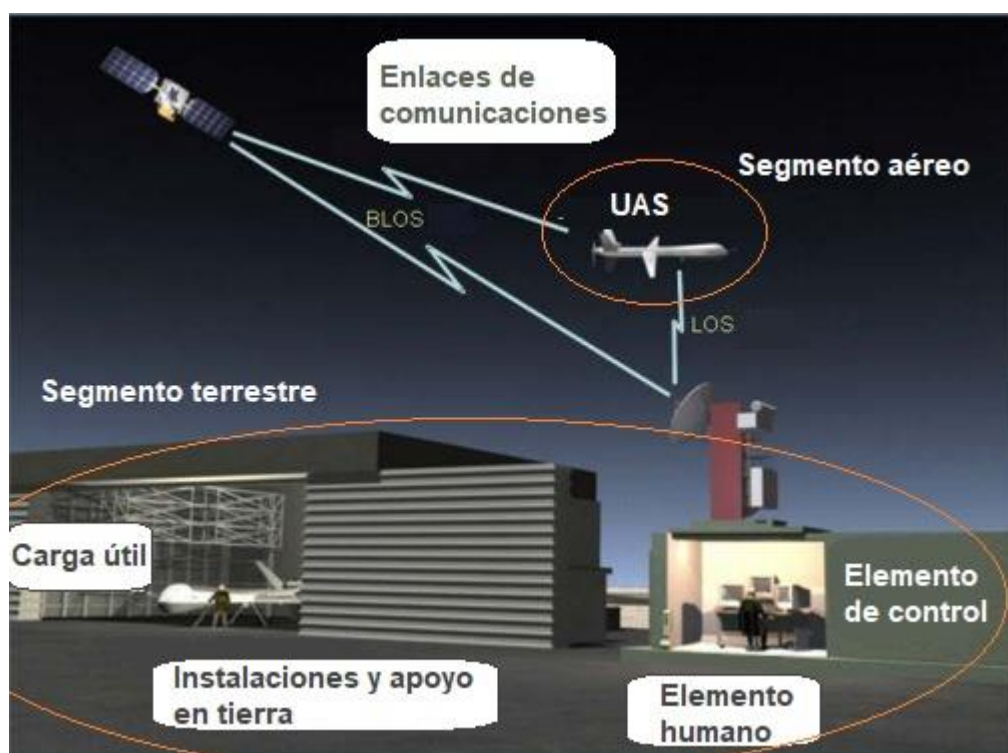


Figura 2-7 Elementos de un sistema UAS. Elaboración propia

2.4.1.1 Segmento aéreo

- La plataforma aérea: dentro de la cual y en función del tipo de aparato, encontraremos diversas clases. El tamaño de la plataforma varía entre los 12 cm de los sistemas más pequeños hasta los

cerca de 40 metros de los Global Hawk. Los sistemas de navegación, comunicaciones, enlace de datos y control de la misión, entre otros, también están considerados como parte de la plataforma aérea, al igual que el sistema de propulsión y el tipo de sistema de sustentación:

- UAV de ala fija (FW): este tipo de aeronaves tiene siempre despegue horizontal (HTOL) y diversos diseños de forma de ala. Puede ser lanzado manualmente, con catapulta o sistema similar de propulsión o, en los modelos de mayor envergadura, despegar por sus propios medios. El fuselaje que emplea es de tipo avión, de forma alargada, pudiendo contar con tren de aterrizaje.
- UAV de ala rotatoria (RW): Realizan despegues y aterrizajes verticales (VTOL). Pueden presentar un único rotor, adoptando en este caso un fuselaje de tipo helicóptero y generalmente disponiendo de patines o elementos similares para facilitar la toma. En el caso de tener más de un rotor (UAV multi-rotor) pueden llegar a tener hasta ocho y adoptan diversas formas. Este último tipo es el más extendido para uso civil.
- UAV Híbridos: combinan las características de los dos anteriores pudiendo ser VTOL de ala fija o bien tener las alas/motores orientables.

Dentro de este tipo de plataforma, el tipo de propulsión variará en función de la misión de la aeronave, de la autonomía prevista y de la envergadura. Se pueden dar los siguientes tipos de motor:

- Motor eléctrico: Los más empleados para las plataformas más pequeñas. Aportan gran fiabilidad y simplicidad. Se alimenta por medio de diversas baterías acopladas a UAV que deben ser recargables e intercambiables para aumentar la polivalencia de la aeronave.
- Motor de explosión: Trabaja en dos o cuatro tiempos, en función del tamaño, y se emplea en las plataformas de mayor envergadura, aunque también se puede dar el caso de que sea empleado en sistemas de menor tamaño, utilizando configuraciones parecidas a los aviones de aeromodelismo.
- Motor a reacción: Empleado en aquellos aparatos diseñados para las misiones a gran altitud o que precisen de gran autonomía. Son de tipo turboreactor o pulsorreactor y se incorporan, obviamente, en las plataformas de mayor envergadura.
- La carga útil o payload. Esta se define como la capacidad de una aeronave para transportar carga [14] estando formado en su conjunto por el combustible más la carga de pago, siendo esta última la capacidad del aparato para llevar diversos elementos extras, pudiendo ser:
 - Desde el punto de vista funcional:
 - Cargas pasivas: sensores para la obtención de información.
 - Cargas activas: cargas que interactúan con el entorno como pueden ser perturbadores de señal, designadores o incluso cargas explosivas.
 - Cargas mixtas: interactúan de las dos maneras, como pueden ser los relés de comunicaciones.
 - En función de la tecnología empleada:
 - Imagen: EO-IR
 - Radioeléctricos
 - Radaricos, por ejemplo, el GPR
 - Sensores de agentes NBQ o medioambientales (presión, temperatura...)
 - Lidar
- Comunicaciones de la parte aérea: enlace de datos para control (LOS y BLOS) e intercambio de información.
- Elementos de mando y control, de forma que la aeronave pueda ser dirigida en la orientación y posición deseada de una manera estable, de esta manera se consigue que se pueda emplear de una manera eficaz la carga útil acoplada. Para cumplir esta misión se cuenta con diversos sensores como pueden ser giroscopios, giroscopios de cabeza y de velocidad angular, sensores de altitud y velocidad o acelerómetros lineales.

- Sistema de navegación: permite que el RPAS integre la función de piloto automático. Para la ubicación se emplean sistemas satelitales como el GPS, el Galileo o el GLONASS. Todo RPAS cuenta hoy en día con un *Inertial Navigation System/Unit* (INS/INU), que emplea un computador, sensores de movimiento (acelerómetro) y sensores de rotación giroscópicos para calcular mediante estima la posición, velocidad y orientación de un objeto en movimiento sin necesidad de tener referencias externas. [15]
- Otros sistemas y ayudas a la navegación son similares a los empleados en aeronaves tripuladas y pueden ser el TACAN, LORAN, Radio tracking o Waypoint Navigation. Su instalación y usos depende de la envergadura del RPAS.

2.4.1.2 Segmento terrestre:

La magnitud y dimensiones de los equipos asociados al segmento terrestre dependerá de la categoría y envergadura del UAV, a mayor tamaño y categoría será necesario contar con más personal involucrado en sus operaciones al igual que las diversas estaciones y sistemas de comunicaciones tendrán mayor tamaño pudiendo incluso involucrar satélites. Para los UAV de menor categoría y tamaño el control y observación, transporte, lanzamiento... podrá ser realizado por una sola persona y no precisan de el mismo despliegue que las clases superiores. Los elementos que componen este segmento son:

- Estación de control (CS): Desde donde se maneja el dispositivo y en donde se recibe toda la información y comunicaciones con el mismo. En la misma operan los pilotos y los operadores de sensores y entre ambos pueden programar el vuelo, coordinarse para la obtención de información. En el caso de los sistemas más grandes puede estar situada en tierra (GCS), en un barco (SCS) o a bordo de otra aeronave (ACS) con varias personas operando dentro de la misma y en el caso de los más pequeños la CS se reduce a una consola simple y portátil desde la cual el operador maneja el aparato y obtiene las imágenes a la vez.



Figura 2-8 Estación de control del sistema Scan Eagle a bordo del BAA Galicia [16]

- Elemento de enlace de datos y comunicaciones: nos permite el mando y control y la comunicación entre la CS y la aeronave. Puede ser de dos tipos:
 - LOS: Line of sight, esto es, en “visión directa” con la aeronave, siendo este tipo el empleado en los sistemas más pequeños y estando controlado por señales de radio.
 - BLOS: Beyond the line of sight, sin “visión directa” por lo que hay que emplear diversos elementos de enlace como pueden ser satélites o un relé.
- Elemento de lanzamiento y recuperación: los más sencillos y pequeños son lanzados de manera manual; aunque pueden ser lanzados con catapulta, propulsión a cohete o por la propia propulsión

de la aeronave. Se engloban dentro de dos grandes grupos: despegue y aterrizaje vertical (VTOL) y despegue y aterrizaje horizontal (HTOL).

2.5 Sistemas no tripulados: indispensables en operaciones de Infantería de Marina

El objetivo de los siguientes apartados es desarrollar los diversos sistemas Clase I con los que actualmente cuenta la Infantería de Marina y cómo estos sistemas podrían ser complementados. Además, se tratarán los problemas asociados a los RPAS y que afectan a las operaciones de la Armada.

Desde el origen estos sistemas han estado ligados a las Fuerzas Armadas, desde los más sencillos modelos que funcionaban como blancos aéreos o torpedos volantes a los complejos sistemas de la actualidad, capaces de volar a gran altitud y realizar funciones de manera inteligente, tales como el seguimiento de objetivos, su neutralización u obtención de inteligencia. La Armada ha sido pionera en el empleo de los RPAS en operaciones en el exterior, contando con una extraordinaria visión de futuro y desplegando este tipo de sistemas en Zona de Operaciones antes que el Ejército del Aire.

La posibilidad de realizar funciones que entrañan gran riesgo es uno de los puntos fuertes de estos aparatos que, si bien han sido desarrolladas en el mundo civil, aún no han logrado implantarse en el ámbito militar. La reducción de los presupuestos de Defensa de los diferentes países de la OTAN ha precisado nuevos sistemas más pequeños, polivalentes y económicos: los RPAS de Clase I.

Este tipo de sistema tiene unas características operacionales que lo diferencian respecto a las otras clases:

- Sus costes de desarrollo y fabricación en comparación con los de Clase II y III son muy bajos, pudiendo embarcar cargas que proporcionan grandes prestaciones.
- El desarrollo tecnológico del sistema y de las baterías permite ir incrementando poco a poco la autonomía de estos.
- El impacto logístico de estos sistemas en operaciones es reducido, debido a su pequeño tamaño y la posibilidad de operar con menos personal y medios que una aeronave tripulada. Este impacto aumenta a medida que lo hace el tamaño de la aeronave, lo que implica más material e instalaciones de control mayores, incluso a la hora de desplegar.
- Puede desplegar en un tiempo muy reducido debido a que las comprobaciones pre-vuelo pueden ser realizadas de una manera muy rápida.

Este tipo de sistemas han evolucionado de una manera exponencial en la última década bajo el amparo de diversos programas como el “RAPAZ” de la DGAM, buscando soluciones que ofreciesen las prestaciones necesarias con un menor coste y obteniendo aparatos de diseño y fabricación nacional, potenciando de esta manera la industria española para lograr dispositivos que se encuentren al nivel tecnológico de los competidores extranjeros. A la hora de presentar un prototipo que pueda reunir los requisitos técnicos para una unidad se deberá hacer a través de la DGAM, teniendo ellos actualmente los sistemas que pueden ser de interés y cediéndolos a las diversas unidades para la realización de pruebas de campo y valoración de capacidades operativas.

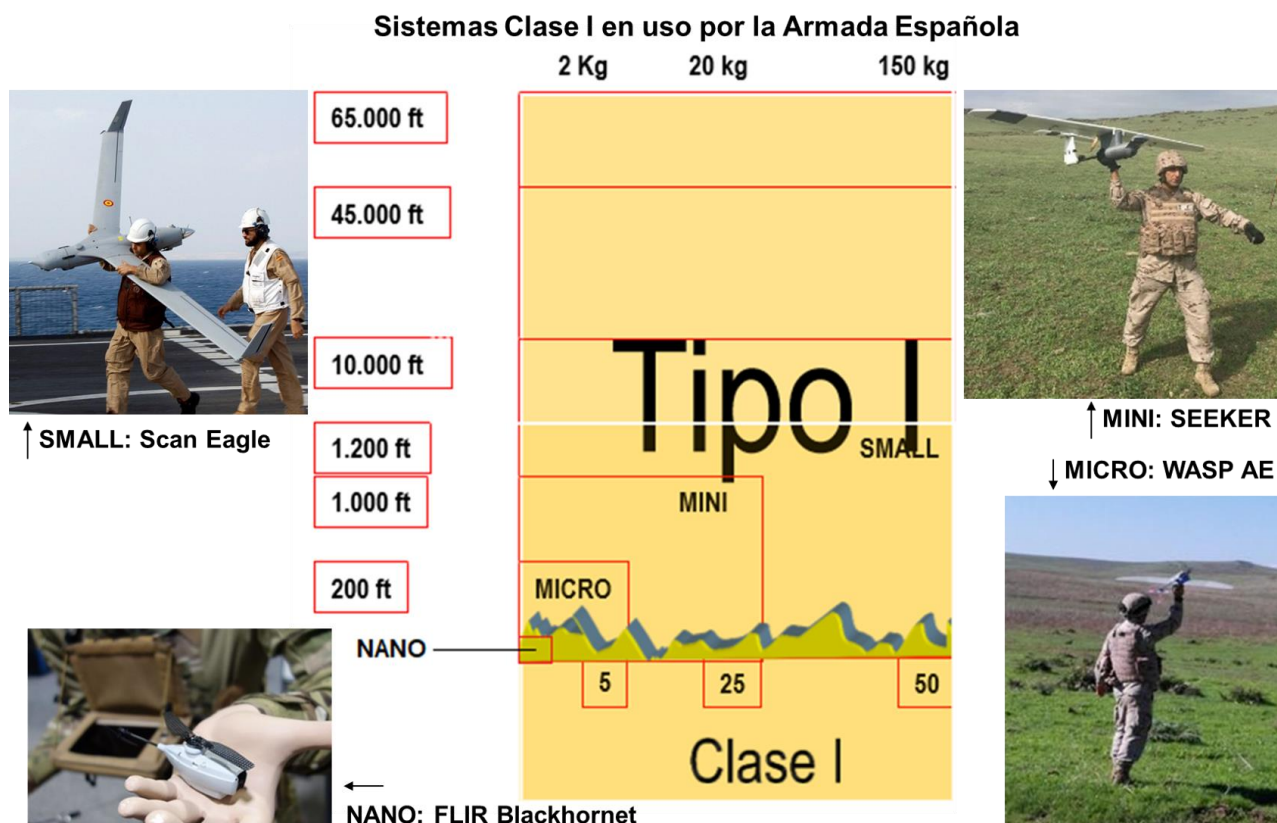


Figura 2-9 Sistemas Clase I empleados por la Armada. Elaboración propia

A nivel operacional, los sistemas que serán estudiados son los Sistemas de Clase I, en todas sus versiones y que también incluyen a los sistemas Nano, comúnmente denominados “UAV de bolsillo”. Todos estos aparecen reflejados en la Figura 2-9 Sistemas Clase I empleados por la Armada. Elaboración propia junto al modelo que se usa en el momento de la redacción de este proyecto. Salvo el Sistema Scan Eagle, que está integrado dentro de la Flotilla de Aeronaves de la Armada (Undécima Escuadrilla), el resto de estos pertenecen y son usados por unidades de Infantería de Marina. Su estudio se realizará en función de su tamaño (de menor a mayor).

2.5.1 Sistemas Nano

Permiten ser llevados por el combatiente en una mochila junto con el equipo para operarlo y su principal aplicación se centra en la obtención de inteligencia dentro del propio espacio de batalla.

El reducido peso y tamaño de estos sistemas hace que no sea posible añadirle sensores para la obtención de datos. Tan sólo es posible equiparlos con una o varias microcámaras de forma que pueda obtener información de lo que ocurre dentro de un edificio antes de realizar un asalto al mismo o ver si un vehículo estacionado a una determinada distancia dispone de explosivos en su interior.

La introducción de estos sistemas dentro de las Compañías de Fusiles de Infantería de Marina permitiría aprovechar y explotar estas capacidades al máximo permitiendo “ver” y “controlar” las partes ocultas dentro del campo de batalla y extendiendo al máximo las posibilidades y capacidades de reconocimiento al nivel más básico, debido a que estos sistemas no interfieren con otras plataformas aéreas y su alcance se reduce al área de acción de una unidad.

El coste de estos sistemas se ha ido reduciendo a lo largo de estos años, pero aún es demasiado elevado como para implantarlo a nivel orgánico en la mayoría de las secciones de los Batallones de Fusiles del TEAR. La implantación de sistemas nano y el estudio para su implantación de manera orgánica será una de las líneas de investigación que deriven de este trabajo.

2.5.1.1 Sistemas en uso actualmente

El PD-100 Blackhornet destaca como el UAV más pequeño en uso por unidades de operaciones especiales dentro de la Armada, en la Fuerza de Guerra Naval Especial (FGNE), aunque también está en servicio en otros ejércitos. Permite obtener de manera instantánea imágenes de alta resolución gracias a tres microcámaras que porta, con una autonomía de media hora. Su reducido tamaño de 10 centímetros de largo y 2,5 de ancho, unido a sus 18 gramos de peso y su sigilo hacen que sea posible obtener información de una manera muy cercana al objetivo sin ser detectado.



Figura 2-10 Sistema Blackhornet. Elaboración propia

2.5.1.2 Los enjambres de nano UAV

Este concepto aún está en desarrollo y ya ha sido probado por el Ejército de Estados Unidos en el año 2017. En España aparece recogido dentro del proyecto Fuerza 35 del Ejército de Tierra. El concepto de operación de este tipo de dispositivos se basa en un gran número de nano UAV que actúan de manera colectiva gracias a un solo operador y a los sistemas de inteligencia artificial. Sus objetivos son variados, desde poder abarcar grandes áreas de búsqueda en conjunto, hasta ir equipados con pequeñas cargas explosivas para realizar misiones de combate o confundir los sensores enemigos confundiendo al RADAR.

Al ser un enjambre, actúan como un conjunto, comunicándose cada UAV con los otros y compartiendo unos parámetros que permitirían hacer que un enemigo se sintiese sobrepasado. Es necesaria la presencia de un operador, que queda relegado a un segundo plano, una vez que el enjambre comience a actuar de forma autónoma y automática según esté programado. La pérdida de individualidad en estos sistemas no afecta al grupo, ya que al actuar como un conjunto donde no hay un UAV líder, se pueden suplir a los elementos que caen.

La implantación de este tipo de sistemas en el Tercio de Armada requeriría de la adquisición de múltiples sistemas nano, además de sus elementos de mando y control (C2) y otra logística e infraestructura necesarias. Sería necesario también crear una unidad totalmente nueva que se encargase de su mantenimiento, vuelo y transporte. Estando encuadrado dentro del TEAR, debería tener posibilidad de ser desplegado desde plataformas navales para poder realizar misiones, por ejemplo, de guerra electrónica o interferencia de comunicaciones o la posibilidad de ser desplegados desde un vehículo como está contemplado en los futuros Dragones 8x8.

La posibilidad de contar con numerosos sensores intercambiables en los UAV o de UAV con diversas configuraciones, permitirían a los enjambres obtener gran cantidad de información en caso de misiones ISR.

En un futuro podrían capacitarse estos enjambres para realizar operaciones de combate, adosando pequeñas cargas explosivas a los mismos y actuando al estilo de los drones suicidas, que ya se han empleado en conflictos armados durante el año 2020. La ventaja de este tipo de sistemas es que al realizar

movimientos controlados por inteligencia artificial podrían ser programados para actuar contra objetivos específicos que cumplan una serie de requisitos o incluso, que sean identificados por medio de reconocimiento facial, dificultando la escapatoria en caso de ataque.

Obviamente este último tipo de operaciones también podría ser usado en nuestra contra, por lo que es indispensable desarrollar y potenciar los medios que podrían evitar este tipo de ataques en el entorno de guerra y operaciones asimétricas en los que se desarrollan los conflictos en la actualidad.

El Ejército de Tierra plantea tres escenarios futuros donde pueden ser empleados los enjambres tanto de nano como micro UAV: su uso para reconocimiento y vigilancia, el empleo como enjambres armados o bien la posibilidad de tener que defenderse de este tipo de agrupaciones mediante los medios de defensa antiaérea.

2.5.2 Sistemas Micro

El sistema micro se contempla como apoyo a una Sección o Compañía de fusiles a la hora de desplegar o bien complementando a las unidades de la SERECO (Sección de reconocimiento). Está planeada su incorporación en los distintos batallones del Tercio de Armada, aunque hoy en día solo se cuentan con dos unidades adscritas a la Compañía de Inteligencia. Estas plataformas deberían ser empleadas por los propios batallones, debiendo de contar la Compañía de Inteligencia con sistemas Mini, que le proporcionarían mayor capacidad ISR, logrando cumplir de esta manera las necesidades de inteligencia de la Brigada de Infantería de Marina.

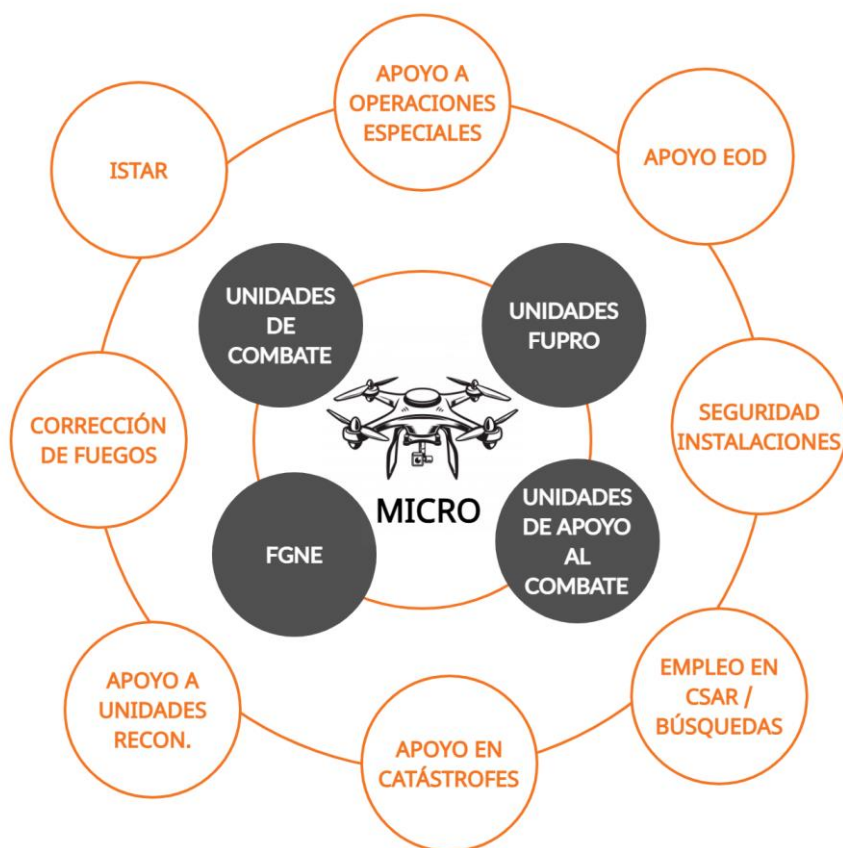


Figura 2-11 Empleo en Infantería de Marina de los sistemas Micro. Elaboración propia

Se plantea la introducción de nuevos sensores, distintos a las cámaras EO-IR, aunque esto exige un tiempo de procesamiento de los datos que no se contempla en operaciones militares, ya que este tipo de sistemas lo que buscan es proporcionar una imagen en tiempo real del entorno, permitiendo ver más allá

de nuestro alcance con una imagen en tiempo real. Los conceptos planteados en la imagen superior se basan únicamente en el empleo de sensores Electroópticos, cámaras IR o de visión térmica.

Se podría acoplar sensores que permitieran realizar ortofotografías o levantamientos 3D, pero esto implicaría un tiempo de procesamiento e interpretación de los datos posterior, labor que no podría ser realizada por una unidad de combate, sino por personal de la Compañía de Inteligencia.

2.5.2.1 Sistemas en uso actualmente

Los primeros fueron recibidos por la BRIMAR en diciembre de 2015, ambos en servicio en la Compañía de Inteligencia del BCG y cuyas características serán detalladas en el siguiente apartado. Estos sistemas son el HUGINN X1 (RW) y el WASP AE (FW).



Figura 2-12 WASP AE (izquierda) y HUGINN X1 (derecha). Elaboración propia

El sistema Huginn X1 es una aeronave de ala rotatoria, con capacidad VTOL y con una cámara EO HD o dual HD/LWIR. Esta segunda cámara permite el uso en condiciones de visibilidad reducida, logrando detectar vehículos a más de 1500 metros de distancia y personas a 500 m. Con estos sistemas se permite realizar todas las funciones mostradas en Figura 2-12 WASP AE (izquierda) y HUGINN X1 (derecha). Elaboración propia siendo la menos desarrollada hoy en día la de targeting¹ o corrección de fuegos, debido a que aún no es posible contar con una precisión elevada. Este aparato puede ser operado por una única persona y cuenta con diversas capacidades operacionales además de contar con un enlace reforzado para evitar el jamming² y el spoofing³.

El otro sistema en la categoría Micro es el WASP, que es de ala fija y cuenta también con sensores EO-IR. Actualmente hay sistemas en evaluación para ver si cumplen las características y requisitos técnicos para las unidades.

A parte de la obtención de imágenes con los sistemas de ala fija, los cuadricópteros se emplean actualmente en apoyo a operaciones EOD permitiendo obtener imágenes de manera cercana al artefacto y sin exponer al operador. Para este tipo de misiones es preciso contar con sistemas RW que permiten al aparato mantenerse estático en el aire.

2.5.3 Sistemas Mini

Si los sistemas Micro están destinados para el apoyo a unidades de entidad SCC/CIA, los Mini están pensados para apoyar a un BON/ARD debido a su mayor carga de pago, alcance y envergadura. El

¹ Targeting: análisis de los blancos y como se desea batir los mismos.

² Jamming: interferencias en los sistemas, de origen malicioso.

³ Spoofing: empleo de técnicas de suplantación de identidad, generalmente con fines maliciosos.

empleo de estas plataformas a nivel Brigada responde a las necesidades del ciclo de inteligencia y las llamadas Zona de Responsabilidad de Inteligencia (ZRI) y Zona de Interés de Inteligencia (ZII), que dependen de los medios disponibles por el comandante de la unidad para obtener información en esa área. Las dimensiones estándar para una unidad de entidad Brigada son de unos 15 kilómetros para la ZRI y unos 70 kilómetros para la ZII, por lo que se justifica de esta manera que el RPAS más adecuado para estas dimensiones sea uno de clase Mini. Sin embargo, es cierto que, debido a la tipología de los conflictos de los últimos años, las dimensiones de estas zonas han aumentado hasta los 50 kilómetros para la ZRI, lo que precisaría de sistemas de tipo Small [17]. Además, este tipo de sistemas requerirían un elevado desembolso económico: plataforma, estación de control, formación de pilotos... y no tendrían la versatilidad de los sistemas Mini, que, debido a su menor tamaño y peso, pueden ser llevados y desplegados desde un vehículo tipo VAMTAC, planteando así la relación perfecta entre polivalencia y alcance. Los sistemas de este tipo son los más interesantes para emplear debido a que pueden llevar una carga lo suficientemente grande como para proporcionar información de calidad unida a la autonomía de la que disponen.

2.5.3.1 Sistemas en uso actualmente

Al igual que el resto de RPAS disponibles, los sistemas Mini se encuentran encuadrados en la Compañía de Inteligencia. Actualmente se cuenta con un sistema SEEKER [18], siendo un sistema de ala fija, 3,5 kg de peso y con una longitud de 1,2 metros que equipa 2 cámaras EO y una cámara IR. A lo largo de la existencia del programa RAPAZ, otros sistemas sí han sido evaluados en el TEAR, aunque sin lograr alcanzar los requisitos establecidos.



Figura 2-13 Lanzamiento del RPAS SEEKER [18]

2.5.4 Sistemas Small

Aunque no formen parte de la estructura orgánica de la Fuerza de Infantería de Marina, la Armada Española cuenta con este tipo de sistemas, encuadrados en la Undécima Escuadrilla de Aeronaves, dentro de la Flotilla de Aeronaves. Este tipo de sistemas pueden operar en apoyo a las operaciones anfibias, formando parte de la Fuerza Anfibia Operativa (FAO) y actuando en beneficio de la Fuerza de Desembarco (FD), aunque también pueden hacerlo desde tierra en apoyo a tropas sobre el terreno a nivel de ARD/Brigada, participando en vigilancias, recolección de inteligencia o seguimientos. Este tipo de sistemas no solo juegan un papel clave en el apoyo a las operaciones de Infantería de Marina, sino que son imprescindibles en la Armada.

2.5.4.1 La Undécima Escuadrilla y el sistema Scan Eagle

Se trata de la Escuadrilla de más reciente creación dentro de la Flotilla de Aeronaves, cuyo comienzo se empezó a gestar a mediados de 2014, entrando en funcionamiento a principios del año 2015. Opera dos tipos de sistemas pilotados de forma remota: los blancos aéreos teledirigidos “SCRAB-II” y el “SCAN EAGLE”. Los primeros sirven para el adiestramiento de las unidades de la flota en ejercicios de tiro.

El sistema “SCAN EAGLE” está fabricado por la compañía norteamericana INSITU [19] (filial de Boeing) y puede ser operado desde tierra o desde buques en la mar.

Los cometidos principales de esta escuadrilla, en relación con el sistema “SCAN EAGLE” son:

- Operaciones ISR.
- Apoyo a unidades de Operaciones Especiales.
- Vigilancia Marítima.
- Apoyo a entidades civiles: vigilancia de instalaciones, SAR, detección de incendios...

A pesar de su corta vida, la unidad ya ha participado en múltiples ejercicios nacionales e internacionales además de haber sido desplegada en repetidas ocasiones en la Operación Atalanta de lucha contra la piratería y en la Operación Inherent Resolve en Irak.

Originalmente se recibieron cuatro aeronaves de este modelo, con su sistema de control y recepción de imágenes en video e infrarrojas, además del sistema de lanzamiento por catapulta y recogida por grúa. En la actualidad, ya disponen de tres sistemas completos y 10 aeronaves.



Figura 2-14 Lanzamiento del Scan Eagle durante su despliegue en Irak [20]

2.5.4.2 Capacidades del Sistema Scan Eagle

Es una aeronave ligera con un peso entre 15 y 17 kilogramos (en función de la configuración), que se encuadra dentro de la categoría Small. El sistema es lanzado mediante una catapulta, que puede situarse en tierra o ir embarcada, y su recuperación se efectúa gracias a una grúa portátil que esta referenciada por DGPS.

Puede efectuar vuelos de hasta 20 horas, siempre en modo LOS. Su gran autonomía y capacidad para permanecer sobre un objetivo, unido a su silencioso motor, hacen de este sistema una de las aeronaves más discretas para cumplir con las misiones de obtención de inteligencia. Puede transmitir datos de manera encriptada hasta una distancia de 55 millas náuticas con múltiples configuraciones para su carga útil: EW, ISR, relé de comunicaciones, ELINT... aunque la gran mayoría no están en servicio en la Armada. Cabe destacar que en la Undécima Escuadrilla se ha logrado ampliar el alcance a 65 millas

náuticas operando desde fragatas de clase Santa María y a 88 millas náuticas en el desierto de Irak operando a una altura de 2000 pies. Estos datos varían según las condiciones atmosféricas y la altura de vuelo [21].

Características técnicas	
Peso máximo al despegue	26,5 kg
Carga útil máxima	5 kg
Longitud	1,71 m
Envergadura	3,1 m
Techo máximo de vuelo	5950 m
Velocidad máxima horizontal	41,2 m/s
Velocidad de crucero	25-30 m/s
Autonomía según fabricante	18 horas

Tabla 2-4 Tabla de características del Scan Eagle [10]

Los sensores de imagen montados actualmente en esta plataforma son capaces de proporcionar imágenes de alta resolución, incluso en condiciones adversas, estando equipada con cámaras IR para condiciones de escasa visibilidad. El sensor va equipado con un sistema de giro-estabilización, que mantiene las imágenes estables, aunque la aeronave se esté moviendo. Con esta configuración son capaces de realizar misiones ISR, escolta de convoyes, apoyo a operaciones MIO e incluso, realizar operaciones de targeting (aunque este último concepto aún está en desarrollo). Los sensores actualmente empleados son de tipo EO-IR (EO 900 y MWIR 3.0). Este tipo de cargas útiles están presentes en la mayoría de UAV/RPAS y se enmarcan en los sensores de imagen, pudiendo ser:

- Sensores ópticos: capturan imágenes en el campo visual, con longitudes de onda entre los 380 y 780 nm. El funcionamiento y producto final es parecido al que se obtendría con una cámara de fotos tradicional, solo que, en el caso de estar aplicado al mundo militar, suelen tener mayor resolución, nitidez y posibilidad de realizar múltiples aumentos.
- Sensores infrarrojos y térmicos: se basan en la emisión de radiación de todos los cuerpos en función de la temperatura. A mayor temperatura, mayor cantidad de radiación emitida. La longitud de onda de operación de estas cámaras varía entre los 3µm y 14µm. Pueden mostrar las imágenes en una escala de grises en la cual las zonas más calientes aparecen en blanco y las más frías en negro, o bien ser mínimamente procesadas para dar imágenes con un abanico más amplio de colores. Este tipo de cámaras permite obtener imágenes bajo condiciones meteorológicas adversas o incluso de noche, pero no debe confundirse con cámaras de visión nocturna, que amplifican la luz residual de la imagen, dando un producto en tonos verdosos y que son ampliamente empleadas en operaciones militares terrestres.



Figura 2-15 Imagen IR tomada desde el Scan Eagle en Irak [20]

2.6 ¿Cómo completar los sistemas existentes?

Una vez concluida la revisión de todos los sistemas existentes hoy en día en la Armada y de las capacidades actuales y posibles de estos UAV, es importante plantearse como podrían ser completados con sensores que se emplean en el mundo civil y que podrían ser interesantes para el uso militar. Los sensores que se mencionarán se plantean para ser usados por su idoneidad y los problemas que solventarían.

Hay que matizar que uno de los objetivos de los RPAS es proporcionar la información de manera instantánea, como pueden ser las imágenes en directo, de manera que así se ayuda al mando a tomar una decisión o bien se recoge información en directo de una operación o acontecimiento en curso.

Algunos de estos sensores han sido empleados por equipos de la Unidad Militar de Emergencias en ciertas intervenciones, pero sin ser propiedad del Estado, y siempre en colaboración con empresas privadas. La rapidez de obtención y el mínimo procesamiento de estos datos hacen que los sensores EO-IR o incluso Radar sean los preferidos. A continuación, se plantearán diversos tipos de sensores, bien para ir acoplado en RPAS de tipo Mini o en otros de tipo Small ya que son los únicos que podrían tener una suficiente capacidad de carga útil para portar sistemas.

Hay que tener en cuenta que no todos los sensores existentes pueden ser útiles o válidos para emplear en UAV militares, hay que fijarse en una serie de rasgos comunes a todos ello:

- Ligereza del sensor: a menor peso del sensor, menor gasto de combustible/batería por lo que se aumenta la capacidad de movimiento de la aeronave.
- Robustez: el hecho de ir montado sobre una aeronave hace que tenga que estar expuesto de una manera casi directa a las inclemencias meteorológicas y más en el caso de las aeronaves militares, que suelen operar en climas y condiciones extremas, por lo que el sensor debe ser capaz de soportarlas, además de tener resistencia ante posibles impactos durante las tomas.
- Facilidad de montaje y desmontaje: si se asegura la intercambiabilidad de sistemas para una aeronave, esta puede ser empleada para realizar un mayor número de misiones aumentando su versatilidad.
- Software y postprocesamiento de datos: La recolección de datos no asegura disponer de la información, ya que en un gran número de situaciones habrá que procesarlos y tratarlos para

obtener el producto final. Unido al coste del sensor puede ir el coste del software específico, aunque bien es cierto que cada vez hay más programas de software libre que permite realizar el procesamiento.

2.6.1 Sensores GPR

El empleo de un Georradar desde un RPAS es ya un hecho en ciertas empresas de ingeniería civiles para la realización de diversos trabajos. Dentro de una unidad militar, este tipo de sensores estaría pensado para apoyar al personal de un GEDE o Zapadores en misiones C-IED, siendo preciso que vayan embarcados en un RPAS de tipo RW y de clase Mini o Small.

Los sistemas GPR emiten ondas electromagnéticas capaces de penetrar en el subsuelo, obteniendo una imagen radar del subsuelo en función de las ondas reflejadas, de forma que se puede apreciar si hay anomalías o alteraciones en la imagen, que se asociarían a la presencia de objetos ocultos. Es una de las mejores técnicas para obtener imágenes del subsuelo, pero es sensible a la composición y relieve del suelo, requiriendo técnicas de procesado de señal para eliminar los falsos ecos y el clutter ⁴ presente en la imagen [22].

En el caso de los sistemas GPR se distinguen dos tipos:

- Radar stand-off: se ilumina el suelo con un ángulo que maximiza la cantidad de energía que penetra, pero se pierde resolución y sensibilidad.
- Incidencia normal: el suelo se ilumina de manera perpendicular a la superficie, aumentando la resolución cuanto más cerca se está del suelo.

Centrándose en estudios en los que se han empleado GPR con UAV se ha demostrado que puede detectar objetos metálicos y no metálicos, así como proporcionar una “imagen” electromagnética del subsuelo. Con el empleo de un RPAS se ganaría velocidad y se reduciría el riesgo de explosión si se compara con los sistemas empleados en la actualidad, consistentes en pequeños y ligeros robots, de forma que se minimiza el riesgo de detonación, que se mueven a una velocidad muy reducida por la superficie realizando un escaneo con incidencia normal.

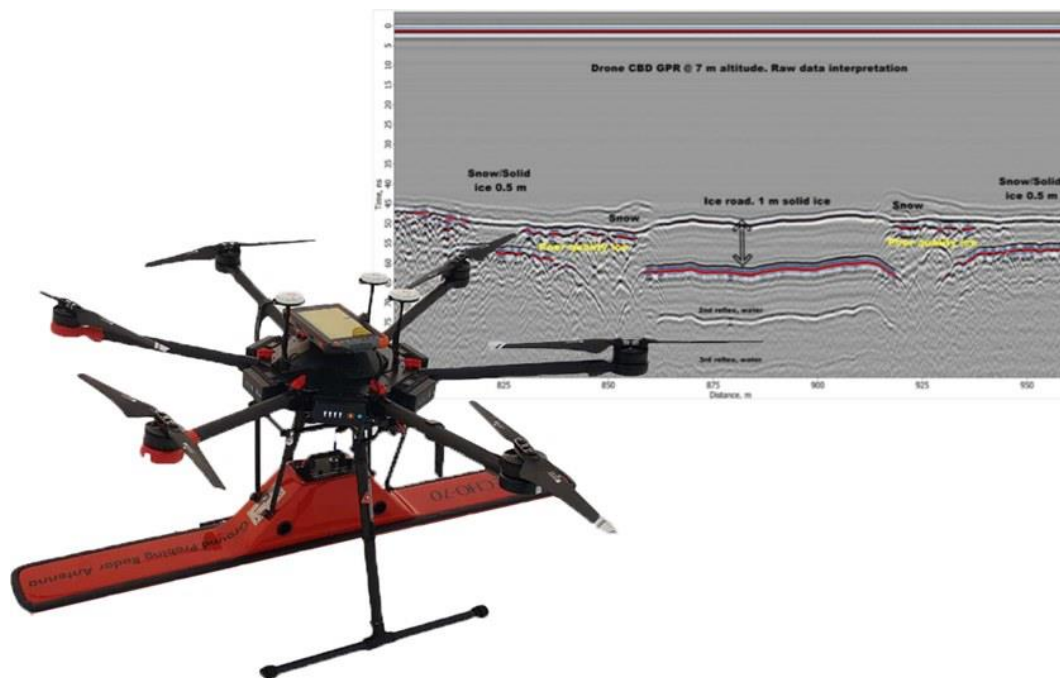


Figura 2-16 Sistema GPR montado en RPAS y producto final [23]

⁴ Clutter: señales recibidas por el Radar y no deseadas. Se deben a fenómenos de origen natural como pueden ser fenómenos atmosféricos.

Diversos estudios han tratado acerca de este tipo de sistemas, pero no aparecía el problema de que no eran capaces de generar una imagen radar de alta resolución debido a que su sistema de posicionamiento no podía garantizar la precisión adecuada, unido a la imposibilidad de detectar dos objetos muy próximos entre sí. Con sistemas como los propuestos en los estudios de [24] y [25] se resolvería este problema, pudiendo ser perfectamente aplicable a los equipos GEDE existentes en el Tercio de Armada.

Para trabajar con este tipo de sensores es necesario georreferenciar de manera muy precisa (con apenas 2-3 cm de error) todas las medidas transmitiéndolas al equipo de control. El equipo empleado en uno de los estudios consultados es un radar UWB (Ultra Wide Band) en banda C que proporciona una alta resolución en rango (de unos 7,5 cm) a costa de perder penetración en el suelo, aunque su reducido peso y tamaño lo hacen idóneo para ser embarcado en RPAS.

Las imágenes obtenidas deben de ser procesadas para reducir el clutter y analizadas en postproceso para determinar la presencia de objetos extraños.

2.6.1.1 Ventajas del empleo de GPR embarcado en UAV

- Se puede escanear una mayor superficie en menos tiempo y de una manera casi automática accediendo además a zonas de difícil acceso.
- Proporciona más seguridad al exponer menos al personal implicado, ya que no se emplean operadores en el terreno o a bordo de vehículos tripulados.
- A diferencia de los detectores de metales empleados en operaciones manuales, el uso de GPR permite detectar objetos metálicos y no metálicos.

Como contraposición requiere la adquisición, montaje y formación de los operadores de este tipo de sistema y el tiempo de procesado y análisis de las imágenes.

2.6.1.2 Distintas aplicaciones al C-IED

El planteamiento principal de este apartado era el estudio de este tipo de sistemas de cara a emplearlos en las misiones de la Infantería de Marina, aunque es cierto que modelos similares a los planteados ya han sido empleados en operaciones en las que han participado miembros de las Fuerzas Armadas, concretamente de la Unidad Militar de Emergencias, aunque no de manera propia, sino que alquilados a empresas civiles y con operadores externos.

Aunque la misión principal de los GEDE dentro del Tercio de Armada sea la de detectar y desactivar explosivos, dotarles de este tipo de medios puede permitirles participar en otro tipo de cometidos. Los elementos ocultos bajo el terreno en zona de operaciones como pueden ser túneles, entradas a los mismos o zulos han sido auténticos quebraderos de cabeza para las tropas desplegadas en Oriente Medio en los conflictos que se han desarrollado en las últimas décadas. La posibilidad de detectarlos de una manera más rápida y desde el aire permitiría aumentar la seguridad de las tropas desplegadas en una operación.

En ciertos países, la existencia de estos túneles va ligada a la realización de actividades ilícitas, como pueden ser el tráfico de sustancias estupefacientes o de personas, por lo que la capacidad de detectarlos contribuye a erradicar estas conductas.

Respecto a la cooperación con organismos civiles, el GPR permite detectar personas u objetos enterrados por avalanchas o corrimientos de tierra permitiendo contribuir a las labores de búsqueda y rescate.

2.6.2 Radar de apertura sintética

Se han hecho pruebas para incorporar este tipo de radares en su versión más pequeña en el sistema Scan Eagle, sin tener que quitar el resto de sensores de la aeronave. Esto proporciona a los operadores

mayor capacidad al poder localizar contactos en condiciones meteorológicas adversas como, por ejemplo, con niebla o en tormentas de arena.

Este tipo de sensores ya han sido probado en UAV del Ejército americano y complementan a los EO/IR existentes en la aeronave. Destaca la empresa IMSAR con su radar de apertura sintética NanoSAR diseñado especialmente para este tipo de plataformas.

2.6.3 Fotogrametría

Esta ciencia emplea fotografías para hacer medidas, estudiando y definiendo con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto o terreno cualquiera utilizando las medidas hechas sobre una o varias fotografías.

Este tipo de misión ya ha sido realizada por personal del Ejército de Tierra en una de las campañas antárticas. Valiéndose de pequeños cuadricópteros se realizaron levantamientos topográficos, modelos digitales del terreno de la Isla Decepción (donde se encuentra la base Gabriel de Castilla) y permitieron observar y analizar desde el aire este paraje.

Mediante el empleo de fotografías realizadas con drones es posible obtener modelos digitales del terreno (MDT) y de la superficie (MDS), además de ortofotos. La cámara empleada para obtener este tipo de datos tiene que haber sido correctamente calibrada y configurada para obtener el producto deseado. Los datos obtenidos por este tipo de sistemas han de ser procesados para poder ser explotados de forma correcta mediante herramientas GIS/SIG, obteniendo las nubes de puntos, mallas en 3D, ortofotos y MDT. Con los datos obtenidos y empleando herramientas CAD y GIS es posible obtener perfiles de terreno, volumetrías, movimientos en caso de corrimientos de tierra o superficies.

Para este tipo de trabajos es independiente si se emplea RPAS de FW o de RW pudiendo ser de categoría Mini o incluso Micro, en caso de que la cámara pueda ser incluida dentro de la carga útil sin inconvenientes.

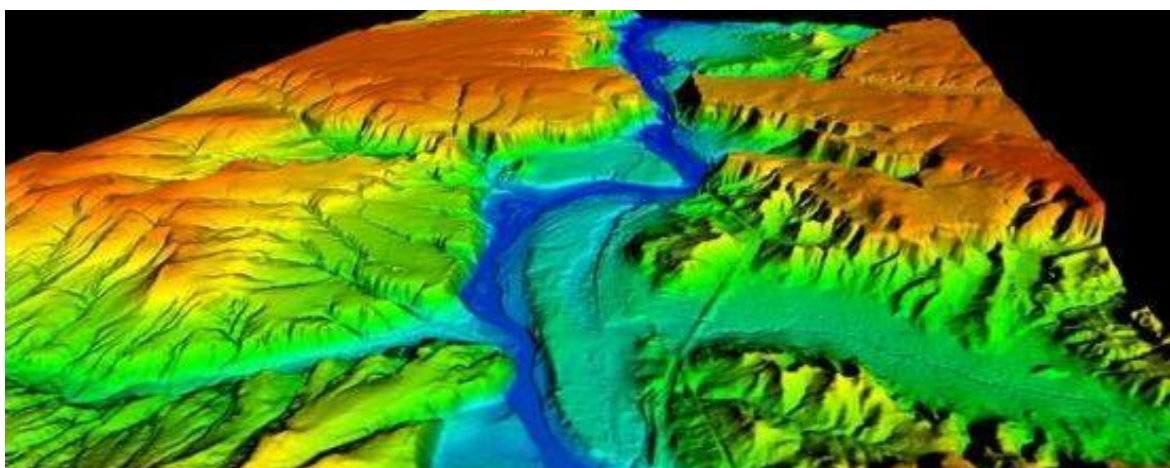


Figura 2-17 MDT obtenido usando un RPAS [26]

A parte de contribuir a las construcciones y apoyo a los Zapadores, el uso de este tipo de sistemas en Infantería de Marina podría permitir la cartografía de las zonas alejadas de territorio nacional en las que nuestras tropas despliegan, y mediante los MDT es posible realizar simulaciones de los campamentos o emplear los datos obtenidos con otros fines de organización y planeamiento. Además, permitiría una mejor evaluación de daños tras una catástrofe natural, permitiendo colaborar con las autoridades civiles de una manera óptima y eficaz.

2.6.4 Sensores LiDAR

El LiDAR, acrónimo de “Light Detection And Ranging” se basa en la emisión y retorno de pulsos de luz a una frecuencia determinada, midiendo el tiempo necesario para cada pulso emitido al reflejarse en el suelo y volver al sensor, siendo este activo, ya que puede emplearse de noche o con condiciones meteorológicas adversas. El LiDAR de alta resolución se apoya en los sistemas GPS para obtener datos más precisos. Al conocer la velocidad de la luz (que es la velocidad a la que se desplaza el pulso), se calcula la distancia recorrida obteniendo una nube de puntos, que tiene que ser filtrada y procesada para su posterior empleo. El sistema embarcado en la aeronave cuenta además con un sistema inercial (IMU) que tiene en cuenta los giros y movimientos del aparato.

Para realizar escaneos aéreos se usan sistemas de barrido perpendicular al suelo que permiten obtener gran cantidad de puntos a la vez, considerando el doble retorno. La ventaja de este tipo de sistemas es que es especialmente útil en zonas en las que existe vegetación densa, porque los pulsos son capaces de penetrarla para llegar hasta el fondo y de esta manera “ver” que hay debajo de la cubierta de los árboles.

A la hora de aplicar esta tecnología para la generación de productos cartográficos es más rápida y eficiente que la fotogrametría, ya que, al generar directamente una nube de puntos, requiere menos procesado que las técnicas de reconstrucción del terreno en base a fotografías tomadas. Con un sistema LiDAR es posible cartografiar una extensión de entre 2000 y 3000 hectáreas en media semana de trabajo con una resolución de en torno a 3-4 cm/píxel. La resolución del sistema viene definida a partir de la combinación del ángulo de escaneo y de la altura de vuelo. Típicamente, cuando mayor es la altura de vuelo, mayor es la anchura de barrido y menor la resolución. Puede ser empleado para la realización de productos de planeamiento previos como el IPOE, atendiendo especialmente a las capacidades de escaneo de entornos urbanos.

2.6.4.1 Sensores LiDAR batimétricos

Encuadrados dentro de los sistemas LiDAR, pero con ciertas capacidades que los hacen idóneos os sistemas LiDAR batimétricos han sido fundamentalmente diseñados para adquirir la batimetría próxima a las costas. La principal diferencia entre estos y sus homólogos topográficos reside en el tipo de láser empleado. En los sistemas topográficos se emplean láseres infrarrojos, incapaces de penetrar en el agua y que, por tanto, no pueden utilizarse para adquirir batimetrías.

La batimetría LiDAR aerotransportada (ALB) permite el escaneo y mapeo de zonas cercanas a la costa o zonas de difícil acceso como pueden ser playas, arrecifes o islas, donde no se podría realizar una batimetría tradicional con un barco. Se emplea el láser verde, que viaja hasta el fondo marino y vuelve a la aeronave. La profundidad máxima de funcionamiento varía, entre otros parámetros, según la limpieza de las aguas, oscilando entre los 10 metros en las zonas más turbias hasta unos 50 metros de profundidad, en caso de plantearse unas condiciones óptimas.

Este tipo de procedimiento es aplicado por empresas de ingeniería y topografía en la actualidad para realizar levantamientos batimétricos de puertos o zonas próximas y permite elaborar MDT y DEM del fondo marino. Las aplicaciones de sensores LiDAR batimétricos están en continua expansión, pero entre las estudiadas hasta la fecha destacan:

- **Detección de objetos subacuáticos:** Siendo esta la primera aplicación militar de este sistema con el objetivo de detectar submarinos, según se recoge en [27]. Los usos civiles se han enfocado hacia el ámbito marítimo, orientados a mejorar la navegación y seguridad, especialmente en aguas costeras o más recientemente se han incluido este tipo de sensores para la navegación de vehículos autónomos submarinos.

- Realización de cartas náuticas y mapeos 3D: Esta es la principal aplicación de los sistemas ALB, especialmente en aguas someras y puertos, pudiendo realizarse en combinación con estudios de tipo ecológico o de morfología costera y fluvial.
- Evaluación de riesgos y gestión de catástrofes: la actualización del relieve cercano a la costa o las zonas ribereñas de los ríos permiten actualizar los datos de zonas con probabilidad de sufrir inundaciones permitiendo en caso de estas, una mejor gestión de las emergencias.

Al mejorar las capacidades de la Armada en general, no solo de Infantería de Marina, sería recomendable adquirir este tipo de sistema para acoplarlo al sistema Scan Eagle en el caso de que se emplease como herramienta previa a un desembarco, para aprovechar las capacidades existentes actualmente, ya que este sistema de por sí solo, no aporta ninguna ventaja estando, integrando en una unidad dentro del propio Tercio de Armada. En caso de no existir ningún sistema compatible con la plataforma del Scan Eagle lo ideal sería un sistema de FW tipo Small que pudiera realizar múltiples escaneos con gran autonomía. Este tipo de sensor será analizado en Resultados.

2.6.5 Sensores ViDAR

Son las siglas de Visual Detection and Ranging. El empleo de este tipo de tecnología, similar a los sistemas LiDAR, pero sin el uso de sensores activos, utiliza una cámara de video digital de alta resolución que recorre 180° y un software específico que analiza las imágenes para detectar posibles contactos que pueden ser del tipo de semi sumergibles o humanos. De esta manera se amplían las características de esta plataforma logrando aumentar en 80 veces el área de búsqueda de una salida de patrulla marítima normal.

Puede buscar de manera autónoma un área de aproximadamente 13360 mn² en 12 horas con un rango de detección entre las 1,7 mn de una persona en el agua hasta las más 30 mn de un contacto tipo barco, pudiendo detectar contactos inapreciables para el radar de superficie de un barco. Todo ello se realiza de manera automática avisando al operador.

Este tipo de sensor puede ser acoplado al Scan Eagle disponible en la Armada Española, aumentando de esta manera las capacidades de la Escuadrilla. Las operaciones en ambiente marítimo en las que han participado en el pasado (operaciones Atalanta y Sophia) encajarían con las características ofrecidas por este sistema ya que permitiría una rápida y automática detección de pequeños contactos, como pueden ser pateras o esquifes piratas. El amplio radio de búsqueda permitiría tener un mayor control desde la plataforma naval pudiendo realizar de esta manera misiones SAR.

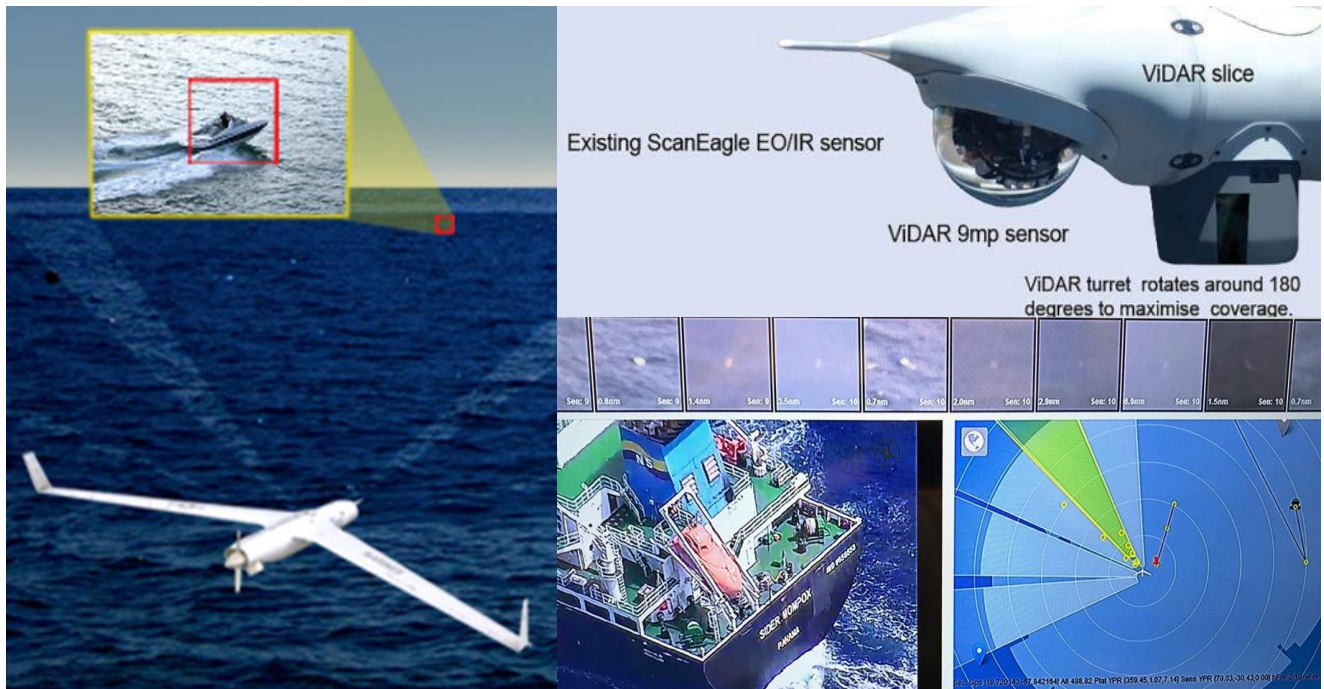


Figura 2-18 Visión global del sistema ViDAR. Elaboración propia

Embarcando este tipo de aeronave en plataformas navales de menor tamaño, como son los BAM, daría a la Armada mayor capacidad a la hora de realizar algunas de las misiones que le son encomendadas y ampliando las mismas como, por ejemplo, a la hora de detectar artefactos semi sumergidos o participar junto con los organismos civiles en tareas de vigilancia de fronteras y persecución de tráfico de sustancias ilícitas.

2.6.6 Otro tipo de sensores

En el mundo de los sensores específicamente diseñados para usos militares hay algunos que podrían ser aplicados en operaciones de la Armada Española. Este tipo de cargas tendrían que ser adosadas a una aeronave de tipo Small (Scan Eagle). Destacan las cargas útiles de EW y SIGINT, que añaden sistemas de COMINT y COMJAM. Estas son capaces de proporcionar información a una distancia mayor que la que se podría obtener con sensores EO/IR o radares de apertura sintética.

Actualmente las Fuerzas Armadas Españolas han perdido la capacidad de guerra electrónica desde el aire que proporcionaban ciertas aeronaves del Ejército del Aire, por lo que el empleo de UAV permitiría recuperarla. Además, los UAV permiten acercarse más a los emisores en comparación con una aeronave de EW tradicional debido al menor tamaño de esto, lo cual contribuye a una menor RCS y minimiza las posibilidades de detección.

Con cargas ESM (apoyo a guerra electrónica) o SIGINT se puede obtener información crucial que contribuye a la actualización del orden electrónico del campo de batalla. Este tipo de sensores encajan perfectamente en los UAV debido a que necesitan menos energía ya que no se dedican a emitir, sino que captan las señales existentes y las procesan, siendo este tipo de cargas las más adecuadas para acoplar a una aeronave no tripulada de pequeño tamaño.

Los pods⁵ destinados al EA (ataque electrónico) aún están en desarrollo e investigación para ser integrados en UAV, aunque irían incorporados en los sistemas de mayor tamaño y autonomía debido al mayor peso de la carga. Si bien es cierto que hay proyectos para la construcción y equipamiento de UAV

⁵ Pods: Contenedores añadidos a aeronaves con el fin de mejorar sus capacidades en diversas áreas para cumplir misiones específicas.

de gran tamaño (tipo HALE o MALE) equipado al completo con sistemas de EW para la recepción y análisis de señales y con la capacidad de realizar ataques y jamming.

2.7 La UME como banco de pruebas

La Unidad Militar de Emergencias es una de las pioneras en el empleo de RPAS con distintos cometidos dentro de las Fuerzas Armadas. El empleo de los sistemas diseñados exclusivamente para uso civil se basa en un modelo de ensayo-error ya que algunos de estos no se pueden aplicar de la manera esperada en el mundo militar ya que no soportan las condiciones operacionales que se pueden dar en una emergencia como son las condiciones climáticas extremas o el desgaste continuo al que se somete a la plataforma, de esta manera la UME juega un papel clave para el estudio de las diversas plataformas y su resistencia a las diversas cargas y ambientes operacionales.



Figura 2-19 Diversos RPAS empleados por la UME [28]

Actualmente los RPAS se emplean en cerca del 90% de las intervenciones de la UME para obtener imágenes en directo, cometidos de seguridad, evaluaciones de daños y análisis de infraestructuras. Este último campo es fundamental ya que los equipos ligeros de primera intervención juegan un papel clave antes de introducir a intervinientes en el escenario para maximizar su seguridad.

Las aplicaciones específicas y especializadas asociadas a las emergencias se pueden clasificar de la siguiente manera:

- USAR: con posibilidad de empleo para mapeo de zonas, para cálculos volumétricos de escombros, localización de puntos de acceso, apoyo al mando, control y a los propios equipos de rescate en la localización de víctimas.
- Inundaciones: para tomar orto fotos, controlar la contención y vías de escape además de evaluación de daños o rescate en superficie.
- Rescate en aguas abiertas: fundamental como apoyo a los equipos de salvamento permitiendo acortar los tiempos de respuesta debido a la posibilidad de ser empleado para búsqueda de víctimas y con la capacidad de aportar una primera asistencia.
- Incendios forestales: Planificación de la extinción y gestión de recursos disponibles, exploración de zonas de difícil acceso o medición de puntos calientes mediante cámaras termográficas.

- Búsqueda en grandes áreas: se pueden emplear como apoyo a los medios terrestres para el rastreo de las zonas asignadas con posibilidad de acoplar ciertas cargas de pago como un altavoz para tratar de localizar a una víctima.
- Nevadas: Mapeo de zonas y localización de víctimas atrapadas. Si la carga de pago de la aeronave es suficiente se pueden emplear para transportar suministros o material específico como medicinas.
- Ambiente NRBQ: Empleados para analizar la situación, posibilidad de añadir sensores específicos para realizar mediciones y minimizar el riesgo a los intervinientes.

Dentro de la Unidad, los RPAS se encuadran en los Batallones de Intervención en Emergencias, contando además con personal especializado en este tipo de sistemas y encuadrado en el Batallón de Transmisiones. Internamente está regulado con normas operativas y diversos procedimientos de actuación.

Aunque se busca la obtención de datos de manera clara y directa para ganar tiempo, ha habido ciertas intervenciones en las cuales los RPAS han sido empleados con cometidos distintos a los habituales como, por ejemplo, durante el Estado de Alarma provocado por la pandemia del COVID-19 se emplearon RPAS con una carga de pago que les permitiese realizar labores de desinfección desde el aire en grandes espacios como patios de cárceles o plataformas logísticas de distribución de alimentos. La capacidad de desinfectante del sistema es de 10 litros y por cada carga puede desinfectar una hectárea.



Figura 2-20 Desinfección empleando un RPAS [29]

La UME es la punta de lanza de las Fuerzas Armadas a la hora de intervenir en emergencias y la clave para las intervenciones de mayor envergadura es la combinación con otros ejércitos y con empresas privadas que puedan aportar sensores especializados, de ahí la necesidad de contar en la Armada con otro tipo de cargas de pago para poder apoyar incluso en emergencias o en apoyo a otros organismos civiles. La problemática de este tipo de usos es la relativa a la gestión del espacio aéreo, que será tratada en un apartado específico.

2.8 Problemas en el empleo de UAV

A pesar de que este tipo de sistemas aportan un gran número de ventajas y capacidades en nuestras Fuerzas Armadas, es cierto que existen una serie de problemas asociados a su uso que se podrían clasificar en problemas técnicos, éticos, de coste económico, de gestión del espacio aéreo y de seguridad.

2.8.1 Problemas técnicos

Al ser un sistema por control remoto, si el enlace de datos no está cifrado de una manera suficientemente robusta puede ser hackeado y de esta manera perder los datos que están siendo tomados o bien inutilizar de manera remota la aeronave tomando el control de esta. Esto bien puede darse cuando la aeronave está a la vista, ya que existen diversos aparatos para, teniendo un UAV a la vista, tomar el control de el de forma remota y adueñarse del mismo o bien logrando acceder al enlace satelital en caso de los sistemas que funcionan en modo BLOS. De esta forma, el enemigo puede hacerse con nuestro sistema y emplearlo en su beneficio o bien obtener la información contenida dentro del mismo. Otra forma de inutilizar un UAV de manera remota es a través de un virus informático que afecte a sus sistemas, imposibilitando que opere.

En ocasiones, el no contar con un sistema fiable de enlace de datos, que logre transmitir la información y las órdenes con fluidez y rapidez puede hacer que las órdenes no lleguen de manera adecuada a la aeronave lo cual puede afectar a la misma cuando se dan las condiciones más críticas.

2.8.2 Problemas éticos

El empleo de inteligencia artificial en este tipo de sistemas, y que permita discriminar o atacar objetivos de forma casi automática es uno de los grandes dilemas éticos de este tipo de sistemas. Actualmente España no tiene capacidad de ataque desde los UAV que dispone, pero en caso de adquirir esta ventaja en el futuro es un dilema al que nuestros operadores se enfrentarán al igual que lo hacen los de países como Estados Unidos. Todo unido a que el hecho de estar alejado del conflicto puede crear un sentimiento de insensibilización.

La posibilidad de obtención de imágenes, especialmente en Territorio Nacional, puede implicar infracciones en la Ley de Protección de datos, atentando contra la intimidad. Este tipo de violaciones de nuestra privacidad ya se contempla en la última actualización de la normativa civil.

2.8.3 Problemas económicos

Aunque la gran mayoría de los sistemas más pequeños (RPAS de Clase I) tienen un precio de adquisición bastante reducido, a medida que aumenta la envergadura de estos, el coste de adquisición y mantenimiento se eleva considerablemente superando con creces al coste que tendría un sistema tripulado. Al coste de los sistemas hay que sumar el coste de la formación específica de los pilotos, que muchas veces es proporcionada en exclusiva por la empresa proveedora del aparato. En este punto hay que poner una balanza entre si es más barato emplear sistemas tripulados, asumiendo los riesgos que ello conlleva o apostar por sistemas UAV que pueden realizar múltiples misiones sin poner en riesgo la vida del operador.

Este debate puede ser de aplicación a la hora de realizar operaciones de vigilancia de fronteras o resguardo fiscal, donde la presencia de un aparato no tripulado no evita riesgos, sino que se limita a facilitar las operaciones.

2.8.4 Problemas de gestión del espacio aéreo

Se distinguen entre los vuelos dentro de Territorio Nacional y aquellos que se producen en el extranjero en el transcurso de misiones, ejercicios o despliegues. La gestión e integración de todas las aeronaves presentes (tripuladas y no tripuladas) dentro del espacio aéreo es una labor compleja.

Dentro de nuestro territorio las operaciones con RPAS solo se podrán realizar en espacio aéreo segregado. Dentro del documento donde se recogen “Las zonas prohibidas, restringidas y peligrosas; espacios aéreos temporalmente segregados” [30] se puede observar que hay algunos apartados exclusivos en zonas para la operación a nivel militar de RPAS, donde se especifica la zona geográfica en concreto, la torre de control que coordina estas acciones y se informa que las operaciones en este tipo de áreas aparecerán recogidas en las NOTAM. Todas las medidas de coordinación se incluirán en la ACO (Orden de tareas aéreas) especificando que las operaciones a realizar son con RPAS e indicando

las cotas máximas de vuelo. Durante el uso de un Espacio Aéreo Temporalmente segregado, el uso de este estará denegado al resto de usuarios y solo podrán acceder al mismo los casos y aeronaves previamente autorizadas.

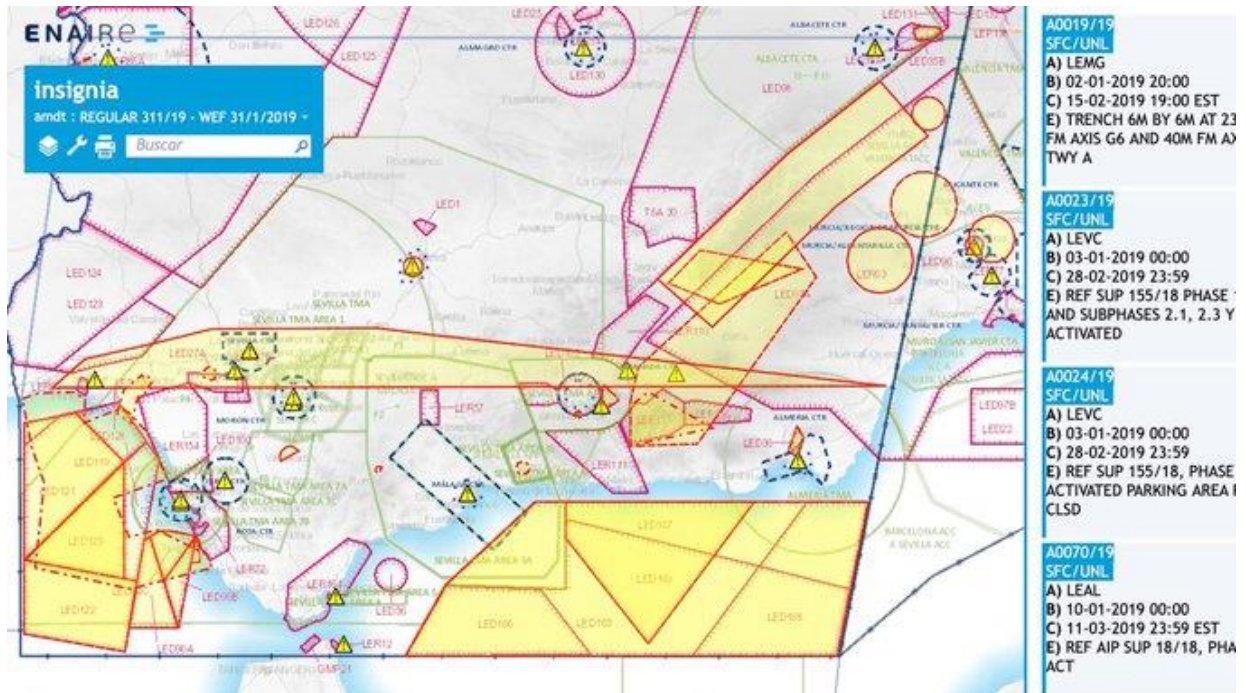


Figura 2-21 Ejemplo de diversas zonas aéreas y NOTAM [11]

En el caso de tener que operar un RPAS dentro de territorio nacional en alguna de las zonas que no están recogidas debido a una situación excepcional o de emergencia se podrá autorizar un vuelo siempre que haya coordinación entre las diversas autoridades y se soliciten los correspondientes permisos.

Fuera de territorio nacional la gestión del espacio aéreo varía en función del despliegue y los actores implicados. Se suelen establecer franjas en función de la altitud de vuelo para los diferentes sistemas implicados que realicen vuelos preplaneados activándose zonas exclusivas de operación para determinados tipos de aeronaves en función de los vuelos no planeados.

2.8.5 Problemas de seguridad

Los UAV también pueden ser empleados en nuestra contra, teniendo que contar con diversos sistemas de inhibición y detección para estas amenazas. Mas allá del empleo de estos dispositivos como plataformas para actividades ilícitas, como puede ser el tráfico de estupefacientes, la posibilidad de añadir una carga explosiva, por ejemplo, puede comprometer seriamente la seguridad de un buque o de una instalación militar, aunque sin ir más lejos, el simple hecho de contar con una grabación de una zona restringida puede comprometer seriamente la seguridad de esta.



Figura 2-22 Neutralización de la amenaza con equipamiento específico. Elaboración propia

Para mitigar y evaluar las posibles amenazas, se siguen los siguientes pasos: detección, identificación y neutralización.

- Detección: se busca conseguir detectar el UAV, para ello se pueden emplear tres procedimientos distintos:
 - Radar, siendo esta la tecnología más madura y cuya principal ventaja es la posibilidad de tener una gran cobertura mediante multitud de haces. Su desventaja radica en que no es siempre eficaz debido al pequeño tamaño de estos aparatos y su pequeña RCS.
 - Sonido, esta tecnología se emplea en ambientes en los que las circunstancias operacionales no permiten emplear el radar, como puede ser un ambiente urbano. La detección mediante sonido permite estimar la posición del UAV en función de su marca sonora.
 - Vigilancia del espectro (equipos ESM), en función de las señales intercambiadas entre la estación emisora y el UAV. Estas pueden ser de tipo UHF, Wifi o incluso satélite. Este tipo de equipos son de gran movilidad, pudiendo ser fácilmente embarcados en camiones o buques.
- Identificación: para discriminar un UAV de otro tipo de objeto volador o ave. El método más empleado es la confirmación visual, aunque también hay sistemas que permiten una confirmación automática empleando inteligencia artificial. Formas de identificación:
 - Micro Doppler, esta firma va asociada al movimiento del UAV y los motores o rotores de los que disponga, permitiendo discernir entre un RPAS y un ave debido a su distinta firma micro doppler.
 - Cámaras, pudiendo ser infrarroja, de gran precisión o hiperspectral.
- Neutralización de la amenaza, una vez que la identificación es positiva, el aparato debe ser neutralizado. Para esto se puede emplear:
 - Jamming, se crean interferencias que imposibilitan el correcto funcionamiento de la aeronave, haciendo que el receptor pierda la señal.
 - GPS Spoofing, esta técnica consiste en transmitir señales alteradas para hacer creer al UAV que está en una posición geográfica distinta a la real.
 - Dron Anti-Dron mediante dispositivos específicos para atrapar aeronaves en pleno vuelo.
 - Wifi y vídeo, en caso de que la conexión entre el emisor y la aeronave sea por wifi, esta conexión se hackea.

- Laser: aun en desarrollo por diversos países, pero se ha demostrado que el uso de sistemas láser de alta potencia es una clara opción como sistema anti-drones en operaciones militares.
- Para pequeñas amenazas, otros sistemas que pueden ser considerados son el uso de aves de cetrería adiestradas o bien personal armado para neutralizar la amenaza. En este último caso el mejor armamento para derribar este tipo de aeronaves son las escopetas de postas, aunque no tienen demasiada cadencia y su eficacia depende de la puntería del tirador.
- En caso de UAV de mayor envergadura, se ha dado el caso de derribos empleando misiles.

3 RESULTADOS

De los sensores mencionados en el apartado 2.6 destacan y van a ser objetivo de estudio aquellos empleados para mejorar la cartografía de detalle, esto es, los referidos al LiDAR y al LiDAR batimétrico. Se ha decidido estudiar este tipo de sensor, porque, al contrario que los otros tipos de carga útil explicados, en estos casos no hay modelos tan definidos para ser empleados en operaciones militares.

3.1 Factores por considerar a la hora de proponer un sistema

Independientemente de si un sensor o sistema puede ser útil para la Infantería de Marina, hay que tener en cuenta una serie de factores que hacen que no todas las opciones sean válidas:

- Objetivo del sensor y donde se va a emplear: no será igual tener que hacer reconocimientos puntuales de un objetivo a baja cota donde la aeronave debe permanecer estática, caso en el que primará el uso de los UAV tipo RW, que querer abarcar grandes extensiones de terreno desde una mayor altitud, donde entrarían en juego los FW. El emplazamiento donde se va a emplear también condiciona la elección, ya que tiene que estar preparado para soportar climas extremos y posibles impactos.
- Plataformas existentes, carga útil e interoperabilidad: debido al alto coste de adquisición de una plataforma y que estas son centralizadas por la DGAM, se busca intentar adaptar nuevos sensores a las plataformas existentes en la actualidad, para ahorrar en los costes asociados a la adquisición y que incluyen, entre otros, la formación de operadores o la adquisición de repuestos y mantenimiento. En caso de no lograr este objetivo, se buscará una plataforma común, que sea capaz de soportar la carga útil añadida y que pueda ser usada con los diferentes sensores realizando mínimas modificaciones técnicas, todo ello teniendo en cuenta que la autonomía tiene que ser suficiente para poder proporcionar al usuario datos de calidad.

3.2 Sensores LiDAR y su aplicación al mundo militar

Aunque en la gran mayoría de casos en los que se emplea un UAV se busca obtener un producto inmediato, con un pequeño procesamiento de datos se podrían obtener productos acordes a las necesidades de una unidad tipo Brigada/ARD. Este tipo de datos puede ser usado en apoyo a unidades más pequeñas y en beneficio de ellas, pero el principal usuario serán los escalones superiores, principalmente en funciones de planeamiento y ayuda a la decisión.

La guerra del presente toma parte cada vez de mayor manera en zonas urbanizadas y pobladas. En otras ocasiones, las misiones de las Fuerzas Armadas no se asocian con acciones ofensivas o defensivas, sino que se centran en el apoyo a otro tipo de fuerzas o unidades, incluso de otros países, o bien realizan labores de formación e instrucción a las fuerzas locales.

Una forma de apoyar las decisiones y el planeamiento es mediante la realización de modelos simulados por ordenador, mediante entornos 3D o bien mediante la creación de mapas en alta resolución que permiten mejorar la disposición de nuestras tropas en el terreno. Todo esto es posible de realizar empleando sensores LiDAR.

En la siguiente Figura 4-1 se muestra un producto obtenido empleando únicamente un sensor LiDAR topográfico embarcado en un UAV y en él se puede apreciar una zona del terreno situada en las inmediaciones de un lago, diversas edificaciones y el relieve debajo de la masa forestal, que no podría ser visto de otra manera.

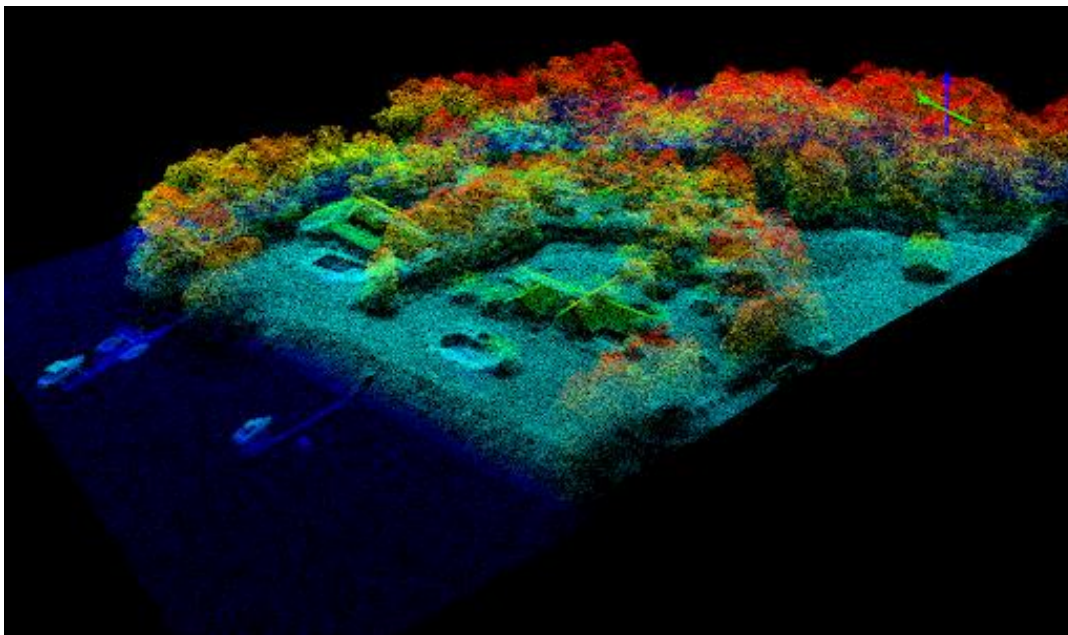


Figura 3-1 Ejemplo de un producto obtenido mediante escaneo LiDAR desde un UAV [31]

3.2.1 Funcionamiento del LiDAR

Es un sensor activo que se centra en los tiempos de vuelo (TOF: Time off light) de los pulsos laser que emite, de manera que, al configurar ciertos parámetros, que son conocidos, como la velocidad del pulso, las características del ángulo de emisión y la diferencia de tiempos, se puede obtener una nube de puntos con los rebotes de los pulsos. El retorno del pulso no siempre se producirá de la misma manera, pudiendo darse tres situaciones distintas:

- Superficie sólida: el rayo se refleja de manera perfecta y vuelve al sensor.
- Agua: en el caso de los topográficos el rayo es absorbido y no se refleja, por lo que no se obtiene ningún tipo de información. Este es el matiz que diferencia a ambos tipos de LiDAR (topográficos y batimétricos): la capacidad de penetrar y ser reflejado a pesar de la existencia de un medio acuático.
- Vegetación: el rayo choca con la parte superior del árbol, por lo que parte del rayo se refleja y vuelve al sensor, mientras que la otra parte del rayo continúa penetrando el follaje hasta que llega al suelo y rebota, guardando el sistema el primer y último pulso recibidos.

Resumiendo, los pulsos laser emitidos se reflejan sobre objetos que están sobre la superficie terrestre tales como árboles o edificios, pudiendo regresar más de un retorno por cada pulso emitido. El primer pulso láser devuelto es el principal y se asocia con la entidad más grande presente (por ejemplo, la copa de un árbol). Los diversos retornos de pulsos intermedios se asocian a las ramas y vegetación existente (en este caso), siendo la última la correspondiente al suelo, aunque puede haber errores debido a que antes de llegar a la superficie se produzca el rebote total debido a la densidad de la vegetación.

En el caso del LiDAR batimétrico, el funcionamiento es parecido puesto que se basa en el mismo principio operacional, aunque lo que varía es el tipo de pulso que es emitido, siendo el láser verde ($\lambda = 532 \text{ nm}$) el elegido. El principio de funcionamiento es equivalente al del LiDAR topográfico, donde un pulso láser es emitido por el escáner y viaja hasta la superficie del objeto a estudiar, en este caso el fondo marino. Al llegar a la superficie del medio acuático parte del pulso es devuelto al sensor debido al rebote que se produce y otra parte del pulso atraviesa el medio llegando hasta el fondo, si las condiciones ópticas del fluido lo permiten, y rebotando de nuevo, volviendo al emisor de pulsos situado en el UAV. Con el tiempo de vuelo de estos pulsos y la altura del vuelo de la aeronave es posible identificar la superficie acuática y el relieve preciso del fondo marino, además de determinar la existencia de posibles objetos entre el fondo y la superficie, bajos que sean un peligro para la navegación o alteraciones en el fondo. Al ser una técnica que opera en dos medios distintos se producen cambios en la propagación y velocidad de la señal al cambiar de medio, definidos según las leyes de Snell.

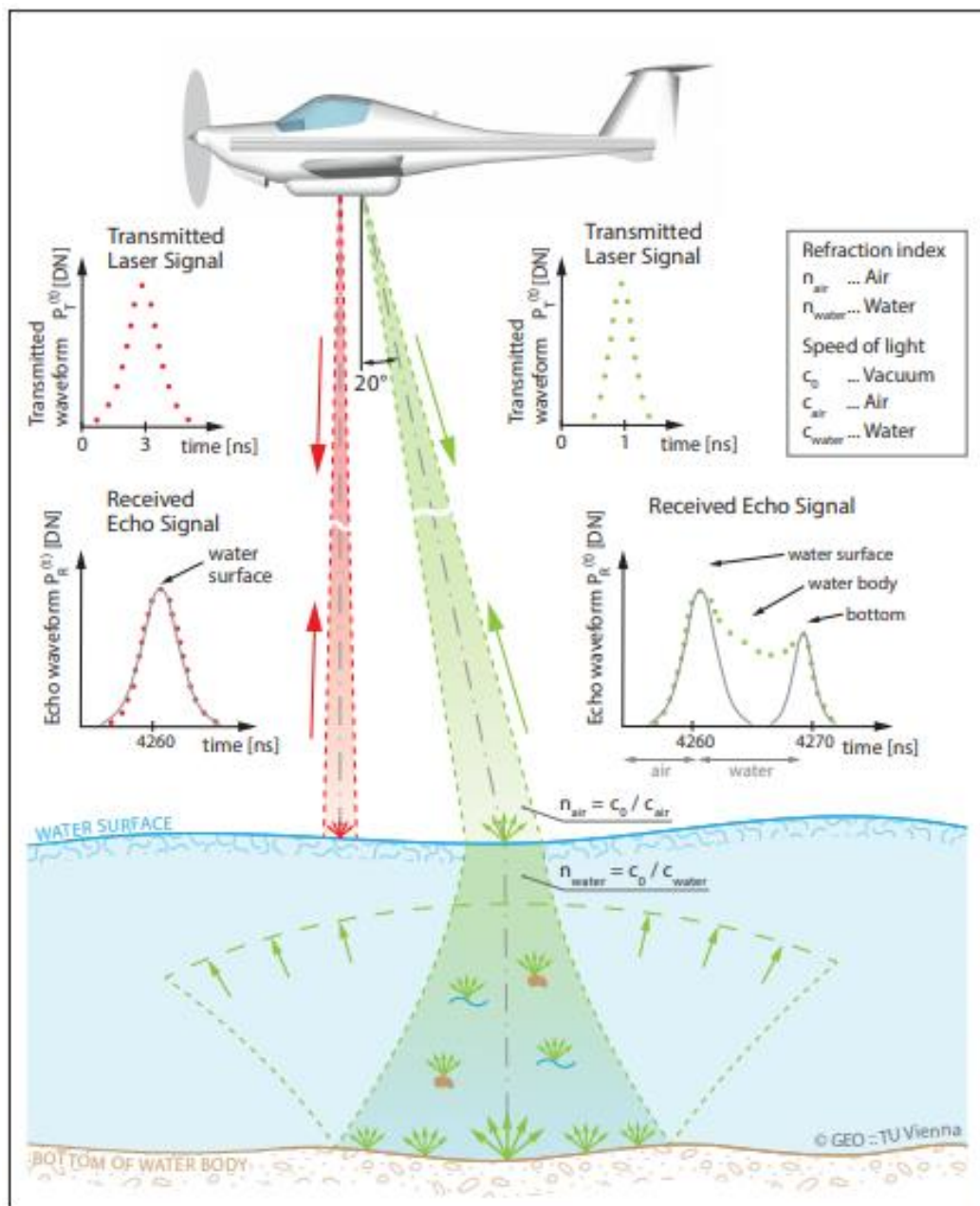


Figura 3-2 Explicación gráfica del funcionamiento del LiDAR batimétrico [32]

Esta técnica se denomina ALB (*Airborne Lidar Bathymetry*) o bien ALH (*Airborne Laser Hydrography*) y su éxito depende de la altura de vuelo de la aeronave y de las condiciones ópticas de la masa de agua en la que se va a hacer el estudio (por ejemplo, su turbiedad, como será explicado más adelante). En los sensores empleados a bordo de aeronaves tripuladas (que ofrecen mayor capacidad de penetración en el medio acuático), se pueden obtener resultados de escaneos para profundidades de hasta 60 metros, en condiciones de aguas muy claras y meteorología favorable (mar en calma), como las que pueden ocurrir en ciertas ocasiones en mares como el Caribe. En caso de tener malas condiciones meteorológicas y elevado grado de turbiedad (gran cantidad de partículas en suspensión presentes en el fluido), la profundidad máxima de operación se reduce a 10 m.

Los primeros usos de esta tecnología datan de los años 60 del siglo pasado y conforme han pasado los años se han producido notables adelantos, aunque si buscamos una gran resolución en los datos, se requerirá un mayor tiempo de escaneo, mayor tamaño de ficheros y tiempo de procesamiento.

Aunque se trata de un sistema que suele emplearse en aeronaves tripuladas, el uso de drones permite que a una altitud de 25 metros y a una velocidad de escaneo de 1 m/s se pueda escanear una parcela de 100 x 50 m en tan solo 100 segundos [33]. Es imprescindible procesar las nubes de puntos obtenidas, pudiendo de esta manera descartar vegetación o apreciar posibles errores en la toma de datos, de forma que se obtiene un producto con unas referencias geográficas y coordenadas.

Con esta nube de puntos refinada se pueden realizar MDT y modelos de elevación digital (DEM). Este tipo de sensores son cada vez más pequeños y pueden ir acoplados en RPAS de categoría Micro, Mini o Small.

La ventaja del empleo de esta tecnología es que en base a las coordenadas desde donde ha sido emitido el pulso, es decir, las del propio dispositivo, es posible conocer las coordenadas de cualquier punto que hayamos escaneado, asociando cada uno de estos con una referencia geográfica.

3.2.2 Ventajas del sistema LiDAR UAV

- Registra con gran precisión todos los datos que se miden de manera numérica, siendo estos datos válidos para la realización de trabajos de ingeniería.
- Al ser aéreo y no tripulado permite obtener datos en zonas de difícil acceso.
- El sistema, al utilizar un sensor activo, puede ser empleado en condiciones de visibilidad reducida o incluso de noche.
- Puede ser procesado de manera semiautomática, lo que aumenta la velocidad en la que se realiza el análisis.
- Con este sistema se obtiene un espaciado de datos más denso en comparación con los métodos clásicos.
- Permite obtener una imagen del terreno bajo una capa de vegetación, permitiendo determinar si existen construcciones o posiciones enemigas ocultas.
- Se obtienen nubes de puntos más precisas que con los sistemas tradicionales ya que no depende de la luz ambiental para tomar las fotografías.

3.2.3 Aplicaciones en el ámbito militar

Se han identificado tres posibles ámbitos de uso dentro de la Armada en los cuales el empleo de este sistema puede ser de interés.

3.2.3.1 Centrado en el planeamiento

Centrado principalmente en el ámbito cartográfico y de planeamiento a nivel superior. El hecho de poder obtener información de alta calidad a la hora de realizar un planeamiento ayudará a los mandos a tomar mejores decisiones. No todo el terreno tiene el mismo valor a la hora de realizar acciones militares,

ya que hay ciertos puntos del terreno que, por su importancia estratégica o por las construcciones que hay en ellos, representan puntos clave para las operaciones militares.

El empleo de un UAV con sensores LiDAR podría facilitar el reconocimiento y elaboración de productos cartográficos de estos puntos clave, especialmente de entornos urbanos, permitiendo planear en detalle las acciones en los objetivos. Si bien es cierto que este tipo de reconocimientos pueden ser llevados a cabo con medios ópticos, la aplicación de este nuevo método permitiría reflejar los objetos y productos de forma realista pudiendo además realizar simulaciones en un entorno 3D.

La posibilidad de obtener datos de elevación bajo la cubierta de vegetación, siempre y cuando ésta no sea excesivamente densa, permite ir un paso más allá en los vuelos ISR ya que otorgaría al operador del sistema la posibilidad de detectar potenciales enemigos bajo la misma, o bien la ocultación bajo lonas de ciertos equipos, que mediante un reconocimiento aéreo no podrían ser detectados, pero si se emplease LiDAR.

Esta misma tecnología podría ser aplicada en apoyo a unidades de artillería o en ataques con fuego naval o aéreo, logrando marcar sobre un plano, con exactitud milimétrica, los impactos que se han producido.

3.2.3.2 Como apoyo a las Unidades de Reconocimiento

El empleo del LiDAR batimétrico aerotransportado podría resolver problemas de vital importancia para las operaciones anfibia de Infantería de Marina. El reconocimiento del fondo marino antes de llegar a una playa es realizado por buceadores de la Compañía de Reconocimiento o de Unidades de Operaciones Especiales. Este trabajo es imprescindible, ya que además de informar de la presencia de obstáculos en las zonas cercanas a playa, se obtienen los detalles de la altura de la ola, corrientes o composición del fondo marino, algo que sólo puede ser realizado empleando el factor humano. Si a este componente le sumásemos una carta náutica realista y actualizada, se lograría evitar la mayoría de problemas asociados a un desembarco, como pueden ser la presencia de bajos ocultos antes de entrar en playa o la existencia de terreno irregular en la rompiente.



Figura 3-3 Diversas fases de un reconocimiento de playa empleando buceadores. Elaboración propia

Con un escaneo ALB se podría disponer en el barco de una carta náutica realista que se completaría con el trabajo de las unidades de Reconocimiento en playa. Esta carta permitiría establecer unas rutas seguras para la navegación, definidas de manera unívoca a partir de waypoints y proporcionando las coordenadas precisas de los puntos de varada a los patrones de las embarcaciones. Además, permitiría la detección de objetos sumergidos situados entre el fondo y la superficie del mar y que pudieran suponer un peligro o afectar a la navegación.

En caso de tener que remontar un río, permitiría definir de forma clara y precisa la profundidad en todos sus puntos y el relieve submarino presente, además de poder ver si hay alguna anomalía en el relieve que se pudiese asociar a algún tipo de sumergible o artefacto. Su aplicación en ríos y estuarios ya ha sido objeto de estudio según se recoge en [34] y en [35].

Este sensor podría ser de interés a la hora de detectar y clasificar minas marinas y UXO's presentes en el medio marino. Empleando la precisión geográfica del sistema y mediante una identificación y análisis de la forma y relieve, se posibilita la clasificación o detección previa de este tipo de artefactos en aguas someras, con el riesgo que ello conlleva para las operaciones militares y marítimas en este tipo de escenarios permitiendo llevar a cabo operaciones de desminado. Algunas empresas, como ASTRALite, se han centrado en este campo, para desarrollar productos junto con agencias especializadas, que permitan solventar este tipo de problemas.

A la hora de procesar estos datos existen programas comerciales de diversas compañías entre las que se pueden destacar a Leica (que también es fabricante de sensores de LiDAR batimétrico) o AutoCAD, existiendo además programas de software libre y gratuitos.



Figura 3-4 Reconocimiento de una playa y su zona de costa. Elaboración propia

3.2.3.3 Como herramienta de apoyo en la Hidrografía

Esta capacidad no solo aportaría mayor precisión a la hora de realizar desembarcos anfibios, sino que podría ser empleado por el Instituto Hidrográfico de la Marina, responsable de la realización de las cartas náuticas en España, para diseñar cartas con mayor detalle y precisión en zonas de puertos o de poca profundidad, ya que, aunque los métodos tradicionales de batimetría que emplean SONAR tienen una mayor penetración (profundidades mayores de 100 m), el ALB tiene mayor precisión para las zonas costeras y zonas en las que la navegación está restringida o en áreas de alto valor ecológico. La ventaja de su fácil transporte despliegue y uso hacen que sea posible obtener datos de calidad en un tiempo reducido. En este caso, sería preciso el empleo de RPAS en su categoría Mini o incluso Micro, ya que facilitaría el transporte y reduciría el personal implicado. Desde 2003, el ALB es empleado por la Guardia Costera de Japón en labores hidrográficas y de actualización de cartografía náutica y no solo permite evitar peligros asociados a la navegación, sino que después del terremoto y tsunami del año 2011 se puso de manifiesto la rapidez del empleo de la tecnología ALB para realizar levantamientos cartográficos de las zonas afectadas en menos de 11 días.

3.2.4 Un sensor multipropósito: estudio de las opciones existentes

Si queremos reunir las capacidades que nos proporcionan el LiDAR topográfico y el batimétrico embarcados sobre UAV, minimizando el impacto al realizar continuos cambios en la carga útil de la aeronave y aprovechando al máximo el tiempo de vuelo, es preciso buscar fabricantes que dispongan de un sensor que sirva para realizar ambos trabajos. Este tipo de sensores, llamados topo-batimétricos integran como mínimo dos láseres, uno que opera en el espectro entre 905 y 1550 nm (infrarrojo cercano) y otro específico para trabajos batimétricos operando a 532 nm (láser verde).

El origen de estos sensores duales se remonta a mediados de la década de los 2000, contando por aquel entonces con un tamaño desproporcionado e impensable para poder ser transportados por medio de un UAV ligero. Este tipo de sistemas pesaban entre 50 y 100 kilogramos y tenían un alto poder de penetración en el agua, siendo solo posible su uso mediante una aeronave tripulada. La evolución de este tipo de sensores los ha llevado a pesos más reducidos entre los 5 y 15 kilogramos, capaces de ser integrados en RPAS. Con una frecuencia de operación entre 4 y 200 kHz se pueden obtener nubes de punto con densidades superiores a los 50 puntos por metro cuadrado, permitiendo así detectar objetos de reducidas dimensiones y alcanzando niveles de penetración similares a los de los sistemas operados en plataformas de mayor envergadura.

Se han buscado diversas empresas que ofrecen sensores multipropósito que puedan ser transportadas por UAV, destacando por su idoneidad y renombre las siguientes: ASTRALite, RIEGL (con dos modelos VQ-840-G y BDF-1), FUGRO (con RAMMS) y el fabricante japonés AMUSE, con su dispositivo TDOT Green. En la Tabla 4-1 anexa pueden compararse las características principales de los sensores.

Características	ASTRALite	VQ-840-G	BDF-1	RAMMS	TDOT GREEN
Peso	5 kg	12 kg	5.3 kg	14 kg	2.6 kg
Precisión	0.5 cm	1.5 cm	2 cm	-	0.4 cm
Exactitud	1 cm	2 cm	2cm	-	0.5 cm
Frecuencia	20 kHz	50-200 kHz	4 kHz	27 kHz	60 kHz
Tipo de láser	Clase 3R	Clase 3B	Clase 2M	Clase 4	Clase 3R
Dimensiones (cm)	27x23x19	36x29x20	14x18x45	99x23x10	26x22x15
Ángulo de apertura para escaneo	30°	40°	15°	45°	90°
Penetración ⁶	>1,5 Secchi	>1,7 Secchi	>1 Secchi	3 Secchi	-
Altitud de vuelo	20 m	75 m	15 m	325 m	50 m

Tabla 3-1 Comparación de sensores (tomada de [38], [39], [40], [41] y [42])

Respecto a las clases de láseres y su seguridad, es necesario comentar que todos los láseres analizados pueden causar, en mayor o menor medida, daños oculares si existe contacto directo con el haz, aunque en general, no suelen tener lugar ya que son empleados para trabajos aéreos donde una exposición directa y prolongada rara vez se produce. El más peligroso de todos ellos es el de clase 4, pero al ser el RAMMS un equipo de mayor peso, está pensado para ser empleado a mayor altura con lo

⁶ Este valor viene reflejado en unidades de Secchi que es la herramienta de medición de la penetración luminosa en masas de agua.

que se disminuye su riesgo. De la misma manera, el haz que se emplea en un ALB es mucho más amplio en comparación con el de un LiDAR topográfico, de forma que no se generan excesivos riesgos para la salud y los operadores al usar esta técnica. Otros emplean sistemas de seguridad, que reducen la salida del láser al volar por debajo de cierta altura.

Todos estos sistemas necesitan realizar una calibración antes del vuelo, aunque este procedimiento se suele realizar de manera automática empleando entre 2 y 5 minutos. A la hora de emplear este tipo de sensores embarcados en un RPAS de tipo Small o Mini, lo recomendable sería elegir aquel más ligero, aun perdiendo algo de calidad, puesto que una carga de 12 kilogramos en uno de estos sistemas limitaría seriamente su autonomía. No obstante, todos los equipos mencionados en la tabla anterior se consideran como opciones válidas.

Otro parámetro importante es la frecuencia de escaneo (PRF: *Pulse Repetition Frequency*) y el ancho de pulso. Ambos parámetros están relacionados [43] con la densidad de puntos obtenida y la resolución angular de las nubes. El empleo de LiDAR requiere pulsos cortos de láser, de entorno a nanosegundos, que permiten obtener resoluciones del orden de centímetros. La ventaja de un mayor PRF permite hacer que mejore la relación señal-ruido del sistema, algo que se logra con los PRF con valores del orden de kHz.

3.2.4.1 BDF-1

Este sistema, fabricado por la compañía RIEGL va integrado en el llamado “Bathycopter”, un dispositivo a la venta que integra este tipo de sistema y que está pensado en exclusiva para la realización de levantamientos hidrográficos empleando RPAS. El problema radica en que no cuenta con un sensor adaptado para realizar escaneos LiDAR topográficos, por lo que a los 5,3 kg que pesa el sistema, habría que añadir uno como, por ejemplo, el mini VUX-1UAV, del mismo fabricante, con lo que se añade peso al sistema y se pierde autonomía, unido a que no todos los UAV están capacitados para transportar una carga de en torno a 7 kg. Los catálogos de especificaciones de el Riegl Bathycopter, del BDF-1 y del mini VUX-1UAV pueden ser consultados en [43].

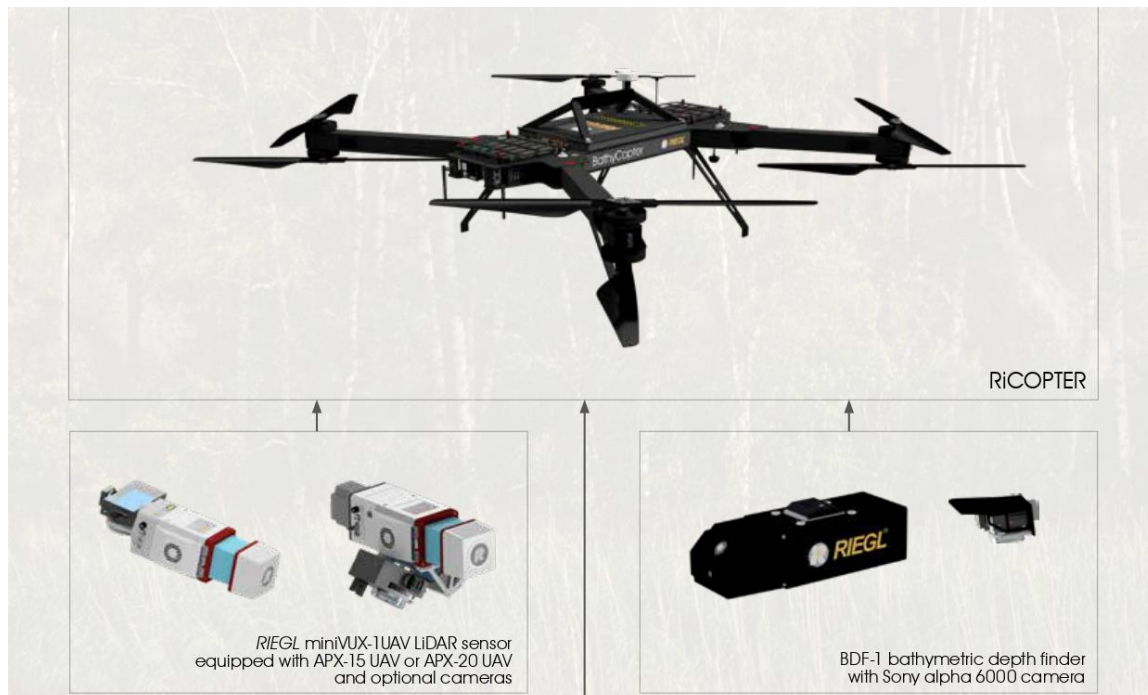


Figura 3-5 Mini VUX-1UAV (izquierda) y BDF-1 (derecha). Obtenido de [43]

3.2.4.2 VQ-840-G

Este sistema, fabricado también por la empresa RIEGL, combina en una plataforma compacta, la medición batimétrica y topográfica integrada, pudiendo ser integrado en plataformas aéreas tripuladas o en RPAS con capacidad para llevar gran carga de pago (ya que el sistema pesa unos 12 kg). El sistema realiza escaneos siguiendo trayectorias elípticas con un rango de escaneo de $\pm 20^\circ$ de manera que el haz laser incide siempre en la superficie del agua con una inclinación que propicia la penetración de este en el medio. El sistema cuenta con un algoritmo que detecta en tiempo real potenciales objetivos de interés. Actualmente, y teniendo en cuenta los sistemas de los que se dispone en la Armada, no se dispone de una plataforma capaz de transportar este sensor, sin embargo, sus características hacen que siga siendo una opción para tener en cuenta. Las especificaciones técnicas y medidas pueden consultarse en [44].



Figura 3-6 RIEGL VQ-840-G montado sobre un RPAS. Obtenido de [44]

3.2.4.3 FUGRO RAMMS

El de mayor peso (14 kg), tiene una versión para ser transportado como pod por un UAV de gran envergadura, aunque también tiene la opción de ir montado en una aeronave tripulada, para realizar vuelos a mayor altitud. Se ha demostrado la eficacia de este sistema para escanear grandes áreas de terreno, siendo el objeto del estudio topográfico una zona de 10000 km² con aguas muy claras, a una altitud de vuelo de 325 metros [36]. La problemática de este sistema es que al realizar vuelos a altitudes más elevadas que las que se llevarían a cabo con aeronaves de menor tamaño, se obtienen peores resoluciones en cuanto a puntos/m². Aún no se ha estudiado el empleo de este sistema en un vuelo con una altitud inferior, lo que podría arrojar una mayor densidad de puntos y, por ende, mejor resolución.

A pesar de ser una opción válida según los requisitos de calidad del sistema, no representa una opción viable para las operaciones militares por sus dimensiones y condiciones de peso, al no encajar en las plataformas aéreas disponibles hoy en día en la Armada. Sus especificaciones técnicas pueden ser consultadas en [46].

3.2.4.4 ASTRALite

El ASTRALite es el más compacto y de menor peso, pero también es uno de los que menor penetración tiene. La ventaja es que combina los sensores topo-batimétricos en uno solo, pudiendo realizar escaneos de ambas tipologías de superficie sin tener que cambiar la carga. Emplea una técnica

denominada INPHAMIS (*Intrapulse Phase Modification Inducted by Scattering*) que polariza los diversos pulsos láser para resolver el problema de los diferentes pulsos recibidos en función del fondo o de la superficie acuática. La altitud óptima de vuelo sobre la superficie del agua es de 20 metros, siendo este uno de sus puntos débiles ya que, al tener una menor altitud, también se cubre menos área de medición. En cambio, si se realiza un escaneo topográfico terrestre, se tendría que elevar a 50 metros para obtener los mejores resultados, pudiendo escanear una superficie de 2 hectáreas por cada vuelo realizado. El precio del sistema y del software de procesamiento asciende a 245.000 \$ y se da la opción de realizar unas demostraciones previas y formación de uso a los operadores con un precio de 5000 \$ por semana de trabajo.

El modelo de la empresa ASTRALite ofrece además la posibilidad de ser empleado en diversas plataformas, no solo desde RPAS, sino que puede ser acoplado en embarcaciones ligeras tipo RHIB o en las empleadas por el Instituto Hidrográfico de la Marina a la hora de realizar sus trabajos batimétricos. Además, podría ser empleada desde un USV en caso de disponer de ellos.

Las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante pueden ser consultadas en [47].



Figura 3-7 ASTRALite montado en RPAS. Obtenido de [47]

3.2.4.5 TDOT GREEN

El TDOT GREEN incorpora un láser verde que permite medir tanto en tierra, la ligereza del peso indicado en la descripción radica en que no se ha tenido en cuenta la antena. Puede capturar hasta 30.000 puntos por segundo proporcionando nubes con alta densidad de puntos (de en torno a 100 puntos/ m²), recibiendo hasta 4 ecos por pulso láser emitido. Tiene un ángulo de campo de visión de 90°, lo cual no es común para este tipo de sistemas, siendo lo corriente buscar una incidencia de ángulo de entre 15° y 20° para lograr una óptima penetración en el medio acuático. El inconveniente de este sistema es el pequeño tamaño del haz láser, entorno a unos 3 cm de ancho cuando se realizan mediciones desde los 100 m de altitud, lo cual se traduce en una menor capacidad de escaneo.

Respecto al área de resultados contrastados, según las mediciones realizadas por el propio personal de la empresa, se demuestra que la capacidad de penetración máxima varía entre los 2 metros en ambientes con gran turbiedad y los 9 metros para las zonas de aguas más claras. Según experimentos realizados con este aparato y recogidos en [37], se pueden obtener buenos resultados empleando este sistema en ríos de hasta 3,2 metros de profundidad y con condiciones adecuadas de turbiedad,

alcanzando los 6 metros de profundidad en zonas costeras con similares propiedades ópticas en el agua. El precio de este sistema se sitúa en torno a los 27 millones de Yenes (aproximadamente 214.000 €). El problema radica en que aún no está disponible para el mercado europeo, estando previsto el inicio de la comercialización de este a lo largo del año 2021. Las especificaciones técnicas más detalladas pueden consultarse en [49].

3.2.5 Conclusiones del estudio previo

A la hora de emplear un sensor LiDAR en un RPAS de tipo Small o Mini, sería idóneo elegir aquel más ligero, aun perdiendo algo de calidad, ya que una carga de 12 kilogramos en uno de estos sistemas limitaría seriamente su autonomía. Actualmente no hay RPAS en la Armada con capacidad para llevar semejante carga de pago, y solamente en caso de adquirir un sistema de mayor envergadura podría estudiarse comprar un equipo LiDAR más pesado. Esto reduce el análisis anterior a los tres sistemas de menor peso: el ASTRALite, el BDF-1 y el TDOT GREEN. De estos tres mencionados, el BDF-1 no incorpora un sistema LiDAR convencional, sino que simplemente se limita a un LiDAR batimétrico. Es posible adquirir un sistema que nos permita suplir esa carencia gracias a los sensores LiDAR ligeros que pueden ser adquiridos al mismo fabricante del BDF-1, por lo que una integración de ambos sistemas en uno solo es una opción posible, aunque incrementaría su peso.

Para poder definir con calidad el fondo marino es preciso contar con un sistema que permita escanear más de 100 puntos/ m². A continuación, y a modo de ejemplo, se representa una comparativa entre un mismo producto obtenido con un escaneo de 4 puntos/m² (izquierda) frente a otro con una densidad de 300 puntos/m² (derecha).

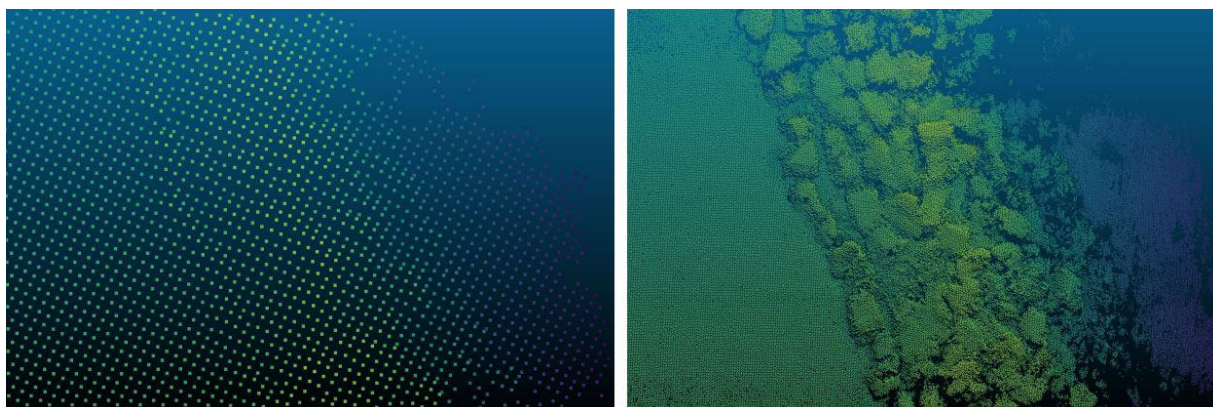


Figura 3-8 Comparativa de densidades de puntos [38]

El ASTRALite EDGE y el TDOT GREEN son los más compactos e incorporan sensores multipropósito topo-batimétricos por lo que, debido a su reducido peso, ambos podrían ser opciones igualmente idóneas. Habría que estudiar cuál de los dos se adapta mejor a la aeronave o si admitiese posibles rediseños por parte de la empresa para su perfecto ajuste. El precio de ambos sistemas es similar, siendo ligeramente más barato el del EDGE, que, además, a diferencia del TDOT, ofrece la posibilidad de formación y soporte continuo.

Una vez obtenidas las nubes de puntos es necesario procesar estos datos para obtener un producto final. Este tratamiento puede ser realizado con programas comerciales o de software libre y es fundamental para obtener un producto de calidad.

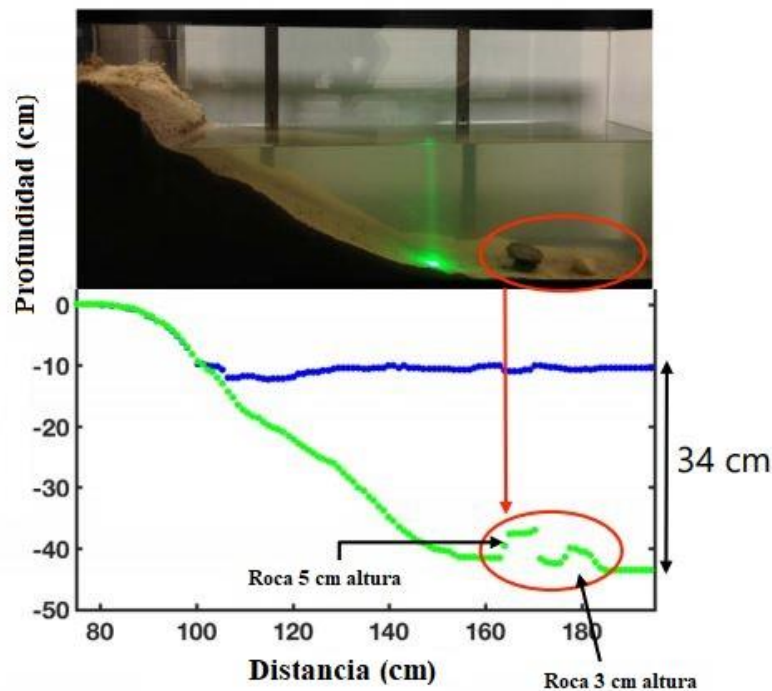


Figura 3-9 Representación esquemática de un escaneo con LiDAR batimétrico en función del fondo marino. Obtenido de [51]

3.3 Trabajo de campo

Para apoyar el empleo del sensor descrito en los apartados anteriores, y ante la imposibilidad de adquirir uno y experimentar con él, se han recogido datos abiertos que han sido tomados con alguno de los sistemas propuestos. En particular, los datos se han obtenido empleando un ASTRALite EDGE montado en un UAS (DJI Matrice 600 Pro) para realizar mediciones en ríos y zonas cercanas de costa.

Para el procesamiento de los datos se ha empleado el software CloudCompare [52], que sirve para procesar nubes de puntos 3D. Se basa en proyectos de código abierto y software libre.

Entre sus prestaciones elementales destacan un conjunto de herramientas básicas para editar y renderizar manualmente nubes de puntos 3D, así como varios algoritmos de procesamiento avanzados, como el método ICP (*Iterative Closest Point*) para realizar registros de nubes de puntos. Permite además trabajar con nubes con gran volumen de puntos dentro de un entorno visual y sencillo.

Respecto a los datos empleados, estos son de dos tipos: por un lado, hay datos fluviales correspondientes a varios ríos localizados en Estados Unidos con diversos tipos de fondo, claridad del agua y profundidad. Por otro, existen datos obtenidos en una playa, donde se ha escaneado tanto la zona marina cercana a la orilla, como las inmediaciones de la arena. Ambos tipos de datos se adquieren desde una altura de vuelo de 4 metros sobre la superficie para maximizar la penetración del láser en el agua.

3.3.1 Primer caso de estudio

El objetivo del primer estudio, cuyos datos se han obtenido de [39], consiste en comparar los datos obtenidos con un LiDAR batimétrico con aquellos tomados de manera “tradicional”, es decir, con una batimetría al uso empleando sondas de haz único o múltiple. Antes de profundizar en el estudio, es importante definir un parámetro que afecta al funcionamiento del LiDAR batimétrico: la NTU. Estas siglas se refieren a la “*Nepheloric Turbidity Unit*”, siendo la manera de cuantificar la turbidez de un fluido o la cantidad de sólidos en suspensión en el mismo. Para aguas de consumo humano, según los estándares de la OMS, no se puede superar 2 NTU, siendo lo ideal una turbidez inferior a 1 NTU. Para hacerse una idea de la posible penetración del LiDAR en el agua, se alcanzaría una transparencia máxima

de 5 centímetros con una turbidez de entre 200 y 300 NTU, de entre 25 a 35 centímetros con 25 NTU y con menos de 10 NTU se tendría una transparencia de más de 60 centímetros.

En el caso de estudio se comparan secciones del río obtenidas de manera tradicional con aquellas obtenidas empleando el prototipo de ASTRALite, que aún estaba en desarrollo por lo que los resultados de otros estudios empleando la versión comercial del mismo pueden variar.

Las conclusiones que se desprenden de este estudio son las siguientes:

- Comparando ambos valores, se obtiene una desviación (σ) en los mismos de 0,72 incluyendo la posición y diferencias en la profundidad.
- Para condiciones ideales de turbidez (<1 NTU), con el LiDAR se pueden detectar objetos sumergidos hasta una profundidad de 9,3 metros, siendo 5,5 metros la profundidad en la que mayor número de señales se recibían de vuelta.
- Con un fondo de arena y una turbidez de 12 NTU se obtendría una profundidad máxima de funcionamiento de 1 metro.
- Con fondo de rocas de mediano tamaño y una turbidez de 6 NTU, las señales son devueltas hasta una profundidad de 0,95 metros.
- Los peores resultados se obtienen en zonas con alta densidad de vegetación en el lecho fluvial, aunque sí destaca la capacidad para detectar objetos de gran volumen sumergidos. Entre otros, por ejemplo, rocas que no pueden distinguirse de manera clara, así como las grandes pendientes y el relieve sumergido, pudiendo ser definidos e identificados en el producto final.

En la siguiente tabla se pueden comparar los datos de área y tiempo de escaneo empleando el sistema EDGE del fabricante ASTRALite frente a los tiempos empleados por personal del USGS escaneando la misma área empleando métodos tradicionales y sonares.

Comparativa de sistemas		
	USGS	ASTRALite EDGE
Área	10.3 m ²	9.7 m ²
Tiempo	45 minutos	2 minutos

Tabla 3-2 Comparativa de método de batimetría [38]

Sirva de ejemplo la siguiente representación gráfica de una sección transversal del cauce de uno de los ríos estudiados, donde se pueden apreciar en rojo los resultados obtenidos con un sondador contratado por el USGS y que representarían la superficie de referencia del fondo marino, frente a los datos en verde que se obtienen gracias al sistema propuesto. La diferencia entre ambos tipos de datos apenas varía un 5%, siendo 20 veces más rápida la obtención de datos usando un RPAS.

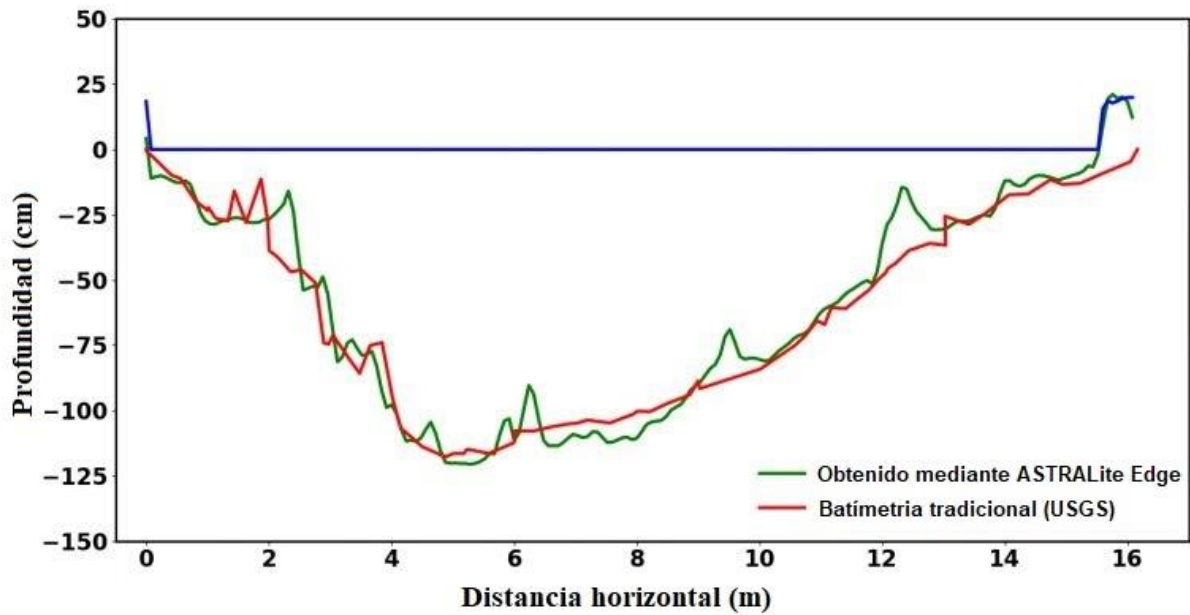


Figura 3-10 Comparación de datos [51]

3.3.2 Segundo caso de estudio

En esta ocasión los datos corresponden al relieve y fondo marino de las inmediaciones de una playa situada en Panama City, Florida (Estados Unidos). Los datos fueron tomados para estudiar el cambio de las infraestructuras costeras y la erosión de las dunas tras diversos fenómenos naturales. Para ello se ha empleado un LiDAR con una alta resolución que genera una gran densidad de puntos, y que permite identificar perfectamente las formas de los objetos sumergidos. Estos datos han sido obtenidos con un equipo ASTRALite Edge. Se expone este caso puesto que una sección de playa tiene interés ante un posible desembarco o bien como demostración para estudios hidrográficos. A continuación, se muestran las imágenes de carta náutica obtenidas de OpenCPN para que sean comparadas con los productos obtenidos, al igual que el mapa topográfico disponible para esta zona, remarcando en ambos casos y con distinto color el segmento de terreno que se pretende estudiar.

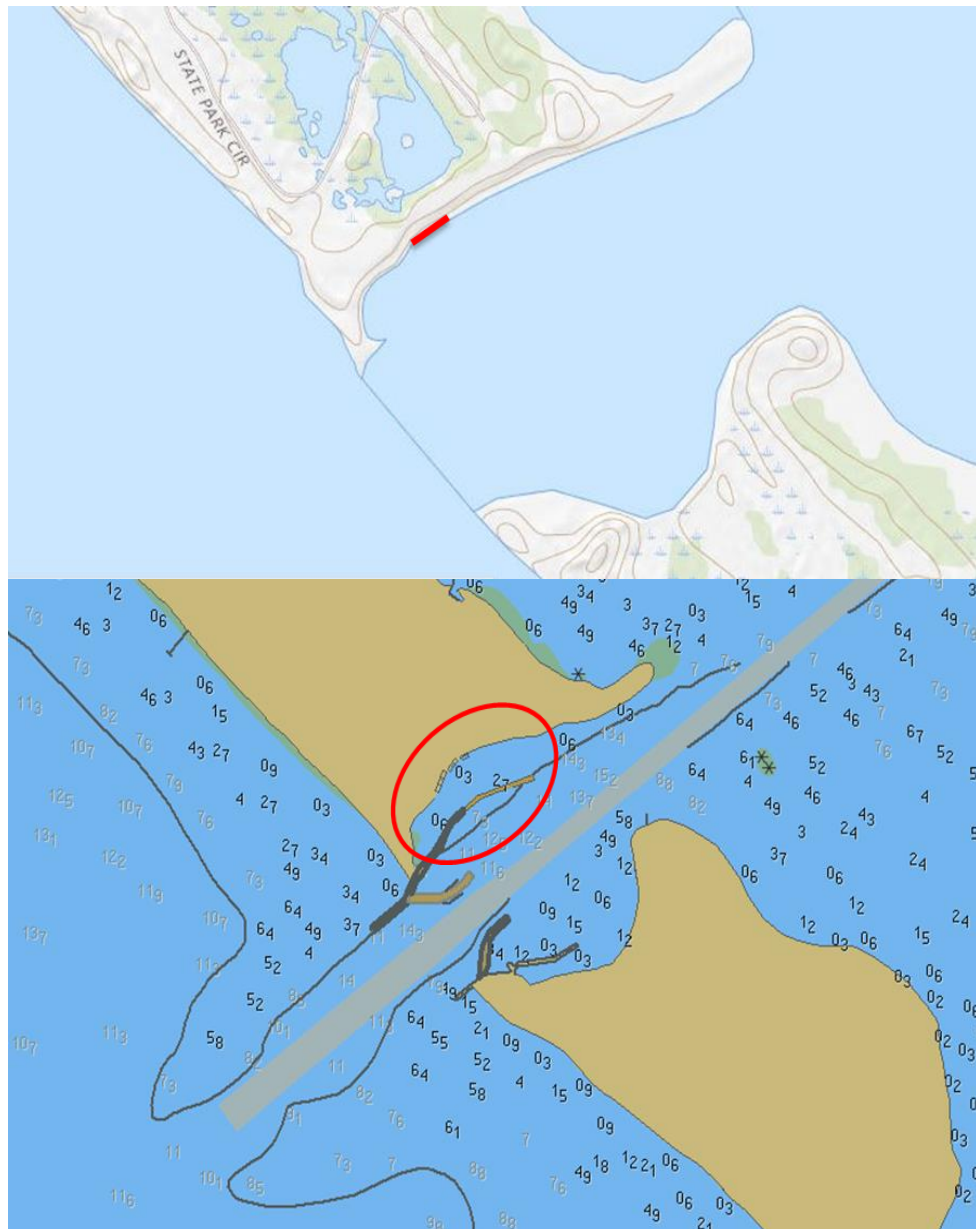


Figura 3-11 Mapa topográfico (superior) y carta náutica (inferior) del área de estudio. Elaboración propia

Como se puede apreciar en la Figura 3-11 Mapa topográfico (superior) y carta náutica (inferior) del área de estudio. Elaboración propia el intervalo entre veriles es de 5 metros y tan solo aparecen referenciadas algunas zonas con menos profundidad. De hecho, como se puede apreciar en la siguiente Figura 3-12, no se indica la presencia de zonas de bajos o de obstáculos a la navegación. La playa de estudio aparece como un segmento de color rojo.

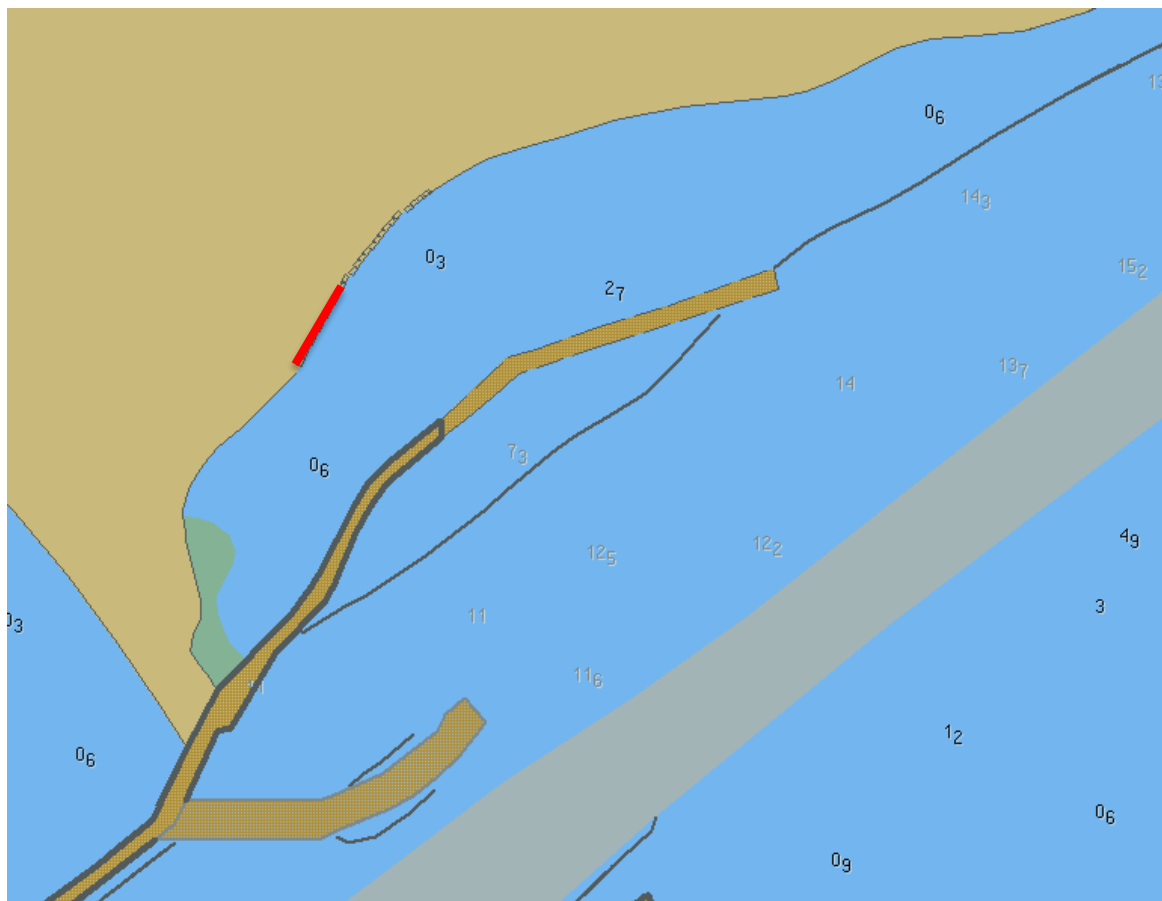


Figura 3-12 Área de estudio en detalle. Elaboración propia

A continuación, se muestra una imagen satélite obtenida para la misma área de estudio, donde, a diferencia de la carta náutica, ya se puede apreciar la presencia de diversos obstáculos que dificultarían el acceso a la playa, tales como la existencia de un rompeolas sumergido o de diversos obstáculos semisumergidos.



Figura 3-13 Imagen satélite de la playa de estudio. Elaboración propia



Figura 3-14 Imagen aérea de la playa de estudio. Elaboración propia

Con la combinación de estos dos productos (carta náutica e imagen satélite) se podría comenzar a analizar la existencia de elementos peligrosos para la navegación en el área de estudio, aunque sin poder precisar la profundidad de estos ni como afectarían.

Mediante la realización de un escaneo ALB desde un UAS con una combinación de LiDAR topográfico y un sistema ASTRALite, se puede obtener una nube de puntos que adoptaría la forma que se muestra en la Figura 3-15 Vista de la zona costera obtenida con un LiDAR topo-batimétrico. Elaboración propia donde se escanea una sección de costa, que incluye una playa y una duna con vegetación.

Gracias a esta tecnología, es posible visualizar con mayor detalle los obstáculos sumergidos, pudiéndose apreciar con claridad las diferencias entre ellos, de forma que faciliten su identificación.

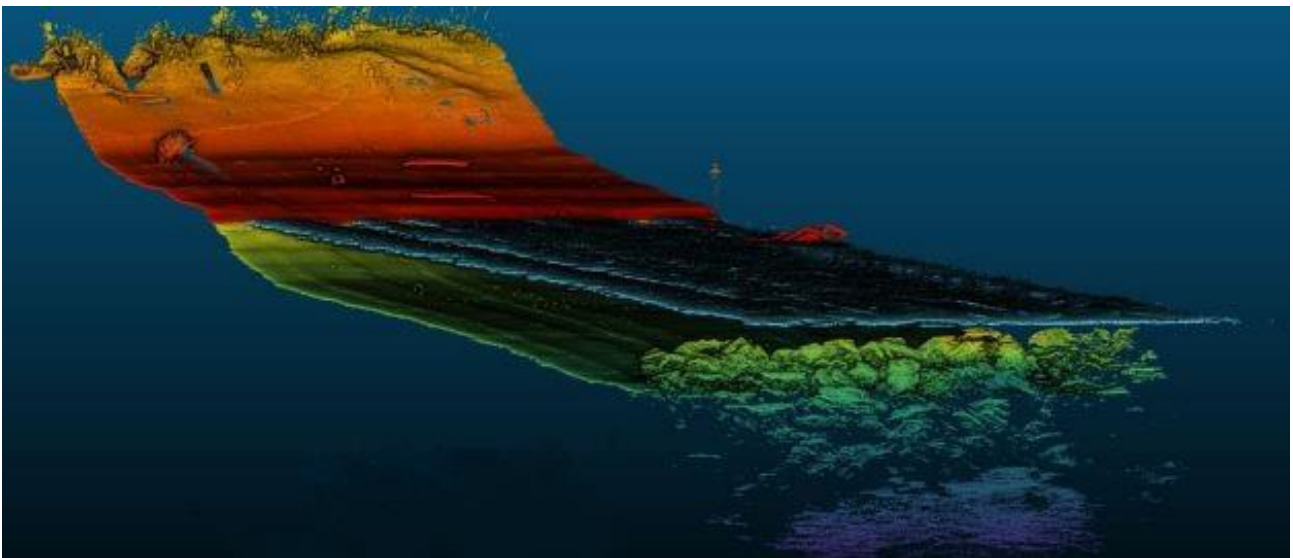


Figura 3-15 Vista de la zona costera obtenida con un LiDAR topo-batimétrico. Elaboración propia

Una vez que esta nube ha sido dimensionada y editada en el software CloudCompare, se pueden obtener varios productos que serían de utilidad para un posible desembarco militar, como, por ejemplo, los perfiles longitudinales o transversales de ciertas zonas de estudio, como se puede apreciar en la imagen inferior.



Figura 3-16 Perfil transversal de una zona cercana a la costa. Elaboración propia

En caso de querer obtener productos topo-batimétricos, similares a un plano o carta náutica, se podría procesar la nube de puntos mediante el uso de los programas como TopoCal hasta obtener el resultado cartográfico deseado. En este caso, al tratarse de un segmento cercano a la costa, que incluye las zonas someras de agua cercanas a la playa, se ha acotado esta sección de la nube de puntos para su procesado.

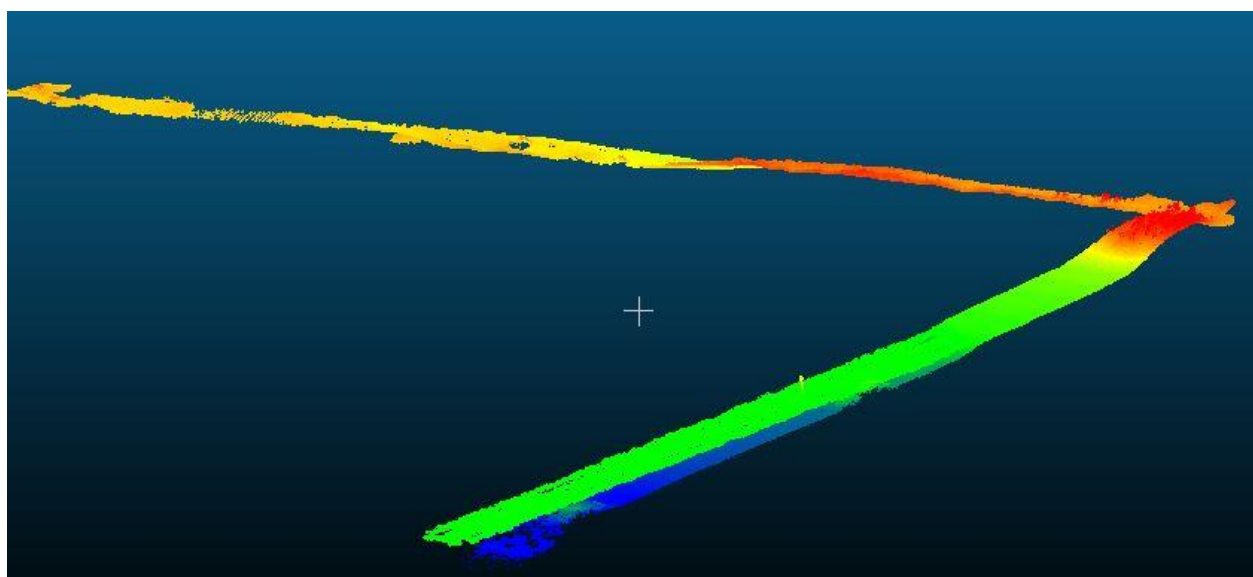


Figura 3-17 Campo escalar obtenido a partir de la nube de puntos. Elaboración propia

En base al resultado obtenido en la Figura 3-17 se puede proceder a diferenciar entre los puntos que corresponden al segmento terrestre (superficie) y aquellos que están sumergidos y constituyen la parte de fondo marino. El producto fruto de esta diferenciación se recoge en la Figura 3-18, donde la parte de colores más claros (blancos) corresponde a la superficie del agua y al fondo marino. Dicha segmentación entre segmentos terrestre y marino se realiza utilizando filtros en función de las coordenadas cartesianas de los puntos, en concreto filtrando por cotas (eje Z), pudiendo ajustar manualmente el valor de dicha cota a la cual se separan los segmentos.

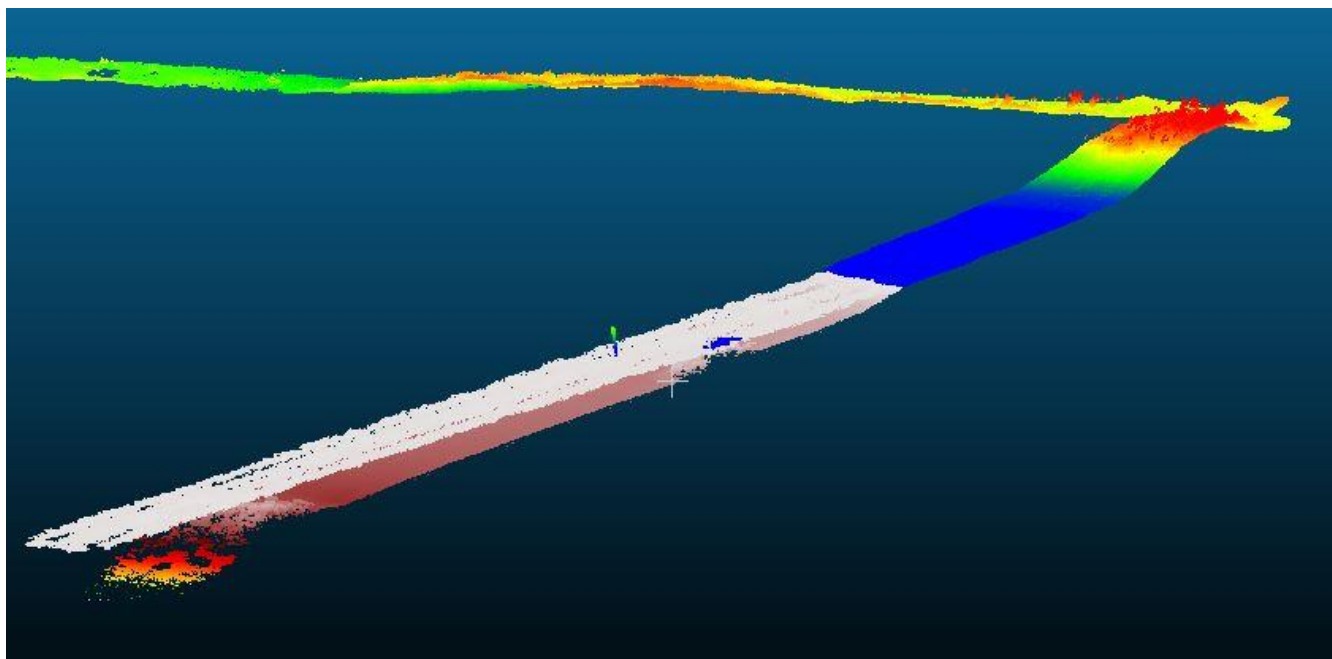


Figura 3-18 Diferencia entre segmentos terrestre y marino. Elaboración propia

Una vez diferenciados ambos segmentos se procede a recortar la zona de interés, obteniendo el producto que se muestra en la Figura 3-19.

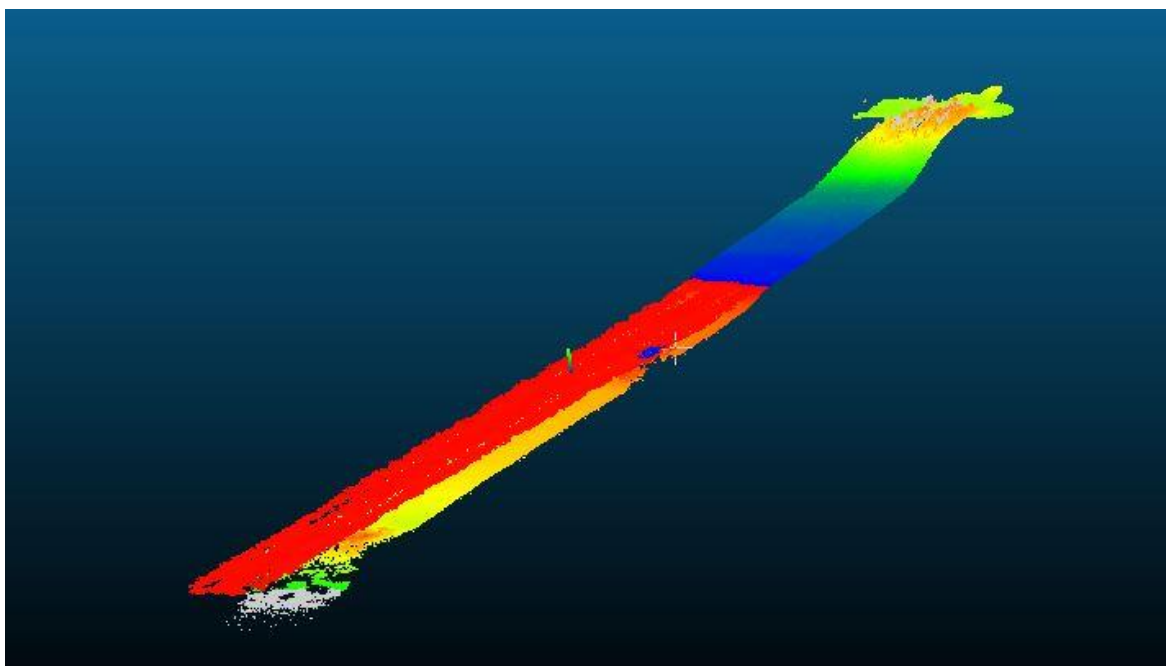


Figura 3-19 Área de estudio. Elaboración propia

3.3.2.1 Fondo marino

Una vez diferenciados ambos segmentos se estudiarán los dos casos, de cara a obtener la batimetría y el plano topográfico en detalle, con una separación entre las distintas curvas de nivel/veriles de 0,25 metros.

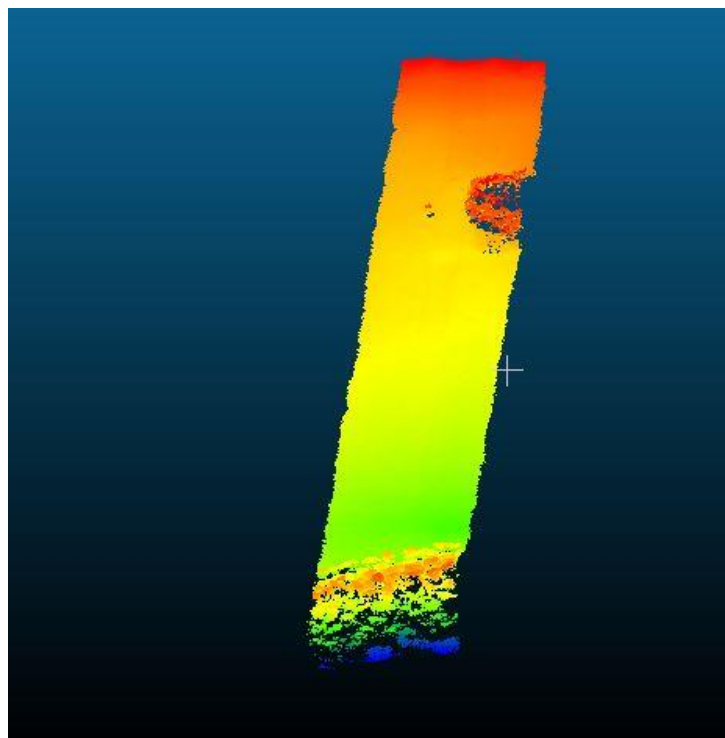


Figura 3-20 Campo escalar del fondo marino. Elaboración propia

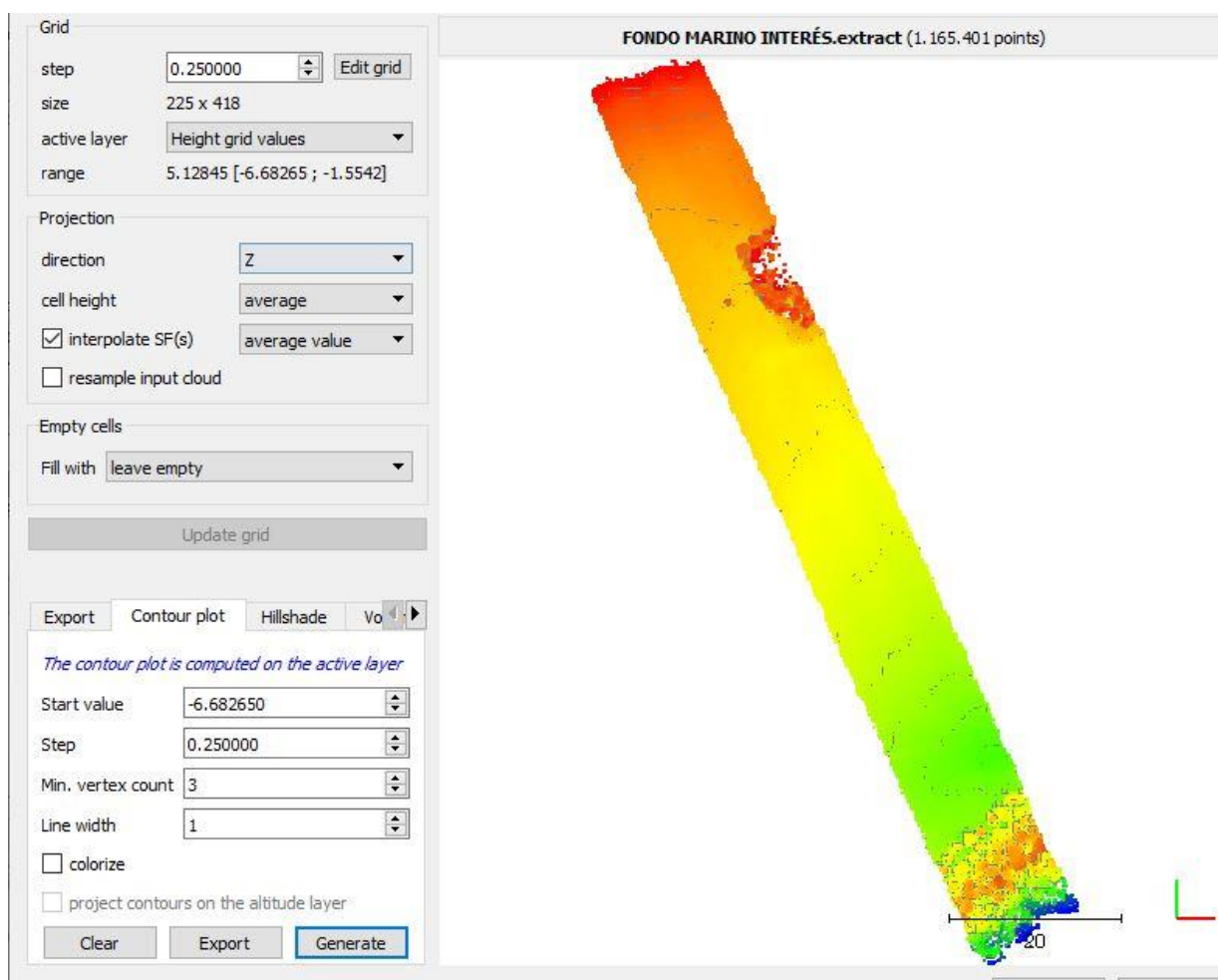


Figura 3-21 Creación de veriles. Elaboración propia

Una vez que se crean las curvas de nivel, se puede procesar con TopoCal para combinarlo con una imagen satélite de Google Earth, como se muestra en la Figura 3-22 Curvas de nivel superpuestas en imagen satélite, en la derecha en detalle. Elaboración propia

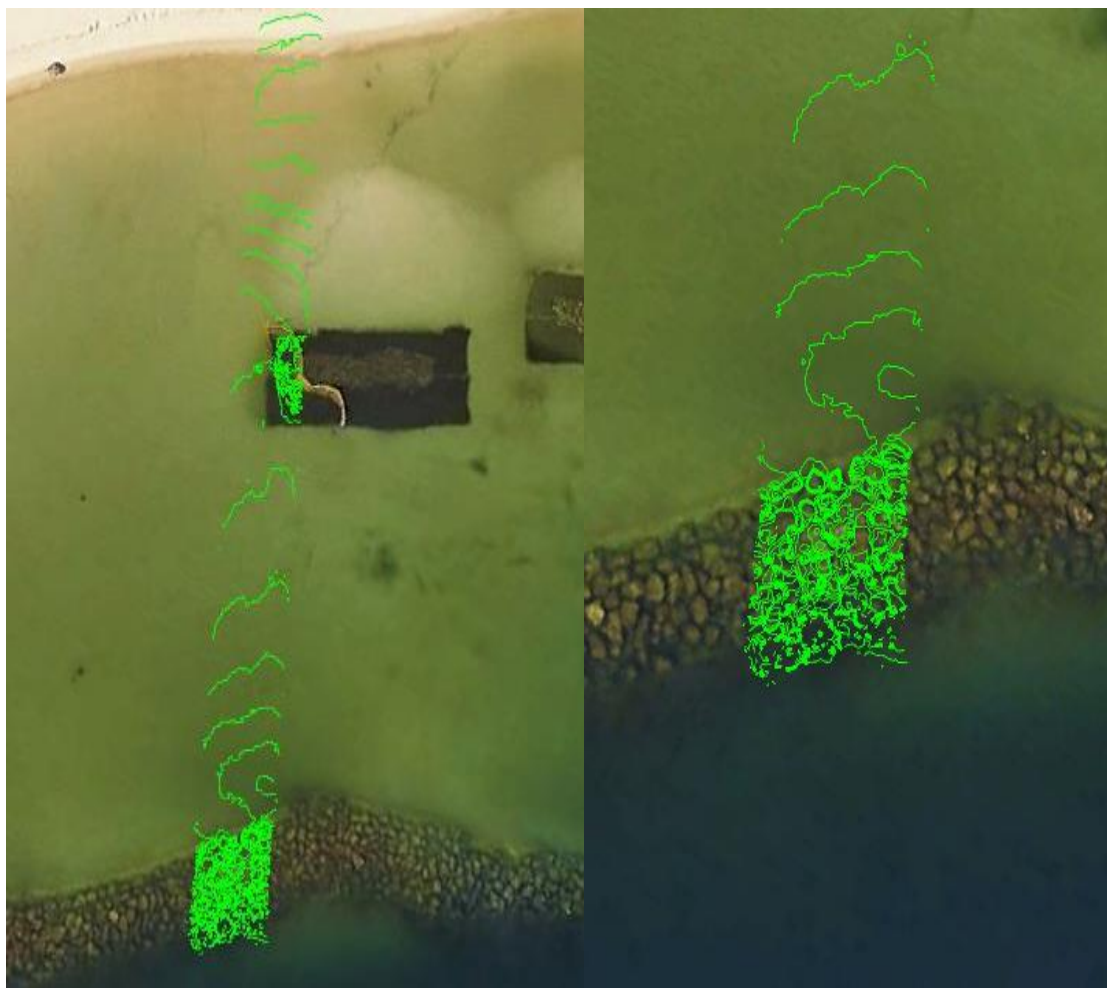


Figura 3-22 Curvas de nivel superpuestas en imagen satélite, en la derecha en detalle. Elaboración propia

3.3.2.2 Segmento terrestre

En base a los campos que se muestran en la Figura 3-19 se analizará y procesará el segmento terrestre hasta obtener los productos deseados que nos permitan completar la información.

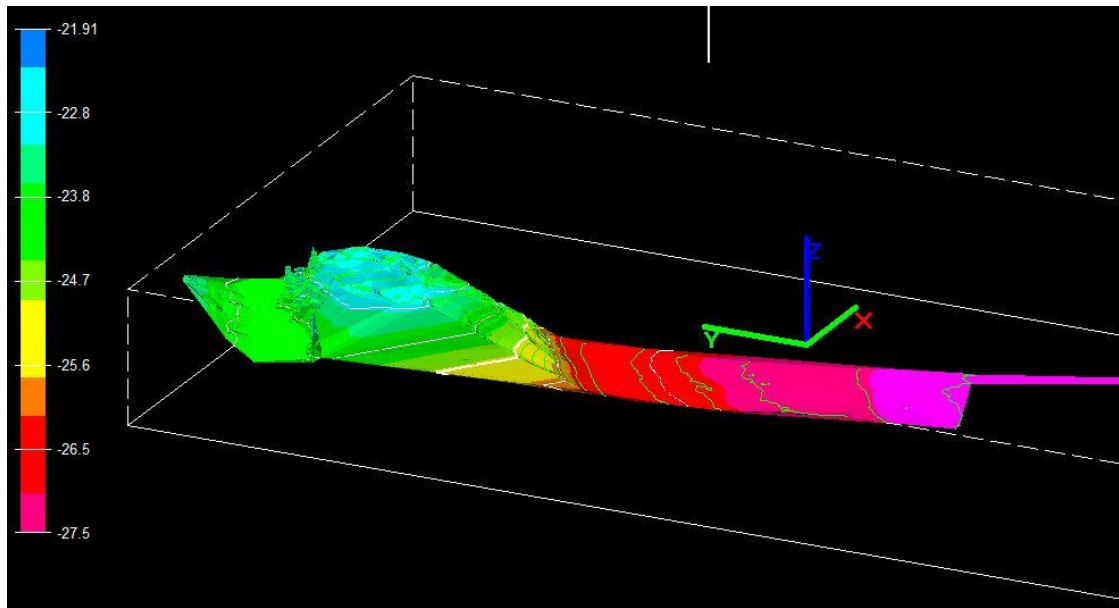


Figura 3-23 Modelo digital del terreno obtenido en base a los puntos. Elaboración propia

El producto representado en la Figura 3-23 nos permite obtener los diversos perfiles del terreno en función de las polilíneas trazadas, permitiéndonos conocer en detalle el relieve y dimensiones de la zona de estudio. Estos perfiles pueden obtenerse de manera múltiple, permitiéndonos estudiar el terreno en función de su relieve.

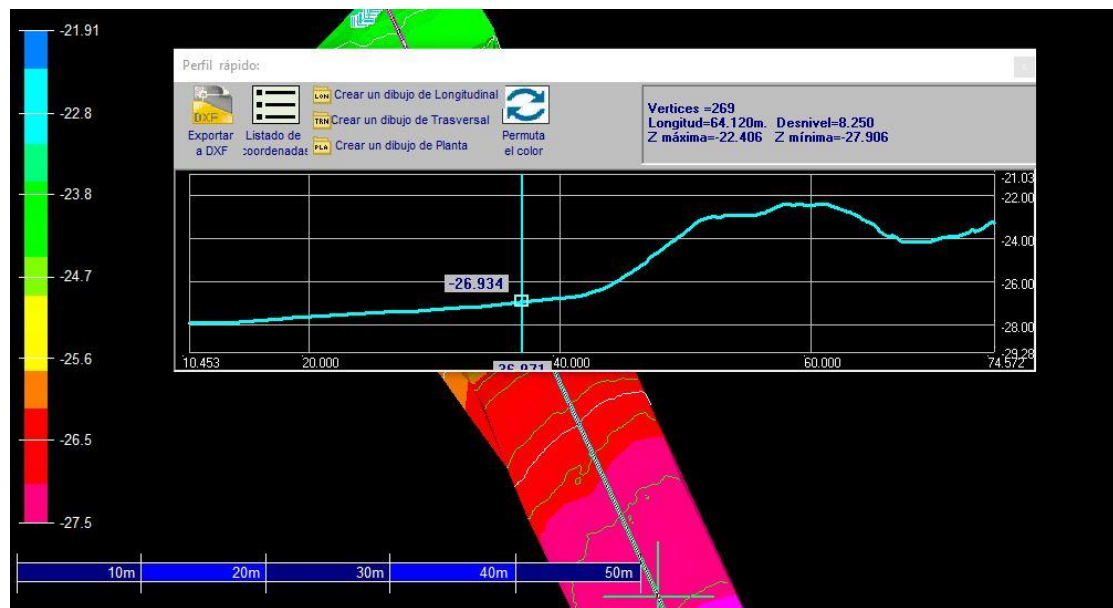


Figura 3-24 Perfil obtenido en base a un MDT. Elaboración propia

En base a estos productos se genera un producto con las curvas a nivel a la distancia deseada, en este caso cada 0,25 metros de elevación debido a que la zona de estudio se encuentra a una cota muy baja y no hay una gran diferencia de altitud entre el punto más elevado y el más bajo.

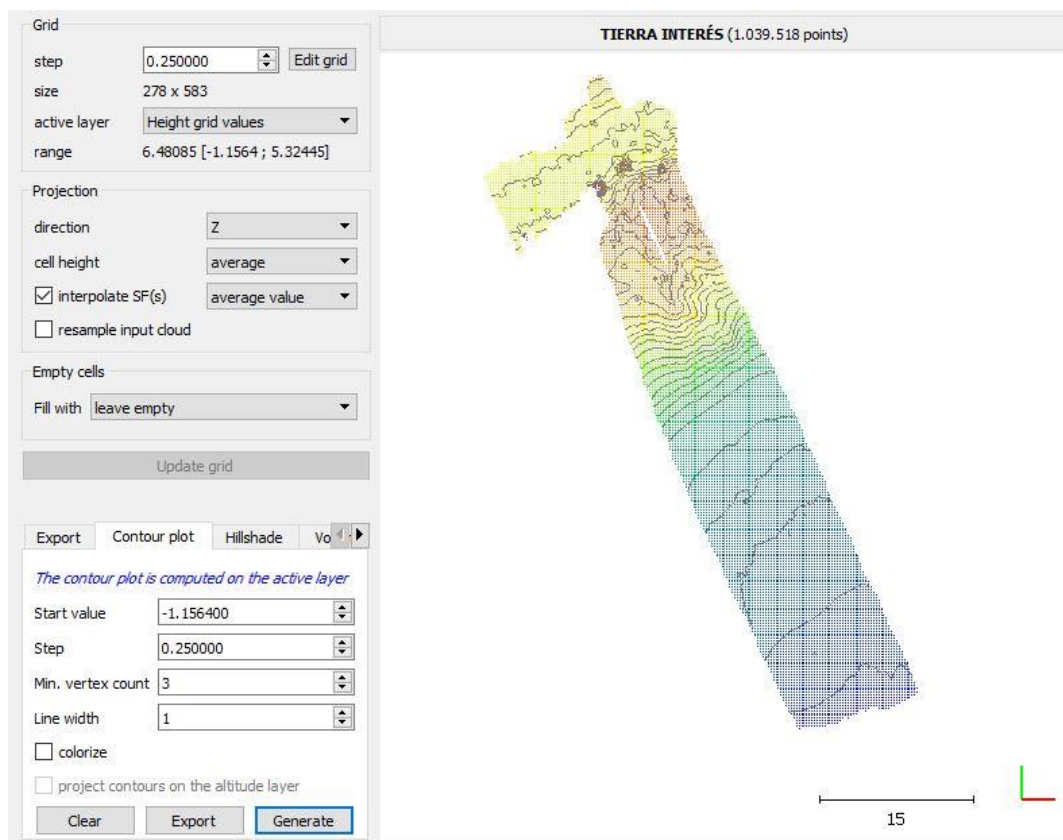


Figura 3-25 Creación de curvas de nivel. Elaboración propia

Una vez generadas las curvas de nivel y el producto final, se puede exportar para superponerlo con una imagen satélite, obteniendo el siguiente producto.



Figura 3-26 Curvas de nivel superpuestas sobre imagen satélite. Elaboración propia

3.3.2.3 Conclusiones

El análisis y tratamiento de estas nubes de puntos permitiría generar este tipo de productos, donde se puede identificar de manera automática la línea de costa, objetos sumergidos, diversas perspectivas de estos y calcular las profundidades, entre otras funciones. A modo de resumen la Figura 3-28 Cortes transversales del estudio de un río muestra el producto final obtenido para los datos donde se aprecian los diversos objetos ocultos que representarían un peligro para la navegación, las profundidades de estos y diversos cortes y perfiles.

Aunque los datos de este caso de estudio se correspondían con una sección de costa, se adjunta a continuación diversos cortes transversales realizados en un estudio en un río en Japón donde se pueden apreciar las diversas profundidades y el relieve submarino del lecho del río Figura 3-28 Cortes transversales del estudio de un río

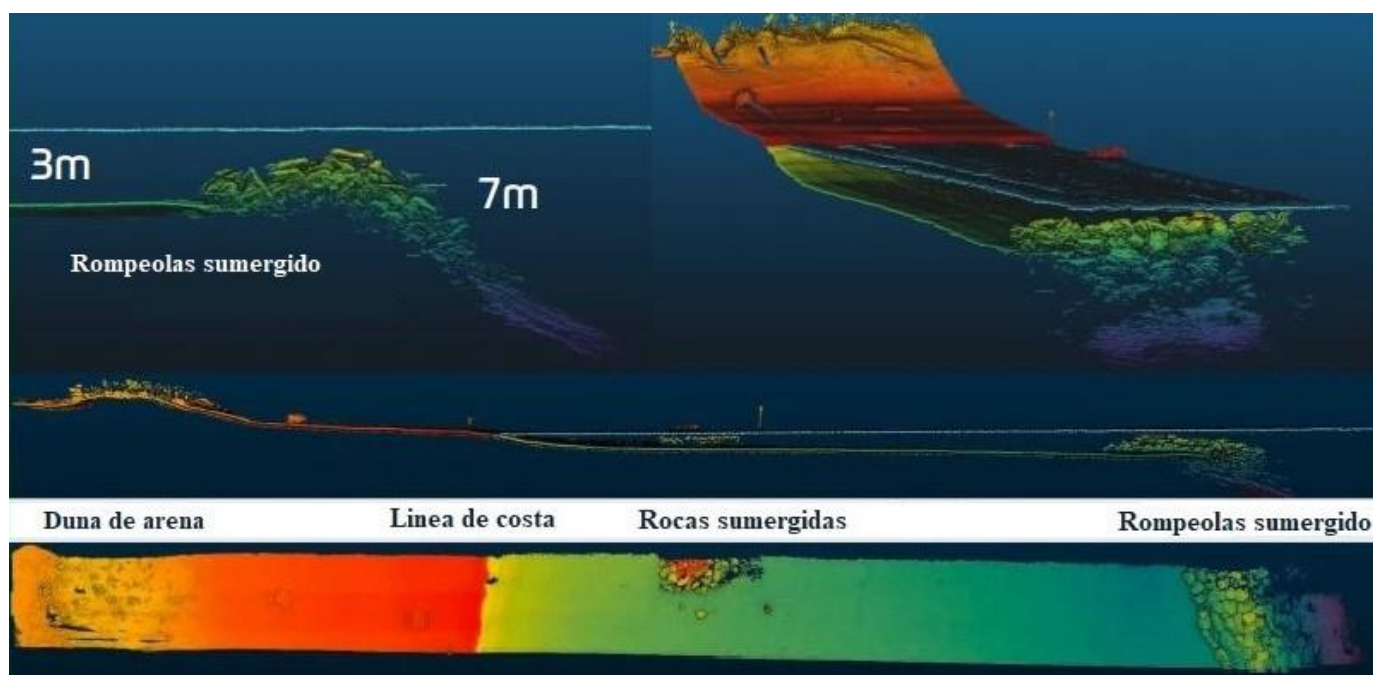


Figura 3-27 Resumen del producto obtenido. Elaboración propia

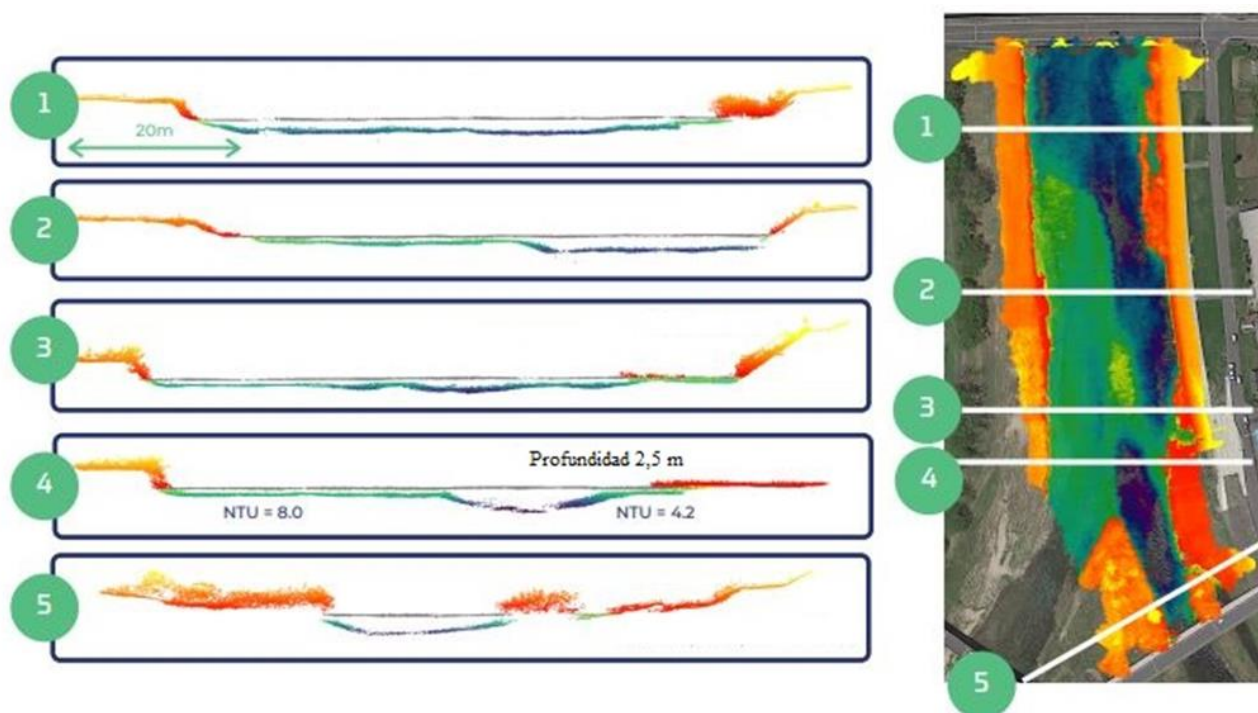


Figura 3-28 Cortes transversales del estudio de un rio [40]

4 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.1 Conclusiones del proyecto

Tras la revisión de los sistemas existentes, normativa y sensores que podrían ser de interés y habiéndose centrado en el LiDAR topográfico y batimétrico, se puede concluir que con los resultados obtenidos mediante los diversos casos de estudio, el uso de sensores LiDAR embarcados en RPAS puede ser de interés para los aspectos planteados en el punto 3.2.3 En concreto se ha comprobado que puede ser de especial utilidad en los siguientes supuestos:

- Como apoyo a las operaciones anfibia: para completar las labores de reconocimiento llevadas a cabo por el elemento humano y para integrar dentro del espacio de batalla nuevos sensores que faciliten la organización de las unidades en este entorno. El hecho de poder trazar perfiles batimétricos en zonas de interés y permitir establecer sus coordenadas, puede ser de gran ayuda a la hora de realizar el guiado final de las embarcaciones que tienen que ir hasta la playa, así como la posibilidad de detectar posibles artefactos explosivos o minas sumergidas.
Todos los productos que se pueden obtener con este tipo de sistemas LiDAR, entre otros, planos, levantamientos batimétricos en detalle, medición de distancias o de áreas y determinación del tipo de fondo o suelo, contribuyen sin lugar a duda a mejorar el planeamiento y, por tanto, la ejecución de las operaciones de Infantería de Marina.
- Apoyo a la Hidrografía: la posibilidad de emplear este tipo de sensores tanto desde un RPAS como desde una plataforma abre una nueva puerta a su uso como herramientas para completar y actualizar las cartas náuticas de España en aquellos lugares de acceso más complicado o bien en aquellas zonas de menor calado, de donde se podrían obtener productos con un mayor detalle para apoyar la navegación. La ventaja radica en el rápido despliegue del sistema y el mínimo impacto logístico que tiene a la hora de ser embarcado en cualquier buque hidrográfico.
- Empleo del LiDAR topográfico: aunque el trabajo de evaluación de resultados se ha centrado en los obtenidos por los sensores batimétricos, el empleo de este otro tipo de sistema ayudaría a definir mejor el IPOE y podría aportar un mayor nivel de información de estructuras ocultas debajo de la maleza o vegetación densa.

4.2 Líneas futuras de investigación

Se plantean diversas líneas de investigación que parten de este proyecto, algunas relacionadas con el empleo de los RPAS a nivel más genérico en el ámbito militar y otras más enfocadas en las operaciones militares. Dentro de cada área de trabajo se plantean diversos campos que pueden ser objeto de un estudio o proyecto futuro.

4.2.1 Evaluación real de un sensor LiDAR topo batimétrico

En caso de adquirir un sistema de este tipo, se plantea la posibilidad de analizar sus resultados y compararlos con otros datos de referencia obtenidos por métodos tradicionales, teniendo en consideración además los tiempos de escaneo y post procesado de datos hasta llegar al producto final deseado. El desarrollo de esta línea de investigación requeriría la adquisición de este tipo de sistema por parte del CUD o de la Armada. En caso de que esto ocurriese, se podría evaluar la autonomía real de los RPAS al portar este tipo de sensores o bien la posibilidad de realizar este tipo de escaneo empleando plataformas marinas o USV, en caso de que quiera ser aplicado como apoyo a la Hidrografía.

Se podría analizar además la relación real entre la turbiedad, la profundidad de Secchi y la altitud de vuelo del RPAS, así como el procesado de datos y la manera de tratar de automatizar en parte el sistema de postprocesado, de cara a obtener un producto final de una manera más rápida.

4.2.2 Evaluación del sistema GPR montado en UAV

En el apartado donde se trataba la forma en la que se podía completar los sistemas existentes se mencionaba la posibilidad de emplear este tipo de sistema, que ya había sido empleado por la UME en algún rescate. Se plantea la posibilidad de emplear este sistema como apoyo a la sección de Zapadores del Tercio de Armada o a los equipos EOD. Requeriría de la disponibilidad de un RPAS con la capacidad de poder llevar adosado un GPR, para obtener los datos de una zona del terreno donde se podrían disponer de manera simulada diversos artefactos explosivos enterrados o semienterrados para analizar la precisión y rapidez a la hora de detectar los mismos. Asimismo, también podría ser estudiado su uso a la hora de detectar cuerpos enterrados por avalanchas de nieve o barro. A la hora de realizar este tipo de estudios sería preciso analizar la resistencia y autonomía de los RPAS para soportar este tipo de cargas y su exposición a climas extremos.

En caso de no disponer de este sistema georradar, se podrían buscar datos abiertos similares y realizar un estudio de viabilidad del propio sistema, repasando los tipos de GPR que pueden ser transportados por un UAV, los tiempos de funcionamiento, trabajo y procesamiento de los datos. Este tipo de sistema ya ha sido evaluado en el CUD, pero nunca embarcado a bordo de un RPAS.

4.2.3 Nano drones

Al ser un concepto y un producto que se empieza a aplicar hoy en día, podría ser de interés para la Armada, el estudio de este tipo de sistemas aplicados a las operaciones militares: las ventajas que nos proporcionan, sistemas existentes en el mercado y su comparativa, además de analizar cómo se podría completar sus usos actuales.

El concepto del empleo de enjambres de NanoUAV aún está en desarrollo casi a nivel mundial, pero es otra línea de investigación interesante dentro del campo de los Nano drones que puede cobrar fuerza en el futuro, tanto para el desarrollo de programas de Inteligencia Artificial que sean capaces de gestionar este tipo de enjambre como a nivel teórico para el desarrollo de las misiones, funciones y concepto de uso de estos. No solo se podrían plantear enjambres de UAV, sino que podrían trabajar interrelacionados con otros tipos de vehículos autónomos, ya sea terrestres o acuáticos.

4.2.4 Sistemas C-UAV

Se trata de un campo de interés para la Armada y para las operaciones que se desarrollan actualmente en el exterior, a fin de proporcionar seguridad a las unidades desplegadas ante una amenaza tan

asimétrica e híbrida. Son sistemas que ya han aparecido en planes nacionales como en el “Plan RAPAZ”, debido a la facilidad para adquirir un RPAS y equiparlo como un arma.

La posible línea de investigación dentro de este campo plantearía una revisión de los diversos sistemas existentes en la actualidad, una revisión de los sistemas de detección en función de las características del UAV y en concreto, según los tipos de propulsión de la aeronave, sus tamaños, ámbitos de actuación, así como la automatización de este tipo de sistemas C-UAV y la forma en que pueden ser integrados en los diversos vehículos y buques de la Armada.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Branco, «Asi son los drones que usa la UME para desinfectar en cuarentena,» *El Español*, 3 Abril 2020.
- [2] J. Maíz Sanz, «Defensa.com,» Defensa.com, 5 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.defensa.com/espana/uav-infanteria-marina-servicio-policia-nacional-espanola>. [Último acceso: 15 Febrero 2021].
- [3] infodefensa.com, «Los 'Raven' volarán más de 40 veces este verano para prevenir fuegos en Galicia,» 23 Agosto 2016. [En línea]. Available: <https://www.infodefensa.com/es/2016/08/23/noticia-raven-volaran-veces-verano-prevenir-fuegos-galicia.html>. [Último acceso: 14 Febrero 2021].
- [4] L. Penide, «La BRILAT vuelve a echar mano de drones para combatir los incendios,» *La Voz de Galicia*, 2 Julio 2020.
- [5] infodron.es, «infodron.es,» 9 Agosto 2017. [En línea]. Available: <http://infodron.es/id/2017/08/09/noticia-searcher-colabore-campanas-contraincendios.html>. [Último acceso: 14 Febrero 2021].
- [6] Ejército del Aire, «ejercitodelaire.defensa.gob.es,» [En línea]. Available: <https://ejercitodelaire.defensa.gob.es/EA/ejercitodelaire/es/aeronaves/avion/MQ-9-Predator-B/#>. [Último acceso: 16 Enero 2021].
- [7] C. Cuerno Rejado, L. Garcia Hernandez, A. Sanchez Carmona, A. Carrio Fernández, J. L. Sánchez López y P. Campoy Cervera, «Historical evolution of the Unmanned Aerial Vehicles to the present,» *Revista DYNA*, vol. 91, pp. 282-288, 2016.
- [8] C. Calvo Gonzalez-Regueral, F. Herranz y P. Calvo Aguilar, «De los UAV a los RPAS,» *Perfiles IDS*, p. 11, 2014.
- [9] Boletín Oficial del Estado, «www.boe.es,» 17 Octubre 2014. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2014-10517>. [Último acceso: 18 Enero 2021].
- [10] Boletín Oficial del Estado, «www.boe.es,» 29 Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2017-15721>. [Último acceso: 18 Enero 2021].
- [11] Agencia Estatal de Seguridad Aérea, «Normativa comunitaria sobre operaciones con UAS,» Ministerio de Fomento , Madrid, Enero 2020.

- [12] Unión Europea, «www.eur-lex.europa.eu,» 2019 Marzo 12. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0945&from=ES>. [Último acceso: 19 Enero 2021].
- [13] Unión Europea, «www.eur-lex.europa.eu,» 4 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0947>. [Último acceso: 19 Enero 2021].
- [14] Agencia Estatal de Seguridad Aérea, «www.seguridadaerea.gob.es,» Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, [En línea]. Available: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/tienes-un-uas-dron>. [Último acceso: 18 Enero 2021].
- [15] International Civil Aviation Organization, Annex 7 to the Convention on International Civil Aviation, Aircraft Nationality and Registration Marks, Montreal: ICAO, 2012.
- [16] ENAIRE, «ENAIRE,» Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, [En línea]. Available: <https://drones.enaire.es/>. [Último acceso: 17 Febrero 2021].
- [17] Unión Europea, «Diario Oficial de la Unión Europea,» 30 Junio 2009. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:170:0001:0037:es:PDF>. [Último acceso: 14 Marzo 2021].
- [18] Ministerio de Defensa, «www.ejercito.defensa.gob.es,» Ejército de Tierra, [En línea]. Available: https://ejercito.defensa.gob.es/materiales/vehiculo_aereo_no_tripulado/SIVA.html. [Último acceso: 19 Febrero 2021].
- [19] J. López-Lago, «Talavera vuela más lejos con el Predator,» *hoy.es*, 27 Septiembre 2020.
- [20] Ministerio de Defensa, «Boletín Oficial de Defensa,» 26 Marzo 2012. [En línea]. [Último acceso: 14 Marzo 2021].
- [21] Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional, «La carga útil,» de *Tecnologías asociadas a sistemas de enjambres de μ UAV*, Madrid, Ministerio de Defensa, 2012, p. 45.
- [22] J. M. Andújar Marquez, «Sistemas aéreos pilotados de forma remota (RPAS): Historia, sistemas y operaciones,» de *Cátedra Jorge Juan, ciclo de conferencias 2015-2016*, La Coruña, Universidade da Coruña, 2017, pp. 29-53.
- [23] Ministerio de Defensa, Estado Mayor de la Defensa, [En línea]. Available: <https://emad.defensa.gob.es/>. [Último acceso: 19 Febrero 2021].
- [24] A. J. Palmero Romero, «Un RPAS Clase I para el Tercio de Armada ¿Tipo Small o Mini?,» *Revista General de Marina*, vol. Junio, nº Junio 2017, pp. 941-942, 2017.
- [25] Hispaviación, «www.hispaviacion.es,» 11 Enero 2021. [En línea]. Available: <http://www.hispaviacion.es/unidades-del-ejercito-de-tierra-y-la-armada-espanola-reciben-las-primeras-unidades-del-rpas-seeker/>. [Último acceso: 20 Febrero 2021].
- [26] INSITU A Boeing Company, «www.insitu.com,» 2020. [En línea]. Available: https://www.insitu.com/wp-content/uploads/2020/12/ScanEagle_ProductCard_DU120320.pdf. [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [27] E. Villarejo, «"Scan Eagle": el dron de la Armada que protegió las operaciones especiales en Irak,» *ABC*, 5 Octubre 2020.

- [28] A. García Santamaría, «La Undécima Escuadrilla. Una gran apuesta para el futuro de las misiones ISR.,» *Revista General de Marina*, vol. Tomo 280, nº Enero-Febrero, pp. 57-69, 2021.
- [29] M. Garcia Fernandez, Y. Alvarez Lopez, B. Gonzalez Valdés, A. Arboleya Arboleya, Y. Rodriguez Vaqueiro, F. Las Heras Andres y A. Pino Garcia, «Sistema de GPR embarcado en un UAV para la detección de objetos,» Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación, Oviedo, 2018.
- [30] Archi Products, «www.archiproducts.com,» Novatest Drone GPR Cobra, [En línea]. Available: https://www.archiproducts.com/es/productos/novatest/instrumento-para-ellevantamiento-topografico-y-geodesico-drone-gpr-cobra_370993. [Último acceso: 2 Febrero 2021].
- [31] M. Garcia Fernandez, Y. Alvarez Lopez, B. Gonzalez Valdes, Y. Rodriguez Vaqueiro, A. Arboleya Arboleya, F. Las Heras y A. Pino, «GPR system onboard a UAV for non-invasive detection of buried objects,» IEEE, Oviedo, 2018.
- [32] M. Garcia Fernandez, Y. Alvarez Lopez y F. Las Heras, «Autonomous Airborne 3D SAR Imaging System for subsurface sensing: UWB-GPR on board a UAV for landmine and IED detection,» *Remote Sensing*, vol. 11, nº 20, 2019.
- [33] Consultores GIS, «www.consultoresgis.com,» Consultores GIS, [En línea]. Available: <http://www.consultoresgis.com/drones/topografia/>. [Último acceso: 20 Febrero 2021].
- [34] G. Sorenson, R. Honey y J. Payne, «Analysis of the use of airborne laser radar for submarine detection and ranging,» Stanford Research Institute, Menlo Park, CA, 1966.
- [35] B. Carrasco, «La UME destina 57.000 euros a la compra de RPAS,» *infodron.es*, 15 Agosto 2017.
- [36] M. Blanco Sanchez, «La industria nacional se reinventa ante la pandemia del COVID-19,» *infodron.es*, 20 Abril 2020.
- [37] ENAIRE, «www.enaire.es,» 17 Agosto 2017. [En línea]. Available: https://ais.enaire.es/AIP/AIPS/AMDT_323_2020_AIRAC_16_2019/AIP/aip/enr/enr5/LE_ENR_5_1_en.pdf. [Último acceso: 28 Enero 2021].
- [38] Sigma Space, «www.sigmaspace.com,» Sigma Space, 6 Julio 2016. [En línea]. Available: <http://www.sigmaspace.com/blog-post/single-photon-lidar-proven-forest-mapping>. [Último acceso: 17 Febrero 2021].
- [39] G. Mandlburguer, «A review of airborne laser bathymetry for mapping in inland and coastal waters,» *Hydrographische Nachrichten*, vol. 06/2020, nº 116, pp. 6-15, 2020.
- [40] A. Á. Búa, «Sistemas LIDAR embarcados en RPAS,» *RPAS Drones*, vol. Enero, nº 2, 2019.
- [41] G. Chust, M. Grande, R. Moncho y I. Galparsoro, «Potential of Bathymetric Hawk Eye Lidar for habitat classification in the Oka Estuary,» *Revista de teledeteccion*, vol. 1, nº 33, pp. 5-10, 2010.
- [42] GAROA Ingenieria Cartográfica, «Batimetria de rios, arroyos, embalses y estuarios de la Comunidad Autónoma del País Vasco,» Ur Agentzia, Vitoria-Gasteiz, 2014.
- [43] R. Cuerno Oruña, «Estudio y análisis de láseres en fibra para su aplicación en LiDAR,» Universidad de Cantabria, Santander, 2013.

- [44] RIEGL, «www.riegl.com,» [En línea]. Available: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_BDF-1_Datasheet_2019-05-31.pdf. [Último acceso: 26 Enero 2021].
- [45] RIEGL, «www.riegl.com,» [En línea]. Available: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-840-G_Datasheet_2020-09-14.pdf. [Último acceso: 26 Enero 2021].
- [46] R. Goosen, «This is how airborne multibeam Lidar coastal mapping is done in paradise,» 19 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.hydro-international.com/content/article/this-is-how-airborne-multibeam-lidar-coastal-mapping-in-paradise-is-done>. [Último acceso: 17 Febrero 2021].
- [47] F. Company, «www.fugro.com,» [En línea]. Available: <https://www.fugro.com/about-fugro/our-expertise/innovations/rapid-airborne-multibeam-mapping-system#tabbed2>. [Último acceso: 26 Enero 2021].
- [48] ASTRALite, «www.astralite.net,» ASTRALite, [En línea]. Available: <https://www.astralite.net/edgelidar>. [Último acceso: 26 Enero 2021].
- [49] K. Mano, K. Sakai, K. Tachibana, K. Sakita y S. Nishiyama, «The measurement accuracy and measurement characteristics of green LiDAR drone,» *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vols. %1 de %2XLIII-B1-2020, pp. 479-483, 2020.
- [50] AMUSE ONESELF INC., «www.amuse-oneself.com,» [En línea]. Available: <https://amuse-oneself.com/en/service/tdotgreen/>. [Último acceso: 26 Enero 2021].
- [51] ASTRALite, «2-in-1 Lidar solution, Mantas II, University of Hawaii, ARL,» 26 Octubre 2018. [En línea]. [Último acceso: 16 Febrero 2021].
- [52] Cloud Compare, «<https://www.danielgm.net/cc/>,» [En línea]. Available: <https://www.danielgm.net/cc/>. [Último acceso: 17 Marzo 2021].
- [53] P. J. Kinzel, C. J. Legleiter y P. E. Grams, «Field evaluation of a compact, polarizing topobathymetric lidar across a range of river conditions,» 6 Enero 2021. [En línea]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rra.3771>. [Último acceso: 31 Enero 2021].
- [54] ASTRALite, «AstraLite: Cases studies using the Edge Topo-bathy lidar,» [En línea]. Available: www.astralite.net. [Último acceso: 16 Febrero 2021].
- [55] Ministerio de Fomento, «Plan estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021,» Ministerio de Fomento, Madrid, 2018.
- [56] Joint Air Power Competence Centre, Strategic Concept of Employment for Unmanned Aircraft Systems in NATO, Kalkar: NATO, 2010.
- [57] Centro conjunto de desarrollo de conceptos, CESEDEN, «Concepto nacional C-UAS LSS,» Estado Mayor de la Defensa, Madrid, 2019.
- [58] D. Guru, «www.droneguru.es,» Rafa Ocón, 16 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.droneguru.es/nueva-normativa-europea-para-drones/>. [Último acceso: 18 Enero 2021].

- [59] Unión Europea, «www.eur-lex.europa.eu,» 4 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32020R0746>. [Último acceso: 19 Enero 2021].
- [60] Ejército del Aire, «www.ejercitodelaire.defensa.gob.es,» Ministerio de Defensa, 5 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://ejercitodelaire.defensa.gob.es/EA/ejercitodelaire/es/noticias/noticia/Tan-pequeno-como-un-colibri-la-aeronave-mas-diminuta-del-Ejercito-del-Aire/>. [Último acceso: 19 Enero 2021].
- [61] Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional, Tecnologías asociadas a sistemas de enjambres de nano UAV, Madrid: Secretaria técnica general Ministerio de Defensa, Julio de 2012.
- [62] Armada Española, «www.armada.defensa.gob.es,» Armada Española, [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/buquesaeronaves/prefLang-es/03flotilla-aeronaves-aeronaves-no-tripuladas>. [Último acceso: 22 Enero 2021].
- [63] Ejército de Tierra, «Fuerza 35,» Ejército de Tierra, Madrid, 2019.
- [64] Navy recognition, «www.navyrecognition.com,» Royal Australian Navy, 24 Febrero 2016. [En línea]. Available: http://www.navyrecognition.com/index.php?option=com_content&view=article&id=3606. [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [65] INSITU A Boeing Company, «www.insitu.com,» 2020. [En línea]. Available: https://www.insitu.com/wp-content/uploads/2020/12/ViDAR_ProductCard_DU120420.pdf. [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [66] Military Aerospace, «www.militaryaerospace.com,» 24 Febrero 2010. [En línea]. Available: <https://www.militaryaerospace.com/defense-executive/article/16724538/nanosarsyntheticaperture-radar-sar-payload-available-from-insitu>. [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [67] M. G. Erdemli, «General use of UAS in EW enviroment - EW concepts and tactics for single or multiple UAS over the net-centric battlefield,» Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2009.
- [68] P. Martinez de Baños Martínez de Moretin, «Utilización de la tecnología LiDAR para la detección de patologías superficiales en la Escuela Naval Militar,» Centro Universitario de la Defensa, Marín, 2016-2017.
- [69] T. Ohga, «Introduction of airborne LiDAR bathymetry in Japan,» LiDAR magazine, 20 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://lidarmag.com/2017/09/20/introduction-of-airborne-lidar-bathymetry-in-japan/>. [Último acceso: 26 Enero 2021].
- [70] S. Amaya Mosquera y J. Fiol Bolivar, «Medidas contra UAV's,» Trabajo fin de curso, Escuela de especialidades "Antonio de Escaño", Ferrol, 2018.
- [71] RPAS BTUME, «RPAS Sistemas aéreos no tripulados,» Unidad Militar de Emergencias, 2019.

- [72] Universidad Politécnica de Valencia, «www.sprl.upv.es,» Servicio Integrado de Prevención y Salud Laboral, [En línea]. Available: https://www.sprl.upv.es/IOP_RF_01%28a%29.htm. [Último acceso: 10 Febrero 2021].
- [73] J. J. Matienzo Merodio y A. Olmedilla García, «Estudio, ensamblaje, caracterización y ensayos de dos modelos reales de RPA,» Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Madrid, 2016.
- [74] V. Méndez, «Operación Centinela Gallego: 4000 kilómetros al día para disuadir a incendiarios,» *Diario de Pontevedra*, 5 Septiembre 2020.
- [75] G. Mandlburguer, M. Pfennigbauer, R. Schwarz, S. Flöry y L. Nussbaumer, «Concept and performance evaluation of a novel UAV-Borne Topo-Bathymetric LiDAR sensor,» *Remote Sensing*, vol. 12, nº 986, 2019.
- [76] J. M. Pan, «Galicia tiene una treintena de zonas aéreas restringidas al vuelo de drones,» *La Voz de Galicia*, 4 Marzo 2020.
- [77] Cradle of Aviation Museum an Education Center, «www.cradleofaviation.org,» [En línea]. Available: https://www.cradleofaviation.org/history/exhibits/exhibit-galleries/world_war_i/curtiss_sperry_aerial_torpedo.html. [Último acceso: 19 Febrero 2021].
- [78] Dronaire, «www.dronairevuelos.es,» 12 Abril 2020. [En línea]. Available: https://www.dronairevuelos.es/que-es-un-drone-parte-7/?fbclid=IwAR0hnFc4SuDMGIU3-quGeHrurCshOHpyGeLW-YaFuNl1iNkz_8PZRTDTEsw. [Último acceso: 19 Febrero 2021].
- [79] Department of Defense, «Unmanned Aircraft System Airspace Integration Plan,» Department of Defense, Washington, 2011.
- [80] Carrasco y F. Á. Molero, «Anteproyecto de una aeronave vehiculo aereo no tripulado ligero,» Centro Universitario de la Defensa, Academia General del Aire, San Javier, 2015.
- [81] D. Deptula, «Air Force Unmanned Aerial System (UAS) Flight Plan 2009-2047,» US Air Force, Washington DC, 2009.
- [82] J. L. Expósito, «Volar con los pies en el suelo,» *Revista Española de Defensa*, vol. 349, nº Abril 2018, pp. 44-49, 2018.
- [83] D. Galán Juárez, «Los UAV de la Armada y los países de su entorno,» *Revista General de Marina*, vol. 271, nº 2, pp. 333-340, 2016.
- [84] E. Garcia Garcia, «Empleo de UAV en la Armada Española ¿Concepto o capacidad militar?,» *Revista General de Marina*, vol. 261, nº Julio, pp. 65-76, 2011.
- [85] B. Hansen, «Unmanned Aircraft Systems present & future capabilities,» de *Unmanned Aircraft Systems present & future capabilities*, 2009.
- [86] F. Dodero Martinez, «Los UAV potenciadores de las capacidades ISTAR de las operaciones anfibas,» *Boletín de Infantería de Marina*, nº 19, pp. 5-11, 2013.
- [87] A. J. Palmero Romero, «Un RPAS Clase I para el Tercio de Armada ¿Tipo Small o Mini?,» *Revista General de Marina*, vol. Junio, nº Junio 2017, pp. 935-945, 2017.
- [88] J. Albert Sánchez, Interviewee, *RPAS en Infanteria de Marina*. [Entrevista]. 27 Enero 2021.
- [89] A. García Santamaría, Interviewee, *Scan Eagle: modernización de los diez drones de la Armada a partir de 2021*. [Entrevista]. 5 Octubre 2020.

- [90] O. Vila Rovira, «Modelización de aeronaves no tripuladas con Simulink,» Escuela Universitaria de Ingenieria Tecnica Aeronautica UPM, Madrid, 2011.
- [91] C. Cuerno Rejado, «Estado actual de las aeronaves pilotadas por control remoto,» de *Jornadas sobre drones*, San Fernando de Henares, 2016.
- [92] J. Maiz Sanz, «www.defensa.com,» Revista Defensa.com, 1 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.defensa.com/espana/mas-joven-unidades-armada-espanola-undecima-esquadrilla-floan>. [Último acceso: 22 Enero 2021].
- [93] J. M. Gutiérrez de la Cámara Seán, «El impacto de los drones en la guerra naval,» *Revista General de Marina*, vol. 275, nº Octubre, pp. 521-532, 2018.
- [94] J. M. Florido Villegas, Interviewee, *RPAS en la UME*. [Entrevista]. 21 Enero 2021.