

EL POTENCIAL DE LOS VUELOS NO TRIPULADOS EN EL COMPLEJO AGROALIMENTARIO ANDALUZ



Unión Europea
Fondo Europeo Agrícola
de Desarrollo Rural



JUNTA DE ANDALUCÍA
CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO RURAL



UNIVERSIDAD
DE
CÓRDOBA



Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática
Escuela Técnica Superior Ingenieros Agrónomos y Montes
Universidad de Córdoba
Noviembre 2015

(Página intencionada en blanco)

**EL POTENCIAL DE LOS VUELOS NO TRIPULADOS EN
EL COMPLEJO AGROALIMENTARIO ANDALUZ**



Unión Europea
Fondo Europeo Agrícola
de Desarrollo Rural



JUNTA DE ANDALUCÍA
CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO RURAL

Equipo de trabajo:

Alfonso García-Ferrer Porras

Francisco Javier Mesas Carrascosa



**UNIVERSIDAD
DE
CÓRDOBA**

**AM
ETSIAM**
Escuela Técnica Superior de
Ingeniería Agronómica y de Montes

(Página intencionada en blanco)

CONTENIDO

Contenido	I
Lista de Figuras	V
Lista de Tablas	XI
Abreviaturas	XIII
1 Introducción. Antecedentes históricos de las plataformas no tripuladas	1
1.1 Precursores de la aviación y las plataformas no tripuladas	1
1.2 Periodo entre 1916 y 1944	4
1.3 Guerra fría	5
1.4 Década de los 80: Expansión de los RPAs	10
1.5 Década de los 90: Los grandes UAV	11
1.6 De la década de los 2000 hasta la actualidad.	12
2 Marco normativo y jurídico	21
2.1 Contexto internacional y europeo	21
2.1.1 Marco normativo en otros Estados Miembros de la Unión Europea.	28
2.2 Situación en España	32
2.2.1 Ley de Navegación Aérea	33
2.2.2 Ley de Seguridad Aérea	35

2.2.3	Reglamento de Circulación Aérea	37
2.2.4	Circulares aeronáuticas	38
2.2.5	Resoluciones de AESA.....	39
2.3	Competencias a nivel autonómico	39
2.4	Mecanismo para la habilitación en AESA para la realización de actividades técnicas o científicas con RPAS.	39
2.4.1	Paso 1: Solicitud realización de vuelos de prueba	40
2.4.2	Paso 2: Realización de vuelos de prueba	46
2.4.3	Paso 3: Presentación documentación previa y declaración responsable para habilitarse como operador de trabajos técnicos o científicos.	46
3	Análisis de plataformas	49
3.1	Clasificación del sistema según capacidad y altura de vuelo	50
3.2	Modelo conceptual de un UAS	51
3.3	Estación de control	54
3.4	Comunicaciones	56
3.5	Arquitectura plataformas aéreas.....	59
3.6	Sistemas de lanzamiento y recuperación	61
3.7	Equipo de soporte.....	66
3.8	Transporte.....	66
3.9	Navegación y orientación.....	69
3.9.1	Controles básicos en vuelo.....	70
3.9.2	Autopilotos comerciales.....	73
3.9.3	Autopilotos Open-Source.....	75
3.10	Descripción detallada de plataformas de fabricación española	77
3.10.1	Plataformas áreas de ala fija	77
3.10.2	Plataformas multirotor.....	80

3.10.3	Plataformas tipo Helicóptero.....	82
4	Sensores	85
4.1	Características técnicas de un sensor	86
4.1.1	Tecnología de fabricación.....	86
4.1.2	Filtro formación de la imagen	88
4.1.3	Modo obtención imagen y efectos derivados	89
4.1.4	Formatos de imagen.....	91
4.2	Aspectos a considerar en la elección de un sensor.....	92
4.2.1	Aspectos geométricos y de iluminación.....	94
4.2.2	Resolución espacial.....	96
4.2.3	Tiempo de exposición	98
4.2.4	Superficie cubierta por un fotograma.....	100
4.2.5	Solape longitudinal	102
4.2.6	Solape transversal	107
4.2.7	Plataforma giroestabilizadora	108
4.2.8	Tamaño imágenes	109
4.2.9	Calidad imagen	110
4.3	Instalación sensores	113
4.4	Sensores RGB	116
4.5	Sensores multiespectrales	119
4.6	Sensores hiperespectrales	125
4.7	Sensores de temperatura	128
4.8	Sensores LiDAR	132
4.9	Calibración métrica de sensores.....	133
5	Operación en vuelo	141
5.1	Planificación de vuelo	141

5.2	Acciones previas y durante al vuelo	153
5.2.1	Acciones previas al vuelo	153
5.2.2	Acciones durante el vuelo.....	161
5.3	Aspectos particulares de operación según carga de pago empleada.	161
6	Procesado de vuelo UAV	163
6.1	Creación proyecto.....	165
6.2	Aerotriangulación	166
6.3	Generación de modelos digitales de superficies y elevaciones.....	172
6.4	Rectificación de imágenes y mosaicado.....	174
6.4.1	Rectificación diferencial	176
6.4.2	Mosaicado	177
6.5	Análisis de software actuales.....	179
6.6	Calibración radiométrica de sensores.....	181
6.6.1	Vicarious calibration.....	183
6.6.2	Modelo de transferencia radiativa.....	184
7	Caracterización de las principales utilidades desarrolladas en el ámbito de la agricultura, la agroindustria y el desarrollo rural	187
7.1	¿Por qué emplear UAS en agricultura?	189
7.2	Teledetección y agricultura de precisión: UAV	191
7.3	Limitaciones de un sistema UAS en la agricultura de precisión	200
8	Recomendaciones y propuestas.....	203
	Apéndices.....	209
	Apéndice 1 Normativa aplicable para la habilitación como operador RPAS	209
9	Bibliografía	213

Lista de Figuras

Figura 1 Diseños de Leonardo Da Vinci: (a) modelo ala rotatorio y (b) pájaro mecánico	2
Figura 2 Evolución sistemas aéreos: (a) Planeador no tripulado, Cayley (1809), (b) planeador tripulado, Cayley (1849), (c) avión no tripulado, Du Temple (1857) y (d) diseño primer avión tripulado, hermanos Wright (1903)	3
Figura 3 Periodo 1916-1944: (a) Liberty Eagle aerial Torpedo, (b) Queen Bee drone, (c) (Radioplane-1), (d) V1 Vengeance Weapon	5
Figura 4 Desarrollos durante la Guerra Fría: (a) MQM-57 de Falconer, (b) Firebee II, (c) QH-50 DASH, (d) Lockheed D-21 Tagboard, (e) DBR-1 ,(f) Lockheed Aquila y (g) Scout UAV (h) Boing Gull	9
Figura 5 UAS en los 80s: (a) Pionner, (b) Canadair CL-327, (c) Canadair CL-427	11
Figura 6 UAV en la década de los 90: (a) GNAT, (b) Phoenix, (c) Sperwer.	12
Figura 7 Sistemas UAV de la década de los 2000 hasta hoy tipo ala fija: (a) Predator, (b) Reaper, (c) 3 vistas del Predator, (d) Shadow, (e) Silver Fox y (f) Global Hawk.	14
Figura 8 Sistemas UAV de la década de los 2000 hasta hoy tipo ala rotatoria: (a) Hummingbird, (b) Camcopter S-100	15
Figura 9 Sistemas UAV para aplicaciones civiles: (a) Helios, (b) Ikhana, (c) Zephyr, (d) Global Hawk, (e) ruta de vuelo sobre el huracán Cristóbal, (f) patrón de circulación de la tormenta tropical Frank en California.	17
Figura 10 Evolución número de consultas en el portal Google de términos relacionados con UAS.	19
Figura 11 Evolución número de consultas en el portal Google de los términos Drone, UAV y UAS	20
Figura 12 Esquema relacional organismos europeos e instituciones en materia de transporte aéreo.	24
Figura 13 Diagrama de flujo proceso habilitación como operador por AESA (Fuente AESA).....	40
Figura 14 Nivel de riesgo según Severidad y Probabilidad.....	43

Figura 15 Modelo conceptual general de un UAS civil.....	52
Figura 16 Tipos de GCS: (a) Centro de operaciones del sistema Predator, (b) GCS instalada en maletín de grandes dimensiones, (c) GCS instalada en maletín con ordenador incorporado, (d) GCS instalada en maletín con ordenador independiente, (e) GCS sobre Tablet y (f) sobre smartphone.	56
Figura 17 Esquema general sistemas de comunicación en una operación UAV	58
Figura 18 Arquitecturas UAV tipo HTOL	60
Figura 19 Arquitecturas UAV tipo VTOL	60
Figura 20 Modalidades lanzamiento UAV	62
Figura 21. Modalidades recuperación UAV tipo HTOL: (a) paracaídas, (b) red, (c) tren de aterrizaje, (d) sobre vientre del fuselaje empleando material polipropileno expandido, (e) sobre el vientre del fuselaje, material polietileno expandido, (f) sobre vientre empleando fibra de carbono y vidrio.	65
Figura 22. Ejemplos plan de vuelo aterrizaje plataformas de ala fija: (a) aproximación helicoidal y (b) lineal.....	66
Figura 23. Dimensiones de la plataforma MD4-1000: (a) con los brazos desplegados y (b) con los motores recogidos para su transporte.	68
Figura 24 Esquema general subsistema de navegación y orientación	70
Figura 25 Ejes de rotación plataforma UAV: (a) VTOL y (b) HTOL.	71
Figura 26 Plataformas ala fija: (a) Mavinci Sirius Pro, (b) UX5, (c) Bramor rTK, (d) detalle instalación sensor (e) E300 y (d) detalle morro E300	80
Figura 27 Equipos multirrotor: (a) MD4-1000 (b) Aibot X6	81
Figura 28 UAS tipo helicóptero: (a) RXMAX, (Copter 4), (b) Copter 4 y (c) Geocopter 83	
Figura 29 Esquema general de tecnología formación imagen por un sensor: (a) CCD y (b) CMOS.	87
Figura 30 Formación imagen: (a) esquema general componentes formación imagen, (b) filtro Bayer y (c) Filtro Foveon.	89
Figura 31 Efectos de distorsiones causadas por disparo modalidad <i>rolling shutter</i> : (a) efecto gelatina, (b) efecto cizalla, (c) efecto corrimiento y (d) exposición parcial.	91

Figura 32 Clasificación objetivos según distancia focal	94
Figura 33 Comparativa resolución respecto a cámara Panasonic GF1	98
Figura 34 Relación tiempo de exposición y velocidad de plataforma, velocidad del viento y GSD.....	99
Figura 35 Comparativa altura imagen y anchura imagen para un vuelo con GSD 3 cm	102
Figura 36 Comparativa solape longitudinal y número de fotogramas según cámara	103
Figura 37 Comportamiento solape longitudinal según tipo de sensor, velocidad, intervalo de tiempo entre imágenes y tipo de arquitectura de plataforma.	105
Figura 38 Comparativa solape transversal y número de pasadas según cámara	108
Figura 39. Efectos de emplear un sistema giroestabilizador: (a) solape transversal con plataforma giroestabilizadora, (b) caso ideal y (c) solape transversal sin plataforma giroestabilizadora.	109
Figura 40 Estrella de Siemens	110
Figura 41 Patrón determinación MTF.....	111
Figura 42 MTF objetivo cámaras Sony Nex5N (línea verde) y Nex7N (línea roja)	112
Figura 43 MTF objetivo H-H020	113
Figura 44 Tipologías instalación sensores: (a) gimbal basado en servos, (b) gimbal basado en motores de dos ejes, (c) gimbal de motores de tres ejes y (d) (e) gimball de cinco ejes y multisensores.	115
Figura 45 Comparativa sistema de enfoque sensores DSLR y MFT	118
Figura 46 Variedad tamaño de sensor	118
Figura 47 Tipos de cámaras RGB.....	119
Figura 48 Sensores multiespectrales: (a) Tetracam ADC Air, (b) Tetracam ADC Lite, (c) TetraCam ADC Micro, (d) TetraCam MultiCamera Array, (e) FluxData FD-1665-MS3, (f) Micasense, (g) Quest Condor 1000 MS4, (h) Pixelteq SpectroCam VNIR	123
Figura 49 Vista a tres caras del sensor Tetracam miniMCA-6.....	124

Figura 50 Muestra bandas espectrales del sensor Tetracam miniMCA-6 sobre ensayo de orientación en olivar	124
Figura 51 Comparativa entre imagen (a) sensor RGB modificado y falso color obtenido con (b) sensor multiespectral.	125
Figura 52 Imagen original (a) y resultado de una corrección geométrica (b) de un sensor de barrido (Oppelt y Mauser 2007)	126
Figura 53 Sensores hiperespectrales: (a) Rikola camera, (b) Headwall Hyperspec standard, (c) Headwall Hyperspec Nano, (d) Headwall Hyperspec Micro, (e) SOC710-GX	127
Figura 54 Esquema separación espectral de la fuente luminosa incidente en el sensor (http://www.headwallphotonics.com)	128
Figura 55 Comparativa sensor termográfico (a) refrigerado frente a uno (b) no refrigerado	130
Figura 56 Sensores termográficos: (a) FLIR A6700SC, (b) FLIR A6X5SC, (c) OPTRIS PI-450, (d) Gobi 640, (e) Miricle y (f) TAU 640.....	131
Figura 57 Sensores LiDAR: (a) Riegl VUX-1, (b) Yellowscan, (c) Velodyne Puck y (d) Velodyne HDL-32	133
Figura 58 Modelos de cámara: (a) pinhole o cámara oscura y (b) cámara de lentes	135
Figura 59 Cámara pinhole: (a) Definición sistemas de coordenadas, (b) relación espacial entre sistemas	137
Figura 60 Ejemplos de distintos patrones de calibración	139
Figura 61 Imágenes captadas de un patrón desde distintos puntos de vista	140
Figura 62 Determinación escala de vuelo	143
Figura 63 Solapamiento (a) longitudinal y (b) transversal.....	147
Figura 64 Comparativa modos de vuelo: (a) cruising mode y (b) stop mode.....	149
Figura 65 Cambios de iluminación sobre un vuelo UAV volando en (a) stop mode y (b) cruising mode.	150
Figura 66 Comparativa tipología de puntos de apoyo.....	153

Figura 67 Distribución de residuos en coordenadas de un bloque fotogramétrico UAV con un punto de apoyo en cada esquina y uno central.....	153
Figura 68 Toma de datos para corrección atmosférica: (a) detalle de paneles blanco, negro y spectralon, (b) toma de muestra con espectroradiómetro y (c) detalle de paneles sobre ortofotografía falso color.....	162
Figura 69 Flujo de trabajo procesado datos obtenidos a partir de un vuelo UAV	164
Figura 70 Estimación del coste temporal de cada una de las etapas en el procesado de un vuelo fotogramétrico UAV.	165
Figura 71 Ejemplo de bloque fotogramétrico de seis fotogramas.....	167
Figura 72: Comparativa (a) MDE y (b) MDS.	173
Figura 73 Error en MDS y su consecuencia sobre ortofotografía: (a) Error local sobre cubierta de edificio y (b) su reflejo en el proceso de ortorectificación. (c) Error introducido por mala delineación de línea de ruptura y (d) deformación sobre imagen ortorectificada.	174
Figura 74 Comparativa entre vista en perspectiva y vista ortográfica.....	175
Figura 75 Esquema de generación de una imagen ortorectificada mediante transformación directa.....	177
Figura 76 Ejemplos mosaicos: Vuelo UAV modo corredor (a) sin balance radiométrico y (b) con balance radiométrico. Detalle del vuelo con (b) discontinuidad radiométrica y (c) con (d) continuidad radiométrica. Detalle del vuelo con (e) discontinuidad radiométrica y geométrica y (f) sin discontinuidades radiométricas y geométricas.	179
Figura 77 Esquema de la esfera integrante Li-Cor 1800-12	183
Figura 78 Paneles de calibración sobre el terreno durante el vuelo	184
Figura 79 (a) Muestra Geoeye sobre campos de arroz en Inakadate (Japón), Muestra WorldView sobre Cairo, Illinois (USA), (c) muestra escena sensor CASI-1500 aerotransportado.....	189
Figura 80 Ejemplo de imágenes registradas mediante plataforma UAV tipo multirrotor: (a) Sensor Sony Nex7, (b) sensor multiespectral TetracamminiMCA 6.	193
Figura 81 Muestra resultados distintos índices de vegetación sobre ensayo de olivar	193

Figura 82 Tecnologías mas populares en la agricultura de precisión (Erickson y Widmar 2015)	195
Figura 83 Uso de tecnologías <i>site-specific</i> a lo largo del tiempo (Erickson y Widmar 2015)	195
Figura 84 Fases de trabajo UAV aplicados a la agricultura de precisión	197
Figura 85 Integración de UAS en redes de sensores inalámbricos (Valente, y otros 2011)	198
Figura 86 Ejemplo evaluación calidad en medición de superficies de parcelas agrícolas (Mesas-Carrascosa, y otros 2014)	199
Figura 87 Prototipo de UAV multirotor equipado con brazo articulado	199
Figura 88 Operatividad de las plataformas UAV inferiores a 25 kg	204
Figura 89 De las aplicaciones de las plataformas UAV inferiores a 25 kg (I)	205
Figura 90 De las aplicaciones de las plataformas UAV inferiores a 25 kg (II)	206
Figura 91 De las aplicaciones de las plataformas UAV inferiores a 25 kg (III)	207

Lista de Tablas

Tabla 1 Definición límites de probabilidad de un factor de riesgo	42
Tabla 2 Ejemplo determinación índice de riesgo antes y después de adoptar medidas correctoras.	44
Tabla 3 Resumen características sensores evaluados	97
Tabla 4 Tamaño imagen de 12 bits/pixel según cámara.....	110
Tabla 5 Resumen características sensores multiespectrales	123
Tabla 6 Resumen características sensores hiperespectrales	128
Tabla 7 Resumen características sensores termográficos	131
Tabla 8 Comparativa entre sensores RGB, multiespectral y termográfica valores GSD, tamaño imagen y superficie de una imagen según altura AGL.....	144
Tabla 9 Comparativa tiempos de vuelo	149
Tabla 10 Escala de Beaufort	156
Tabla 11 Rugosidad para diferentes superficies	157

(Página intencionada en blanco)

ABREVIATURAS

AESA	Agencia Estatal de Seguridad Aérea
AGL	Above Ground Level
AMSL	Above Mean Sea Level
ATC	Air Traffic Control
ATO	Approved Training Organization
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
CEAC	Confederación Europea de Aviación Civil
CAAC	Consejo Asesor de Aviación Civil
CCD	Charge Coupled Device
CdP	Centro de Proyección
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CRUAV	Close Range Unmanned Aerial Vehicle,
CS	Control Station
CTF	Función de Transferencia del Contraste
CWSI	Crop Water Stress Index
DGAC	Dirección General de Aviación Civil
DSLR	Digital Single Lens Reflex
EASA	Agencia Europea de Seguridad Aérea (<i>European Aviation Safety Agency</i>)
ELFAA	European Low Fare Airline Association
FPS	Frame Per Second

FTM	Función Transferencia de Modulación
GCS	Ground Control Station
GNC	Guiado, Navegación y Control
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sample Distance
HALE	High Altitude – Long Endurance
HAPS	High Altitude Pseudo Satellite
HTOL	Horizontal Take-off and Landing
IATA	International Air Transport Association
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
JARUS	Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LAI	Leaf Area Index
LARS	Low Altitude Remote Sensing
LGR	Linear Ground Resolution
MALE	Medium Altitude Long Endurance
MAV	Micro UAV
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
MDS	Modelo Digital de Superficies
MEMS	Microelectromechanical systems
MFT	Micro Four Thirds System
MKE	Maximum Kinetic Energy
MPCS	Mission Planning and Control Station
Mpx	Megapixel
MTOW	Maximum Take Off Weight
MUAV	Mini UAV
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAV	Nano Air Vehicles
Nd	Nivel Digital
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near InfraRed
NOTAM	Notice To Airmen

PVA	Posición, Velocidad y Actitud
RPA	Remote Piloted Aircraft
RTH	Return to Home
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Indexl
SDK	Software Development Kit
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
SRC	Sistema de Referencia de Coordenadas
SWIR	Short Wave InfraRed
OACI	Organización de la Aviación Civil Internacional
PID	Proportional-Integral-Derivative
UCAV	Unmanned Combat Aerial Vehicle
TIFF	Tagged Image File Format
TUAV	Tactical Unmanned Aerial Vehicle
UAS	Unmanned Aerial System
ULM	Ultraligero
VLOS	Visual Line of Sight
VNIR	Visble Near InfraRed
VTOL	Vertical Take-Off and Landing

(Página intencionada en blanco)

1 INTRODUCCIÓN. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LAS PLATAFORMAS NO TRIPULADAS

Heavier-than-air flying machines are impossible.

Lord Kelvin, 1895

*It is apparent to me that the possibilities of the aeroplane,
... have been exhausted, and that we must turn elsewhere.*

Thomas Edison, 1895

*Flight by machines heavier than air is unpractical and
insignificant, if not utterly impossible.*

Simon Newcomb, 1902

1.1 Precursores de la aviación y las plataformas no tripuladas

En los tiempos modernos, la aviación tripulada surgió a finales del siglo XVIII y necesitó del paso de otro siglo para que plataformas mas pesadas que el aire pudieran volar. Las plataformas no tripuladas no tardarían en aparecer tras el diseño del primer aeroplano, alrededor de la Primera Guerra Mundial, 1916. No obstante, esa primera idea de una “maquina voladora” apareció por primera vez en la mente del ser humano hace mas de 2.500 años, en la cultura griega y china. Arquímedes, Pitágoras y otros filósofos de la Grecia Antigua estudiaron el diseño y uso de mecanismos autónomos utilizados en una gran variedad de aplicaciones. La primera maquina o dispositivo con capacidad de vuelo autónomo conocido se le atribuye a Archytas de la ciudad de Tarantas o Tarentum, en el sur de Italia. Archytas es considerado como el Leonardo da Vinci del Mundo Antiguo.

A él se le atribuye la invención de lo que es conocido como “la primera máquina voladora de la antigüedad” en el año 425 a.C. denominada “La Paloma”. Según Cornelio Gelio en su obra *Noctes Atticae* (Gellius 1927), la máquina se había construido de madera, equilibrada con pesas, volando mediante el uso del aire, probablemente vapor dispuesto en su interior. En la misma era pero en otra parte del mundo, concretamente en China, sobre el 400 a.C. se documentó la idea de un avión de vuelo vertical consistente en la colocación de plumas en el extremo de un palo el cual se giraba entre las manos hasta generar la suficiente energía para hacerlo volar. Con el paso de los años, la cultura China experimentaría con otro tipo de plataformas como globos de aire caliente, cohetes o cometas. Tales plataformas tendrían en origen una naturaleza militar.

Varios siglos más tarde, Leonardo Da Vinci, en 1483, diseñó una plataforma de unos cinco metros de diámetro capaz de sobrevolar un punto (Figura 1.a), siendo considerado como el precursor del helicóptero que conocemos hoy día. Da Vinci, en 1508, ideó un pájaro mecánico que batía las alas por medio de un doble mecanismo de manivelas (Figura 1.b).

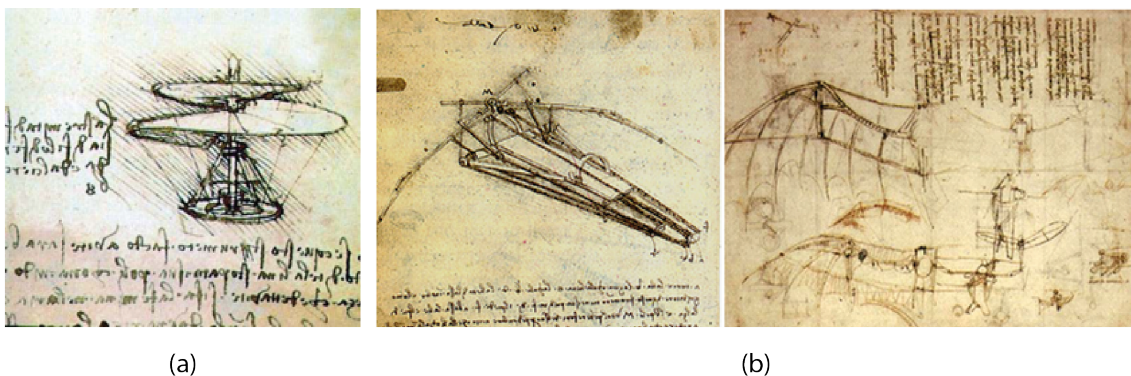


Figura 1 Diseños de Leonardo Da Vinci: (a) modelo ala rotatorio y (b) pájaro mecánico

El primer vuelo tripulado reconocido como tal tuvo lugar en el año 1783, empleando para ello un globo de aire caliente diseñado por los hermanos Montgolfier.

Considerando la aviación no tripulada, los primeros modelos aparecieron a partir de los trabajos desarrollados por pioneros como Cayley, Stringfellow o Du Temple entre otros, siendo estos modelos anteriores a las primeras aeronaves tripuladas. Sería Europa la que tomara la iniciativa en desarrollar los principios aeronáuticos y aplicarlos a aeronaves viables. Sir George Cayley (Reino Unido) es uno de los personajes más importantes dentro de la historia de la aeronáutica, siendo considerado por muchos como el primero en comprender y desarrollar los principios aeronáuticos. En el año 1796

desarrolló el primer modelo aéreo de tipo helicóptero y en 1809 el primer planeador no tripulado (Figura 2.a), para en 1849 presentar su correspondiente versión tripulada (Figura 2.b). Correspondería al oficial francés de la marina Félix du Temple de la Croix la realización del primer vuelo con avión tripulado. La aeronave presentada (Figura 2.c) incorporaba un tren de aterrizaje, una hélice y alas a la cual nombró "*Locomotion aérienne par imitation du vol des oiseaux*" (Locomoción aérea para la imitación del vuelo de los pájaros). La barrera tecnológica en ese periodo fue el no poder disponer de un motor con la suficiente relación peso-potencia para poder mantener en vuelo las plataformas.

Junto con los avances acontecidos en ese tiempo en Europa, en los Estados Unidos los desarrollos iban dirigidos hacia la mejora del transporte terrestre con objeto de la conquista de su continente, siendo unos recién llegados al mundo de la aviación. No obstante, los Hermanos Wright y su mecánico Charles Taylor desarrollaron un motor de 12 CV y 80 kg de peso que les permitió ser los primeros en realizar un vuelo con un avión tripulado (Figura 2.d).

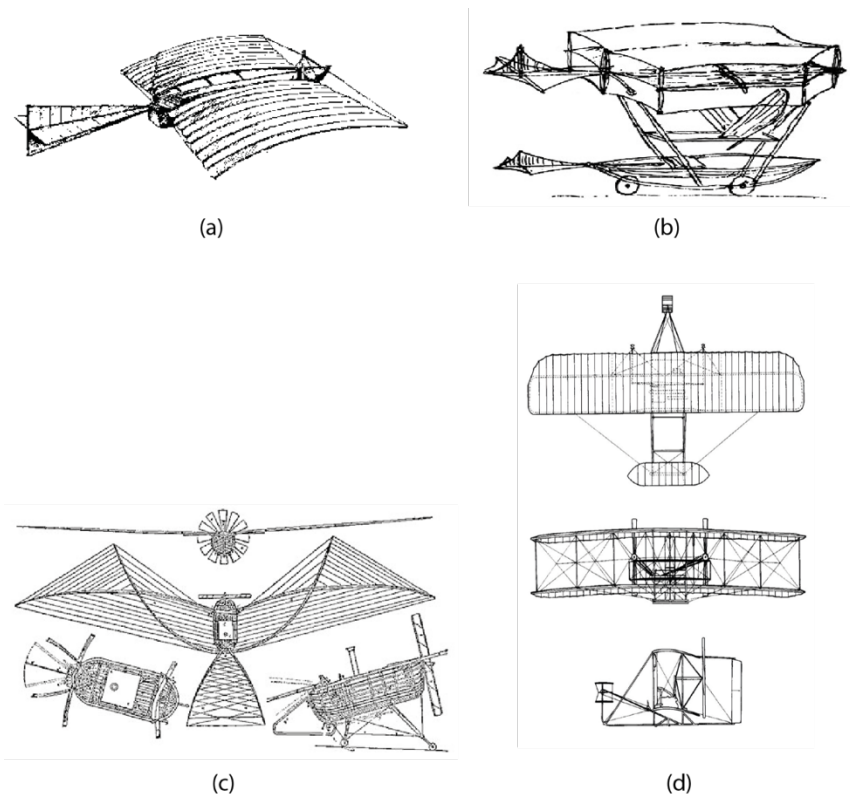


Figura 2 Evolución sistemas aéreos: (a) Planeador no tripulado, Cayley (1809), (b) planeador tripulado, Cayley (1849), (c) avión no tripulado, Du Temple (1857) y (d) diseño primer avión tripulado, hermanos Wright (1903)

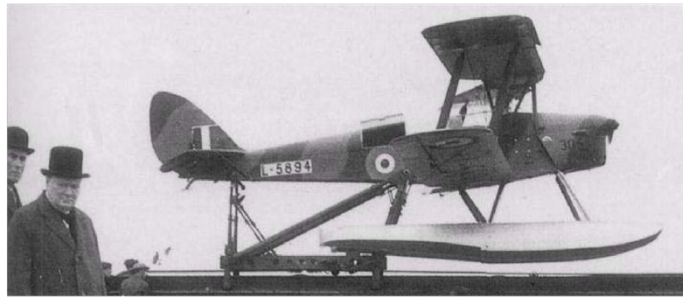
1.2 Periodo entre 1916 y 1944

En estos primeros momentos, el desarrollo de UAVs y misiles guiados estuvieron íntimamente ligados, principalmente dado que el reto consistente en la dirección del vuelo era básicamente idéntico en ambos tipos de vehículos. En el año 1916, menos de quince años del histórico vuelo de los hermanos Wright, se realizó el primer vuelo moderno no tripulado con la aeronave automática de Hewitt Sperry. La aeronave no habría sido una realidad sin los trabajos previos de Sperry con giróscopos, permitiendo dar estabilidad en vuelo a la plataforma. Este dispositivo despertó el interés de la armada estadounidense y el resultado fue el desarrollo del torpedo aéreo Curtiss-Sperry, coetáneo en el tiempo al torpedo aéreo Liberty Eagle (Figura 3.a) desarrollado por Charles Kettering, siendo financiado el proyecto por las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos. Los primeros aviones pilotados de forma remota aparecieron con fuerza en la I Guerra Mundial, si bien presentaron serias deficiencias propias de la tecnología del momento. A consecuencia de la falta de exactitud, el interés por los vuelos automáticos fue disminuyendo al tiempo que se fue despertando el interés por el uso remoto. En Gran Bretaña, los ensayos realizados tuvieron como resultado que la Royal Navy entre los años 1934 y 1943 adquirieran más de 400 unidades del Queen Bee drone DH.82B (Figura 3.b). Esta plataforma presentaba una envergadura de 8.9 m, siendo capaz de desarrollar una velocidad de 170 km/h y un masa máxima al despegue (Maximum Take Off Weight, MTOW) de 830 kg. El DH 82B tenía como objetivo servir de blanco aéreo en las prácticas de la artillería antiaérea. De este modo los target-drone se convirtieron en el uso principal de las plataformas sin piloto durante casi medio siglo. Tales actividades desencadenaron la mejora y perfeccionamiento de los sistemas de radio control, un concepto propuesto en 1895 y demostrado en 1898 por Tesla con su Teleautomaton. En Estados Unidos, el actor Reginald Denny inició una aventura empresarial en 1934 denominada "Reginald Denny Hobby Shops", comenzando a vender aviones dirigidos por radio control, concretamente el modelo Radioplane-1 (Figura 3.c). Unos pocos años más tarde demostraría a las fuerzas armadas norteamericanas el camino hacia el desarrollo de target-drone empleados de forma masiva en la Segunda Guerra Mundial. En ese periodo se construirían hasta 15.374 Radioplane RP-4, posteriormente mejorado por el modelo RP-19/Q-19 del cual se venderían más de 48.000 unidades entre el periodo 1946 y 1984.

El concepto de misil crucero sería revisado por la Alemania Nazi diseñando el V1 Vengeance Weapon (Figura 3.c), siendo el primer misil crucero equipado con un motor de reacción. El sistema de guiado era asistido por un barómetro para controlar la velocidad y altura, y un anemómetro para estimar la distancia recorrida. Alcanzaba velocidades de hasta 640 km/h y un alcance de 250 km, de este modo el punto de lanzamiento se situaba en los Países Bajos, alcanzando objetivos al Sur de Inglaterra.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3 Período 1916-1944: (a) Liberty Eagle aerial Torpedo, (b) Queen Bee drone, (c) (Radioplane-1), (d) V1 Vengeance Weapon

1.3 Guerra fría

Poco antes del final de la Segunda Guerra Mundial hubo un aumento en el interés por las misiones de reconocimiento del terreno, equipando a las plataformas de vuelo de cámaras. En este periodo la empresa Radioplane, más adelante Northrop, diseñó tomando como base el Radioplane-1 el MQM-57 Falconer (Figura 4.a), también denominado SD-1, con una autonomía de 30 minutos de vuelo, una cámara KA-20A con capacidad para tomar 95 imágenes o una KA-39A para vuelos nocturnos con película infrarroja. El SD-1 era lanzado de forma asistida mediante cohete y recuperado mediante paracaídas. Este modelo se estuvo fabricando hasta la década de 1980.

Con la aparición de los aviones con sistemas de propulsión a reacción se diseñaron blancos más rápidos y con más alcance como el *Ryan Firebee*, cuyo programa se inició en la década de los 50. La pérdida de un avión tripulado U-2 sobre territorio de la Unión Soviética en 1960 dio un nuevo impulso hacia el uso de los sistemas no tripulados en tareas de reconocimiento y, la pérdida de un segundo U-2 en territorio cubano por un misil SA-2 en la crisis de los misiles cubanos en 1962, reforzaría el programa. Con la aparición de sucesivas mejoras en el sistema de la plataforma Firebee (Figura 4.b), hasta un total de doce disponibles, hizo que se fueran empleando en distintas misiones de reconocimiento en China, Vietnam y otros países durante de las década de 1960 y 1970. El Firebee presentaba dos modos de trabajo, bien como misil o como herramienta de reconocimiento. El sistema de lanzamiento podía ser desde tierra mediante un motor cohete, o desde el aire empleando un avión tripulado como el Lockheed C130 Hercules. El sistema de recuperación se realizaba mediante el despliegue de un paracaídas una vez que se encontraba próximo a la zona de aterrizaje. Todas las variantes del modelo base han gozado de un gran interés, e incluso hoy día alguna de éstas se encuentran en uso empleando sistemas de posicionamiento global

En épocas anteriores, una de las mayores preocupaciones y motivo de cancelación de distintos programas UAV se debía en gran medida a las incidencias en las operaciones de lanzamiento y sobre todo de recuperación. En respuesta a tales inconvenientes se comenzarían a desarrollar dispositivos de despegue vertical como el helicóptero no tripulado tipo DASH, *Drone Anti-Submarine Helicopter*, por la empresa Gyrodine, concretamente el modelo QH-50 DASH (Figura 4.c). Empleado por la armada norteamericana por su diseño, su capacidad para poder ser lanzado desde pequeñas embarcaciones como fragatas, y la posibilidad de transportar torpedos o cargas nucleares le hacía ser un sistema adecuado para atacar objetivos fuera del alcance de otras armas de las embarcaciones. También sería empleado para operaciones de reconocimiento. Si bien tecnológicamente no era una plataforma de alto nivel al no disponer de autopiloto ni sensores, sino ser radiocontrolada, fue la primera vez en usarse una aeronave de ala giratoria como UAV. La plataforma no era muy estable y se perdieron numerosas unidades cayendo al mar, conociéndose el programa como "*Splash-DASH-a-day*". El Ministerio de Defensa del Reino Unido diseñaría con esta misma filosofía el sistema Westland Wisp.

A finales de la década de los 60, la CIA trabajó en su propio dron de reconocimiento hipersónico de largo alcance, diseñado para ser lanzado a partir de un avión nodriza. El programa D-21 Tagboard se cancelaría a principio de los años 70 por problemas técnicos, accidentes y fallos en las misiones realizadas.

En paralelo a los trabajos expuestos anteriormente, las fuerzas aéreas soviéticas trabajaron en su propio programa de drones de reconocimiento. El primer sistema se basó en el TBR-1, seguido del DBR-1 (*Dalniy Bepilotniy Razvedchik* o explorador no tripulado largo alcance) (Figura 4.d). Fue diseñado para no ser recuperado de forma completa, de este modo, una vez alcanzado la localización para su recuperación se desprendía la cabeza de la plataforma la cual contenía el paquete de sensores y el resto de la plataforma colisionaba. Como consecuencia de esto, el coste operacional era bastante elevado lo que derivó en el desarrollo de plataformas de medio y corto alcance empleadas en tareas de reconocimiento y recuperadas mediante paracaídas.

Otro actor importante en el área de los UAV son las Fuerzas Aéreas de Israel. En una primera fase estuvieron operando con plataformas estadounidenses destinadas a operaciones de reconocimiento durante la guerra de Yom Kippur. Mas tarde desarrollarían su propia plataforma, la Scout (Figura 4.g) y la Mastiff. Esta última plataforma sería la base del futuro sistema Pioneer, su diseño incluso ha influido en los famosos Predator and Shadow UAS.

En esta época, un sistema de corto alcance, el Lockheed Aquila (Figura 4.f) habría sido una aeronave muy destacable en el campo de la aviación no tripulada si hubiera cumplido con las expectativas puestas en él, si bien estas eran demasiado ambiciosas tecnológicamente para la época. Consistía en un pequeño avión impulsado por una hélice y una construcción modular transportable por cuatro personas, permitiendo tener información en tiempo real de las tareas de reconocimiento desarrolladas. En el propio proceso de reconocimiento, una de las funciones abordadas era la localización e identificación de objetivos enemigos tanto de día como de noche, así como la indicación mediante un laser de los objetivos para la artillería. Dadas las dimensiones del fuselaje de la aeronave se presentaron importantes problemas de integración de sensores y sistemas, tanto por peso como por dimensiones que o bien consumían una potencia excesiva o bien sufrían o generaban interferencias, afectando por ejemplo a la calidad del video y por tanto a la capacidad de identificación de objetivos. Un sistema parecido fue el MBLE Epervier, de origen belga. Se comenzaría a desarrollar en 1960, siendo

empleado hasta finales de la década de los 70. En este sistema, los datos quedaban almacenados a bordo y luego eran procesados en la estación de tierra una vez recuperado el sistema.

Por otro lado, en el año 1971, el Boeing Gull (Figura 4.h) sería el ganador de la Compass Cope de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Es una plataforma de elevada altitud y gran autonomía (HALE, High Altitude – Long Endurance). Esta plataforma presentó unas dimensiones de 12.80 m de longitud, 27.43 m de envergadura y un peso de 5.897 kg. Permitía desarrollar vuelos de hasta 30 horas de duración y subir a una altura máxima de 21.340 m. El programa sería cancelado en 1977 al no conseguir de manera satisfactoria el correcto funcionamiento de los sistemas de navegación, siendo necesario esperar mas de diez años para contar con tecnología mas avanzada como la aportada por los sistemas de navegación por satélite.

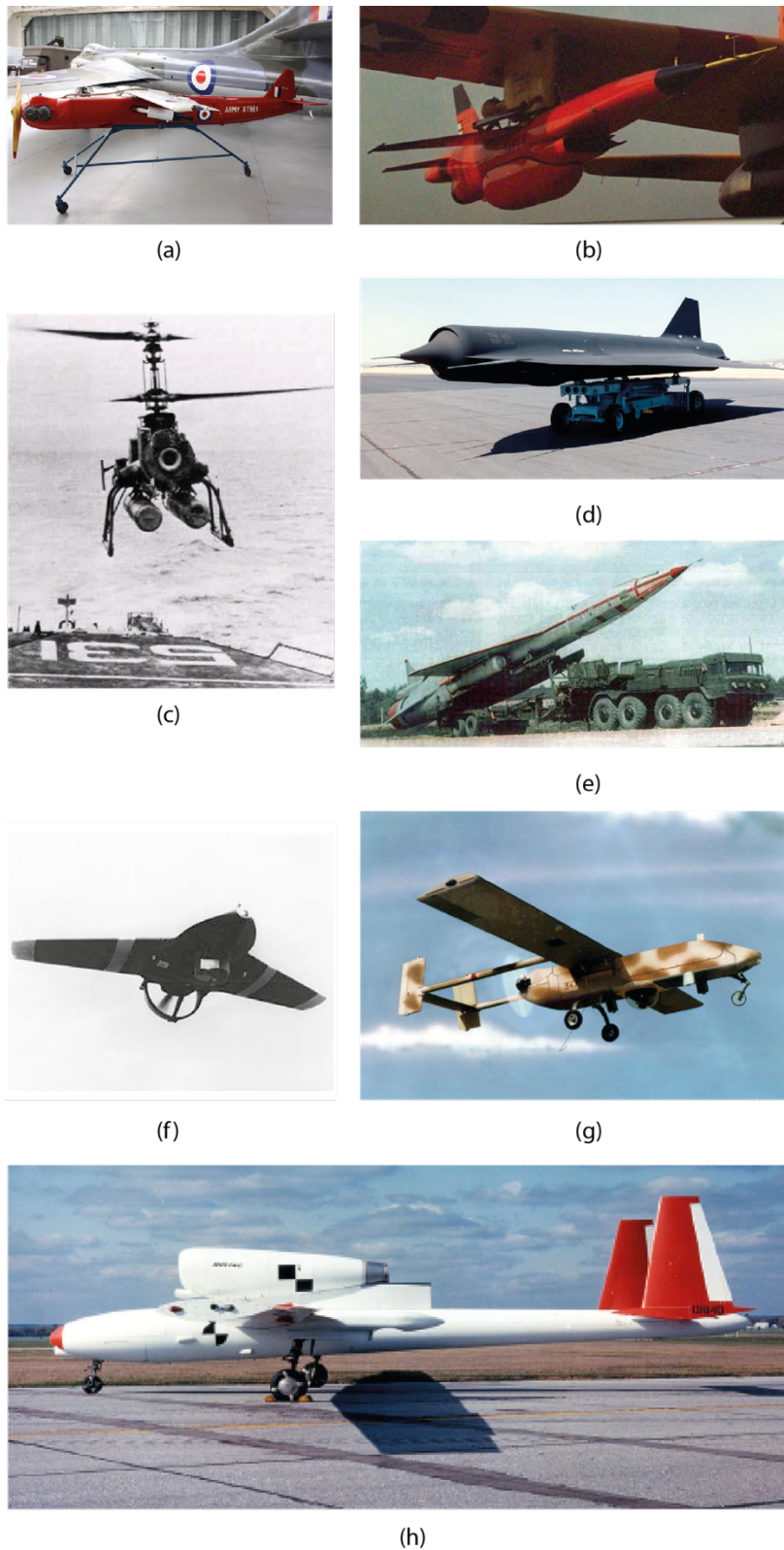


Figura 4 Desarrollos durante la Guerra Fría: (a) MQM-57 de Falconer, (b) Firebee II, (c) QH-50 DASH, (d) Lockheed D-21 Tagboard, (e) DBR-1, (f) Lockheed Aquila y (g) Scout UAV (h) Boeing Gull

1.4 Década de los 80: Expansión de los RPAs

En este periodo el desarrollo de cargas de pago con sensores mas avanzados y sofisticados permitiría abrir otras posibilidades de misiones. Igualmente importante sería la mejora en los sistemas de guiado y recuperación en tierra, si bien la recuperación en tierra aun presentaba deficiencias en el caso de arquitecturas de ala fija. En las operaciones de reconocimiento destaca sin duda alguna el sistema Pioneer (Figura 5.a), el cual acumularía mas de 1.500 horas de vuelo en las operaciones Tormenta del Desierto en la Guerra del Golfo Pérsico o la Guerra de los Balcanes. Desarrollado por AAI Corporation y la Industria Aérea de Israel, este sistema se ha estado empleado entre el periodo 1986-2007. Presentaba la posibilidad de ser lanzado bien mediante cohete motor o catapulta. Presentaba una longitud de 4 m y un peso de 205 kg, capaz de alcanzar una velocidad crucero de 200 km/h y un techo de vuelo de 4.600 m. En Europa, uno de los sistemas de navegación no tripulado mas relevante vino de la financiación de Canada y Reunio Unido, concretamente el CL-89 Midge, empleado incluso por la armada francesa y alemana. En el CL-89 se cargaba un ruta planificada previamente, era capaz de registrar imágenes tanto de día como de noche y regresaba al punto base para ser recuperado mediante paracaídas. El sistema evoluciono hacía el modelo CL-289, presentando un radio de acción de 200 km. Con objeto de salir ileso de ataques por parte de sistemas del enemigo se diseñaría con unas dimensiones muy reducidas presentando un diámetro de 0.38 m y una envergadura de 1.32 m, siendo capaz de desarrollar una velocidad de 740 km/h, dificultando de este modo su detección. En la década de los 2000 se integraría a este modelo el sistema de localización GPS y un radar de apertura sintética que permitirían desarrollar vuelos mas cerca del terreno y en cualquier condición meteorológica. En esta década se realizarían grandes avances en lo que respecta a vehículos de ala giratoria para tareas de reconocimiento de muy corto alcance y vigilancia. Destacar en esta tipología el modelos Canadair C-227, inspirado en el modelo Westland, y sus evoluciones, el CL-327 (Figura 5.b) y el CL-427 (Figura 5.c). Ambos modelos presentan una MTOW de 350 kg y unos rotores de grandes dimensiones con objeto de aumentar la autonomía en operaciones navales.

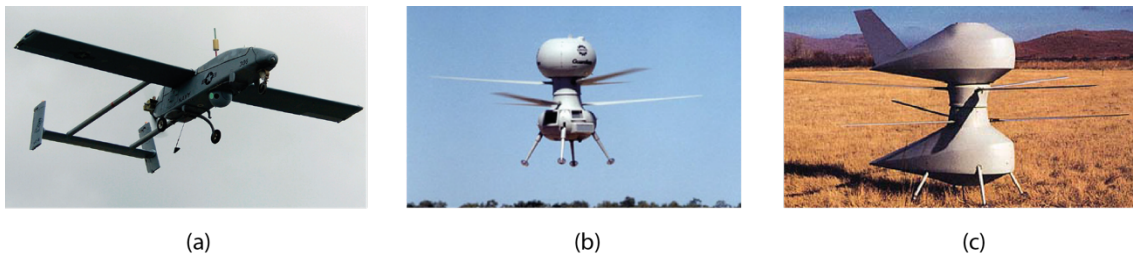


Figura 5 UAS en los 80s: (a) Pioneer, (b) Canadair CL-327, (c) Canadair CL-427

1.5 Década de los 90: Los grandes UAV

El aumento en la disponibilidad de los sistemas de navegación por satélite y la mejora de las comunicaciones de satélite permitirían aumentar el alcance de las operaciones y la mejora en la exactitud de la navegación, siendo este periodo el correspondiente al gran desarrollo de los sistemas UAS.

Dentro del tipo ala fija aparece la aeronave GNAT (Figura 6.a), sistema base del desarrollo de los sistemas de navegación de media altura y gran autonomía (Medium Altitude Long Endurance, MALE) y HALE. Presenta una capacidad de vuelo de 48 horas, desplegando una velocidad máxima de 192 km/h y un techo de vuelo de 7.600 m. Presentó tres evoluciones durante su uso, siendo la base del diseño de los famosos sistemas Predator de tipo MALE y Global Hawk como HALE, ambos desarrollados en la década de los 2000. La ventaja de poder volar a una altura tan elevada permitía evitar el ataque de sistemas terrestres, si bien en caso de condiciones con nubes el sistema debía descender por problemas en el sistema de navegación, siendo por tanto mas vulnerables. Destacar además dentro de esta arquitectura los sistemas Phoenix (Figura 6.b), desarrollado por BAE System. Realizaría su primer vuelo en 1986 y retirado de fabricación diez años mas tarde, siendo operado por la armada británica. En el caso del sistema Sperwer (Figura 6.c) era capaz de enviar imágenes en tiempo real al centro de control situado a mas de 150 km. Este sistema se encuentra en servicios como la armada de Francia, Holanda, Suecia, Estados Unidos o Grecia. Por parte de la Federación Rusa, diferentes compañías como Yakolev han desarrollado igualmente sistemas de vuelo no tripulado como por el Pchela o el Irkut.

Con respecto a los sistemas de ala giratoria, destacar la aparición en esta década con fines no militares el sistema Yamaha R50 y su evolución R.Max, ambos de tipo despegue y aterrizaje vertical (Vertical Take-Off and Landing, VTOL), con una

fabricación de mas de 1.500 unidades hasta la fecha destaca su uso en agricultura, concretamente en la siembra y fumigación de arroz.

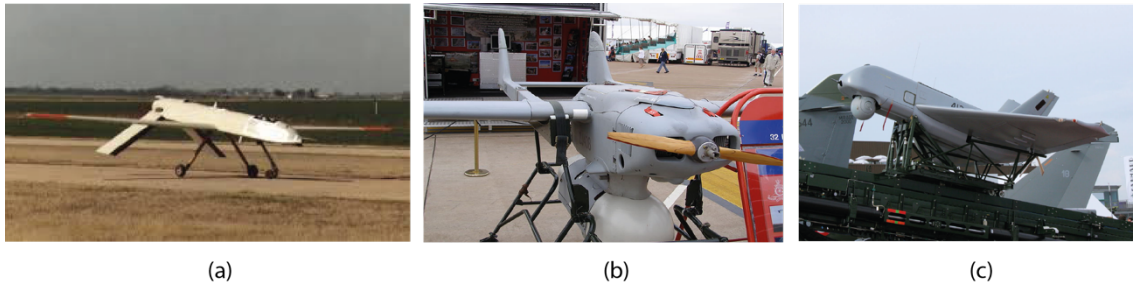


Figura 6 UAV en la década de los 90: (a) GNAT, (b) Phoenix, (c) Sperwer.

1.6 De la década de los 2000 hasta la actualidad.

En este periodo destaca en primer lugar el asentamiento de la tecnología, el desarrollo y uso de forma estable de grandes y medias plataformas UAV y la aparición de pequeñas plataformas para operaciones y actividades con carácter civil. Si bien el abanico de posibilidades de éstas es mayor que las propias del fin militar, la dificultad reside actualmente en asegurar un marco de trabajo seguro donde puedan operar plataformas tanto tripuladas como no tripuladas.

Es en este periodo donde se ponen en servicio dos de los sistemas mas conocidos actualmente, Predator (Figura 7.a y c) y Global Hawk (Figura 7.f). El primero de ellos es una aeronave de tipo ala fija catalogado como MALE, evolución del sistema GNAT-750. Este presenta por primera vez el concepto de “reconocimiento y ataque” en el uso de este tipo de sistemas, teniendo como resultado la aparición de los vehículos aéreos de combate no tripulado (Unmanned Combat Aerial Vehicle,UCAV). Este sistema presenta un rendimiento de 24 horas en combate, siendo capaz de alcanzar un techo de vuelo de 7620 m y desarrollar una velocidad crucero de entre 130 a 165 km/h. Una evolución de este avión en la actualidad es el sistema Reaper (Figura 7.b). Destacar igualmente el desarrollo en este periodo de sistemas tácticos (Tactical Unmanned Aerial Vehicle, TUAV) con algo menos de carga de pago, alcance y duración de vuelo como el Shadow (Figura 7.d), y por debajo de esta categoría, con prestaciones mas reducidas los sistemas de corto alcance (Close Range Unmanned Aerial Vehicle, CRUAV) como el Silver Fox (Figura 7.e). En el otro lado, dentro de la categoría de HALE UAV se desarrolla el sistema Global Hawk (Figura 7.f). Este sistema ha destacado por ir mostrando prestaciones hasta el momento difícil de alcanzar con otros sistemas, como

el de ser capaz de alcanzar un techo de vuelo de 19.928 m (posteriormente el prototipo Helios lo superaría), o ser el primer avión no tripulado en cruzar el Océano Pacífico sin hacer paradas, en total 13.219,86 km entre las bases de Edwards en Estados Unidos y la base de Edinburgh en Australia. La aeronave tiene unas dimensiones de 13,54 m de longitud y una envergadura de 35,41 m.

Todos los sistemas presentados son sistemas diseñados y desarrollados en Estados Unidos, esto no quiere decir que otros países estén trabajando en sus propios sistemas. Actualmente mas de 50 países se encuentran trabajando en el desarrollo de mas de 1.000 plataformas de vuelo. Resaltar el Heron (Israel), el Irkut-2000 o el Dozor-600 (Rusia). En estos momentos, desde el punto de vista de desarrollo los esfuerzos se están dirigiendo en el diseño de modelos tipo UCAV, y si bien se encuentran en una fase experimental, ya han aparecido algunos modelos en fase operacional como el Neuron, el Barracuda o el Sky-X.

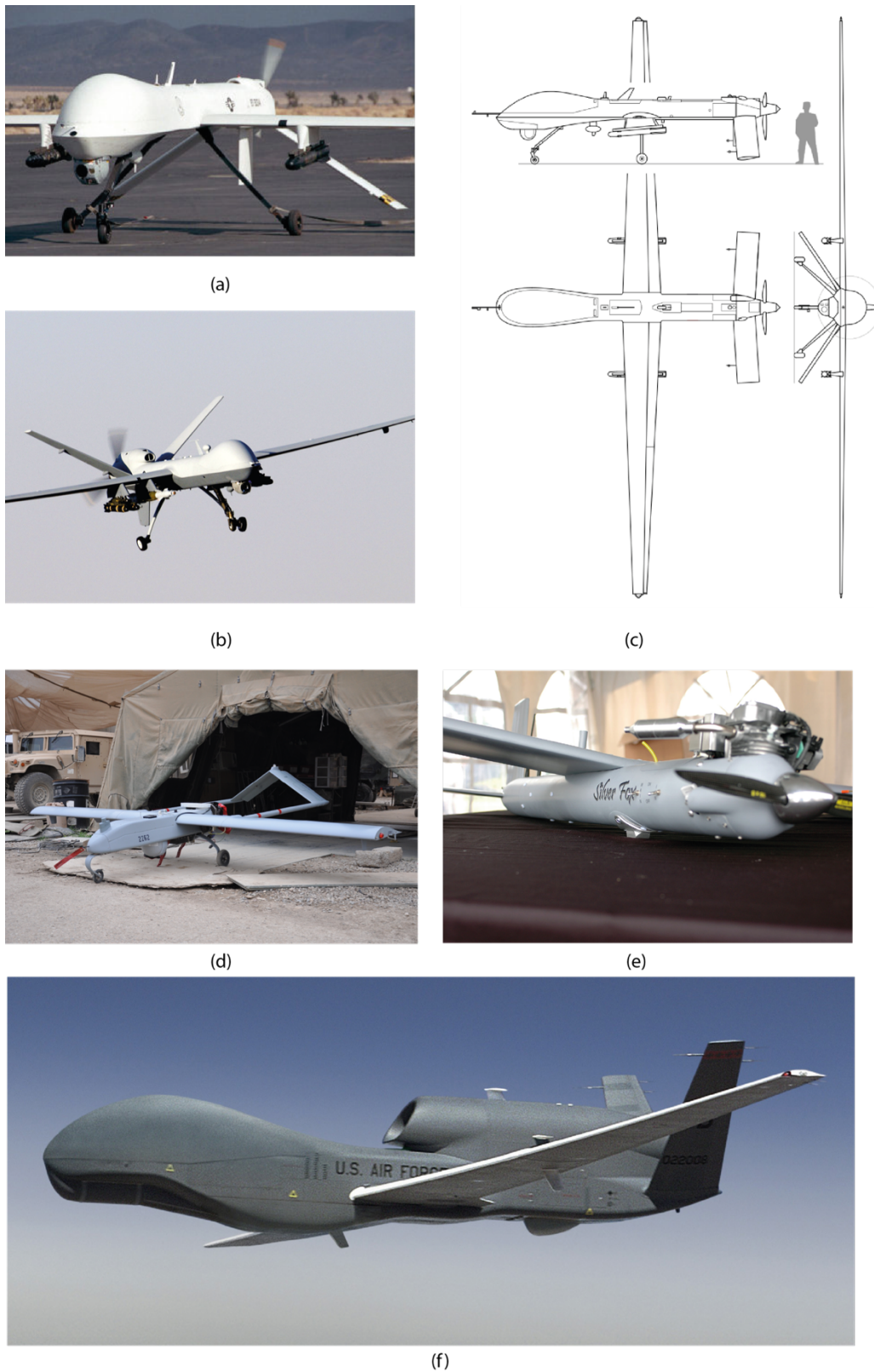


Figura 7 Sistemas UAV de la década de los 2000 hasta hoy tipo ala fija: (a) Predator, (b) Reaper, (c) 3 vistas del Predator, (d) Shadow, (e) Silver Fox y (f) Global Hawk.

Dentro de los sistemas de ala rotatoria se están haciendo igualmente importantes avances, que se están empleando tanto en operaciones civiles como militares. Algunos ejemplos de esta arquitectura incluyen el Hummingbird, el Camcopter S-100 o el Firescout. El modelo Hummingbird (Figura 8.a), desarrollado por Boeing Advanced Systems, es un sistema de tipo helicóptero diseñado para operar en un rango de alcance de 4.000 km durante 24 horas a una altura de 9.100 m. Debido a los continuos problemas técnicos con resultados de accidentes el programa se canceló justo cuando iba ser desplegado en la guerra de Afganistán. De producción austriaca, el Camcopter S-100 (Figura 8.b), es un UAV de tipo VTOL diseñado principalmente para operaciones navales que esta siendo empleado por un gran numero de países entre los que se encuentra España, concretamente esta siendo empleado por la Guardia Civil en tareas de vigilancia marítima y fronteriza.



(a)



(b)

Figura 8 Sistemas UAV de la década de los 2000 hasta hoy tipo ala rotatoria: (a) Hummingbird, (b) Camcopter S-100

Es en esta década cuando irrumpen con fuerza los UAS en aplicaciones en el mundo civil independientemente del tipo de sistema. De este modo plataformas que se estaban empleando en misiones militares pasan a emplearse principalmente en misiones de observación de la Tierra. Por ejemplo, la National Aeronautics and Space Administration (NASA) comienza a participar en el desarrollo y uso de sistemas como el Helios, Altair, Ikhana o Zephyr en sus proyectos. El sistema Helios (Figura 9.a) es un sistema alimentado por energía solar diseñado con dos propósitos, ser un satélite atmosférico de alta proximidad al tiempo que dar soporte como plataforma de comunicaciones. Actualmente se encuentra en fase de prototipo, y cuenta con el mérito de haber alcanzado la altura mas alta de un vuelo no tripulado con una altura total de 29.524 m. El sistema Altair (Figura 9.b) y el Ikhana se presentan como una adaptación y evolución del sistema Predator hacia estas nuevas aplicaciones. Destacar el sistema Zephyr

(Figura 9.c), proyecto con un diseño conceptual similar al sistema Helios que ha llevado a formular una nueva tipología de UAS, concretamente los High Altitude Pseudo Satellite (HAPS). El proyecto fue comprado en 2013 por EADS Astrium y en 2014 estuvo volando en invierno de forma ininterrumpida durante 11 días. A futuro se tiene por objetivo que esté volando por periodos próximos a seis meses, bajando a tierra solo para tareas de mantenimiento. En 2007, se transfirió a NASA un UAS Global Hawk (Figura 9.d) con objeto de desarrollar nuevas aplicaciones desde un punto de vista científico para este sistema. Ya se está aplicando en proyectos de observación de la capa de ozono, medida de contaminantes y aerosoles atmosféricos. Se está planteando la posibilidad de emplearlo en proyectos de observación del Antártico. En el año 2010 voló de forma satisfactoria sobre el huracán Earl en la costa este de Estados Unidos (Figura 9.e), esto ha tenido como resultado que se estén volando tanto tormentas como huracanes de forma regular con este sistema (Figura 9.f), aumentando el conocimiento científico de estos fenómenos.

Es a partir de la década de los 2000 cuando el tamaño de los UAS comienza a reducirse, así como necesariamente la carga de pago o payload. La consecuencia directa es que aparecen un gran número de sistemas pequeños, incluso miniaturas, operando hoy día de forma activa debido a que se han convertido en sistemas versátiles, fáciles de mantener y de transportar así como a un coste económico reducido nada comparable con los sistemas de alto nivel tanto militar como de uso por agencias gubernamentales. De este modo encontramos un sin fin de ejemplos como el Skylark, Evolution, Puma, Aerocon Inspector de fabricantes muy diversos. De esta forma han surgido repartidas por todo el mundo numerosas compañías dedicadas al diseño y desarrollo de nuevos sistemas a emplear por el gran público, tanto de tipo ala giratoria como ala fija.

A futuro se plantean diferentes frentes que necesitan de análisis, investigación y desarrollo tanto a nivel tecnológico, de roles, como incluso de nuevos retos hasta hoy día impensables. El empleo de nuevos materiales, mas ligeros y resistentes, permitirá el aumento de los tiempos de vuelo. Uno de los aspectos mas críticos en el uso de sistemas UAS es tanto el lanzamiento como la recuperación de la plataforma. Este aspecto es sobre todo significativo en las plataformas de ala fija frente a las de ala giratoria, presentando estas últimas una tasa de incidentes menor así como mayor facilidad en el manejo. Nuevos sistemas se están evaluando actualmente como el Eagle Eye desarrollado por Bell Helicopter, esta plataforma presenta los motores en una

configuración rotatoria de tal forma que en las operaciones de despegue y aterrizaje el sistema trabaja en modo VTOL para luego en vuelo girarlos y trabajar como un UAS de ala fija. Otro aspecto en el que se está trabajando es en dotar al sistema de la capacidad de ver y evitar, con objeto de hacer la navegación más segura. En cuanto a nuevos roles, la mejora de las prestaciones y fiabilidad de estos sistemas permitirá a futuro el transporte de maquinaria, robots o incluso personas. En este sentido además del desarrollo tecnológico se hace necesario la definición de un marco regulatorio donde se asegure en todos los aspectos la coexistencia con plataformas tripuladas.

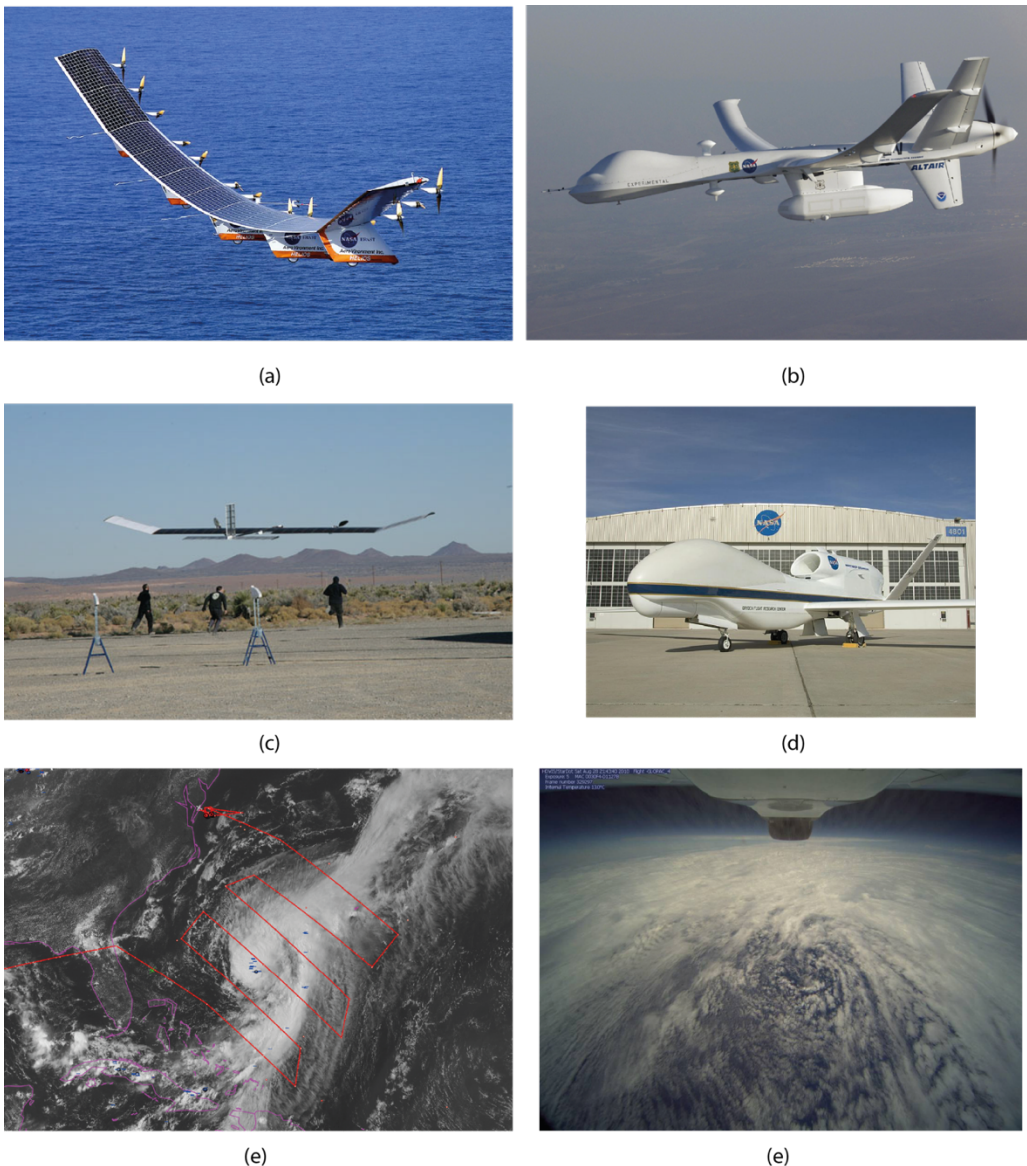


Figura 9 Sistemas UAV para aplicaciones civiles: (a) Helios, (b) Ikhana, (c) Zephyr, (d) Global Hawk, (e) ruta de vuelo sobre el huracán Cristóbal, (f) patrón de circulación de la tormenta tropical Frank en California.

Si bien tal y como ha quedado reflejado en este capítulo, la naturaleza y desarrollo de los UAS ha sido militar, es innegable que se ha despertado el interés del gran público. El crecimiento de usos civiles y comerciales esta creciendo cada año al tiempo que se mantienen las aplicaciones militares. Tal y como refleja el estudio realizado por UVS Internacional (UVS-International 2014) entre el periodo 2005 – 2013 se han triplicado las referencias UAS y duplicado los productores y desarrolladores de sistemas. En este periodo, año a año se han ido incrementando las aplicaciones civiles, de 55 en el año 2005 a 247 en el año 2013 y se han duplicado los proyectos de investigación. La sociedad civil desde 2011 muestra un aumento por el interés por este tipo de tecnologías como muestra la Figura 10 donde se representa la frecuencia de búsqueda de términos relativos a tecnología UAV en la WEB. En ella se observa como el término UAS se mantiene prácticamente constante a lo largo del tiempo en el número de búsquedas. A partir de 2011 el término UAV presenta fluctuaciones. Estos dos acrónimos son los mas técnicos, no siendo una referencia de búsqueda para el público en general, mas acostumbrado a emplear el término Drone. Éste último puede observarse como desde 2011 ha experimentado un notable aumento en el número de consultas. Como se observa en la gráfica, además aparecen una serie de picos de máxima intensidad de búsquedas. Todos ellos aparecen relacionados con algún tipo de acontecimiento. El mas reciente, etiquetado como 1, es de 2015 y aparece relacionado con una noticia relacionada con la muerte de dos civiles occidentales por un ataque de drones contra Al-Qaeda, pidiendo el presidente de Estados Unidos disculpas, igualmente el pico numerado como 3 se corresponde con otra acción militar en este caso en Israel. El interés despertado en la sociedad civil no solo aparece motivado por asuntos militares, el pico etiquetado como número 2 coincide con el periodo navideño de 2015 y el número 4 coincide con la noticia de que Amazon esta trabajando en un proyecto para emplear drones en el reparto de paquetería.

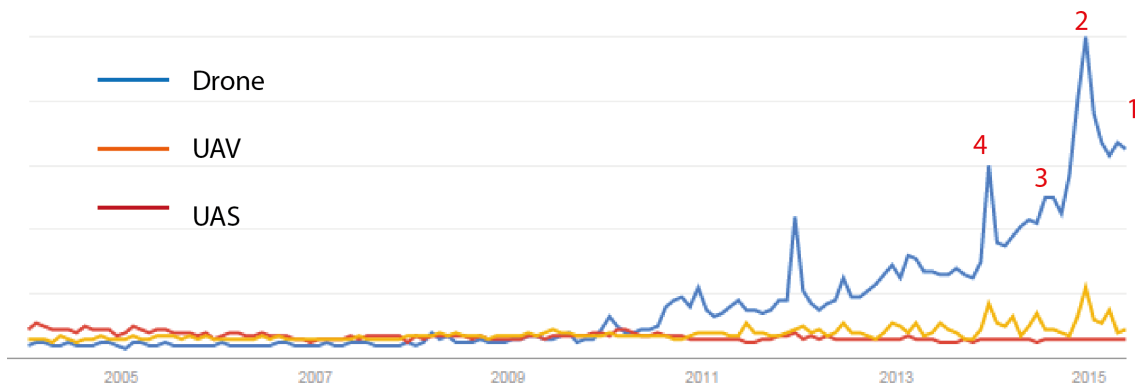


Figura 10 Evolución número de consultas en el portal Google de términos relacionados con UAS.

Desde un punto de vista geográfico el mayor interés aparece en Estados Unidos, Canadá, Australia e Israel tal y como muestra la Figura 11 entre 2007 y 2008. Este interés desde 2011 va en aumento, extendiéndose por Europa y algunos países como Pakistán o Suráfrica. En 2013 la tecnología se introduce en las economías emergentes como Chile y Brasil. Además, países como India aparece resaltados desde 2014, probablemente por intereses militares.

A la vista de estos datos es posible afirmar como el interés del gran público por estas tecnologías va en aumento y que todo lo iniciado y desarrollado por motivos militares se está incorporando a la sociedad civil al igual que otras tecnologías lo hicieron anteriormente como el sistema GPS. Por lo tanto es posible afirmar que a corto plazo la progresión y evolución de estas tecnologías se incrementará, desarrollando plataformas mas estables y segura, equipadas con sensores de mayores prestaciones, navegando en el espacio compartido con plataformas tripuladas.

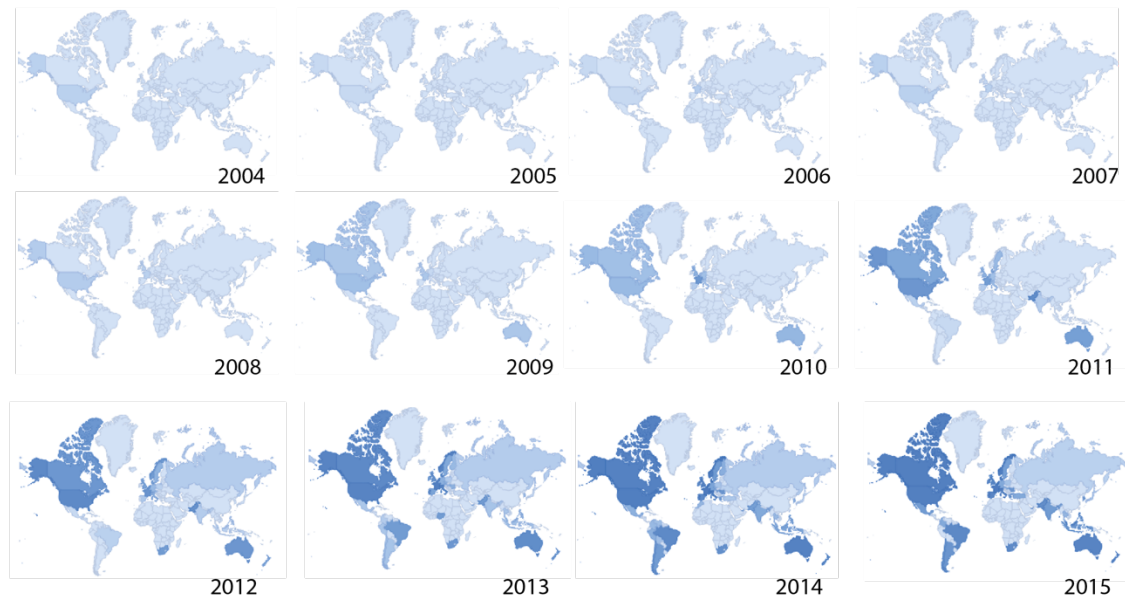


Figura 11 Evolución número de consultas en el portal Google de los términos Drone, UAV y UAS

2 MARCO NORMATIVO Y JURÍDICO

Imponer condiciones excesivamente duras es dispensar de su cumplimiento.

Napoleón Bonaparte (1769-1821).

La actividad aeronáutica se encuentra regulada en distintas ramas del ordenamiento jurídico y por tanto aquellas desarrolladas mediante una plataforma aérea no tripulada también. Ejemplo de ello es posible encontrar en el Derecho Internacional Público a través de Tratados Internacionales o el funcionamiento de las organizaciones internacionales, en el Derecho Administrativo mediante la regulación de licencias de operadores, personal de vuelo o las concesiones de explotación, en el Derecho Mercantil por medio de contratos de transporte, sobre la aeronave o la responsabilidad de los operadores, entre otros. De este modo es posible afirmar que la actividad posible a realizar mediante este tipo de plataformas no necesita de un desarrollo normativo desde el inicio, tan solo de la consideración de aspectos particulares y concretos.

2.1 Contexto internacional y europeo

Si bien resulta poco probable que la mayoría de los vuelos a realizar mediante un UAS se vean involucrados en navegación aérea internacional, habrá que prestar especial cuidado en aquellos trabajos realizados cerca de zonas fronterizas con otros Estados.

La navegación aérea presenta por su propia naturaleza la necesidad de establecer un conjunto de normas con carácter internacional. Tal aspecto fue reconocido el 7 de Diciembre de 1944 a través del Convenio de Chicago sobre aviación civil. A través de

dicho convenio se creó la Organización de Aviación Civil Internacional, en adelante OACI (www.icao.int). En este contexto, la OACI es un organismo independiente y especializado de la ONU que tiene por objeto el desarrollo de normas, métodos y recomendaciones que los Estados firmantes del convenio se comprometen a cumplir a través de sus normativas de aviación civil. El Convenio reconoce el principio de que todo Estado tiene soberanía plena y exclusiva del espacio aéreo de su territorio, estableciendo que ningún servicio aéreo internacional no programado, puede operar sobre o dentro de un territorio de un estado contratante sin un consentimiento previo.

Entre las funciones principales de OACI destacan:

1. Promover el desarrollo de la aviación civil internacional.
2. Servir de foro para la discusión y el debate.
3. Promocionar la cooperación y la resolución de conflictos.

Los objetivos definidos por OACI son la mejora de la seguridad de la aviación civil, el fomento y desarrollo de un sistema de aviación civil viable en términos económicos y la reducción al mínimo de los efectos ambientales negativos derivados de las actividades de la aviación civil.

La OACI esta constituida por 191 Estados contratantes entre los que se encuentra España, contando con un representante permanente en el Consejo y un miembro en la Comisión de Navegación Aérea, y participando en los grupos de trabajo que desarrollan la normativa en materia de aviación civil.

El artículo 8 del Convenio sobre Aviación Civil Internacional, firmado en Chicago el 7 de Diciembre de 1944 y enmendado por la Asamblea de la OACI (OACI 2011) ya hace referencia a las plataformas no tripuladas, estipulando que:

"Ninguna aeronave capaz de volar sin piloto volará sin él sobre el territorio de un Estado contratante, a menos que se cuente con autorización de tal Estado y de conformidad con los términos de dicha conformidad. Cada Estado contratante se compromete a asegurar que los vuelos de tales aeronaves sin piloto en las regiones abiertas a la navegación de las aeronaves civiles sean controlados de forma que se evite todo peligro a las aeronaves civiles."

Con objeto de armonizar todos los conceptos y terminología relacionada con los sistemas no tripulados (UAS) y contar con un documento base para el desarrollo de normativas se desarrollo la *Circular 328, Sistemas de Aeronaves no Tripuladas (UAS)*

(OACI 2011). En este documento la OACI integra dentro del sistema de aviación civil internacional todas aquellas aeronaves pilotadas por control remoto, no considerando al resto de los UAS, como aeronaves plenamente autónomas u otros tipos de aeronaves que no pueden dirigirse en tiempo real durante el vuelo.

La creación de la OACI consagra las nueve libertades del aire e impone un conjunto de obligaciones a los Estados relacionadas con el correcto funcionamiento de la aeronáutica civil. Desarrolla igualmente instrumentos normativos, actualmente 54, como el Convenio de Varsovia, el de Montreal o el de Roma entre otros.

Dentro del contexto europeo, la seguridad aérea aparece regulada por el Reglamento (CE) no 216/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de Febrero de 2008, siendo los organismos relacionados con la aviación civil la Conferencia Europea de Aviación Civil (CEAC), Eurocontrol y la propia Unión Europea (Figura 12). Estos organismos trabajan de forma conjunta con otras organizaciones e instituciones. La CEAC surgió como una iniciativa del Consejo de Europa en el año 1951. Los primeros encuentros fueron en Paris en el año 1953 para finalmente en el año 1954 celebrar la primera conferencia para la coordinación del transporte aéreo en Europa. La CEAC nace como una organización regional cuyo objetivo principal es la promoción y desarrollo de modo continuado de un sistema de transporte aéreo europeo seguro, eficiente y sostenible. Por otro lado, Eurocontrol es una organización con personalidad jurídica propia que nace a raíz del Convenio Internacional para la Seguridad de la Navegación Aérea de 13 de Diciembre de 1960, siendo integrada por organizaciones civiles y militares. Por último, la Unión Europea (UE) ha ido asumiendo responsabilidades en aspectos relacionados con el transporte aéreo, regulando aspectos como la seguridad operacional, aeropuertos y los derechos de los pasajeros entre otros. Para ello ha creado la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) y desarrollado e implantado regulaciones como normas básicas operacionales, de protección del medioambiente o la implantación del Cielo Único Europeo¹ (CUE). El CUE tiene por objeto reducir la fragmentación del espacio aéreo europeo (entre Estados miembros, entre uso civil y militar y entre tecnologías), incrementando la capacidad y la eficiencia en la gestión del

¹ El Cielo único europeo es una iniciativa comunitaria, encuadrada dentro de los Tratados de la Unión Europea, que pretende reformar la arquitectura del sistema de gestión de tránsito aéreo europeo permitiendo el cumplimiento de las necesidades futuras de capacidad y de seguridad así como con los requisitos medioambientales cada vez más exigentes.

tránsito aéreo y de los servicios de navegación aérea. Dada su localización geográfica, reseñar que Gibraltar se encuentra actualmente fuera del CUE.

En el contexto europeo, EASA (creada en virtud del Reglamento (CE) 1592/2002) es un elemento principal dentro de la estructura organizativa y estratégica en materia de seguridad aérea de la UE, situándose en el centro de todo el sistema normativo dentro un mercado único europeo en el sector aeronáutico. Entre las competencias de EASA cabe destacar:

1. Redacción de regulación sobre seguridad aérea y asesoramiento a la Comisión Europea y sus estados miembros.
2. Garantizar el cumplimiento de la legislación europea de seguridad aérea.
3. Certificar tipos de aeronavegabilidad y medioambiental de productos aeronáuticos.
4. Coordinación de programas de seguridad, toma y análisis de datos para la mejora de la seguridad aérea.

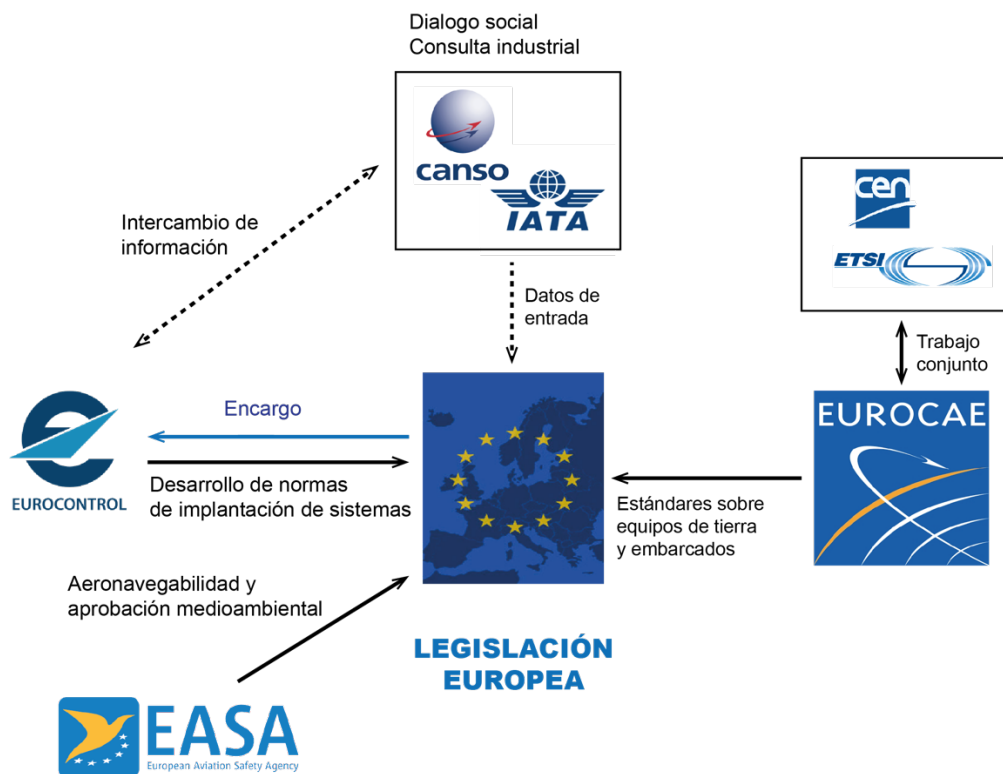


Figura 12 Esquema relacional organismos europeos e instituciones en materia de transporte aéreo.

En el caso del uso de UAS, el artículo 4.4 y su Anexo II apartado i, del Reglamento 216/2008 excluye aquellas plataformas no tripuladas cuya masa operativa no sea superior a 150 kg. De este modo, actualmente corresponde a los Estados Miembros las competencias de regulación del uso de UAS, si bien se está trabajando actualmente por parte de EASA en una modificación del reglamento para la no exclusión de estas plataformas por la masa operacional. EASA es consciente del rápido aumento de las actividades de pequeños UAS, concretamente aquellos que son pilotados remotamente (Remote Piloted Aircraft Systems, RPAS), en múltiples aplicaciones. Solo en Europa se tiene registrados un total de 2.495 operadores en el año 2015 y más de 100 fabricantes de sistemas menores de 150 kg. Ante este escenario, 16 países han desarrollado reglamentos con carácter nacional y 11 están en fase de desarrollo. Tales marcos regulatorios no están armonizados actualmente. La regulación que se está desarrollando actualmente por parte de EASA está teniendo en cuenta lo establecido por OACI y Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems (JARUS). Esta última organización es una asociación de carácter mundial formada por las autoridades nacionales con competencia en aviación civil. JARUS tiene por objeto la presentación de normas relacionadas con UAS, desarrollando un marco normativo armonizado. En el año 2016 se tiene previsto por parte de JARUS la publicación de todos los trabajos desarrollados hasta la fecha.

En este escenario, Europa está actualmente trabajando de forma activa en el desarrollo de un marco normativo para UAS de masa inferior a 150 kg. En una primera reunión sobre RPAS la Comisión acordó:

1. El objetivo a alcanzar es la integración de RPAS dentro del sistema de aviación.
2. El marco normativo a desarrollar tiene que ser proporcional al nivel de riesgo. Todas las reglas tienen que ser elaboradas con un carácter integrador por todos los Estados miembros.
3. Tener presente la seguridad, protección y privacidad de los datos y los ciudadanos.

Los trabajos encomendados a EASA por parte de la Comisión son:

1. Elaborar un proyecto de evaluación del impacto sobre la integración de RPAS.
2. Desarrollar un proyecto de modificación de la Regulación actual con objeto de permitir a futuro el desarrollo de una normativa específica para RPAS.

3. Desarrollar un conjunto de tipologías de operación que tengan en consideración con carácter proporcional el riesgo asociado a estas.

En el ICAO RPAS Simposio, celebrado en Montreal en Marzo 2015, EASA expuso el modelo conceptual en el que esta trabajando para el desarrollo del marco regulatorio, que esta sustentado en un marco proporcional, progresivo, basado en el riesgo y apoyado en estándares de la industria aeronáutica. Todas las normas que se desarrollen tiene que tener en cuenta todos los sistemas, considerando al mismo nivel las operaciones comerciales como no comerciales. En este sentido exponen que tienen definido tres tipos de categorías de operaciones, con las siguientes características:

1. Abiertas: Establecen que son operaciones con un riesgo bajo, no implicando a la Autoridad de aviación. Presentan como restricciones que solo se podrán desarrollar con vuelos a línea vista (Visual Line of Sight, VLOS), con una altura máxima sobre el terreno limitada y a una distancia de proximidad limitada a aeropuertos y zonas sensibles. Solo se podrá volar en zonas urbanas en el caso de no volar sobre agrupación de personas.
2. Específicas: Esta tipología aumenta el factor de riesgo, de esta manera es necesario una evaluación de la seguridad. El vuelo tiene que estar aprobado por una Agencia, siendo necesario tener desarrollado un manual de operaciones. Será necesario disponer de un certificado de aeronavegabilidad y acreditar la competencia del personal que intervenga en la operación, realizando una evaluación de riesgos.
3. Certificada: Tiene la misma consideración que un vuelo tripulado. Las diferencias entre este tipo de operación y la específica aun no esta bien desarrollada por parte de EASA.

Ante este escenario, la competencia a nivel normativo actualmente recae sobre los Estados miembros de la UE para vuelos RPAS de masa inferior a 150 kg, si bien en 2016 se espera tener un marco normativo único con el que operar de forma homogénea en Europa.

Con fecha Septiembre 2015, EASA ha publicado un informe titulado "*Propuesta para establecer reglas comunes para la operación de drones en Europa*". En el se reconoce la necesidad de modificar el marco normativo actual, entre otros motivos por la evolución tecnológica de los últimos años, la disparidad de plataformas y usos, así como su potencia para la creación de puestos de trabajo. El enfoque que se esta elaborando

pretende dar un enfoque de proporcionalidad y dirigido al objetivo de la operación. Una vez finalizado todo el proceso EASA pretende publicar una propuesta a modo de Dictamen de la EASA para que sea la Comisión Europea la que lo implemente. El informe en el que se está trabajando aparecen 33 propuestas donde se contemplan las operaciones tanto comerciales como no comerciales y tres categorías de operación:

- a) Categoría abierta o de bajo riesgo, en ella se contemplan limitaciones operacionales y un mínimo de normas, siendo la policía la que se encargue de velar por su cumplimiento. En esta categoría se obligará a contacto visual con la aeronave, peso inferior a 25 kg, altura sobre el terreno (Above Ground Level, AGL) máxima igual a 150 m, incluyendo el concepto de geo-fencing, restringiendo el acceso a determinadas áreas.

Dentro de esta categoría se diferenciarán tres subcategorías:

- CAT A0: “Juguetes y minidrones”, con un peso inferior a 1 kg. Estos no podrán operar a mas de 50 m AGL.
 - CAT A1: “Drones muy pequeños”, con un peso de menos 4 kg. Si se quiere volar a mas de 50 m AGL será necesario demostrar conocimientos básicos de aviación.
 - CAT A2: “Drones pequeños”, de menos de 25 kg. Si se quiere volar a mas de 50 m AGL será necesario demostrar conocimientos básicos de aviación.
- b) Categoría específica o de riesgo medio, necesitará de una autorización aeronáutica nacional, siendo necesario realizar una evaluación de riesgos y contar con una autorización de la operación por parte de la autoridad competente del Estado del operador. Las plataformas de vuelo deberán ser certificadas o aprobadas.
- c) Categoría certificada o de riesgo alto, sus requisitos serán equiparables a la de una aeronave tripulada, debiendo asegurar la aeronavegabilidad del dispositivo y el cumplimiento de las normas medioambientales de igual forma que se hace actualmente para la aviación tripulada con la emisión de un certificado de tipo o un certificado de tipo restringido para el diseño de tipo y un certificado de aeronavegabilidad o un certificado de aeronavegabilidad restringida para el dron en particular. El piloto necesitará ser titular de una licencia de vuelo.

2.1.1 Marco normativo en otros Estados Miembros de la Unión Europea.

En el caso de **Austria**, desde el 1 de Enero de 2014, se regularon las operaciones con RPAS. Tal regulación diferencia entre RPAS por debajo de 25 kg y de 25 a 125 kg de MTOW. En dicha normativa se establecen una lista de requisitos para la certificación como son el peso, el riesgo potencial para la aviación, el hombre y el medio ambiente, funcionamiento y un certificado de ruido. La autoridad competente es Austro Control, la cual emite un permiso para la realización de la operación, correspondiendo al operador cumplir con todos los requisitos legales y normativos. Distinguen dos tipologías de RPAS dependiendo si realizan vuelos VLOS o fuera de línea vista (Beyond Visual Line of Sight, BVLOS). Dependiendo del tipo de operación, masa máxima al despegue MTOW y de las características de la zona de trabajo es necesario cumplir una serie de requisitos técnicos, operacionales y de personal.

Dinamarca tiene desarrollada en el texto BL 9-4 de 3 de Enero de 2004 la regulación para aeronaves con MTOW inferior a 25 kg. En dicho texto se definen un conjunto de regulaciones generales y otras de carácter específico. Con carácter general no es posible operar siempre que personas o propiedades estén expuestas a peligro, la distancia a aeródromos, aeropuertos y bases militares debe ser al menos de 5 km. La distancia a zonas pobladas o vías de comunicación principal tiene que ser al menos de 150 m, siendo la altura AGL máxima no superior a 100 m. Con carácter específico, aquellos sistemas con un MTOW superior a 7 kg e inferior a 25 kg, incluyendo aquellos que emplean motores de combustión y propulsión tienen que ir equipados con un sistema de radio control, siendo aprobados previamente por la Autoridad Civil.

Francia, a través del Ministerio de Ecología, Desarrollo Sostenible y Energía, ha desarrollado una regulación bastante extensa sobre el uso de RPAS. Esta regulación entró en vigor el 11 de Abril de 2012 con el objetivo de separar el uso de los RPAS del resto de usuarios en el mundo de la aviación, minimizando el riesgo de personas y bienes. Su uso está prohibido cerca de las inmediaciones de cascos urbanos o emplazamientos donde haya reuniones de personas, vuelos sobre carreteras, aeródromos y aeropuertos, plantas nucleares, zonas militares y monumentos históricos. En el caso de aeródromos no está permitido volar a menos de 5 km de ellos, siendo ampliada a 15 km para el caso de aeropuertos con un campo de aviación mayor y pistas de 1200 m. La altura máxima de vuelo es igual a 150 m AGL con objeto de minimizar el riesgo de colisión con plataformas tripuladas. El vuelo ha de realizarse a línea de vista,

no perdiendo en ningún momento contacto visual con la plataforma. Quedan prohibidos los vuelos nocturnos. Dicha regulación contempla la privacidad de las personas, debiendo quedar garantizado ésta en todo momento, no pudiendo grabar imágenes de terceros sin su consentimiento.

La legislación francesa precisa la necesidad de contar con un certificado de aeronavegabilidad para aquellos RPAS de más de 25 kg. Para las plataformas de menos de 25 kg se necesita de un permiso específico tras el análisis de los equipos y componentes instalados. Los operadores deben contar con un manual de operaciones y firmar un declaración jurada del cumplimiento de los requisitos de la norma francesa. Además necesitan acreditar una formación teórica sobre el uso de RPAS.

Se definen las siguientes tipologías de aeronaves:

- Categoría C: Corresponde con plataformas "cautivas", con contacto mediante cable.
- Categoría D: Aeronaves de menos de 2 kg.
- Categoría E: Aeronaves entre 2 y 25 kg.
- Categoría F: Aeronaves de más de 25 kg y menos de 150 kg.
- Categoría G: Aeronaves de más de 150 kg (reguladas por EASA).

La legislación francesa define cuatro escenarios de trabajo de RPAS, los cuales podrán ser realizados en función de la tipología de la aeronave:

- S-1: Operación con contacto visual y distancia horizontal de separación máxima de la aeronave de 100 m. Tales operaciones puede ser realizadas por las plataformas de categoría C, D y E.
- S-2: Operación fuera de la línea de vista de una zona poblada con distancia de separación 1 km y una altura de 50 m AGL o sobre obstáculos, sin la presencia de persona cerca de la zona de maniobra. En este marco operacional es válido el uso de plataformas de categoría D y E.
- S-3: Operaciones cerca de zonas urbanas, personas o animales con una distancia horizontal máxima de 100 metros de la plataforma de vuelo. Tales operaciones serán desarrolladas por las aeronaves de categoría C, D, E o masa inferior a 4 kg.
- S-4: Operaciones relacionadas con el registro de imágenes, observación de áreas y control que no cumplan los requisitos definidos en el escenario S-2. Tales operaciones se realizaran con aeronaves tipo D.

En **Irlanda** la regulación del uso y operaciones de RPAS se establece en la *Irish Aviation Authority (Rockets and Small Aircraft) Order (2000)*, la cual se encuentra actualmente en proceso de revisión. Adicionalmente, la orden aeronáutica O.63 define los requisitos para que un operador obtenga los permisos por parte de la Autoridad para operar un RPAS. Dicha orden establece que el marco operacional de un RPAS tiene que cumplir con los mínimos requisitos de estándares de seguridad exigidos a una operación tripulada, no pudiendo ser realizada sino se cuenta con un permiso específico emitido por la Autoridad. Además, en el caso de que el uso de RPAS tenga fines comerciales tales como cartografía, grabación de video, fotografía, etc., el operador tiene que enviar solicitud a la Autoridad para la realización de dicho vuelo.

La Irish Aviation Authority (IAA) en su documento "Operation of Remotely Piloted Aircraft Systems in Irish Airspace" (2014) establece que:

- Los vuelos a realizar con RPAS no puede ser realizados fuera de línea de visión del operador, no pudiendo emplear sistemas alternativos de visión y seguimiento. En ningún caso podrán alejarse más de 500 metros del punto de operación.
- Es obligatorio por parte del operador desarrollar un manual de operaciones donde se debe informar del procedimiento de despegue y aterrizaje, del procedimiento de seguimiento en vuelo, de la pérdida de comunicaciones y del modo y mecanismos de abortar un vuelo en caso de fallo del sistema.
- Un RPAS no podrá ser operado a una altura mayor de 120 m (400 pies) sobre el terreno.
- Un RPAS no podrá operar sobre zonas sensibles salvo con permiso escrito de la Autoridad.
- Un RPAS no puede ser operado en zonas controladas para el tráfico aéreo salvo que se cuente con permiso escrito del Autoridad de Control de dicha zona.
- Un RPAS no puede ser operado dentro de un radio de acción de 8 km de un aeródromo a excepción de contar con permiso escrito de la Autoridad de Control de dicha zona.
- Un RPAS no podrá volar sobre una persona o grupo de personas, manteniendo una distancia de seguridad al grupo de personas de 150 m.
- Durante el despegue y el aterrizaje un RPAS no puede estar a menos de 50 m de una persona salvo que esta sea la que tenga el control.
- Un RPAS no podrá volar más cerca de 2 km de un aeropuerto.

Dado que no existe un estándar europeo sobre la cualificación exigida a los operadores, la IAA es la que establece tales requisitos. Éstos deben cubrir desde aspectos teóricos tales como aerodinámica, meteorología, navegación, limitaciones aeronaves, etc. a aspectos prácticos que demuestren el conocimiento de la aeronave.

En cuanto al mantenimiento del sistema, la IAA establece que pese a no existir regulación alguna, el operador debe asegurar el correcto funcionamiento del sistema, siendo necesario contar con el personal cualificado para dicho mantenimiento.

En **Italia** el organismo que regula el uso de RPAS es el Ente Nazionale per L'Aviazione Civile (ENAC), estableciendo éste que el uso de RPAS se encuentra siempre sujeto a la posesión de la licencia de operador por parte de dicho organismo. El uso de RPAS queda dividido en dos grandes grupos: operaciones especializadas o actividades de investigación. ENAC establece que debe haber un acuerdo entre el operador de RPAS y el cliente que contrata el servicio para, por un lado fijar las responsabilidades respectivas, el cumplimiento de la protección de datos y del cumplimiento de las restricciones fijadas por la Autoridad. Al igual que otros Estados Miembro, ENAC diferencia entre operaciones VLOS y BVLOS.

La Agencia del Transporte de **Suecia**, en su texto "The Swedish Transport Agency's regulations on unmanned aircraft systems (UAS): TSFS 2009:88" desarrolla toda la regulación referente a la materia que no aparece cubierta por la normativa europea. Distingue entre cuatro categorías diferentes de UAS atendiendo a su MTOW como otros estados miembros y la máxima energía cinética² (Maximum Kinetic Energy, MKE), llevando cada una de éstas un conjunto de restricciones a la hora de operar:

- Categoría 1A: Presentan un MTOW inferior o igual a 1.5 kg, un valor de MKE igual a 150 J y siempre volando en modo VLOS.
- Categoría 1B: Comprende aquellas plataformas con MTOW superior a 1.5 kg e inferior o igual a 7 kg que desarrollan un MKE de 1000 J y siempre operan en VLOS.
- Categoría 2: Tiene un MTOW superior a 7 kg y vuelan en modo VLOS.
- Categoría 3: Aquellas plataformas certificadas para volar y ser controladas en modo BVLOS.

² Trabajo necesario para parar un cuerpo en movimiento. Se usa en la regulación sueca para describir el impacto de energía y calculado como $E_k = m_{max} \cdot v_{max}^2 / 2$; siendo m_{max} MTOW y v_{max} la velocidad de impacto.

Desde un punto de vista operacional esta es la regulación mas completa actualmente, indicando las acciones a considerar en la fase de planificación de un vuelo y durante el vuelo. En este sentido tiene en consideración las condiciones meteorológicas, la capacidad de las baterías o del combustible, los sistemas de comunicación.

Al igual que otros Estados miembro, establece los requerimientos en cuanto a personal, permisos, etc.

2.2 Situación en España

Tal y como establece la Ley 21/2003, de 7 de Julio, de Seguridad Aérea, la autoridad de la Administración aeronáutica española esta depositada en el Ministerio de Fomento, teniendo por objeto la ordenación, supervisión y control de los diferentes sectores de actividad que conforman la aviación civil. En el organigrama de este Ministerio, es la Dirección General de Aviación Civil (DGAC) la autoridad que define las condiciones de funcionamiento de este sector. Con objeto de adaptarse al dinamismo del sector el propio director de la DGAC tiene atribuida la potestad de dictar disposiciones reglamentarias de carácter secundario y de contenido técnico y especializado, denominadas "Circulares Aeronáuticas" con objeto de precisar, completar y asegurar el cumplimiento de las normas con finalidad de asegurar la seguridad de las operaciones aéreas.

La organización administrativa se completa con la creación de un Consejo Asesor de Aviación Civil (CAAC) como órgano superior de asesoramiento y consulta de la Administración General del Estado en materia de aviación civil, adscrito igualmente al Ministerio de Fomento. En el artículo 10.2 de la Ley 21/2003 establece que el CAAC esta presidido por el Ministerio de Fomento y en el mismo aparecen representados los departamentos ministeriales y Administraciones públicas, que tengan competencias sobre aviación civil, los colegios y asociaciones profesionales del personal aeronáutico, las organizaciones sindicales mas representativas del sector de la aviación civil, las compañías aéreas, los fabricantes de productos aeronáuticos, las organizaciones y asociaciones aseguradoras relacionadas con seguros aéreos, organizaciones de usuarios, de personas con discapacidad y de mayores y los demás titulares de actividades relacionadas con la aviación civil.

Corresponde al Comité Nacional de Seguridad de la Aviación Civil, tal y como establece el RD 550/2005, la coordinación de las actividades en materia de seguridad, la

elaboración de Programas Nacionales de Seguridad para la Aviación Civil, desarrollo de procedimientos, etc.

La DGAC ve reducidas sus funciones a raíz de la creación de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), siendo el RD 184/2008, de 8 de febrero el que define sus estatutos. Esto tuvo como consecuencia la eliminación de tres Subdirecciones generales: la de explotación del transporte aéreo, la de control del transporte aéreo y la de sistemas de navegación aérea y aeroportuaria. El objeto de la creación de AESA es la de agilizar los procesos al no estar sujeta a la legislación de contratos administrativos, estando regulada por sus normas especiales.

Ante este contexto administrativo el derecho aéreo español queda definido por la Ley de Navegación Aérea, la Ley de Seguridad Aérea, el Reglamento de Circulación aérea, las Circulares aeronáuticas y las Resoluciones de AESA. Igualmente indicar que actualmente se está trabajando y hay un anteproyecto para presentar como propuesta a tener en cuenta dentro del Código Mercantil.

2.2.1 Ley de Navegación Aérea

La Ley 48/1960, de 21 de Julio, sobre navegación aérea, se corresponde con una Ley muy antigua que ha sido revisada en diferentes ocasiones mediante distintos Reales Decretos. Esta Ley contiene la regulación de la responsabilidad del transportista a nivel tanto contractual (pasajeros y mercancías) y extracontractual.

El concepto de RPAS queda introducido en el RD-Ley 8/2014, de 4 de Julio, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia y posteriormente en la Ley 18/2014 de 15 de Octubre. En la sección V del preámbulo de dicha Ley se reconoce la proliferación en el uso de estos sistemas debido a los avances científicos y tecnológicos así como la reducción del coste. La consecuencia directa se ha reflejado en un incremento en su uso, siendo necesario establecer el régimen jurídico específico de aplicación a estas aeronaves y a las actividades aéreas desarrolladas por ellas. Las condiciones establecidas en el RD 18/2014 tienen aplicación con carácter temporal y son complementadas con la Ley 48/1960.

El RD 18/2014 en su Sección 6ª, Aeronaves civiles pilotadas por control remoto, define el marco de trabajo con estas plataformas:

- Artículo 50. Operación de aeronaves civiles pilotadas por control remoto:

- Las operaciones de aeronaves civiles no pilotadas por control remoto quedan sujetas a lo establecido en este artículo.
- El responsable en todo momento es el operador, tanto de la aeronave como de la operación.
- Si la aeronave tiene un MTOW superior a 25 kg debe ser inscrita en el Registro de matrículas de aeronaves y disponer de un certificado de aeronavegabilidad.
- Todas las aeronaves tienen que tener una placa identificativa donde se informe del número de serie, nombre de la operadora y todos los datos necesarios para contactar con ésta.
- Las actividades y trabajos técnicos y científicos se podrán hacer de día y en condiciones meteorológicas visuales sujetas a los siguientes requisitos:
 - a) Aeronaves con MTOW inferior a 2 kg: Fuera de aglomeraciones de edificios en zonas urbanas o de reuniones de personas, en espacio aéreo no controlado, mas allá del alcance visual del piloto, dentro del alcance de radio y a una altura máxima de sobre el terreno no mayor de 400 pies (120 m). La operación estará condicionada a la emisión de una *Notice To Airmen* (NOTAM) a solicitud del operador.
 - b) Aeronaves con MTOW no superior a 25 kg: Solo podrán operar fuera de zonas urbanas o aglomeraciones urbanas, en espacio aéreo no controlado, en modo VLOS a una distancia no mayor de 500 m y a una altura AGL no mayor de 120 m.
 - c) Aeronaves con MTOW superior a 25 kg e inferior a 150 kg y aquellas cuyo MTOW sea superior a 150 kg destinadas a actividades de lucha contra incendios o salvamento: Solo podrán operar con las condiciones y limitaciones establecidas en su certificado de aeronavegabilidad emitido por AESA.
 - d) Además se requerirá:
 - i. Documentación para caracterizar la aeronave, manual de operaciones, estudio aeronáutico de seguridad.
 - ii. Haber realizado de forma satisfactoria un conjunto de vuelos de prueba.
 - iii. Establecimiento de un programa de mantenimiento de la aeronave.
 - iv. Tener contratada una póliza de seguro u otra garantía que cubra la responsabilidad civil frente a terceros por daños.

- v. Haber adoptado las medidas necesarias para garantizar la seguridad de la operación, protección de actos de interferencias ilícitas.
- vi. La distancia mínima de 8 km respecto de cualquier aeropuerto o aeródromo, o en el caso de vuelos de aeronaves con MTOW inferior a 2 kg, si la infraestructura cuenta con procedimientos de vuelo instrumental la distancia será de 15 km.
- o Los pilotos tiene que cumplir los siguientes requisitos:
 - a) Ser titulares de una licencia de piloto, incluidas las de ultraligero, emitida conforme a la normativa vigente, o haberlo sido en los últimos cinco años, y no haber sido desposeída de la misma.
 - b) Demostrar que se tienen los conocimientos teóricos para obtener cualquier licencia de piloto. Igualmente es necesario acreditar tener los conocimientos de la aeronave y sus sistemas, así como su pilotaje, emitido por el fabricante u organización autorizada por éste.
 - c) Para aeronaves con MTOW inferior a 25 kg:
 - i. En vuelos modo VLOS disponer de un certificado básico para el pilotaje de aeronaves civiles pilotadas por control remoto.
 - ii. En vuelos modo BVLOS disponer de un certificado avanzado.
 - d) El ejercicio de una actividad con una aeronave con MTOW inferior a 25 kg se comunicará a AESA con una antelación mínima de cinco días.
 - e) El ejercicio de una actividad con una aeronave con MTOW superior a 25 kg estará sujeta a la previa autorización de AESA.

2.2.2 Ley de Seguridad Aérea

La Ley 21/2003, de 7 de julio, de Seguridad Aérea, tiene por objeto determinar las competencias de la Administración General del Estado en materia de aviación civil, regular la investigación técnica de los accidentes e incidentes aéreos y establecer el régimen jurídico de la inspección aeronáutica, las obligaciones por razones de seguridad aérea y el régimen de infracciones y sanciones en materia de aviación civil.

En el artículo 4 de la Ley 21/2003 se establece que las competencias en materia de estructura y gestión del espacio aéreo y de circulación corresponden a los Ministerios de Defensa y Fomento. Entre las competencias del Ministerio de Fomento se encuentran:

- a) Ordenación y supervisión del transporte aéreo así como de las actividades y trabajos aéreos, la aviación general y la deportiva.
- b) Ordenación, verificación y control del cumplimiento de los requisitos y procedimientos establecidos para garantizar la seguridad aérea.
- c) Ordenación, otorgamiento y supervisión de los títulos que habilitan a personas y organizaciones civiles para la realización de actividades aeronáuticas.
- d) Ordenación, dirección y ejecución de la inspección aeronáutica civil, en el ámbito de las competencias de la Administración General del Estado .

El artículo 36 de “Obligaciones específicas de los operadores aéreos y el artículo 37 de “Obligaciones específicas de las compañías aéreas y empresas de trabajos aéreos” especifican un conjunto de requisitos, de los cuales algunos son de aplicación para el trabajo de RPAs tales como cumplir las condiciones, excepciones y limitaciones impuestas en las licencias o en las normas reguladoras, disponer de certificados, licencias o autorizaciones validos para la actividad a desarrollar, etc.

En el Título V “De las infracciones y sanciones” de la Ley 21/2003 aparece todo el articulado que deberá ser tenido en cuenta igualmente en el caso de uso de RPAS. Las infracciones administrativas son tipificadas como leves, graves y muy graves:

- Infracción leve: Entran dentro de esta tipología cualquier incumplimiento de las obligaciones establecidas en el Título IV de la Ley 21/2003.
- Infracción grave: El incumplimiento de los establecido en el título IV entra dentro de esta categoría si:
 - Se haya causado un incidente grave de aviación.
 - Se hayan producido lesiones a personas, según lo dispuesto en el Código Penal, o determinantes de baja laboral por periodo superior a siete días o incapacidad laboral.
 - Se hayan originado daños y perjuicios a bienes y derechos que, valorados de forma individual para cada sujeto afectado, alcancen una cuantía entre 5.000 y 15.000 €.
 - Originado retrasos por tiempo superior a cuatro horas en la prestación de servicios aeronáuticos.
- Infracción muy grave: El incumplimiento de los establecido en el título IV entra dentro de esta categoría si:
 - Se haya causado un accidente de aviación.

- Se haya causado la muerte de una persona.
- Se hayan originado daños y perjuicios a bienes y derechos, que valorados de forma individual para cada sujeto afectado, alcancen una cuantía superior a 15.000 €.
- Se haya causado la suspensión de la prestación de servicios aeronáuticos.

El artículo 55 del Capítulo II del Título V de la Ley 21/2003 establece las sanciones correspondientes a las infracciones definidas anteriormente del siguiente modo:

- Infracciones leves tendrán un apercibimiento o una multa entre 60 y 45.000 €.
- Infracciones graves tendrán una multa de 45.001 a 90.000 €.
- Infracciones muy graves con multa de 90.001 a 225.000 €.

En caso que la infracción fuera cometida con carácter comercial o que se realicen a cambio de una contraprestación económica no salarial las sanciones serán:

- Infracciones leves tendrán un apercibimiento o una multa entre 4.500 y 70.000 €.
- Infracciones graves tendrán una multa de 70.001 a 250.000 €.
- Infracciones muy graves con multa de 250.001 a 4.500.000 €.

Además de la sanción económica, en el supuesto de sanciones graves se podrá imponer la suspensión o limitación en el desempeño de funciones relacionadas con actividades aeronáuticas por periodo máximo de cinco años o la revocación en el caso de sanciones muy graves.

La competencia para la imposición de sanciones corresponde al Subsecretario de Fomento para casos de infracciones muy graves y en aquellos graves cuando la cuantía de la multa supere la cantidad de 300.000 €, y al Director General de Aviación Civil en los demás casos.

2.2.3 Reglamento de Circulación Aérea

Queda regulado por el RD 57/2002, de 18 de enero. La aplicación de este reglamento se realizará sobre las aeronaves españolas sujetas a las normas de la circulación aérea general, cualquiera que sea el espacio aéreo o el territorio en el que se encuentren, siempre que no se oponga a normas dictadas por el Estado que tenga jurisdicción sobre él. Igualmente las aeronaves extranjeras, que se encuentren en espacio aéreo o territorio de soberanía española o en espacio aéreo asignado a España tendrá que aplicarlo. De este modo regula en el ámbito nacional, la adaptación de las operaciones

de vuelo a las innovaciones técnicas que se producen, logrando un mejor aprovechamiento del espacio aéreo, un mejor uso de los medios de control disponibles y un aumento de la capacidad del sistema de control del tránsito aéreo.

El cumplimiento del Reglamento del Aire para las operaciones de aeronaves, tanto en vuelo como en el área de movimiento de los aeródromos, se ajustará a reglas generales y, además, durante el vuelo a las reglas de vuelo visual, o a las reglas de vuelo visual nocturno o a las reglas de vuelo por instrumentos.

En el caso de reglas generales el reglamento establece que excepto cuando sea necesario para despegar o aterrizar, o cuando se tenga autorización de la autoridad competente, las aeronaves no volarán sobre aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados, o sobre una reunión de personas al aire libre, a menos que se vuele a una altura que permita, en caso de emergencia, efectuar un aterrizaje sin peligro para las personas o la propiedad que se encuentren en la superficie. Como se observa esta es la base legal para la limitación en la realización de vuelos RPAs en zonas urbanas.

2.2.4 Circulares aeronáuticas

La Ley 21/2003, de 7 de julio, de Seguridad Aérea, establece en su artículo 8 que el Director General de Aviación Civil podrá aprobar, en el ámbito de la aviación civil, disposiciones de carácter secundario y de contenido técnico, que completen, precisen y aseguren de forma eficaz la aplicación de las normas dirigidas a preservar la seguridad y el orden del tránsito y del transporte aéreo civil.

Tales disposiciones tendrán que tener en cuenta las prescripciones y recomendaciones adoptadas por OACI y por los organismos internacionales de los que forme parte el Estado español, correspondiendo con las circulares aeronáuticas. Éstas serán obligatorias, dentro del ámbito de la aviación civil, tanto para las personas físicas como jurídicas que ejecuten cualquier actividad relacionada con formación, diseño, producción, trabajos aéreos, etc.

La entrada en vigor de una circular aeronáutica requiere su previa publicación en el Boletín Oficial del Estado.

2.2.5 Resoluciones de AESA

Emitidas por el Director de AESA, tienen por objeto la ejecución de reglamentos y normas de otro rango.

2.3 Competencias a nivel autonómico

Las comunidades tienen competencias en materia de infraestructuras e instalaciones aeroportuarias. En este caso, si la instalación es de competencia autonómica necesita de la participación de la Administración estatal en las tareas de planificación, construcción y/o modificación, mediante la emisión de informes vinculantes sobre su integración en el espacio y transporte aéreo.

En el caso de la Comunidad Autónoma de Andalucía no se han asumido las competencias en materia aeroportuaria.

2.4 Mecanismo para la habilitación en AESA para la realización de actividades técnicas o científicas con RPAS.

AESA es el organismo regulador para operaciones con RPAS de hasta 150 kg MTOW. Para plataformas por encima de este límite es necesario cumplir la normativa a nivel europeo, siendo EASA el organismo encargado a tal efecto.

En el presente apartado se detalla el procedimiento para la habilitación como operador de RPAS de MTOW inferior a 25 kg para trabajos técnicos o científicos.

El Apéndice 1 del presente informe se recoge un desglose de la normativa aplicable para la habilitación y operación de RPAS en España.

El procedimiento para la habilitación consta de tres pasos (Figura 13) consistentes en:

- Paso 1: Solicitud de realización de los vuelos de prueba que demuestren que la operación pretendida conforme al artículo 50.3 de la Ley 18/2014 se puede realizar con seguridad.
- Paso 2: Realización de los vuelos de prueba.
- Paso 3: Presentación de la comunicación previa y declaración responsable para habilitarse como operador de trabajos técnicos o científicos.

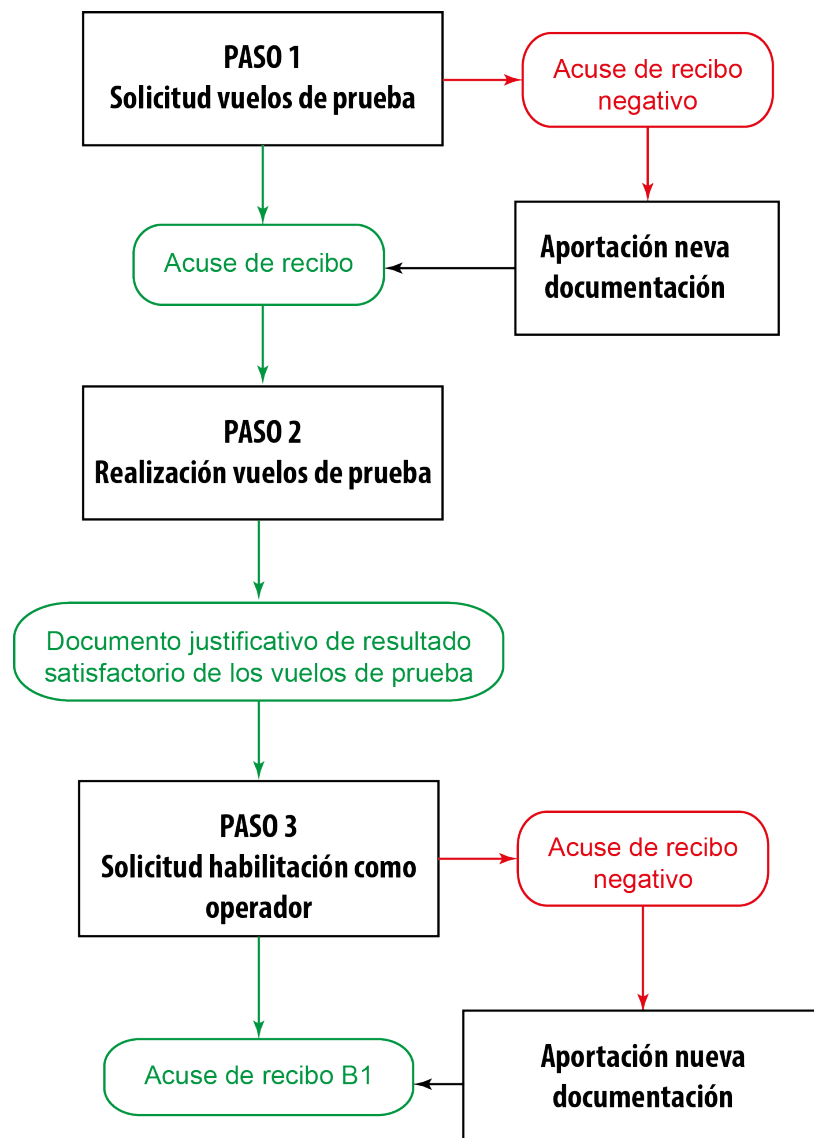


Figura 13 Diagrama de flujo proceso habilitación como operador por AESA (Fuente AESA)

2.4.1 Paso 1: Solicitud realización de vuelos de prueba

La documentación a presentar consiste en:

- Comunicación previa y declaración responsable (Apéndice A.2)³.
- Acuse de recibo (Apéndice B.2).⁴
- Documento de caracterización de cada aeronave declarada.
- Estudio aeronáutico de seguridad.

³ El modelo oficial esta disponible en la página web de AESA, concretamente en http://www.seguridadaerea.gob.es/media/4274858/141118_apendice_a2_art_50_4.docx.

⁴ El modelo oficial esta disponible en la página web de AESA, concretamente en http://www.seguridadaerea.gob.es/media/4274866/141118_apendice_b2_art_50_4.docx.

- Documentos de demostración del cumplimiento de los requisitos exigibles a los pilotos (art.50.5 de la Ley 18/2014).
- Condiciones o limitaciones que se van a aplicar a la operación o vuelo para garantizar la seguridad (art 50 3.d.9 o de la Ley 18/2014).
- Perfiles de los vuelos a desarrollar y características de la operación (art 50 6.c de la Ley 18/2014).
- Documento acreditativo de tener suscrito el seguro obligatorio. Junto con la declaración responsable es necesario entregar un certificado emitido por la compañía de seguros indicando que ésta se encuentra autorizada por la Dirección General de Seguros en el ramo de responsabilidad civil de vehículos aéreos.

La comunicación previa y declaración responsable (apéndice A.2) así como el acuse de recibo (apéndice B.2) sellado por AESA habilita al operador para la realización de los vuelos de prueba.

2.4.1.1 Caracterización de la aeronave

Se debe informar de las características del sistema RPAs, el sistema de comunicaciones así como las actuaciones y limitaciones del vehículo aéreo.

En la descripción de las características del sistema hay que realizar una descripción del sistema, indicando los siguientes aspectos:

- Descripción del sistema, indicando como mínimo nombre del fabricante, marca, modelo, numero de serie.
- Planos de tres vistas y perspectiva de la plataforma aérea.
- Listado de componentes, detallando todo el instrumental de tierra y aéreo.
- Masa de la aeronave en vacío, MTOM y masa máxima recomendada en el despegue.
- Descripción del piloto automático y del sistema de navegación.
- Sistema de alimentación y capacidad de las baterías caso de alimentación eléctrica.
- Sistema de propulsión, detallando potencia de motores, pesos, diámetro, etc.
- Material del bastidor, fuselaje, tren de aterrizaje y hélices.
- Descripción de la carga de pago.
- Luces instaladas y esquema de pintura.

Con respecto al sistema de comunicaciones se debe informar de:

- Descripción del sistema de mando, control y enlace de radio, detallando los datos técnicos del emisor, del receptor y del transmisor de mano.
- Relativo a la estación de control se debe informar tanto del hardware como del software empleado.

Finalmente, en relación a las actuaciones y limitaciones del vehículo hay que definir:

- Sistema de terminación del vuelo, si es aterrizaje vertical, con paracaídas, red, etc.
- El alcance y la autonomía tanto del tiempo como de la radio en vuelo.
- Altura máxima de vuelo y el techo de vuelo.
- Velocidades normales y máxima de operación, de ascenso y de descenso.
- Limitaciones operativas en cuanto a temperatura, humedad y tolerancia al vuelo.

2.4.1.2 Estudio aeronáutico de seguridad

El objetivo es valorar el nivel de seguridad de la actividad a desarrollar, definiendo el campo de riesgo como no tolerable, tolerable o aceptable y estableciendo las medidas mitigadoras de riesgo que se den adoptar para que el nivel de riesgo sea aceptable. En dicho estudio es necesario considerar medios, entorno y personas.

AESA establece que el operador emplee una metodología basada en matrices de evaluación de riesgo, recomendando la metodología utilizada por la Autoridad de Aviación Civil de Noruega, si bien es posible emplear cualquier otro tipo de metodología empleada en el sector aeronáutico. La metodología propuesta por AESA se basa en:

1. Definir un valor de “Exposición” en el rango entre -3 y +3 en función de la frecuencia con la que se realiza una determinada actividad. Se asignará un valor de 0 en el caso de no considerarse como factor de riesgo.
2. Establecer un valor de “Probabilidad” que refleje la frecuencia en el riesgo. Este valor se otorgará en base a la experiencia en el problema analizado. Se sugiere establecer la probabilidad definida en Tabla 1.

Tabla 1 Definición límites de probabilidad de un factor de riesgo					
	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja
Limite Superior	1 : 10	1:10	1:10	1:10	--
Limite Inferior	--	1:100	1:1000	10.000	1:10.000

3. Finalmente hay que asignar una valor de “Severidad” que indique las consecuencias en caso de ocurrir el percance analizado. La severidad será valorada atendiendo a:

- a. Muy alta: Si causa muerte o incapacidad total permanente de personas, pérdidas económicas superiores a 700.000 €, o daños graves irreversibles al medio ambiente.
- b. Alta: Si causa incapacidad parcial permanente, lesiones o enfermedad profesional, pérdidas económicas entre 150.000 y 700.000 €, o daños graves al medio ambiente.
- c. Media: Si causa lesiones o enfermedades ocupacionales que resulten en uno o más días de trabajo perdido, pérdidas económicas entre 7.000 y 150.000 €, o daños mitigables al medio ambiente sin necesidad de aplicación de medidas de corrección.
- d. Baja: Si causa lesión o enfermedad que no resulte en una pérdida de jornada de trabajo, pérdida económica entre 1.500 y 7.000 €, o daños mínimos al medio ambiente que no requieren restauración.
- e. Muy baja: Si causa pérdidas económicas inferiores a 1.500 €.

La Figura 14 refleja el nivel de riesgo atendiendo a los criterios de severidad y probabilidad.

PROBABILIDAD (frecuencia)

	Muy baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)
Muy alta (5)	5	10	15	20	25
Alta (4)	4	8	12	16	20
Media (3)	3	6	9	12	15
Baja (2)	2	4	6	8	10
Muy Baja (1)	1	2	3	4	5

SEVERIDAD (consecuencias)

Figura 14 Nivel de riesgo según Severidad y Probabilidad.

El índice de riesgo se obtiene de multiplicar la probabilidad por la severidad y a este resultado sumarle o restarle el valor de exposición. Introduciendo en esta casuística las medidas mitigadoras del riesgo se obtendrá un nuevo índice de riesgo que indicará si es posible realizar o no una operación. En la Tabla 2 se muestra un ejemplo de cálculo del índice de riesgo (IR) antes y después de adoptar medidas correctoras.

Tabla 2 Ejemplo determinación índice de riesgo antes y después de adoptar medidas correctoras.						
ID.	Punto de peligro potencial	P/S/E	IR	Factores mitigadores	P/S/E	IR
1	El piloto al mando está enfermo en el momento de realizar el vuelo.	4/3/3	15	Se sustituye al piloto al mando en caso de que haya disponible otro de reserva, con el perfil requerido. Si eso no fuera posible, se suspende la operación hasta que se restablezca suficientemente la salud del piloto.	3/2/3	9

A la hora de un análisis de un posible riesgo es necesario responder a ¿qué podría suceder?, ¿qué probabilidad hay de que suceda?, ¿cuáles son las condiciones si esto sucede?, ¿se puede mitigar o reducir los riesgos?, ¿es aceptable el riesgo residual?.

En el estudio de riesgos hay que analizar toda la estructura presente en una actividad o trabajo aeronáutico, incluyendo personas, entorno y medios. En lo que respecta al personal, influye la formación, la experiencia en la operación y la experiencia en el tipo de aeronave. En lo que respecta al entorno hay que analizar las zonas de vuelo, las de aproximación, aterrizaje, posibles obstáculos, zonas de aterrizaje de emergencia, poblaciones y control de personas entre otros aspectos. Finalmente, en cuanto a los medios, es necesario analizar como se gestionarán posibles fallos de los equipos, la falta de comunicación, etc.

2.4.1.3 Documentos que acrediten los requisitos exigibles a pilotos

El artículo 50.5 ley 18/2014 establece todos los requisitos que se deben acreditar para operar con un RPAS. En el caso de la demostración de requisitos teóricos se pueden hacer de alguna de las siguientes maneras:

1. Presentación de una licencia de piloto expedida según la Parte FCL (*Flight Crew Licensing*) del Reglamento 1178/2011 o JAR FCL-1 o 2, licencia de piloto ultraligero (ULM) expedido por AESA.
2. Certificado de haber superado los exámenes de los conocimientos teóricos para la obtención de una licencia de piloto expedido por un Estado miembro de OACI.
3. Certificado de haber superado los exámenes de los conocimientos teóricos para la obtención de una licencia de piloto expedido por una Approved Training Organization

(ATO) aprobada por AESA o por la propia AESA, o en el caso de la licencia de piloto de ultraligero, mediante un certificado de aptitud.

4. Licencias militares de los pilotos al servicio de las Fuerzas Armadas españolas y de la Guardia Civil.

En el caso de no cumplir alguno de los requisitos anteriores se debe superar un curso de formación básica en el caso de vuelos VLOS, o avanzado para vuelos BVLOS, cuyo contenido, condiciones y número de horas aparece definido por AESA. Estos contenidos serán impartidos por una ATO siempre que esta lo haya comunicado a la autoridad aeronáutica y aparezca en el listado de organizadas aprobadas por AESA para impartir formación.

Por otra parte, todo operador que pretenda operar una aeronave pilotada por control remoto deberá realizar un curso práctico. En este sentido AESA tiene definido las maniobras mínimas que debe ser capaz de realizar un operador de RPAs en función de la tipología de plataforma (avión, helicóptero o multi-rotor).

Junto con la documentación que acredita la formación se debe acompañar copia de un certificado médico válido. El tipo de certificado dependerá de la modalidad de licencia en vigor o, en otro caso, como mínimo un certificado médico LAPL, o para el caso de RPAs con un MTOM superior a 25 kg, como mínimo un certificado médico de clase 2.

2.4.1.4 Condiciones o limitaciones a aplicar a la operación de vuelo

Es necesario cumplir lo establecido en el artículo 50 3.d.9º de la Ley 18/2014 de forma que se adopten todas aquellas medidas adicionales necesarias para garantizar la seguridad de la operación y la protección de las personas y los bienes subyacentes.

2.4.1.5 Perfiles de vuelo de prueba

Estos perfiles tiene que reproducir todos los tipos diferentes de operación que se vayan a realizar, siendo el número mínimo de repeticiones igual a 5 vuelos.

Igualmente se realizarán vuelos que, simulando sin comprometer la integridad de la aeronave, prueben:

1. Fallos del sistema automático del control de vuelo.
2. Pérdida del radioenlace de mando y control.
3. Prueba del procedimiento de emergencia establecido para posible pérdida posicional de la aeronave.

Igualmente será necesario evaluar los procedimientos de emergencia establecidos en el estudio aeronáutico de seguridad de las operaciones, así como el resto de actuaciones presentes en el Manual de Operaciones. Finalmente en tierra se evaluará la activación del sistema de terminación inmediata del vuelo.

2.4.2 Paso 2: Realización de vuelos de prueba

Una vez evaluada la documentación presentada por parte de AESA, si ésta es correcta, el operador recibirá el acuse de recibo correspondiente al Apéndice 2 sellado por AESA. En ese momento el operador está habilitado para la realización de los vuelos de prueba establecidos que puedan demostrar que la operación se puede realizar con seguridad.

2.4.3 Paso 3: Presentación documentación previa y declaración responsable para habilitarse como operador de trabajos técnicos o científicos.

En el último paso la documentación a presentar es:

- Acuse de recibo B1.
- Manual de operaciones.
- Estudio aeronáutico de seguridad para cada tipo de operación indicada en la declaración responsable.
- Documentación acreditativa de la realización de los vuelos de prueba.
- Programa de mantenimiento.

2.4.3.1 Manual de operaciones

En este documento se tiene que indicar los siguientes aspectos:

1. Administración y control del manual de operaciones, indicando el sistema de modificación y revisión así como los responsables de este mantenimiento.
2. Organización y responsables. En esta sección se debe indicar cual es la estructura organizativa, los responsables y responsabilidades de las personas del personal de operaciones, mantenimiento y pilotaje remoto.
3. Control y supervisión de las operaciones. Se documentará, entre otros aspectos, el tipo de operación, el programa de prevención de accidentes y seguridad del vuelo, la composición de la tripulación.
4. Cualificación requerida tanto para el operador como para los miembros de la tripulación, llevando un registro de los cursos realizados de forma periódica.
5. Precauciones relativas a la salud e higiene de la tripulación.

6. Limitaciones de tiempo de vuelo referentes a periodos mínimos de descanso, reducciones de éstos, etc.
7. Procedimientos operacionales. En este apartado hay que indicar aspectos como:
 - a. Instrucciones para la preparación del vuelo.
 - b. Establecimiento de los criterios adoptados para la selección de la zona de despegue y recuperación.
 - c. Definición de los mínimos de operación relativos a la zona de operación.
 - d. Criterios seguidos para la elaboración de un plan de vuelo.
 - e. Máxima distancia del piloto para cada RPA.
8. Descripción de aspectos específicos para un trabajo aéreo relacionados con el tipo de aeronave.
9. Programas de entrenamiento.
10. Manuales aplicables.
11. Mantenimiento y registro.
12. Modelo de notificación de suceso.
13. Anexo con la lista de pilotos autorizados.

2.4.3.2 Estudio aeronáutico de seguridad para cada tipo de operación indicada en la declaración responsable.

Se tendrá en cuenta los mismos criterios definidos en el apartado “2.4.1.2 Estudio aeronáutico de seguridad” del presente documento.

2.4.3.3 Documentación acreditativa de la realización de los vuelos de prueba

Mediante una declaración jurada se indicará el resultado de cada uno de los vuelos de prueba realizados.

2.4.3.4 Programa de mantenimiento.

Después del montaje de un RPAS es necesario, si es el caso, una revisión de elementos (hélices, motores, estructura, etc.), líquidos, fluidos, combustibles, baterías, etc. Las pruebas de funcionamiento se harán tanto en tierra como en vuelo.

Las revisiones periódicas a realizar serán:

1. Diarias: Antes de cada vuelo es necesario verificar la operatividad y funcionamiento de los equipos e comunicación y navegación.

2. Servicio. Se tendrá en cuenta lo establecido por el fabricante, y como máximo 6 meses. En esta se verificarán baterías, tren de aterrizaje, inspección visual sobre la aeronave y del equipo de tierra.
3. Básica: Según lo recomendado por el fabricante, y como máximo cada 12 meses.
4. General: Revisión cada 3 años.

Junto a estas revisiones se tendrá en cuenta cualquier boletín emitido por el fabricante así como la aplicación de modificaciones definidas por éste entre otros aspectos.

Se tendrán en cuenta directivas de aeronavegabilidad, para aquellas plataformas que dispongan del certificado de tipo, emitido o aceptado por AESA.

Se recomienda consultar periódicamente la página web de AESA ante posibles cambios en el protocolo de habilitación como operador.

3 ANÁLISIS DE PLATAFORMAS

Un sistema aéreo no tripulado (*Unmanned Aerial System, UAS*) es un sistema compuesto de distintos subsistemas entre los que se encuentra la propia plataforma de vuelo como un subsistema más. Además se tiene que contar con la carga de pago, la estación de control, el subsistema de lanzamiento y aterrizaje, el de transporte, las comunicaciones, etc. De este modo es posible afirmar que un UAS con carácter general cuenta con los mismos subsistemas de un sistema tripulado solo que con distinto modelo conceptual, funcional, dimensiones y/o diseño.

Una plataforma no tripulada no debe ser confundida con otros términos tales como “drone”, término utilizado en sentido general por el usuario o los medios de comunicación. Bajo este término se encuentran aquellas plataformas que vuelan generalmente en modo VLOS, probablemente con poca capacidad de maniobrabilidad y con casi nula capacidad de inteligencia para tomar decisiones, salvo la de poder ejecutar un plan de vuelo pre-programado. Por otro lado un UAV es un vehículo con un mayor grado de inteligencia; es capaz de comunicarse con una estación de control, albergar sensores RGB, multi o hiperspectrales o termográficos, entre otros, informar en todo momento de su posición, velocidad, orientación, capaz de ejecutar programas de vuelta a casa, ejecución de aterrizaje de emergencia. De ese modo es posible advertir y corregir posibles fallos de alguno de los subsistemas.

Independientemente de la tipología de sistema o arquitectura de plataforma de vuelo elegida resulta importante evaluar la necesidad de utilizar, o no, estos sistemas. Una

frase muy empleada en el sector militar, la cual también es aplicable al uso civil, relaciona el uso de estos sistemas en acciones que cumplan la regla de las tres “D”: *Dull, Dirty y/o Dangerous*, o lo que es lo mismo acciones monótonas, “sucias” y/o peligrosas. Determinadas operaciones de vuelo que se realizan con una determinada frecuencia por parte de un piloto pueden generar pérdidas de concentración y como consecuencia una pérdida de efectividad. La realización de vuelos programados mediante sistemas UAS puede resultar ser una manera rápida y económica de realizar trabajos de inspección con una elevada resolución temporal. Otro escenario donde el uso de un sistemas UAS es de máximo interés es aquel donde es necesario la inspección de zonas con una alta concentración de material tóxico. Bajo estas condiciones, la subsecuente desinfección del equipo empleado es mas fácil y económica. Finalmente la última de reglas, la referente a peligrosidad, no solo tiene una componente militar pensando en posibles ataques o reconocimiento de zonas conflictivas. La inspección de líneas eléctricas, el control y asistencia en incendios forestales son un claro ejemplo donde el uso de un UAS esta mas que justificado. Además de lo expuesto, el uso de un UAS permite captar información de un territorio con una muy alta resolución espacial y temporal, siendo probablemente esta última componente la de mayor interés dado que permite captar información de una localización en el preciso instante en que se necesita. Tal acción por parte de una plataforma tripulada es posible realizarla igualmente pero a un coste económico tan elevado que puede hacer inviable el desarrollo de un proyecto.

A la hora de la adquisición de un sistema UAS es recomendable tener en cuenta que este será empleado junto con otros sensores. De este modo el sistema debe permitir poder incluir con el tiempo nuevos subsistemas o elementos, soportando por tanto una arquitectura abierta u *Open System Architecture*. Esto permitirá en este caso incluir un nuevo sensor sin necesidad de hacer grandes cambios en la electrónica o los mecanismos por ejemplo de la estación de control. Para ello es recomendable el empleo de sistemas que empleen y permitan sistemas de interconexiones abiertas o *Open Systems Interconnections*.

3.1 Clasificación del sistema según capacidad y altura de vuelo

Una clasificación de estos sistemas se puede realizar considerando la capacidad de vuelo, y el tamaño de la plataforma aérea. No obstante, hay que tener presente que

tanto los tipos presentados como sus prestaciones pueden presentar cambios debido al continuo avance tecnológico:

- **HALE** (*High Altitude Long Endurance*): Alcanza una altura de vuelo superior a los 15.000 m AGL y una duración superior a 24 horas. Tienen la capacidad de realizar operaciones de muy largo recorrido, de tipo intercontinental incluso. Su origen, uso y desarrollo es realizado sobre todo por las fuerzas aéreas de algunos estados.
- **MALE** (*Medium Altitude Long Endurance*): Presenta un rango de altura de vuelo AGL entre 5.000 y 15.000 m y una duración de vuelo de 24 horas. Sus objetivos son similares a los sistemas HALE salvo que operan en un rango de acción inferior, de aproximadamente unos 500 km desde la base o punto de lanzamiento.
- **TUAV** (*Medium Range or Tactical UAV*): Estos sistemas presentan unas aeronaves de un tamaño mucho menor, operando en un entorno entre 100 y 300 km.
- **Close-Range UAV**: El rango de operaciones se sitúa entorno a los 100 km.
- **Mini UAV (MUAV)**: Dentro de este grupo se encuadran un gran número de plataformas con una masa alrededor de los 20 kg, capaz de realizar operaciones por encima de los 30 km . Es esta el primer tipo de sistemas que se están empleando ya con fines civiles de una forma masiva por el gran público.
- **MAV (Micro UAV)**: Este tipo de sistemas desarrollan vuelos a velocidad baja, en escenarios urbanos, incluso en interiores de edificios. El lanzamiento es realizado en la mayoría de los casos de forma manual. Debido a su bajo peso, las plataformas de vuelo son muy vulnerables a turbulencias y rachas de viento elevadas.
- **NAV** (*Nano Air Vehicles*): Presentan unas dimensiones muy pequeñas y están diseñadas para tareas de espionaje y no ser detectados por sistemas radar.

Dependiendo de las necesidades del proyecto, técnicamente los sistemas de mas interés y utilidad pensando en una explotación agronómica según la clasificación expuesta son los tipos *Close-Range UAV* y *MUAV*.

3.2 Modelo conceptual de un UAS

El sistema aparece compuesto de un conjunto de subsistemas los cuales aparecen resumidos en la Figura 15. En lo que respecta a la estación de control, esta puede localizarse en tierra, mar o aire. En el caso de aplicaciones relacionadas con agricultura su localización natural será la terrestre denominándose ésta como *Ground Control Station (GCS)*. La función de la GCS es la ser el centro de control de la operación y ser

el nexo de unión entre el equipo al mando de la operación en tierra y la plataforma aérea. En algunos sistemas la GCS es también donde se realizan todos los trabajos de planificación relativos a una operación, denominándose en este caso *Mission Planning and Control Station* (MPCS). A través de la GCS, el equipo de tierra se comunicará con la plataforma de vuelo a través de un canal de comunicación. Tal comunicación se entiende en dos direcciones, en primer lugar la comunicación se puede desarrollar entre el equipo de tierra y la plataforma o *up-link*, pudiendo mandar ordenes en tiempo real a la aeronave, interactuar con la carga de pago, etc. En el otro sentido de comunicación, *down-link*, es la aeronave la que manda información al equipo de tierra como por ejemplo la posición o el estado de otros subsistemas.

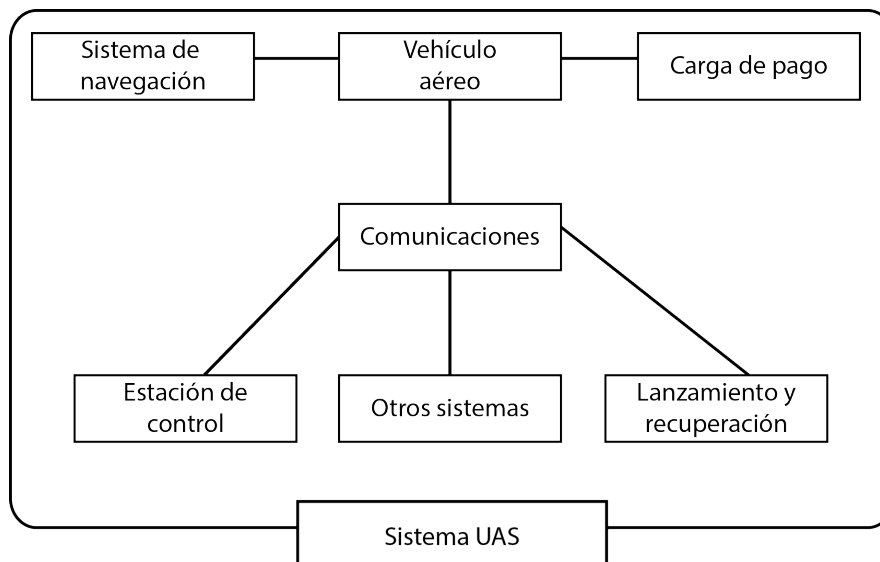


Figura 15 Modelo conceptual general de un UAS civil

En lo que respecta a la carga de pago, hay una gran variedad de sensores a instalar en estas plataformas, abarcando desde sensores RGB hasta hiperspectrales o LiDAR. En el capítulo 4, por título Sensores, del presente informe se aborda con más detalle las características de cada uno de ellos.

La plataforma de vuelo ha de ser elegida una vez definidas las necesidades y características del trabajo a desarrollar. Resaltar en este sentido el hecho de que una plataforma de vuelo no sirve para la realización de todos los trabajos, no siendo por tanto multipropósito. La función de la plataforma es la de ejecutar la misión transportando todos los subsistemas necesarios para la misma. Se necesita conocer previamente el radio de acción, la duración del vuelo, las necesidades en cuanto a capacidad de carga y/o la velocidad del viento a partir del cual la plataforma no puede

desarrollar los trabajos. El apartado 3.5 del presente informe documenta los distintos tipos de configuraciones de UAV.

El subsistema de navegación permite conocer en tiempo real donde se encuentra la aeronave en todo momento, aspecto muy importante en caso de volar de forma autónoma. Además permite a la aeronave ejecutar una misión previamente cargada, o ejecutar un programa de vuelta a casa (*Return to Home*, RTH). En un primer momento, el sistema de navegación desarrollado se basó en un sistema de navegación inercial (*Inertial Navigation System*, INS), si bien hoy día los Sistemas de Navegación Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System*, GNSS) como el Sistema de Posicionamiento por Satélite (*Global Positioning System*, GPS) dan solución a este problema, siendo posible sistemas que trabajen en modo absoluto o en modo diferencial. Existen otras alternativas a los sistemas INS y GNSS como seguimiento por radar o radio dirigidos hacia actividades donde la operación no es autónoma, o hay posibilidades de fallos en el sistema GNSS empleado, no siendo común su uso desde un punto civil.

En cuanto al sistema de lanzamiento, este aparece íntimamente ligado al tipo de aeronave empleado. En el caso de emplear una plataforma de despegue vertical tal subsistema es eliminado del esquema conceptual. En el caso de plataformas de ala fija, el lanzamiento en función del peso de éstas se puede hacer de forma manual o bien mediante sistemas de catapulta. Igualmente en el caso del subsistema de aterrizaje existen diferencias según la arquitectura de la plataforma. En el caso de aterrizajes verticales, como los empleados por multirotores, solo es necesario el tren de aterrizaje para realizar tal acción. En el caso de plataformas de tipo ala fija, el aterrizaje puede realizar bien sobre un tren de aterrizaje, o bien mediante impacto absorbido por la propia plataforma, pasando por redes de atrape. Independientemente de estos sistemas algunas plataformas disponen de un sistema de recuperación en caso de emergencia consistente en un paracaídas.

En el subsistema comunicaciones, las modalidades mas empleadas son las correspondientes al enlace mediante un *data link* entre la GCS y la aeronave siguiendo los modos *uplink* y *downlink*. En el primero de los casos la comunicación tiene como sentido el envío de información de la GCS a la plataforma, mientras que en el segundo tipo, la comunicación es desde la plataforma hacia la GCS. En el desarrollo o evaluación

de este subsistema hay que considerar el rango de operación máximo existente entre la GCS y la plataforma, la frecuencia y la seguridad en la comunicación.

3.3 Estación de control

La modalidad de estación de control analizada en este apartado se corresponde con la modalidad terrestre o *Ground Control Station* (GCS). Éstas pueden ser estacionarias o transportables, incluyendo tanto la componente de hardware como de software. La función de la GCS es realizar el seguimiento y el control de la aeronave durante el vuelo. Este subsistema es tan importante como la propia aeronave, actuando como la interfaz entre el operador y la aeronave, a través de ella el operador se comunica con la misma con el sistema de comunicaciones *up-link* para enviar ordenes como por ejemplo actualizar el programa de vuelo, controlar los sensores de la carga de pago, etc. Igualmente, la aeronave mediante el sistema de comunicaciones en modo *down-link* puede enviar imágenes de estos sensores en tiempo real, informar sobre el estado de baterías, posición, etc.

Una GCS se compone de un conjunto de subsistemas, cuya presencia y funcionalidades dependerá del tipo de plataforma empleada y de las propias características del modelo con el que se este operando. Estos subsistemas pueden resumirse en:

- a) Control de vuelo: Muestra el estado actual del UAV durante la operación. Interactúa directamente con el sistema definido por el autopiloto. Ejemplos de operaciones de control de vuelo son seguir una trayectoria a modo de orbita con un radio determinado, permanecer sobre un punto determinado, ascender a una determinada altura o ejecutar el plan de aterrizaje.
- b) Control de la carga de pago: Permite la gestión de los sensores instalados en el UAV, gestionando la toma de imágenes y/o video, su almacenamiento o la visualización de estos datos en tiempo real en tierra.
- c) Aquellos elementos de comunicación en tierra que permitan el enlace entre la GCS y el UAV como antenas de radio o WiFi. Estas pueden hacer un seguimiento manual o automático del UAV. Sobre la GCS se muestra los niveles de recepción de la señal en tiempo real.
- d) Seguimiento de la navegación, mostrando la posición y la ruta seguida por el UAV. Esto puede combinarse con la cartografía de la zona, sirviendo de apoyo para la

toma de decisiones si hubiese necesidad de cambios en la planificación que se este ejecutando.

El tamaño y dispositivos de una GCS es variable dependiendo de la tipología de UAV. En el caso de plataformas de grandes dimensiones, como las de tipo HALE o MALE, la GCS necesita de un espacio de mayores dimensiones que otras tipologías de UAV (Figura 16.a). En el caso de sistemas de menores prestaciones en cuanto a alcance y duración de vuelo, las necesidades y complejidad del subsistema GCS también aparece reducido. No obstante se presentan diferentes alternativas dependiendo de los distintos sistemas existentes en el mercado actualmente. Probablemente la solución mas popular sea el uso de una maleta de plástico rugerizado. Las dimensiones, pesos y componentes igualmente varían. Destacar por ejemplo la GCS desarrollada por UAV Factory (Figura 16.b) con unas dimensiones de 1000x420x170 y un peso de 18,9 kg, permitiendo el transporte de forma integrada de un ordenador portátil así como un monitor auxiliar de hasta 17", además cuenta con una superficie destinada a poder manejar dispositivos que permiten interactuar con el software. Con un tamaño mas reducido se presentan maletines mas ligeros y prácticos para los trabajos de campo, los cuales se distribuyen con el ordenador portátil ya incorporado (Figura 16.c), o bien este es un componente independiente y externo que aporta el usuario (Figura 16.d). Con un tamaño mucho menor es posible encontrar GCS diseñadas sobre la arquitectura de tabletas (Figura 16.e) o incluso sobre smarthphones (Figura 16.f).

Como se observa, el empleo de un maletín rugerizado es la solución de mayor uso. En este sentido, dado que el trabajo se desarrolla en exterior, es recomendable el uso de un ordenador portátil con pantalla rugerizada para evitar problemas con la visualización de la misma en condiciones de iluminación exterior.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 16 Tipos de GCS: (a) Centro de operaciones del sistema Predator, (b) GCS instalada en maletín de grandes dimensiones, (c) GCS instalada en maletín con ordenador incorporado, (d) GCS instalada en maletín con ordenador independiente, (e) GCS sobre Tablet y (f) sobre smartphone.

3.4 Comunicaciones

Como se ha indicado anteriormente, el subsistema comunicación es crítico en términos operacionales y de seguridad, sobre todo en caso de pensar en la integración con el control de tráfico aéreo (*Air Traffic Control, ATC*).

Para una operación segura de un UAV en condiciones de vuelo VLOS o BVLOS se requieren tres tipos de enlaces de comunicación entre el UAV y la estación de control (Control Station, CS): en conjunción con el tráfico aéreo, para el control del UAV y para las funciones de detectar y evitar.

En el espacio aéreo no segregado, se necesitaría una comunicación en vuelo con ATC recibiendo y transmitiendo. Los dispositivos a emplear presentan las mismas funcionalidades que las plataformas tripuladas. Estas comunicaciones serán especialmente importantes en áreas con una alta densidad de tráfico, siendo necesario por parte de OACI definir estándares de obligado cumplimiento en este sentido.

El segundo tipo de comunicaciones, las correspondientes al control del UAV, son las comúnmente empleadas en estos sistemas, siendo de dos tipos:

1. *Uplink*: Envía información a la aeronave para controlar el vuelo y la navegación.
2. *Downlink*: El UAV envía información a modo de telemetría, información de la carga de pago.

Por último, en cuanto a la comunicación de detectar y evitar, ésta se corresponde con el principio de “ver y evitar” donde el piloto remoto es el responsable de asegurar la mínima distancia de seguridad entre otras plataformas aéreas, el terreno y/o obstáculos.

En este marco de trabajo se hace necesario por motivos de seguridad al realizar cualquier tipo de operación tener redundancia en los enlaces de comunicación.

La Figura 17 resume los distintos canales de comunicación que intervienen en una operación con UAV. En un escenario hipotético, en primer lugar se encuentra la comunicación con una torre de control de un servicio aeroportuario. Esta comunicación será en dos modalidades. La primera de ellas se corresponde con una comunicación bidireccional entre la CS y la torre de control. En segundo lugar, la comunicación es entre la torre de control y la plataforma de vuelo mediante señales luminosas. Esto implica un marco de trabajo que actualmente no es contemplado por ley, estando enmarcado dentro de un contexto militar. El segundo canal o vía de comunicación es a través de la CS, esta comunicación es bidireccional e interna, estando limitada a unos determinados usuarios para recibir datos y comandar la plataforma. Por otro lado, la plataforma estará recibiendo continuamente señal procedente de algún sistema GNSS que permita la localización y dirección de la plataforma durante el vuelo. Además es posible enviar información vía satélite a ésta para realizar determinadas acciones dentro

del plan de vuelo, salvando en este caso el radio máximo de alcance, caso de trabajar con radiofrecuencia. Finalmente, la plataforma puede tener comunicación con otros agentes con objeto de prevenir posibles accidentes. Si bien el esquema planteado cubre todo el espectro posible de casuísticas dentro de una operación, a nivel de usuario actualmente la comunicación existente se desarrolla dentro del marco de control, estableciendo una comunicación bidireccional entre CS y plataforma de vuelo. A medida que la regulación permita nuevos tipos de operación, las distintas tipologías se irán desarrollando para hacerlas mas accesibles al gran público. Actualmente, aunque la mayoría de las operaciones se desarrollan en un espacio segregado, asegurando la independencia con los vuelos tripulados, se prevé que un futuro sea posible poder operar compartiendo el espacio aéreo.

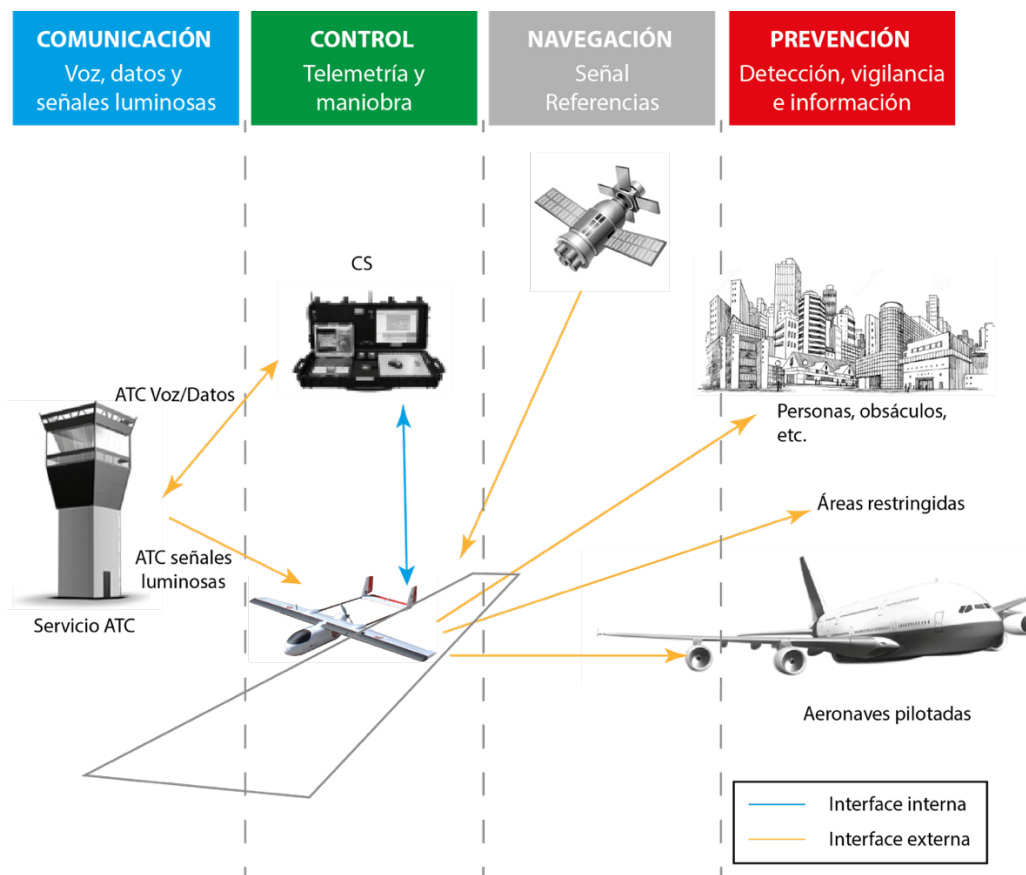


Figura 17 Esquema general sistemas de comunicación en una operación UAV

Considerando por tanto la modalidad de comunicación de control, dado que no es necesario tener contacto con un ATC hoy día, el enlace de comunicación se desarrolla actualmente siguiendo la legislación vigente de radiofrecuencias. De esta manera, es responsabilidad del operador garantizar la seguridad de dicha comunicación y por ende

de la operación. La gran mayoría de los sistemas que se utilizan para operaciones VLOS y BVLOS con un radio de alcance sobre los 45 km emplean tecnología Wi-Fi, alrededor de 2.4 GHz y radio.

3.5 Arquitectura plataformas aéreas

Una plataforma aérea la podemos catalogar siguiendo distintos criterios tales como el tipo de motor empleado: combustión o eléctrico, si es o no mas pesada que el aire, por el numero de motores, etc. En este apartado se consideran tres tipologías atendiendo al modo de aterrizar y despegar, distinguiendo entre:

- a) Plataformas de despegue y aterrizaje horizontal (Horizontal Take-Off and Landing, HTOL). Dentro de esta categoría se engloban todas aquellas plataformas de ala fija. La Figura 18 representa las modalidades mas comunes adoptadas en esta configuración.
- b) Plataformas de despegue y aterrizaje vertical (Vertical Take-Off and Landing, VTOL). En esta categoría se encuadran aquellos UAV con arquitectura tipo helicópteros o multirotor, presentando 4, 6 u 8 motores generalmente. La Figura 19 presenta estas modalidades en función de la disposición de los rotores.
- c) Plataformas híbridas, combinando los dos tipos anteriores. Esta solución presenta la posibilidad de girar los rotores de manera que presenta un ascenso y descenso vertical para luego, volando en modo crucero, girar los motores para poder volar de forma similar a un UAV tipo HTOL.

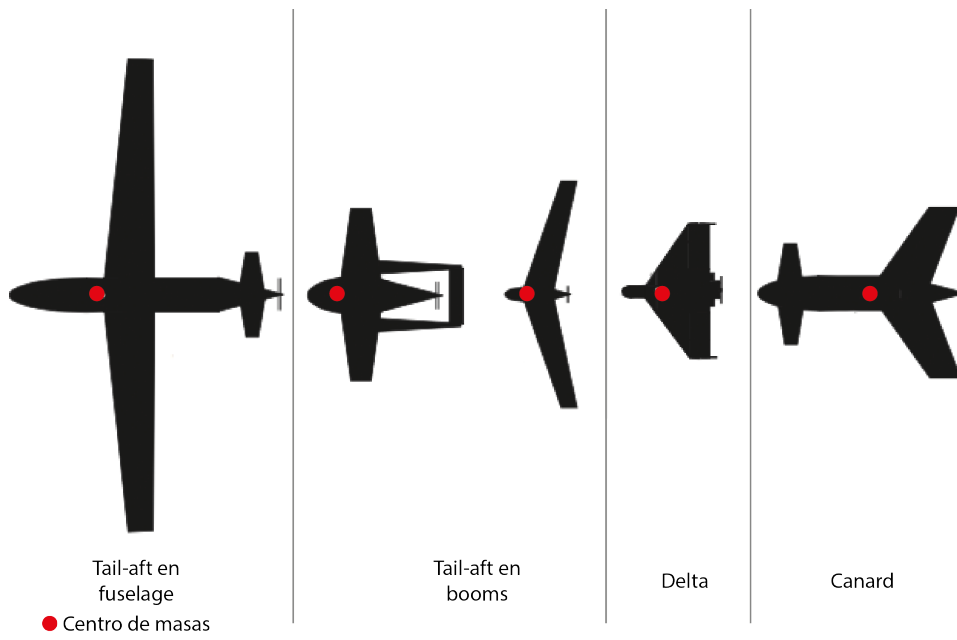


Figura 18 Arquitecturas UAV tipo HTOL

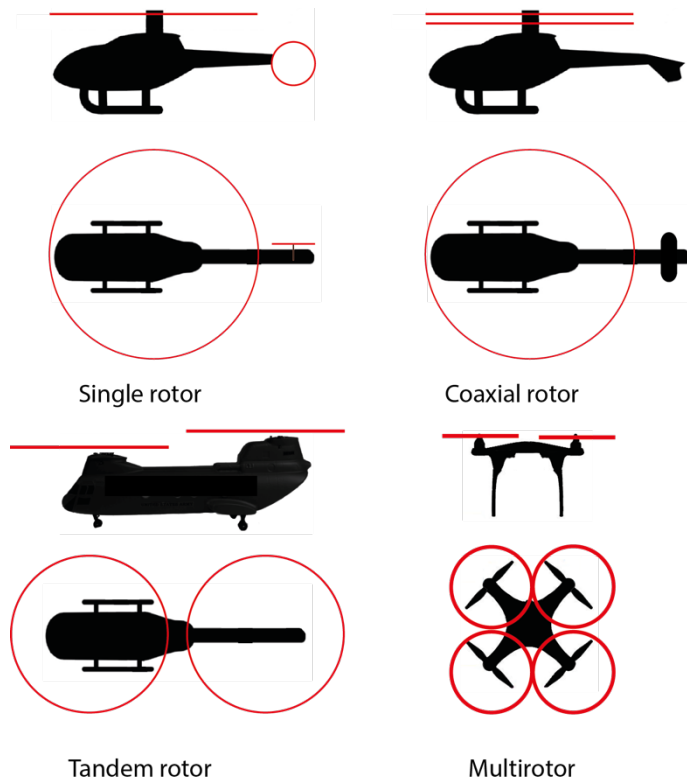


Figura 19 Arquitecturas UAV tipo VTOL

3.6 Sistemas de lanzamiento y recuperación

El lanzamiento de un UAV puede realizarse de tres maneras diferentes, ligadas al tipo de arquitectura del mismo:

1. Despegue apoyado en tren de aterrizaje/despegue, siendo necesario una pista con una superficie acondicionada para esto. Sistema empleado por arquitecturas HTOL.
2. Lanzamiento a través de catapulta, diseñado igualmente para plataformas tipo HTOL que carecen de capacidad de vuelo vertical.
3. Lanzamiento manual, igualmente diseñado para tipos HTOL.
4. Despegue vertical, empleado por plataformas VTOL.

El uso de sistemas con tren de aterrizaje (Figura 20.a) no es de uso común en UAV de tamaño reducido, diseñadas y empleadas en el sector civil, siendo empleado por sistemas de gran envergadura con una gran capacidad y altura de vuelo.

El uso de sistemas de lanzamiento apoyados en catapulta (Figura 20.b) tienen como finalidad lanzar la aeronave al aire con la suficiente aceleración para que pueda alcanzar la velocidad de vuelo deseada. Este sistema requiere del transporte e instalación de la catapulta, haciendo que el sistema aumente en dimensiones. El mecanismo empleado en esta modalidad es la tensión de un elastómero o goma. Este elastómero deberá ser cambiado cada cierto número de lanzamientos con objeto de garantizar la tensión del mismo en el momento del lanzamiento. Este sistema suele emplearse por plataformas HTOL de dimensiones superiores a los tres metros de envergadura y una capacidad de carga de payload superior a 1.5 kg. En caso contrario, plataformas HTOL de menor envergadura y peso pueden ser lanzadas manualmente (Figura 20.c). En estos tipos de lanzamientos habrá que tener en cuenta la dirección del viento. Ambas modalidades de lanzamiento requieren de una cierta longitud de pista despejada para que la plataforma pueda iniciar el vuelo.

Finalmente, en la modalidad VTOL (Figura 20.d), es posible afirmar que el lanzamiento permite una mayor versatilidad de la plataforma pues no es necesario contar con un horizonte despejado de muchos metros. El lanzamiento además es independiente de la dirección del viento. De este modo la operación de lanzamiento supone un menor riesgo de accidente con esta plataforma.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 20 Modalidades lanzamiento UAV

Igualmente, los sistemas de recuperación serán diferentes dependiendo si se opera un sistema HTOL o VTOL, siendo en ambos casos una de las situaciones más críticas durante la operación. En el caso de plataformas HTOL se puede plantear distintas alternativas. La primera de ellas consiste en el empleo como sistema de un paracaídas. Este sistema además suele implementar la posibilidad de poder ser desplegado por control remoto en caso de emergencia durante el vuelo. Dado el modo de funcionamiento del sistema, éste se activará una vez que la plataforma esté próxima al punto deseado y siempre teniendo en cuenta una altura mínima respecto del suelo. El sistema basado en paracaídas presenta como inconveniente su influencia respecto del viento. En este sentido, en el caso de estar operando en días con velocidad de viento mayores de las deseadas, puede originar que la plataforma se desvíe del punto de aterrizaje deseado. La velocidad del viento límite para evitar tal circunstancia será función del peso de la plataforma. No es por tanto una solución muy común debido a que la plataforma en un momento determinado se encuentra a merced del viento. Además el impacto puede desarrollarse en un ángulo y velocidad no deseada con el

consiguiente aumento del riesgo de generar daños importantes en los subsistemas de la plataforma aérea. Este sistema es empleado por sistemas como Bramo de la firma C-Astral (Figura 21.a).

Otra alternativa consiste en emplear una red que atrape a la plataforma durante la maniobra de aproximación durante el aterrizaje (Figura 21.b). Este sistema no suele ser empleado por soluciones comerciales. Esta solución implica la necesidad de instalar en tierra el subsistema aterrizaje, siendo necesario transportar un mayor volumen de elementos a la zona de trabajo. Este sistema es empleado en la fase de desarrollo de plataformas con objeto de minimizar pérdidas en los ensayos. También es una solución muy empleada en el caso de operar en zonas de alta mar, ya que reduce la probabilidad de impacto sobre la superficie de agua caso de una salida de la plataforma de aterrizaje.

Un subsistema de aterrizaje más propio de plataformas de dimensiones medias y/o grandes es el basado en un tren de aterrizaje (Figura 21.c), igualmente es empleado en aquellas soluciones que emplean motores de combustión en vez de eléctricos. El sistema es similar al de una plataforma tripulada. De este modo se hace necesario contar con una pista de aterrizaje lo suficientemente larga como para tomar tierra y además contar con un horizonte despejado durante la maniobra de aproximación. Si bien este tipo de subsistema podría ser una solución viable para plataformas HTOL, dado el peso de las mismas, en caso de emplear plataformas de bajo peso, se reemplaza el tren de aterrizaje por un aterrizaje sobre el vientre del fuselaje. En este caso, es necesario tener en cuenta que cada cierto número de lanzamientos será necesario reemplazar determinadas piezas o componentes de la estructura de la plataforma que pueden incluir hasta el cambio completo del cuerpo de la plataforma. Por lo tanto es necesario proteger al máximo el cuerpo de la aeronave en esta modalidad, haciéndolo lo más duradero posible en el tiempo y al menor coste posible de mantenimiento. Los materiales empleados en esta modalidad van desde el empleo de polipropileno expandido protegiendo a una estructura de carbono, como es el caso del modelo UX5 comercializado por Trimble (Figura 21.d) a polietileno como el modelo Sirius fabricado por Mavinci (Figura 21.e). Ambas soluciones necesitan del reemplazo del fuselaje con una cierta periodicidad. Otros compuestos como la fibra de carbono junto con vidrio son más resistentes. Destacar en este compuesto el sistema E300 (Figura 21.f), el cual recibe el primer impacto en una quilla reforzada con un elemento neumático, no siendo necesario reemplazar elementos en un horizonte temporal medio.

Un aspecto a tener en cuenta en el empleo de subsistemas de aterrizaje empleando tanto tren de aterrizaje como primer impacto sobre el vientre del fuselaje, es la necesidad de contar con una zona de aproximación libre de obstáculos, cuyas dimensiones serán dependientes de la arquitectura y diseño de la plataforma. La Figura 22 muestra dos ejemplos para realizar esta maniobra. En la primera opción (Figura 22.a), la plataforma describe una trayectoria helicoidal, con un radio suficientemente amplio como para garantizar el movimiento descendente, y una vez alcanzada una determinada altura AGL en ese descenso continuar con una trayectoria lineal descendente hasta alcanzar el punto de aterrizaje. Otra opción (Figura 22.b) es describir un rectángulo donde progresivamente la plataforma va descendiendo hasta llegar al punto indicado de aterrizaje. Las dos situaciones presentan pros y contras, la primera de ellas necesita de un cilindro por donde se realiza el descenso sin obstáculo alguno. En escenarios con desniveles acusados puede provocar cierta dificultad para encontrar una zona adecuada donde no exista peligro de colisión lateral. En el caso de la aproximación lineal es posible definir si la aproximación se realiza a derecha o izquierda por lo que no es tan restrictiva en el sentido transversal, sin embargo necesita de un mayor horizonte despejado en el sentido longitudinal.

En el caso de plataformas VTOL, la maniobra de recuperación es relativamente sencilla. La aeronave se comanda hacia una posición definida, siendo posible realizar un aterrizaje automático o manual dependiendo de las características del sistema empleado. La aeronave toma tierra de una forma controlada y no agresiva, no siendo necesario en un principio cambiar el patín de aterrizaje.

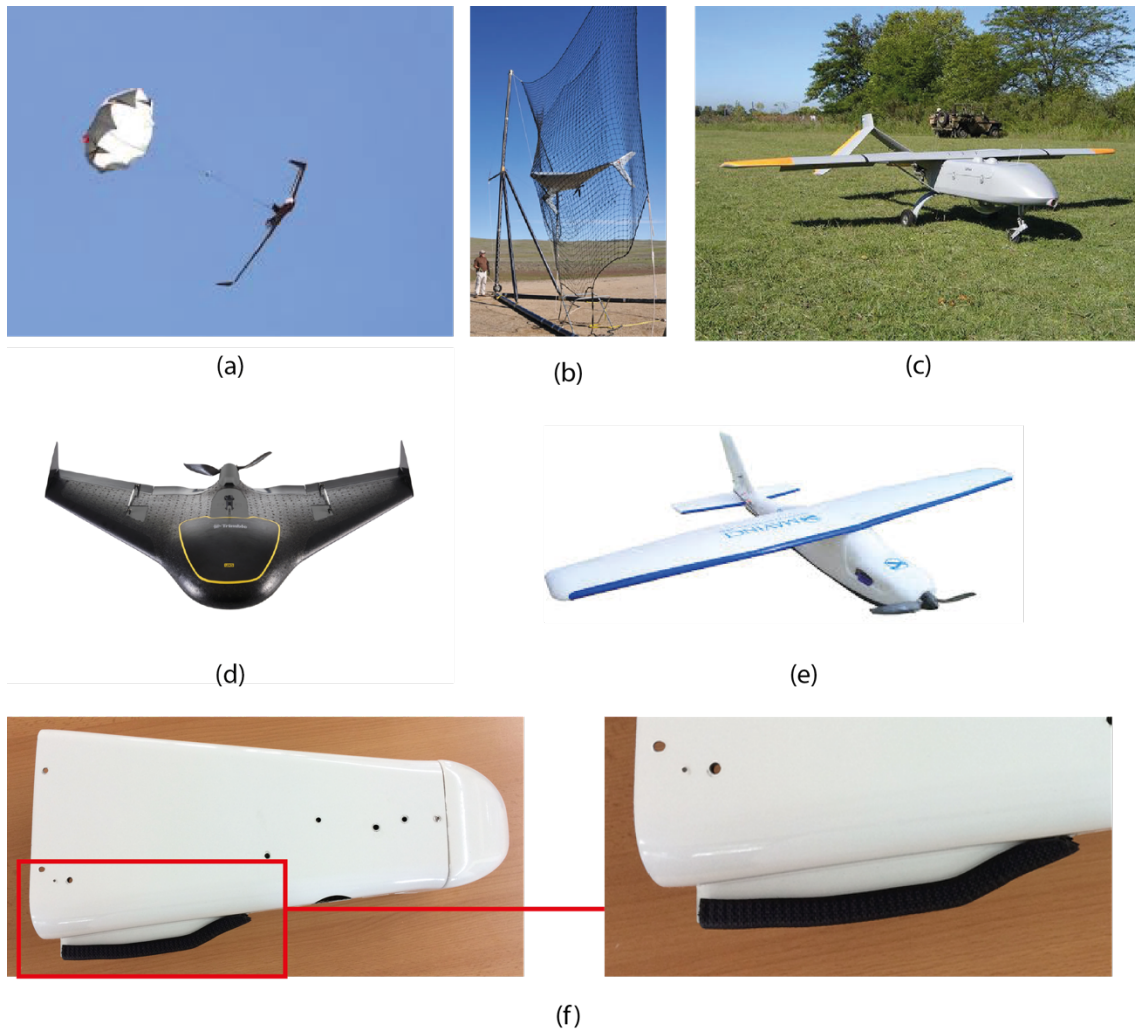


Figura 21. Modalidades recuperación UAV tipo HTOL: (a) paracaídas, (b) red, (c) tren de aterrizaje, (d) sobre vientre del fuselaje empleando material polipropileno expandido, (e) sobre el vientre del fuselaje, material polietileno expandido, (f) sobre vientre empleando fibra de carbono y vidrio.

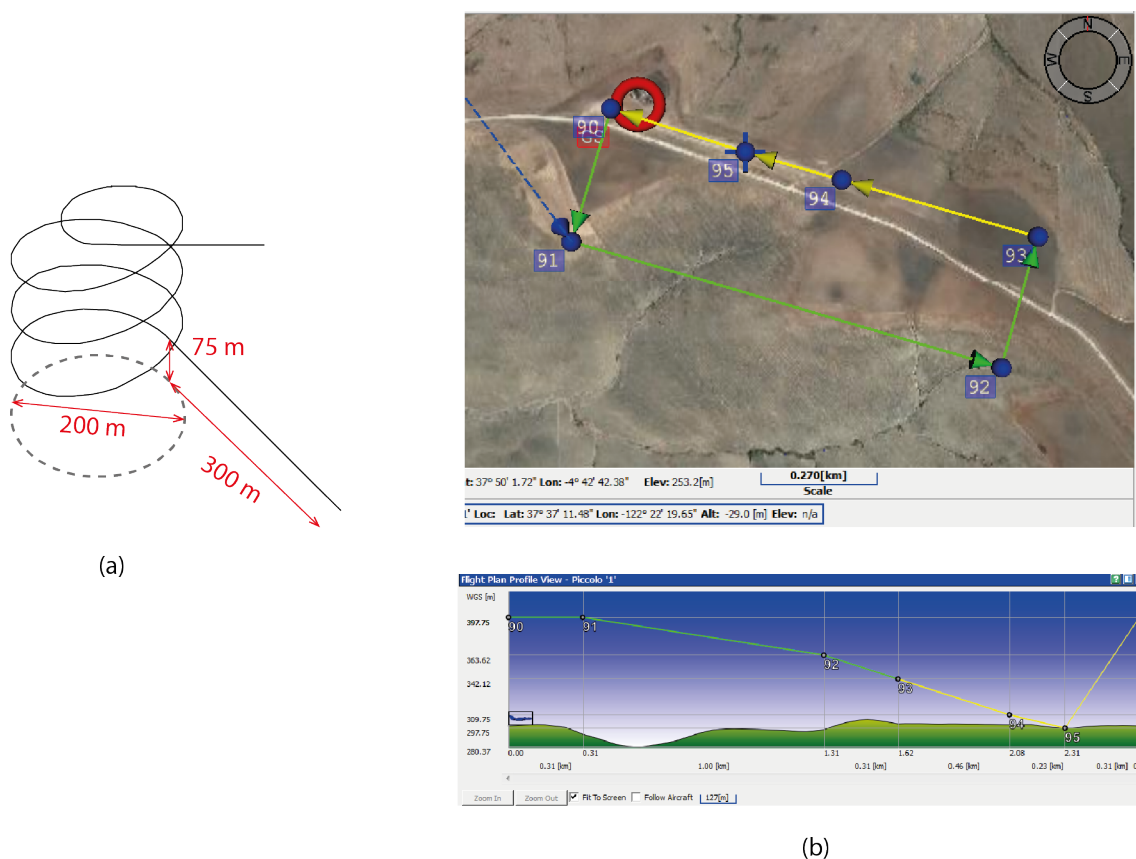


Figura 22. Ejemplos plan de vuelo aterrizaje plataformas de ala fija: (a) aproximación helicoidal y (b) lineal

3.7 Equipo de soporte

Todo el sistema tiene que ir acompañado de un conjunto de elementos que garanticen poder desarrollar el vuelo en el momento deseado como tarjetas de almacenamiento, piezas de repuesto como hélices, servos, cableado y herramientas. Todos estos elementos deben ir junto con el resto del sistema a la hora de realizar un vuelo programado. Junto con todos estos elementos hardware debe aparecer el manual de operaciones tal y como establece la legislación vigente.

Entre los materiales fungibles destacar lubricantes, material de limpieza y baterías o combustible según el tipo de motor empleado.

3.8 Transporte

Si bien las aplicaciones se van a desarrollar empleando plataformas de pequeñas dimensiones, el transporte del sistema es un aspecto que tiene que ser tenido en cuenta

dada la gran cantidad de elementos a emplear durante la campaña de campo y el volumen de estos.

En el caso de plataformas VTOL, estas presentan un aspecto mas compacto que las de tipo HTOL. Sin embargo, dada la necesidad de usar sensores con un peso superior a los 200 gr se emplean plataformas de una dimensiones mayores que garanticen una autonomía de vuelo como mínimo de 20-25 minutos. La consecuencia es el aumento del volumen ocupado por la plataforma. Por ejemplo, en el caso de la plataforma MD4-1000 (Figura 23) presenta una dimensiones en planta de 1730x1730 mm, por ello en su diseño se contemplo recoger los brazos para presentar unas dimensiones en su transporte de 700x700mm. Estas se ven incrementadas por la necesidad de emplear una caja para su transporte.

En el caso de plataformas HTOL su transporte suele presentar mas dificultad, sobre todo en el caso de aquellas que necesitan del empleo de un sistema de lanzamiento asistido por una catapulta. En este sentido, la dificultad en el transporte viene derivado de la longitud de los elementos mas que el volumen que puedan ocupar. La mayoría de estas plataformas suelen ser montadas in situ sobre la zona de trabajo.

Además de la plataforma aérea, en el transporte es necesario tener en cuenta otros elementos como trípodes, estación meteorológica, paneles de calibración, maletines de transporte de sensores, etc.

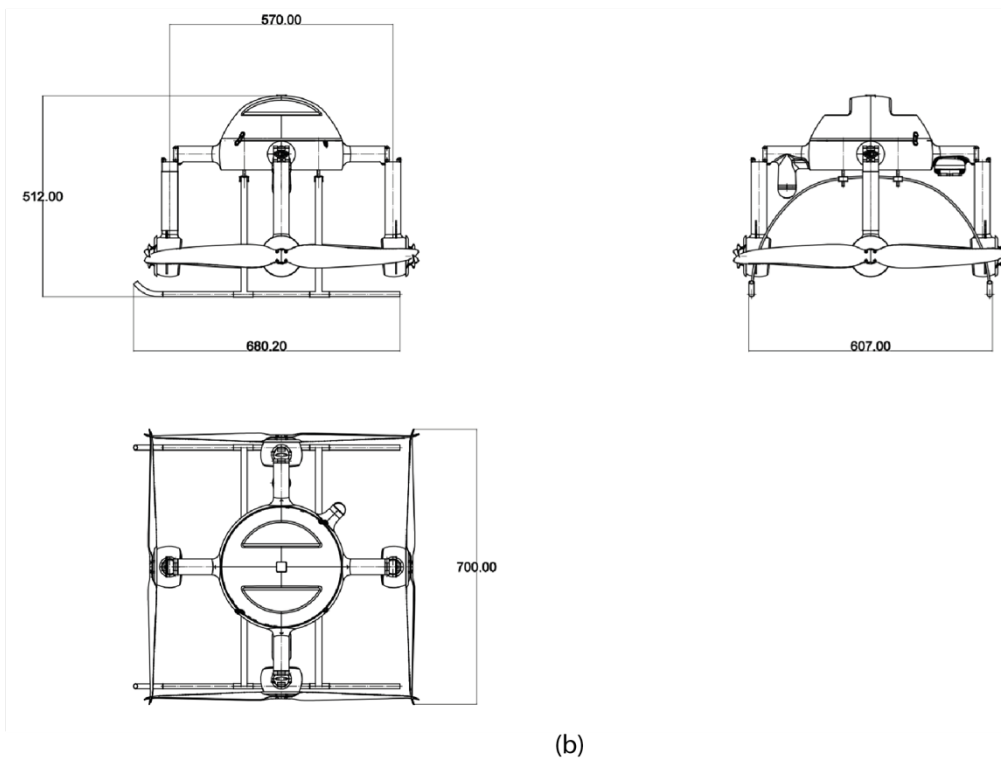
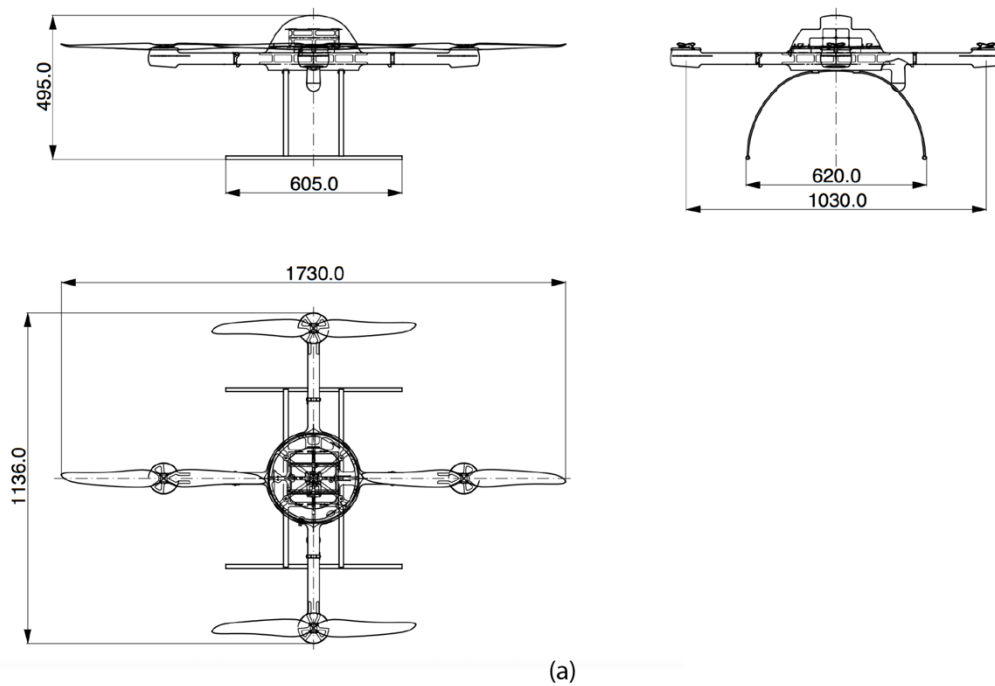


Figura 23. Dimensiones de la plataforma MD4-1000: (a) con los brazos desplegados y (b) con los motores recogidos para su transporte.

3.9 Navegación y orientación

Independientemente de la tipología de la plataforma de vuelo y de la operación a desarrollar, un UAS tiene una serie de módulos y componentes que permiten la navegación de la plataforma (Figura 24). De este modo, todos los subsistemas UAV necesitan de un sensor o un sistema de sensores de navegación que aporten una estimación completa de la geolocalización de la plataforma. Esta información se compone de las coordenadas tridimensionales de la plataforma, los vectores de velocidad en las tres direcciones y entre tres y nueve parámetros para la determinación de la actitud de la plataforma. Además de esta información, en caso que el sistema empleado permita desarrollar operaciones de forma autónoma, es necesario un sistema de control y otro de guiado. El módulo de guiado genera los comandos relacionados con la trayectoria que debe seguir el UAV para poder ejecutar el plan de vuelo. El módulo de control gestiona los elementos de vuelo de la plataforma como alerones, elevadores, rotores, etc para seguir la trayectoria generada por el módulo de guiado. Esta información es transmitida a la estación de control y al mismo tiempo ésta podrá enviar modificaciones o nuevos datos de vuelo que serán recogidos por la plataforma y ejecutados.

En un sistema convencional, el autopiloto de la aeronave leerá de forma continua la posición, la velocidad y la actitud de la aeronave (PVA), obteniendo un valor para cada instante de tiempo de tPVA, a través del sistema de navegación y estos parámetros de tPVA serán empleados por el sistema de control para poder guiar la aeronave en vuelo. A este esquema es posible incorporarle un sistema de orientación para estimar igualmente los valores tPVA, los cuales podrán ser empleados posteriormente en la fase de aerotriangulación en la fase de producción cartográfica, de manera que no es necesario su uso en tiempo real.

En el caso general, la unidad de medida inercial (Inertial Measurement Unit, IMU), el receptor GNSS, el altímetro barométrico, la brújula y otros posibles sensores, compartirán información con el sistema de orientación y además la redundancia de este sistema junto con el de navegación será empleado en vuelo. En la práctica, el sistema de navegación y el sistema de orientación son dos subsistemas independientes. Dado los distintos usos que ofrecen ambos, por lo general el sistema de navegación implica una tasa de refresco de tPVA muy alta, por encima de 1 kHz, aunque esto aporte una

calidad de los datos moderada; por el contrario el sistema de orientación presenta una calidad de tPVA muy alta registrada a una frecuencia mas baja.

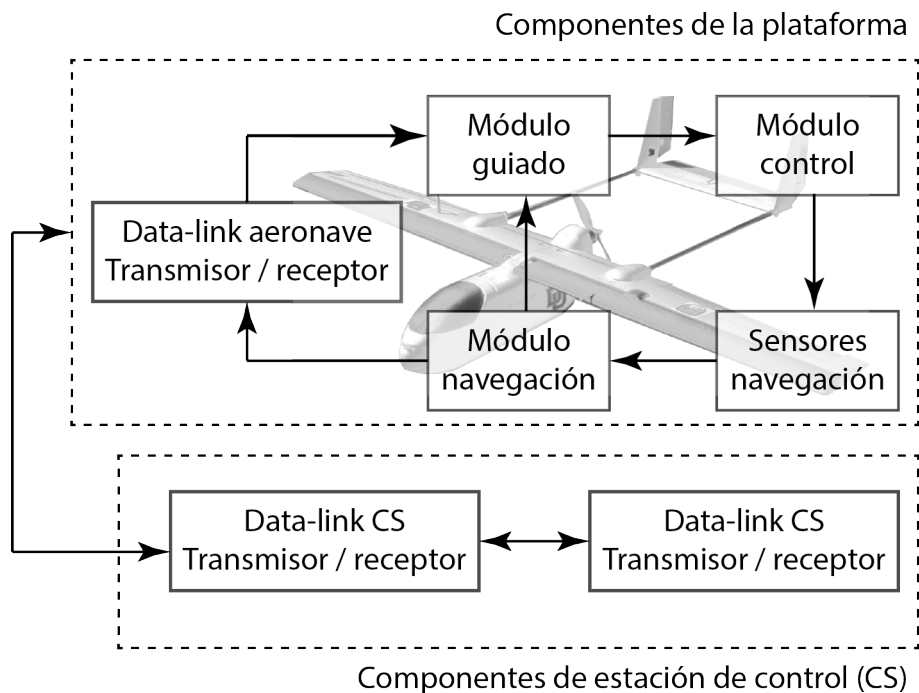


Figura 24 Esquema general subsistema de navegación y orientación

3.9.1 Controles básicos en vuelo

Un UAV puede girar alrededor de sus tres ejes considerando como referencia su centro de gravedad. El control de la posición de la plataforma, por lo general se convierte a unidades angulares: roll (ϕ), pitch (θ) y yaw (ψ), siendo los ejes de rotación los definidos en la Figura 25, observando como éstos son coincidentes independientemente de la arquitectura de UAV empleada.

La gestión y control de los elementos en el caso de una plataforma tipo VTOL como la mostrada en la Figura 25.a se basa en la gestión de las revoluciones de cada uno de los motores. En el caso de la modalidad de tipo HTOL el control se apoya en otros elementos o superficies como son los alerones para el control del ángulo roll, los elevadores para el control del pitch, el acelerador para la velocidad del motor o el timón de cola para el control del yaw.

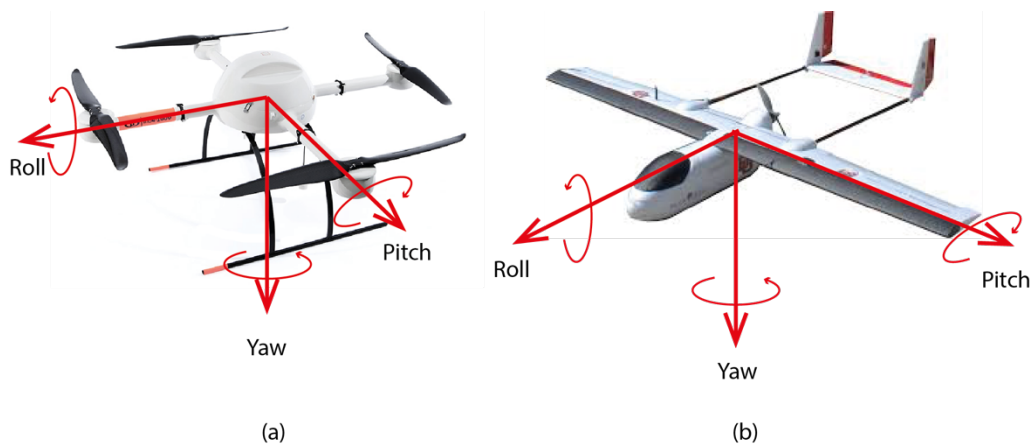


Figura 25 Ejes de rotación plataforma UAV: (a) VTOL y (b) HTOL.

El primer autopiloto fue desarrollado por Sperry Corporation en 1912 y dos años más tarde desarrollaron el primer vuelo libre. Hoy día los autopilotos se emplean en numerosas plataformas tanto aéreas, terrestres como marítimas. El objetivo es, como se ha establecido anteriormente, guiar de forma estable y consistente a una plataforma, bien siguiendo una ruta de vuelo o navegar siguiendo un conjunto de waypoints. Las prestaciones pueden ser mayores, abarcando además el despegue, aterrizaje, ascensos y descensos en la trayectoria, etc.

Desde el punto de vista del hardware, el autopiloto más sencillo consiste en un paquete de sensores para la determinación de la situación y comportamiento del UAV, un procesador para la estimación y el control de la plataforma. Debido a las limitaciones físicas de los UAV empleados comúnmente para aplicaciones civiles hoy día, el hardware tiene que presentar unas dimensiones y un peso reducido, así como un consumo de energía bajo. La exactitud del vuelo controlado requiere de una observación precisa de la actitud del UAV durante el vuelo. Además, el paquete de sensores debe garantizar un buen comportamiento, especialmente si las condiciones de temperatura son cambiantes. El paquete de sensores citado anteriormente, es denominado el sistema MicroElectroMecánico (Microelectromechanical systems, MEMS). Hoy día estos sistemas presentan un tamaño muy reducido, permitiendo:

- Determinar la posición absoluta y la velocidad a través de un sensor GNSS.
- Un giróscopo para medir los ángulos yaw, pitch y roll.
- Medir la aceleración en sus tres componentes espaciales.
- Medir el campo magnético, permitiendo corregir errores en la dirección de la trayectoria.

- Un barómetro para medir la altura y la velocidad del aire (presión relativa).

El sensor GNSS tiene como misión fundamental en el control de un vuelo autónomo aportar la medida de la posición absoluta. En este caso, dependiendo de la calidad del sensor empleado, el error en posición se encuentra en niveles desde el metro a unos pocos centímetros. Además es posible trabajar en modo relativo a la hora de obtener coordenadas en vuelo, estando en este caso el error a nivel subcentimétrico.

Todas las medidas realizadas por parte de los sensores son enviadas al procesador, siendo filtradas y procesadas, todo ello en tiempo real. Las tareas que es posible realizar mediante el sistema de control por parte de un autopiloto son:

- Mantener un determinado ángulo de inclinación o pitch.
- Mantener una altura determinada.
- Aterrizar y/o despegar de forma automática.
- Mantener un determinado ángulo de alabeo o roll.
- Girar de forma coordinada.
- Mantener una dirección determinada o yaw.

Para poder desarrollar esto, es necesario que el autopiloto trabaje a una frecuencia relativamente alta. Un UAV de calidad media-baja trabaja con una tasa de refresco en la toma de datos de 20 Hz. Sin embargo, sensores como por ejemplo los de tipo GNSS solo pueden aportar una solución con ruido en 4 Hz, siendo necesario filtrar los datos para una correcta estimación de la posición mediante un filtro Kalman. En este sentido, la mayoría de los autopilotos con fines comerciales se basan en el uso de un sistema GNSS para la navegación apoyada en el seguimiento de un conjunto de waypoints que componen una ruta. En el control de la navegación aparecen dos funciones de control básicas, el control de la altura y el control de la velocidad y la dirección. El control de altura tiene como propósito dirigir al UAV para volar a una determinada altura, incluyendo en ese paquete las fases de despegue y el aterrizaje. El control de la dirección y la velocidad tiene por objeto guiar al UAV siguiendo un conjunto de waypoints definidos. Para la realización de tales funciones es posible adoptar distintas aproximaciones como PID, red neuronal adaptativa, lógica difusa, *fractional order control*, etc. La aproximación PID (Proportional-Integral-Derivative) es la empleada por la mayoría de los autopilotos comerciales, basado en la retroalimentación de los parámetros de vuelos. El tipo lógica difusa se basa en determinar en una primera fase el estado de la plataforma dado un conjunto de waypoints de coordenadas definidas.

Posteriormente en vuelo los parámetros de control se van ajustando para ir alcanzando cada uno de los puntos de la trayectoria. Esta metodología es fácil de implementar en plataformas pequeñas, presentando como inconvenientes una cierta limitación en cuanto a robustez de las soluciones planteadas y la dificultad para ajustar los parámetros de vuelo ante determinadas circunstancias y estados de la plataforma.

En el mercado actual es posible encontrar una gran variedad de autopilotos, tanto de arquitectura y diseño cerrado como de tipo open source. Cada uno de ellos presentan unas dimensiones y pesos diferentes, permiten ser instalados en una arquitectura específica o varias de plataformas y tienen distintos sensores integrados.

3.9.2 Autopilotos comerciales

3.9.2.1 Serie Micropilot MP

Micropilot ofrece distintos autopilotos que puede ser empleados en UAV de tipo ala fija como ala rotatoria. Estos autopilotos son del tipo PID, algunos de ellos son capaces, de abordar tareas de aterrizaje y despegue automático, siendo su tasa de frecuencia de actualización de la información de navegación igual a 30 Hz. Sus dimensiones son 10x4x15 cm y su peso alrededor de los 28 gr.

El modelo MP1028G es el mas económico de la serie, con un precio alrededor de los 1.500\$. Pese a que a nivel de hardware la plataforma es muy similar a modelos de alta gama, presenta distintas funcionalidades deshabilitadas como por ejemplo el sensor de altura sobre el terreno, la no posibilidad de integrar una brújula o el simple hecho de tener limitada la capacidad de almacenamiento a tan solo 100 kB, la actualización de la posición GPS solo es posible tenerla con una tasa de refresco de un segundo. Además en este modelo no se incluye el software de la GS, no siendo posible tampoco contar con un entorno de desarrollo de funcionalidades. De este modo, es posible afirmar que este modelo de autopiloto no satisface las necesidades mínimas que debe reunir este hardware para abordar proyectos dirigidos a la obtención de productos cartográficos.

Una versión mas avanzada se corresponde con el modelo MP2028G, siendo su precio alrededor de los 8.000\$. Su capacidad del data logger es de 1.5 MB, soporta la determinación de la velocidad del viento, capacidad de aterrizaje y despegue automático. En este modelo si se cuenta con la aplicación para la GS y el sensor de AGL. Además es posible contar con el SDK del autopiloto, con un precio de 13.000\$. La tasa de refresco de la posición por parte del módulo GNSS es de 1 Hz, siendo posible

realizar posicionamiento relativo. Además es posible controlar un servo con el que desarrollar acciones una vez que por ejemplo se ha alcanzado un waypoint de la ruta programada. El sensor barométrico alcanza un techo de estabilidad de hasta 12000 m.

3.9.2.2 Procerus Technologies Kestrel

Es uno de los autopilotos mas pequeños del mercado. Este autopiloto se desarrollo inicialmente en la universidad de Brigham Young y posteriormente ha pasado a una fase de comercialización. Tiene unas dimensiones de 5.1x3.5x1.2 cm y un peso de 16.7 g, sin incluir el receptor GNSS y el modem, empleando como lógica de navegación la tipología PID. Entre los aspectos a destacar se encuentra un sensor de temperatura para la compensación de los sensores, la posibilidad de ser empleado en distintas arquitecturas de UAV y la posibilidad de gestionar gimball de doble eje. Permite operaciones autónomas como el despegue, el aterrizaje, vuelta a casa, control de velocidad fija y la navegación de waypoints.

El sistema se basa en el microcontrolador Rabbit 3000. Se distribuye igualmente el entorno de desarrollo (Software Development Kit, SDK), siendo el lenguaje empleado Dynamic C. El precio base del autopiloto se encuentra alrededor de los 5.000\$, el SDK 7.500\$ y la estación de control 3.400\$.

3.9.2.3 Cloud Cap Piccolo

Esta compañía ofrece actualmente tres autopilotos: Piccolo SL, Piccolo II y Piccolo Nano. El modelo Piccolo SL es posible emplearlo en UAV tipo ala fija, helicóptero, multirrotor o híbridos. Presenta unas dimensiones igual a 13.1x5.5x1.9 cm y un peso de 110 gr. El sistema de navegación permite gestionar hasta 1000 waypoints almacenados. El sensor inercial se compone de un giróscopo de tres ejes y un acelerómetro también de tres ejes, contando además con un módulo GPS de 4 Hz. La comunicación por radio se puede adquirir a distintas frecuencias. Trabajando en modo DGPS permite acometer aterrizajes autónomos alcanzando una precisión espacial de hasta 2 cm, empleando para ello un sistema NovAtel igualmente soporta la recuperación mediante red. El modelo Piccolo II presenta unas dimensiones de 14.2x4.6x6.2 cm y un peso de 200 gr. La principal diferencia con el modelo anterior radica básicamente en el número de entradas / salidas de propósito general. En el primer modelo se presentan 14 frente a 16 de éste último. Finalmente, el modelo Nano, con unas dimensiones mas reducidas, presentan además menores prestaciones.

Estos tres modelos ofrecen la posibilidad de tener acceso a varios puertos RS232 a partir de los cuales poder conectar con los sensores de la carga de pago. En este sentido, este autopiloto es muy empleado actualmente dada su polivalencia y posibilidad de integración de sensores. El software de la CS permite, además de la gestión en tiempo real de la ejecución de un vuelo, la simulación del mismo antes de la realización de la operación. De este modo es posible conocer el comportamiento de la plataforma durante el vuelo, salvando las condiciones climatológicas.

3.9.3 Autopilotos Open-Source

El carácter general de los autopilotos de naturaleza open-source permite por parte de los usuarios la posibilidad de desarrollar funcionalidades, retroalimentando el sistema para una mejora del mismo. Entre esta modalidad destacan los proyectos Paparazzi, Ardupilot y OpenPilot. En el primer caso, Paparazzi se corresponde con un proyecto a nivel tanto de hardware como de software de naturaleza open-source, el cual es posible emplearlo en distintas arquitecturas de plataformas de vuelo. El proyecto se inició en el año 2003 como un proyecto de hobby. Después de la participación en distintas convocatorias de manera exitosa, el proyecto sería del interés de grupos de investigación tanto en su evolución como su explotación, siendo el primer sistema de naturaleza open source. Este sistema incluye el desarrollo tanto de la GS así como todo el hardware de las distintas partes del sistema de aviónica. A nivel de software es posible hacer uso de él en distintas plataformas, lo cual facilita el acceso al mismo por parte un perfil amplio de usuarios. A diferencia de otros sistemas, Paparazzi se diseñó en un primer momento para realizar vuelos autónomos, aunque posteriormente luego se habilitó para además volar en modo manual. El sistema se ha empleado con éxito en trabajos tan variados como en el control de parques eólicos o la mejora de ecosistemas en zonas deprimidas. A nivel comercial el proyecto se introduce en el año 2009 a través de tres compañías que ofrecen distintas soluciones basadas en este autopiloto.

El autopiloto se desarrolla sobre dos procesadores principalmente, el STM32 y el LPC2148. El sistema de control es de tipo PID, trabajando a 4 Hz en la ejecución del vuelo. La seguridad y la estabilidad han sido uno de las bases en el desarrollo de este autopiloto, lo cual no tiene porque estar reñido con su naturaleza abierta y libre. El sistema presenta un simulador de vuelo completo con el que poder analizar distintas situaciones de vuelo como por ejemplo una reducción de la cobertura GNSS. Igualmente

presenta la posibilidad de operar con distintos modos de seguridad activados como el vuelta a casa, pérdida de señal GNSS.

En segundo lugar, ArduPilot, también conocido como ArduPilotMega (APM) se creó en 2007 por DIY Drones (*Do It Yourself Drones*), basado en la plataforma de prototipado abierta Arduino ATmega 168, actualmente emplea ATmega 328 y ATmega 2560. Desde sus inicios, determinando el horizonte de vuelo a través de una termopila a través de diferencias de temperatura hasta la actualidad el sistema ha evolucionando incorporando acelerómetros, giróscopos, etc. Se está empleando en sistemas tanto terrestres como aéreos, en este último tipo aparece integrado tanto en plataformas de ala fija como multirrotor.

La determinación de la orientación de la aeronave lo realiza usando una IMU externa, concretamente una ArduIMU, y dos tipos de sensores GNSS diferentes para la navegación, la uBlox GS407 y la MediaTek MT3329. Mediante un módulo XBee se recibe la telemetría en tiempo real a la GCS. Algunos usuarios ponen como inconveniente de este sistema su tamaño, el cual puede ser grande para algunas plataformas, obligando a instalar algunos componentes en el exterior de ésta, y por consiguiente incrementando el riesgo de daños en la electrónica. No obstante este proyecto es hoy día una solución estable donde se ha creado una comunidad de usuarios y desarrolladores numerosa cuyo resultado ha sido el que existan distintas soluciones con distintos niveles de integración

Finalmente OpenPilot, es un autopiloto igualmente empleado en plataformas tanto de ala fija como rotatoria. Siguiendo la misma filosofía que Ardupilot, esta plataforma se ha desarrollado con la idea de ser un proyecto colaborativo con idea de obtener un dispositivo flexible para la aviónica de plataformas de vuelo pequeños. Junto con su distribución es necesario implementar diferentes tarjetas adicionales como CopterControl y Revolution. La primera de ellas tiene por objeto la estabilización de la plataforma, provista para esto de 3 giróscopos y 3 acelerómetros además de recibir la señal GPS. La plataforma Revolution se encuentra actualmente en fase de desarrollo y tiene por fin la construcción de un autopiloto aplicable a cualquier tipo de vehículo no tripulado, presentando mayores exigencias en su diseño

3.10 Descripción detallada de plataformas de fabricación española

3.10.1 Plataformas áreas de ala fija

La plataforma MAVinci Sirius Pro (Figura 26.a), desarrollado por la empresa MAVinci, perteneciente al grupo Topcon, es compatible con sistemas GNSS en modo tiempo real, bien mediante estación base en tierra o conectando mediante el protocolo NTRIP a un servicio web para la recepción de correcciones. Presenta una exactitud de 2 a 5 cm en navegación por medio de sensores GNSS – RTK recibiendo señal L1/L2 GPS y GLONASS. Fabricado en Elapor, el fuselaje es capaz de aguantar hasta 200 vuelos. Por defecto emplea un sensor Fujifilm XF de 18 mm f/2 R lentes de focal fija, siendo posible emplear con carácter opcional un sensor con una banda en el infrarrojo con objeto de poder calcular el índice NDVI.

La plataforma tiene una envergadura de 163 cm y una longitud de 120 cm. Su peso es de 2,7 kg, incluida la carga de pago. El motor eléctrico tiene una potencia de 730 W, empleando para su funcionamiento una batería LiPo de 18,5 v, 5300 mAh., con capacidad para una autonomía de vuelo superior a 50 minutos. El aterrizaje es posible realizarlo de forma automática, asistida o totalmente manual.

La firma Trimble también presenta en el mercado una solución de tipo ala fija, el UX5 y el UX5 HP (Figura 26.b), con unas características muy parecidas a la anterior. El sistema de lanzamiento en este caso es mediante catapulta, realizando el aterrizaje sobre el vientre del fuselaje. El peso de la aeronave es de 2,5 kg, presentando una envergadura de 1 m y una longitud de 0,65 m. El material de construcción es espuma de polipropileno expandido, reforzado con una estructura de fibra de carbono y materiales compuestos. El motor es eléctrico, con una potencia de 700 W, empleando una batería de 14,8 V, 6000 mAh. La velocidad de crucero es de 65 km/h. Al igual que MAVinci, los sensores son una cámara RGB, concretamente una Sony a7R de 36 MP, teniendo la posibilidad de emplear su versión modificada para la captura de la región del infrarrojo.

La solución Bramor rTK (Figura 26.c), desarrollada por la casa C-ASTRAL, presenta una autonomía de vuelo de hasta 2,5 horas, empleando para ello dos set de baterías. Destaca por su aterrizaje automático, empleando en este caso un sistema de paracaídas, siendo el lanzamiento mediante catapulta. La navegación es posible realizarla empleando técnicas de posicionamiento en tiempo real, alcanzando precisión centimétrica en vuelo. Su dimensión de ala es de 230 cm y una longitud de 96 cm. A

diferencia de las dos anteriores, esta plataforma presenta una bodega mas versátil, pudiendo embarcar no solo sensores RGB convencionales sino además sensores multiespectrales específicos como el sensor Tetracam Lite de forma individual o combinada con los primeros, o incluso un sensor hiperespectral como el desarrollado por la firma Rikola.

Las plataformas analizadas, si bien presentan buenas prestaciones en cuanto a vuelo presentan el problema de la versatilidad en cuanto a la posibilidad de embarcar sensores. Como se observa en la Figura 26.d, el espacio destinado en la bodega de estas soluciones para alojar la carga de pago es bastante reducida y adaptada a un sensor concreto. De esta manera el usuario no tiene la capacidad de poder emplear el sensor que mejor le convenga para según que tipo de proyecto. En un sector como el de los sensores, en continuo desarrollo, este tipo de plataformas pueden quedarse obsoletas, no tanto por el modo y prestaciones en vuelo sino por la capacidad de incorporar distintos sensores según necesidades. En este sentido la firma española Elimco presenta la plataforma de vuelo E-300 (Figura 26.e), este sistema presenta como principales características una gran autonomía de vuelo, gran capacidad de carga de pago y versatilidad así como tener independizada la parte destinada a la aviónica de la correspondiente a sensores, por lo tanto ofrece la posibilidad de tener como carga de pago una gran variedad de sensores. La Figura 26.f muestra un detalle de una de las soluciones planteadas como morro de la plataforma la cual permite volar simultáneamente con un sensor multiespectral y otro termográfico. En caso de querer emplear otros tipos de sensores, la solución permite adquirir solo un nuevo morro y sobre el adaptar e integrar éstos. Esto le dota de una gran versatilidad frente a otras plataformas, las cuales limitan el tipo de sensor a utilizar. La plataforma puede emplear una o dos baterías, presentando una autonomía de vuelo de una hora y media o tres horas respectivamente, siendo la carga de pago máxima de hasta 4 kg. El motor es de tipo eléctrico, presentando una potencia de 2.000 W. El piloto automático empleado se corresponde con CloudCap Piccolo II. Este piloto es un sistema de altas prestaciones, siendo empleado por sistemas de alto nivel de tipo ala fija o rotatoria, tanto de pequeñas, medias y grandes dimensiones. El sistema de lanzamiento de la plataforma se realiza mediante lanzadera y la recuperación bien en pista o con paracaídas. Desde un punto de vista de las aplicaciones a desarrollar a través de los sensores embarcados, la plataforma E-300 tiene una bodega de 140x140x200 mm. Esto permite poder hacer

vuelos hasta con dos sensores de forma simultanea, por ejemplo sensor multiespectral y termográfico, de gran interés desde un punto de vista agronómico.

Finalmente destacar en este apartado el sistema FL-ALTEA desarrollado por la firma Flightech Systems. El vehículo presenta 6 m de envergadura y un MTOW de 80 kg. El sistema tanto de despegue como de aterrizaje se realiza en tierra. Presenta una autonomía superior a las cuatro horas de vuelo, desarrollando una velocidad de crucero de 150 km/h, ofreciendo la posibilidad de realizar vuelos nocturnos de modo que es posible emplearlo en trabajos de prevención y detección temprana de incendios forestales. Entre sus prestaciones de mas alto nivel se encuentra la posibilidad de conexión a la torre de control mas próxima para el control del tráfico aéreo. En el desarrollo de la aeronave ha participado principalmente la empresa española Flightech System y ha contacto con la participación de otras empresas aeronáuticas de reconocido prestigio como Aernnova, empresa responsable de la fabricación de componentes para el A380 de Airbus o el 747-LFC de Boeing.

Si bien su desarrollo ha sido lento y ha tenido un elevado coste económico, en el año 2010 AESA le ha concedido el certificado de aeronavegabilidad experimental, siendo esta la primera vez que se asigna tal calificación a una plataforma de estas características.



Figura 26 Plataformas ala fija: (a) Mavinci Sirius Pro, (b) UX5, (c) Bramor rTK, (d) detalle instalación sensor (e) E300 y (f) detalle morro E300

3.10.2 Plataformas multirotor

Dentro de este apartado destacan dos sistemas desarrollados por las firmas Microdrones, Aibotix. En el caso de la primera, ofrece tres soluciones: MD4-200, MD4-1000 y MD4-3000, este último de próximo lanzamiento. La plataforma MD4-200 se presenta como un sistema de pequeñas dimensiones y por tanto limitada capacidad de carga y autonomía de vuelo, siendo la plataforma MD4-1000 (Figura 27.a) la de mayor interés. Este vehículo tiene un bastidor de mono-carbono robusto que protege los

motores. Las baterías que posee permiten realizar vuelos de mayor duración en comparación con otras plataformas, presentando una autonomía de hasta 30 minutos considerando una carga de pago de 250 gr. En cuanto a la electrónica, la mayoría de los UAV emplean una única IMU con un micro-procesador de 32 bits, estas plataformas mejoran este aspecto ya que utilizan dos tarjetas diferentes: un controlador de navegación y un controlador de vuelo con dos micro-procesadores de 32 bits. El peso de la plataforma es de 2.650 gr, con una carga de pago recomendada de 800 gr. Presenta cuatro motores de 250 W alimentados por baterías LiPo de 12,2/18,3 Ah 22,2. La plataforma de vuelo integra sensores de inclinación, acelerómetros, giróscopos y receptor GNSS de tal forma que puede reproducir y recorrer correctamente rutas de vuelo programadas así como modificar automáticamente los parámetros para adaptarlos a las condiciones reales que se va encontrando a medida que avanza en sus desplazamientos.

La firma Leica ha incorporado a la empresa Aibotix dentro del grupo la cual tiene desarrollado la plataforma Aibot X6 (Figura 27.b) fabricada en CFK tiene un peso de 1,05x1,05 m y un peso de 3,4 kg, con sus seis motores es capaz de levantar una carga de pago de hasta 2 kg, ofreciendo una autonomía de vuelo de 30 minutos si bien ésta se reduce a menos de 20 minutos caso de emplear sensores como carga de pago.



Figura 27 Equipos multirotor: (a) MD4-1000 (b) Aibot X6

En el caso de las plataformas multirotor la limitación en el uso de sensores no está ligada al espacio donde instalarlos. De este modo la carga útil puede estar compuesta por sensores, cámaras, escáner láser, GPS, etc., siendo más polivalentes en ese sentido que las de ala fija.

3.10.3 Plataformas tipo Helicóptero

En esta modalidad destacan las plataformas RXMAX, Copter y Geocopter. La primera de ellas, la plataforma RMAX fabricada por Yamaha (Figura 28.a) presenta un diámetro rotor de 3,13 m y una longitud de 3,6 m. Su MTOW es de 94 kg y presenta una capacidad de carga de pago de 28 kg y una capacidad de vuelo de 60 minutos. En el año 2002 el UAS R-MAX fue analizado para evaluar la exactitud de los sistemas de navegación que incorpora. Empleando posicionamiento diferencial, la calidad 3D en la posición se estableció en 0,3 m y 0,1°/0,2° en la orientación (roll y pitch / yaw respectivamente) en los puntos que definen la trayectoria. Tal estudio fue desarrollado por el Wallenberg Laboratory for research on Information Technology and Autonomous Systems (Linköping University, Suecia) y el Institute of Photogrammetry and Remote Sensing (University of Technology Dresden). El estudio mostró que las vibraciones a consecuencia del motor y la propia calidad del sistema de navegación tienen una gran influencia tanto en la estabilización del sistema UAS así como en la calidad de la imagen. El sistema de navegación del UAS RMAX es el diseñado por la empresa wePilot wePilot4RMAX. El sistema de navegación va equipado con un receptor GPS monofrecuencia de 16 canales que permite realizar post-procesado de los datos de vuelo. Todo el sistema va montado sobre una placa INTEL XScale PXA255 32-bit con una SDRAM de 64Mbl. El peso de todo el sistema es igual a 70 gramos y presenta unas dimensiones de 130x84 mm.

Dada su gran capacidad de carga se ha diseñado un sistema para el transporte y aplicación de productos fitosanitarios y pesticidas en parcelas agrícolas (Huang, y otros 2008).

Los equipos fabricados por Surveycopter, el Copter City y Copter 4 (Figura 28.b), son dos helicópteros UAV muy bien valorados por los usuarios. Emplea el sistema de control de vuelo wePilot1000 de la casa weControl, el cual permite la estabilización de la plataforma y el vuelo autónomo siguiendo una ruta programada. El sistema se completa con la estación de tierra consisten en un ordenador portátil con el software de control weGCS, la cámara multispectral o de video, el sistema de comunicación, un video link para control visual del vuelo y el equipo de transporte. Los motores empleados son motores de gasolina de 26 cc permitiendo una carga máxima de 5 a 10 kg según el modelo. La capacidad de carga en el caso del Copter 4 es de 10 kg, permitiendo desarrollar vuelos de 130 minutos a una velocidad de 40 km/h.

Por último, la compañía holandesa Geocopter presenta esta solución equipada con un motor de gasolina el cual permite realizar vuelos con una duración superior a 1.5 horas. Este sistema va equipado con el sistema de navegación AEROcontrol (Figura 28.c). Esta plataforma presenta una longitud de 2.9 m y un diámetro rotor de 3.3 m. Su MTOW es igual a 90 kg, permitiendo tener una carga de pago de hasta 30 kg. Su duración de vuelo es de 90 minutos con una velocidad crucero de 72 km/h.

El sistema de navegación empleado es igual al empleado en en vuelos fotogramétricos convencionales. EL UAS Geocopter ha integrado tal tipo de sistema en su interior replicando el sistema de una aeronave tripulada. El sistema está compuesto de dos subsistemas:

- a) AEROcontrol SMU: Incorpora un receptor GPS NovAtel OEMV-3 y se encarga de la gestión de todo el sistema. Peso 1,8 kg.
- b) IMU-IIe: Se corresponde con la unidad de medida inercial. Peso 2,2 kg.

El sistema se distribuye en tres modalidades dependiente de la exactitud en la medida de los datos inerciales.



(a)



(b)



(c)

Figura 28 UAS tipo helicóptero: (a) RXMAX, (Copter 4), (b) Copter 4 y (c) Geocopter

(Página intencionada en blanco)

4 SENSORES

*“La cámara fotográfica es un instrumento que enseña a
gente cómo ver sin una cámara fotográfica”*

Dorothea Lange (1895-1965)

Durante la década de los 90, los sensores digitales se desarrollaron tanto para el uso general como el científico, avanzando tecnológicamente de forma vertiginosa a partir de entonces hasta nuestros días. Estos sensores emplean dispositivos electrónicos para “sentir” una fuente luminosa. Fundamentalmente están basados en una matriz de semiconductores que miden la luz incidente sobre ellos, la imagen se forma de la unión de pequeñas unidades, generalmente cuadradas, denominadas celdas. En sus orígenes estos sensores no era capaces de ofrecer la misma resolución espacial que sus homólogos analógicos. Sin embargo, con el paso de los años han alcanzado unas cuotas en cuanto a resolución espacial muy altas, reemplazando actualmente a la mayoría de los sistemas formadores de imágenes analógicos.

La variedad de sensores a emplear a bordo de plataformas UAV es similar al de las plataformas tripuladas, siendo posible emplear sensores RGB, multiespectrales, hiperespectrales, termográficos, LiDAR y video. La principal diferencia se basa en las dimensiones y peso de éstos. Actualmente se cuenta con un amplio abanico de posibilidades, si bien es cierto, que el grado de desarrollo y prestaciones ofrecidas es variado dependiendo de la tipología. Destacar en este sentido la necesidad de

intensificar y potenciar los trabajos relacionados con la integración de sistemas, incluidos los sistemas de captura de imágenes.

A la hora de seleccionar un sensor, además de tener en cuenta la resolución espectral y radiométrica del mismo, es importante considerar la tecnología de fabricación, el tipo de filtro empleado en la formación de la imagen o el modo de generación de la misma y los efectos derivados de éste.

4.1 Características técnicas de un sensor

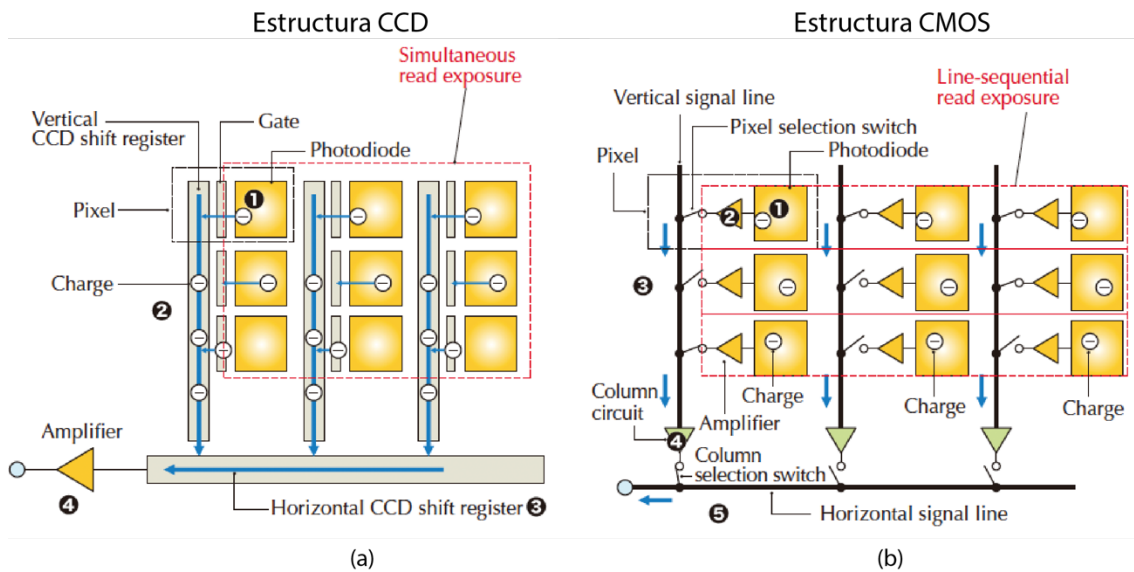
4.1.1 Tecnología de fabricación

Hoy día hay dos tecnologías donde poder elegir: CCD (Charge Coupled Device) y CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Ambas arquitecturas básicamente están formadas por semiconductores de metal-óxido distribuidos en forma de matriz que detectan la intensidad de la luz

La tecnología CCD (Figura 29.a) consiste en un dispositivo electrónico de silicio donde cada uno de sus puntos fotosensibles incorpora un fotodiodo que tiene como propiedad generar electrones dependiendo de la cantidad de luz que inciden en él. Cada fotodiodo produce una carga electrónica proporcional a la luz incidente. Es el proceso de lectura de esta carga electrónica la que presenta la mayor diferencia entre la tecnología CCD y CMOS. En el caso de CCD, la carga de cada fotodiodo va pasando de éste al adyacente, y así sucesivamente hasta llegar a un registro encargado de ir suministrando de forma secuencial la diferentes cargas. Estas cargas electrónicas son convertidas a potencial eléctrico, voltaje, que se amplifica y se recoge en el circuito integrado de la cámara, encargado de procesar esta información y generar una señal digital que se grabará en una memoria.

La tecnología CMOS (Figura 29.b) se caracteriza porque cada fotodiodo integrado en el sensor lleva consigo toda la electrónica necesaria para convertir la carga de electrones en voltaje, así como el registro individual de este voltaje. De este modo el sensor CMOS integra además la electrónica necesaria para el control y lectura de los datos y el conversor analógico-digital. Así, cada elemento trabaja de forma independiente del resto, realizándose todo el trabajo dentro del sensor, no siendo necesario emplear ningún elemento externo al sistema. Esto tiene como consecuencia un menor tamaño

del circuito para la captura de la imagen y un ahorro económico en el proceso de fabricación.



1. El fotodiodo del pixel recibe la luz que se convierte en carga eléctrica.
2. Las cargas eléctricas acumuladas en una sección son transferidas a un registro vertical.
3. Las cargas que han pasado por el registro vertical son transferidas a un registro horizontal.
4. Las cargas que llegan son convertidas a unidades de voltaje y amplificadas para luego llegar al procesador del sensor.

1. El fotodiodo del pixel recibe la luz que se convierte en carga eléctrica y queda acumulado.
2. La carga acumulada es convertida a voltaje y es amplificada dentro del pixel.
3. El voltaje se transfiere a línea de señal vertical.
4. El ruido aleatorio y/o con un patrón es posible eliminarlo mediante muestreo.
5. La señal de salida de la imagen se transfiere mediante una línea horizontal de señal.

Figura 29 Esquema general de tecnología formación imagen por un sensor: (a) CCD y (b) CMOS.

Ambas arquitecturas de sensor se basan en el silicio, siendo su principal diferencia el modo constructivo. Mientras que en los sensores tipo CCD la carga electrónica va pasando de forma secuencial hacia un dispositivo que las convierte en unidades de voltaje, en el tipo CMOS, esta conversión se realiza en el mismo fotodiodo. Esta forma de actuar es la que origina las diferencias entre uno y otro tipo. La primera, y fundamental diferencia entre los arquitecturas es que, mientras que en CMOS la electrónica de control se encuentra integrada en el propio dispositivo de captura, en la CCD ésta se encuentra fuera. Desde el punto de vista de fabricación CCD permite una actualización, adaptación y/o mejora de los dispositivos en un entorno mucho mas rápido y sencillo debido a que no es necesario el empleo de un nuevo sensor. De este

modo, cambiando solo la electrónica es posible cambiar el resultado obtenido de una imagen sin que ello conlleve un cambio de sensor. Por el contrario, dado que en el tipo CMOS, la señal queda amplificada por el propio fotodiodo la respuesta en cuanto a generación de carga eléctrica por unidad de luz incidente resulta algo mejor que con el tipo CCD, si bien los avances por parte de algunos fabricantes están reduciendo tales diferencias en este aspecto. Con respecto al rango dinámico⁵, la tecnología CCD es muy superior a la CMOS pues, para el mismo tamaño de sensor, por motivos de construcción, la superficie para captar la luz es mayor. En este sentido además, la tipología CCD presenta una menor cantidad de ruido pues integra menos electrónica que el sensor CMOS, al tiempo que es posible alcanzar mayores velocidades de obturación. Sin embargo, la tecnología CCD está más expuesta a presentar efecto *blooming* pues si un fotodiodo se satura demasiado puede afectar a los fotodiodos próximos a él, como resultado se produce un halo alrededor de los objetos muy luminosos. Este efecto no se produce en un sensor CMOS pues no existe ningún tipo de transferencia entre fotodiodos vecinos. Es importante en este punto resaltar que ninguna arquitectura es mejor que otra, sobre todo teniendo en cuenta los continuos avances tecnológicos.

Tanto CCD como CMOS ofrecen numerosas ventajas frente a otros sistemas como la capacidad de capturar escenas donde el sensor se encuentra estático o en movimiento, capacidad de registrar una imagen en milisegundos, seleccionar la sensibilidad del sensor según las condiciones de luz, etc.

4.1.2 Filtro formación de la imagen

El esquema general de un sensor formador de imágenes (Figura 30.a) viene definido mediante una o varias lentes dispuestas delante de un filtro selectivo para una determinada longitud de onda. Todo este sistema aparece distribuido justo delante del sensor imagen. Dicho esquema constructivo es válido para un sensor monobanda que trabaje en una sola banda o longitud de onda. En el caso de emplear sensores de tres canales tipo RGB el esquema es algo más complejo, siendo necesario emplear filtros para descomponer la luz en distintas longitudes de onda. Dos son los tipos de filtros empleados generalmente: Filtro Bayern y Foveon. El primero de ellos (Figura 30.b) es un filtro de color situado delante del sensor, el cual descompone la luz en las longitudes

⁵ Rango dinámico expresa el nivel de señal que el fotodiodo puede medir antes de alcanzar un nivel de saturación.

de onda del rojo, verde y azul, siendo la proporción de cada longitud de onda igual al 25%, 50% y 25% respectivamente. Los valores no registrados en cada banda son obtenidos posteriormente mediante interpolación. Siguiendo esta arquitectura existen otros filtros similares como el filtro CYGM que toma como referencia el cian, amarillo, verde y magenta o el filtro RGBE compuesto de los valores rojo, verde, azul y esmeralda. Como alternativa a esta arquitectura clásica de filtros la firma Foveon ha diseñado un nuevo sensor denominado Foveon X3 (Figura 30.c) compuesto de tres capas o filtros siguiendo una disposición vertical. La principal característica en este sistema es que cada capa es sensible a una longitud de onda trabajando como si de una película analógica se tratase, no siendo necesario realizar una interpolación de los valores de la imagen. Sin embargo, el sensor Foveon no es actualmente una alternativa comercial a los sensores tradicionales y solo esta siendo implementado por parte de algunos modelos de determinadas firmas comerciales.

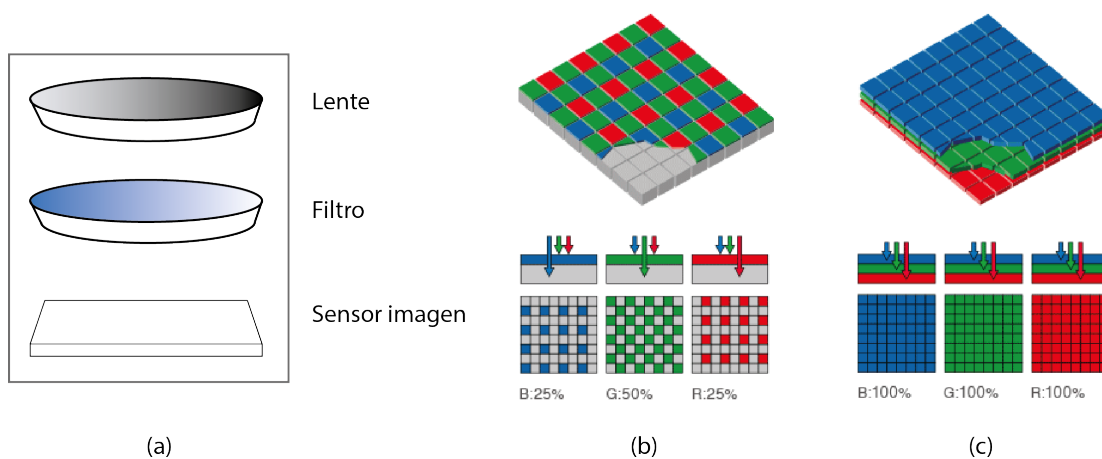


Figura 30 Formación imagen: (a) esquema general componentes formación imagen, (b) filtro Bayer y (c) Filtro Foveon.

4.1.3 Modo obtención imagen y efectos derivados

Los requisitos técnicos en la formación de la imagen por parte del sensor se basan en el registro de la escena libre de distorsiones. El tiempo de exposición en la captura es controlado mediante un disparador eléctrico de forma que la imagen es registrada en cuatro fases: (a) inicialización de los píxeles a exponer, (b) exposición de los píxeles, (c) transferencia de carga sobre el sensor y (d) lectura de los datos. Este proceso se desarrolla por dos métodos diferentes principalmente: *global shutter* y *rolling shutter*. En el caso del método *global shutter* la totalidad de los fotodiodos del sensor registran de forma simultánea la información, mientras que en el segundo tipo el registro se hace por

sectores de fotodiodos, siendo necesario por tanto un intervalo de tiempo para registrar toda la imagen.

La tecnología *global shutter* presenta como ventajas que no introduce distorsiones en los objetos capturados y que todos los píxeles son observados simultáneamente. Tal comportamiento no compromete el uso de las imágenes en tratamientos posteriores como por ejemplo la obtención de ortofotografías o modelos digitales de elevaciones y/o superficies. Como contrapartida este tipo de sensores son tecnológicamente más complejos y por tanto más costosos en términos económicos. Además puede presentar problemas de *hot pixels* en caso de temperaturas elevadas o tiempos de exposición elevados. En el caso del tipo *rolling shutter*, la lectura de una o varias líneas de la imagen se produce mientras que otras continúan expuestas. En caso de que el sensor lea un grupo de líneas estas constituyen un bloque de lectura. Generalmente el tiempo de lectura entre líneas depende de la arquitectura del sensor y de la tasa de frames por segundo que es capaz de desarrollar éste. En este caso es posible obtener una mayor resolución, sin embargo los objetos en movimiento presentes en una escena van a aparecer deformados generando errores posicionales en el momento de la formación de la imagen. Los efectos de distorsión sobre la imagen a consecuencia de emplear un sensor de tipo *rolling shutter* son:

- a) Efecto gelatina o efecto *wobble* o *jello* (Figura 31.a): Aparece cuando la cámara esta vibrando, apareciendo efectos no naturales como si la imagen temblase.
- b) Efecto cizalla o *skew* (Figura 31.b): La imagen se deforma en sentido diagonal en una dirección causado por el movimiento de la cámara o del objeto de tal manera que diferentes secciones de la imagen aparecen registradas en diferentes instantes de tiempo.
- c) Efecto corrimiento o *smear* (Figura 31.c): La imagen de un objeto girando aparece fraccionado.
- d) Exposición parcial (Figura 31.d): Provoca diferencias de iluminación sobre la imagen.

Pese a los problemas presentando por la tipología *rolling shutter*, debido a su menor complejidad tecnológica y coste económico, la mayoría de los sensores que se emplean a bordo de plataformas UAV usan esta modalidad. De este modo, se hace necesario contemplar este comportamiento en los procesos de generación de productos cartográficos, siendo aconsejable, en caso de poder elegir entre varios sensores,

trabajar con aquel que reduzca al mínimo el tiempo empleado en la formación de la imagen.

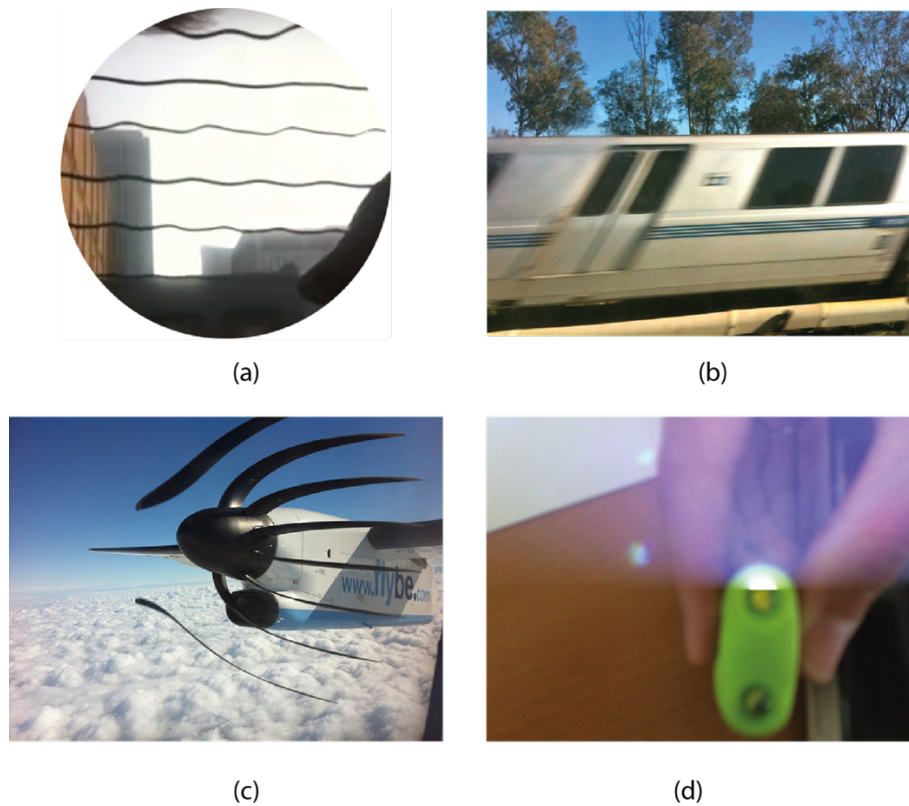


Figura 31 Efectos de distorsiones causadas por disparo modalidad *rolling shutter*: (a) efecto gelatina, (b) efecto cizalla, (c) efecto corrimiento y (d) exposición parcial.

4.1.4 Formatos de imagen

El tipo de sensor: RGB, multi / hiperespectral y/o termográfico determina el formato de imagen empleado. En el caso de operar con sensores RGB el formato digital de las imágenes suele ser generalmente JPEG a 8-bit o TIFF. El formato JPEG (Joint Photographic Experts Group) es un formato estándar de compresión y codificación de imágenes fácilmente interpretado por la mayoría de las aplicaciones de tratamiento y procesado de imágenes. Este formato emplea un algoritmo de compresión con pérdida, para reducir el tamaño de las imágenes, de este modo a la hora de restaurar la información contenida en la imagen no es posible obtener la información original registrada por el sensor. A consecuencia de esto, dicho formato será empleado solo en aquellas aplicaciones donde solo se busque la representación e interpretación visual de los datos, siendo descartado en aquellas aplicaciones donde sean necesario determinar índices de vegetación, realizar clasificaciones, etc, por eso este formato solo es

empleado en sensores RGB, siendo descartado en el resto. Existen distintas variantes del formato JPEG como son el JPEG2000 o el JPEG-LS.

Otro formato muy extendido es el formato TIFF (Tagged Image File Format) desarrollado inicialmente por Aldus y Microsoft y actualmente propiedad de Adobe Systems. Desde su creación ha ido evolucionando a lo largo de varias versiones, siendo la actual la versión 6 del año 1992. Pese a ser propiedad de una compañía privada, dicho formato aparece perfectamente documentado de manera que es interpretado por la mayoría de las aplicaciones informáticas. Este formato de imagen permite almacenar la información tanto con compresión como sin compresión, por lo que no hay pérdida de información en este último caso, siendo posible emplearlo en aplicaciones donde se desarrollen técnicas de teledetección. Un variante a este formato es GeoTIFF, pudiendo almacenar junto con la imagen toda la información referente a la georreferenciación de ésta. Esta variante del formato TIFF fue desarrollada por el *Jet Propulsion Laboratory* de la NASA.

El formato RAW se corresponde con un formato de imagen sin pérdida que la mayoría de los sensores emplea para almacenar la información captada, presentando el problema que dicho formato no está estandarizado y cada fabricante tiene su propia versión. Esto obliga a emplear aplicaciones informáticas específicas, siendo generalmente transformada la información hacia formatos de archivo estandarizados.

4.2 Aspectos a considerar en la elección de un sensor

Los criterios que se desarrollan en este apartado se enfocan teniendo por objetivo la obtención de productos cartográficos, bien ortofotografías y/o modelos digitales de superficies (MDS) o de elevaciones (MDE). En primer lugar es necesario determinar cuáles son las necesidades del proyecto a cubrir, este aspecto definirá la modalidad de sensor con el que trabajar: RGB, multiespectral, hiperespectral, termográfico, térmico o LiDAR. Una vez definida ésta, se hace necesario evaluar que sensor es el más adecuado, siendo necesario considerar a nivel general los siguientes aspectos:

- a) Dimensiones del sensor: Cuanto mayor sea las dimensiones del sensor, mayor superficie será cubierta por un fotograma. De este modo en el caso de emplear plataformas tipo multirrotor se reducirá el tiempo de la misión, aspecto de suma importancia en este tipo de UAVs dado los problemas de rendimiento de las baterías. En el caso de plataformas tipo ala fija, la base aérea será mayor, de este modo es posible garantizar los solapes longitudinales entre imágenes de la misma pasada.

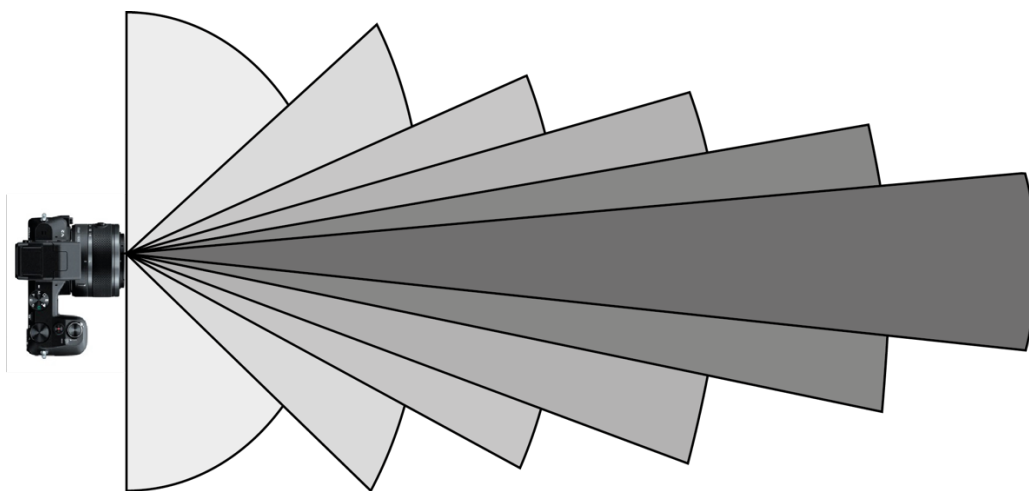
- b) Peso del sensor. Sobre todo en el uso de plataformas de autonomía reducida, es muy conveniente emplear sensores lo mas ligeros posibles con objeto de cubrir la mayor superficie posible, al aumentar el tiempo de vuelo.
- c) Posibilidad de emplear objetivos intercambiables y elección del más adecuado. Este aspecto sobre todo es de valorar en sensores tipo RGB. Además de la calidad de la óptica hay que tener en cuenta:
 - 1. Es posible trabajar en dos modos con un sensor a la hora de tomar una imagen, bien en modo manual o bien en modo automático. En el modo manual es el usuario quien fija las condiciones de sensibilidad, velocidad de obturación, apertura del diafragma y distancia de enfoque. Esta es la opción mas deseable pues se consigue la mejor configuración del sensor en la toma de las imágenes, además la distancia focal será la misma durante todo el vuelo. Caso de trabajar en modo automático hay que tener en cuenta la velocidad que es capaz de desarrollar el objetivo para enfocar y determinar los parámetros de toma de las imágenes. En este modo se corre el riesgo que un determinado número de imágenes se obtengan desenfocadas, perjudicando notablemente la calidad de los procesos posteriores.
 - 2. En cuanto a plataformas UAV de ala fija se hace necesario configurar el sensor en modo manual, manteniendo la distancia focal fija, por lo general a infinito. Si la aeronave emplea la modalidad de despegue mediante catapulta, dada la fuerza desarrollada durante el lanzamiento en algunos modelos es necesario asegurar que el objetivo no se desenfoque, dejando fijo el sistema de lentes. Para ello se deben anclar las partes móviles del objetivo, no siendo recomendable el empleo de sistemas de enfoque basados por ejemplo en imanes. De este modo se eliminan el posible desenfoque del objetivo durante la operación de vuelo.
- d) Velocidad de almacenamiento. Durante la realización del vuelo se hace necesario almacenar información a intervalos cortos de tiempo de 2,3 o 4 segundos generalmente, dependiendo de la velocidad que es capaz de desarrollar la plataforma. De este modo, es importante determinar cada cuanto tiempo el sensor puede registrar una imagen y además emplear tarjetas de almacenamiento de alta velocidad.

Además de todo esto, en la elección de uso de un sensor determinado intervienen de forma conjunta factores tan variados como la resolución, calidad de la imagen, velocidad

de operación del objetivo, etc. Todo esto al margen de los condicionantes técnicos que implique el trabajo a desarrollar.

4.2.1 Aspectos geométricos y de iluminación

Cualquier cámara, por simple y sencilla que sea, se compone de un conjunto de lentes. Los rayos al entrar en el objetivo son refractados por éstas, convergiendo en un punto singular coincidente con el centro óptico del objetivo. Una vez alcanzan a éste, fugarán hacia el plano focal o plano imagen. La distancia entre el centro óptico y el plano imagen se denomina distancia focal, que es medida en milímetros. La distancia focal va a determinar el ángulo de visión en el que la cámara va a registrar una escena de tal modo que distancias focales cortas van a generar ángulos de visión amplios y viceversa (Figura 32). De esta forma se pueden clasificar los objetivos como normales, aquellos que captan una imagen con un ángulo de visión similar al del ojo humano; gran angular, donde el ángulo de visión es mayor que el del ojo humano y teleobjetivos, donde las imágenes se captan a tamaño normal en comparación con el ojo humano que las percibiría como muy pequeñas.



	Ojo de Pez	Gran angular	Estándar	Tele corto	Teleobjetivo	Super teleobjetivo
Distancia focal	8 mm	8 - 25 mm	25 - 65 mm	65 - 100 mm	100 - 160 mm	160 - 600 mm
Ángulo de visión	180°	110 - 60°	60 - 25°	25 - 15°	15 - 10°	10 - 2°

Figura 32 Clasificación objetivos según distancia focal

Operando con sensores RGB, la correcta formación de la imagen desde un punto de visual depende de la configuración de los parámetros apertura, velocidad de disparo y sensibilidad. La apertura de la lente aparece controlada por el diafragma y queda definida como el diámetro de apertura dividido por la distancia focal (*f-stop*). Valores

bajos de *f-stop* tienen como consecuencia que entre una gran cantidad de luz en la cámara mientras que valores altos todo lo contrario. Generalmente los sensores disponen de un rango de aperturas definido de tal manera que cada paso dentro de ese rango se corresponde con la mitad (o el doble) de entrada de luz. El rango de valores de apertura suele estar entre $f/1$ y $f/32$. La elección de la apertura tiene que realizarse conjuntamente con la velocidad de disparo. Intervalos largos de exposición tienen como consecuencia una mayor entrada de luz que una exposición corta. Los sensores presentan el siguiente rango de intervalos: 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/15, 1/30, 1/60, 1/125, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/4000. A consecuencia del movimiento de la plataforma de vuelo UAV es necesario configurar el sensor para trabajar con tiempos de exposición cortos, máxime en el caso de plataformas de tipo ala fija donde la velocidad es mayor. Finalmente, es necesario configurar el factor ISO. En sensores analógicos, existe la posibilidad de trabajar con distintos tipos de películas cuya sensibilidad a la luz depende del tamaño de las sales de plata presentes en la emulsión, haciendo que las necesidades de tiempo de iluminación sean mayores o menores. Estas necesidades vienen reguladas por distintas escalas como ASA o ISO. En el caso de la escala ISO, valores bajos indican que la película necesita mucha luz mientras que valores altos se asocian a películas donde estos requisitos son menores y por tanto necesitan menos tiempo. Este concepto se ha trasladado igualmente a los sensores digitales, en este caso, indicando la configuración en cuanto a sensibilidad del sensor. Según esto, valores altos de ISO en un sensor digital amplifican la señal y por tanto las necesidades de luz son menores, sin embargo también hay que tener en cuenta que aumenta el ruido de la señal, dando la sensación de rugosidad o grano en la imagen. De este modo, se recomienda emplear valores bajos de ISO próximos a 100, y subirlos un poco en el caso de la velocidad de obturación sea muy rápida o si las condiciones de luz son malas. Como se observa, la configuración de la exposición se debe hacer de manera conjunta considerando estos tres parámetros. Para ello, hay una relación de reciprocidad entre ellos de manera que cambiando uno de los parámetros ofrece unos resultados iguales que si se cambia otro de los parámetros en sentido contrario. Por todo esto se hace necesario adquirir experiencia con el sensor con el que se este trabajando para conocer su comportamiento bajo distintas condiciones de iluminación.

4.2.2 Resolución espacial

En la planificación de un vuelo fotogramétrico, el primer factor a tener en cuenta es el tamaño del pixel sobre el terreno (Ground Sample Distance, GSD) del vuelo a realizar. Una vez éste queda definido, el diseño de la planificación del vuelo tendrá como objeto realizar el menor número posible de fotogramas con el fin de reducir los tiempos de procesado y manipulación de las imágenes, sin que ello afecte a la calidad de los productos generados.

Considerando un entorno de producción ligado a vuelos tripulados convencionales, las cámaras a emplear quedan agrupadas en dos grandes familias en función de su arquitectura, cámaras de área o de barrido. En el caso de cámaras de área, existen distintas casas comerciales contrastadas en numerosos proyectos de producción cartográfica (Vexcel, Intergraph, IGI). Dado que con carácter general se realiza el vuelo externalizando el servicio, la elección de la cámara no se realiza en la mayoría de los casos por el tipo de cámara a emplear sino por factores económicos en base al coste total de la realización del vuelo. Si bien tal afirmación no es del todo exacta se acepta como punto de partida debido a la dificultad para tener un sensor de estas características así como la plataforma de vuelo correspondiente.

En el caso de sistemas UAS, los costes de los sensores para la captura de imágenes se reducen considerablemente en comparación con las cámaras métricas convencionales. En este sentido si cobra sentido analizar qué tipo de sensor es necesario emplear en función del tipo de vuelo a desarrollar. Una mala elección del sensor puede tener como consecuencia directa un número excesivo de imágenes a manipular. Para abordar los distintos aspectos estudiados en el presente documento se han tenido en cuenta cuatro sensores. Tres de ellos se corresponden con sensores de tipo RGB (Sony Nex5N, Sony Nex7N y Panasoc GF1) y el cuarto con una cámara multiespectral como la TetraCam ADC. La Tabla 3 resume las características técnicas de éstos.

Tabla 3 Resumen características sensores evaluados								
Cámara	Megapixel	Ancho [px]	Alto [px]	Ancho [mm]	Alto [mm]	Focal [mm]	CCD [mm]	Peso [gr]
Sony Nex5N	16.1	4912	3264	23.5	15.6	18	4.7	210
Sony Nex7N	24.3	6000	4000	23.5	15.6	18	3.9	291
Panasonic GF1	12.1	4000	3000	17.3	13	20	4.3	285
TetraCam ADC	3.2	2048	1536	6.59	4.9	8	3.2	520

En cuanto a resolución, en el mercado es posible encontrar una gran variedad de cámaras atendiendo al número de megapíxeles (Mpx) que son capaces de registrar. Si bien la tendencia es adquirir sensores con la mayor capacidad posible, entendida ésta como un mayor número de Mpx, esto no tiene porque verse reflejado en una mejora sustancial de la calidad de las imágenes. Para ello se ha comparado la variación en la Linear Ground Resolution (LGR) respecto a un sensor de referencia, en concreto se ha considerado un sensor Panasonic GF1 con 12.1 Mpx, la Figura 33 representa tal relación. En primer lugar puede observarse como las diferencias en el intervalo entre 10 y 15 Mpx son inapreciables a efectos prácticos. Por el contrario, como cabe esperar, si aparecen diferencias significativas en la LGR considerando un sensor de 3.4 Mpx como es el sensor TetraCam ADC. El empeoramiento de la LGR es del 48.75% frente al sensor Panasonic GF1. Destacar que la comparativa es solo a nivel de LGR en este caso, pues ambos sensores aparecen diseñados para aplicaciones bien distintas. En el otro sentido, el sensor Sony Nex5N presenta una mejora del 15.35%, no siendo esta una mejora sustancial para un tipo de trabajo destinado a la producción de ortofotografías y/o modelos digitales de elevaciones/superficies. Sin embargo el sensor Sony Nex7N presenta un incremento del 41.71%, de forma que en este caso el aumento de Mpx si repercute en la mejora de la LGR y por tanto en los resultados a obtener.

Por tanto, si es necesario elegir entre un grupo de sensores con una diferencia en Mpx de $\pm 10\%$ esta característica no es significativa para tener en cuenta en la elección del sensor pues no repercute en una mejora de la LGR, siendo las propias características de las lentes los aspectos más relevantes en la elección del sensor.

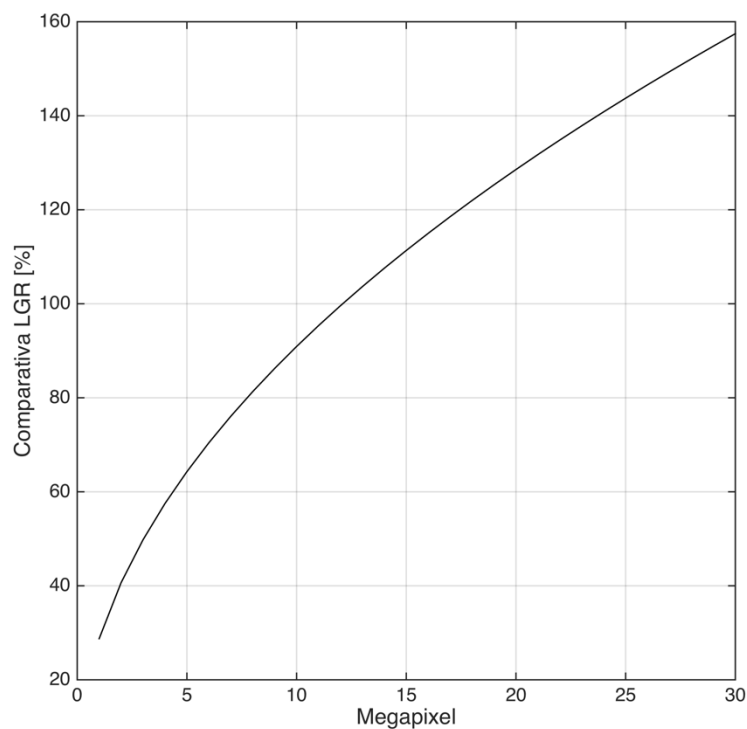


Figura 33 Comparativa resolución respecto a cámara Panasonic GF1

4.2.3 Tiempo de exposición

La ejecución del vuelo tiene que asegurar que las imágenes registradas no aparecen borrosas y desenfocadas. Dado que el plano imagen se mueve sobre el terreno a consecuencia del movimiento de la plataforma, éste aparecerá desplazado una determinada distancia durante la toma de la fotografía. Una condición que se impone para no percibir el desenfoque sobre las imágenes es asegurar que la distancia recorrida durante el tiempo de exposición sea inferior a la mitad del tamaño del píxel. A partir de esta condición, el peor de los escenarios se produce cuando la plataforma UAV vuele a favor del viento, incrementándose la velocidad de ésta. Este factor es muy importante en el caso de emplear plataformas de arquitectura de ala fija, donde en ningún momento el sensor está estabilizado en la toma de las imágenes. Además en este tipo, la velocidad horizontal es superior como regla general a las plataformas de tipo multirrotor. En el caso de las plataformas de arquitectura multirrotor es posible desarrollar vuelos donde el movimiento sea igual al de un ala fija, no estabilizando el sensor, o bien parando la plataforma en cada waypoint para adquirir las imágenes.

Para ver la influencia del tiempo de exposición en la toma de las imágenes, su relación con la plataforma de vuelo y las condiciones de viento se han considerado unas

velocidad comunes para un UAV multirrotor (18 km/h) y uno de tipo ala fija (80 km/h), la velocidad del viento: sin viento, viento moderado (3 m/s) y rachas de viento elevadas (10 m/s), y su relación con el GSD del vuelo. Esta relación aparece recogida en la Figura 34.

Se puede observar como el tiempo de exposición es más crítico en una plataforma UAV de tipo ala fija que en una de tipo multirrotor debido a la mayor velocidad horizontal a la que se desplaza, más si cabe cuando aparezcan condiciones de rachas de viento elevado. De este modo es aconsejable no volar con tiempos de exposición inferiores a $1/1500 - 1/2500$, en el caso de realizar un vuelo con un GSD algo superior a los 3.5 cm. En este sentido, en el caso de UAV ala fija las condiciones de viento afectan en mayor medida, sobre todo en el caso de GSD inferiores a los 3.5 cm. En el caso de plataformas tipo multirrotor, dado que la velocidad que desarrollan es considerablemente inferior, el tiempo de exposición tiene un comportamiento más estable, afectando en menor medida las condiciones de viento y al tamaño de GSD. No obstante no es recomendable emplear tiempos de exposición inferiores a $1/1000$.

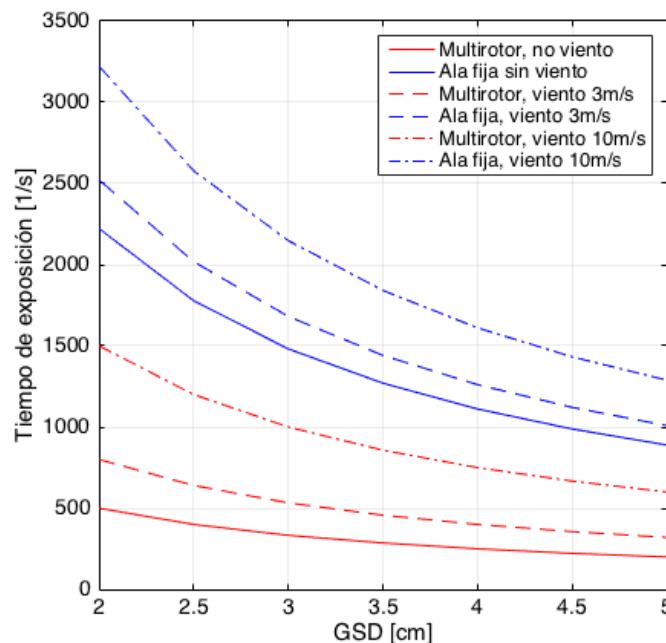


Figura 34 Relación tiempo de exposición y velocidad de plataforma, velocidad del viento y GSD.

De este modo es posible afirmar que hay que tener muy en cuenta las condiciones de viento a la hora de configurar el sensor para registrar imágenes en lo que respecta a los

tiempos de exposición, acción que hay que realizar justo en el momento del vuelo. El poder cumplir las condiciones de vuelo no está garantizado en la ejecución del mismo a consecuencia de variables no predecibles como una racha de viento. Una de las consecuencias es, entre otras, la presencia de imágenes desenfocadas que serán descartadas posteriormente en el procesado del proyecto. De este modo es necesario sobredimensionar el tiempo de exposición con objeto de garantizar la calidad de las imágenes adquiridas. Una solución para trabajar con tiempos de exposición menores es tomar imágenes con un mayor GDS. Esto implica realizar el vuelo a una mayor altura. Tal condición presenta como desventaja la exposición a una mayor velocidad del viento que por un lado puede dar lugar a imágenes movidas en caso de que la dirección del viento sea a favor, o bien un aumento en el consumo de la batería en el caso de que la el sentido del viento sea contrario al desplazamiento. Otro aspecto a tener en cuenta en el uso de determinados sensores es que algunos de ellos no permiten configurar el tiempo de exposición, de manera que las imágenes adquiridas pueden no presentar los mínimos requisitos en cuanto a resolución espacial requerida.

4.2.4 Superficie cubierta por un fotograma

La relación entre la altura de vuelo y la distancia focal de un sensor establece la escala de vuelo. A partir de dicha relación puede establecerse que:

1. A mayor altura de vuelo mayor superficie cubierta por un fotograma.
2. A mayor altura de vuelo se reduce el número de imágenes a registrar.
3. A mayor altura de vuelo mayor tamaño de GSD del vuelo.

Como cualquier otro proyecto de vuelo, será necesario establecer las necesidades del producto a elaborar para así definir la altura de vuelo más adecuada, siendo necesario establecer un compromiso entre realizar más o menos pasadas a consecuencia de volar a mayor o menor altura y la resolución espacial de la imágenes obtenidas, lo cual incidirá directamente en los procesos de análisis y medida posteriores. Igualmente es importante destacar que volar a una menor altura tiene como consecuencia tener que realizar más pasadas en algunas ocasiones para cubrir toda la anchura de la zona de trabajo, lo cual provoca un aumento de la duración del vuelo, y por lo tanto tener que realizar mas de un vuelo sobre la zona. Durante el intervalo entre vuelos pueden aparecer cambios de iluminación y/o atmosféricos que pueden traer consecuencias negativas dependiendo de la finalidad del trabajo.

Analizando las cuatro sensores tomados como referencia, se ha determinado la altura AGL necesaria de cada uno de ellos para realizar un vuelo con un GSD igual a 3 cm. Cada uno de ellos presenta una focal, un tamaño de CCD y un tamaño del sensor diferente lo cual tiene como consecuencia que cada uno desarrolla un vuelo a una diferente altura, e igualmente la superficie cubierta por cada imagen será distinta. La Figura 35 representa el comportamiento de cada una de las cámaras en su sección transversal. Puede observarse como, salvo la cámara Panasonic GF1, a mayor cantidad de Mpx mayor es la distancia focal de la cámara, menor el tamaño del CCD y mayor tamaño del sensor, de tal forma que en este caso, cámaras de mayores prestaciones en cuanto a número de Mpx permiten realizar vuelos más altos cubriendo mas territorio frente a cámaras de peores prestaciones en cuanto a resolución. Este factor tiene un gran impacto en un vuelo UAV en tanto y en cuanto es posible reducir el número de pasadas a realizar.

Siguiendo la línea de lo establecido anteriormente, en el caso de la componente longitudinal puede establecerse como a mayor altura se reduce el número de fotogramas. Tal afirmación está ligada a las prestaciones de la cámara de manera que a mayor número de Mpx del sensor, menor número de fotogramas a realizar a lo largo de la pasada. De este modo es posible afirmar que:

1. A mayor número de Mpx de la cámara el número de pasadas a realizar es menor.
2. A mayor número de Mpx de la cámara el número de fotogramas en una pasada es menor.
3. A mayor número de Mpx el coste de los trabajos a realizar es menor al reducirse el número de imágenes a tratar.

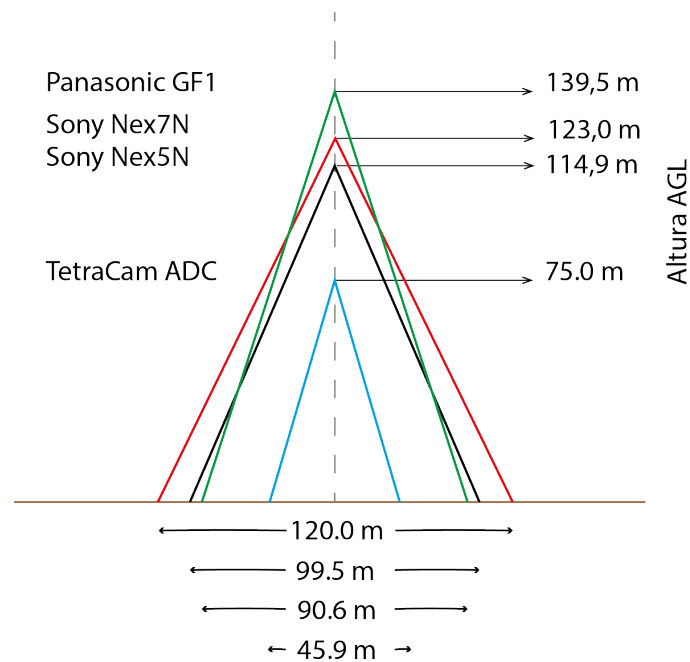


Figura 35 Comparativa altura imagen y anchura imagen para un vuelo con GSD 3 cm

4.2.5 Solape longitudinal

A la hora de realizar un vuelo UAV con el propósito de generar productos cartográficos se hace necesario considerar un elevado solape longitudinal comparado con un vuelo clásico fotogramétrico tripulado. Este solape además se debe ver incrementando cuando el sensor no ofrezca una resolución espacial adecuada, tal es el caso de sensores de tipo termográfico o multiespectral. De este modo no es aconsejable emplear un solape longitudinal inferior al 70%, siendo recomendable emplear valores próximos al 75% - 80% con objeto de garantizar los resultados óptimos. Este incremento en el solape longitudinal además reduce los riesgos de pérdidas de solape longitudinal por posibles desviaciones en la trayectoria ideal de la plataforma debido a rachas de viento o falta de exactitud en los sensores de navegación. Por otro lado, este elevado solape longitudinal tiene como consecuencia un aumento del número de imágenes a procesar, sobre todo si las dimensiones del sensor empleado son reducidas, presentando este comportamiento un carácter exponencial. Tal y como se observa en la Figura 36, a lo largo de una pasada de un kilómetro de longitud aparecen diferencias significativas en el número de imágenes a registrar, mostrándose de manera más acentuada conforme el solape longitudinal aumenta. Dadas las características del sensor multiespectral, mostradas en la Tabla 3, se aprecia como éste tiene unas dimensiones muy reducidas con respecto a sensores RGB convencionales de manera que hasta en el caso de

considerar un solape reducido del 60% se necesitaran registrar mas imágenes que con otro tipo de sensor. Además, dadas las características del sensor en cuanto a velocidad de captura y modo de captura, se hace necesario incrementar el solape longitudinal como mínimo hasta el 70%. En este sentido, es recomendable emplear tarjetas de almacenamiento de gran capacidad y en la medida que sea posible, siempre que el marco regulatorio y las características del trabajo lo permitan, volar a la altura AGL mayor posible. En el caso de sensores RGB convencionales, las diferencias aparecen cuando se emplean solapes superiores al 80%, si bien estas diferencias no son significativas, es recomendable emplear sensores con el mayor tamaño de sensor posible, pues esto economizará en tiempo la duración del vuelo.

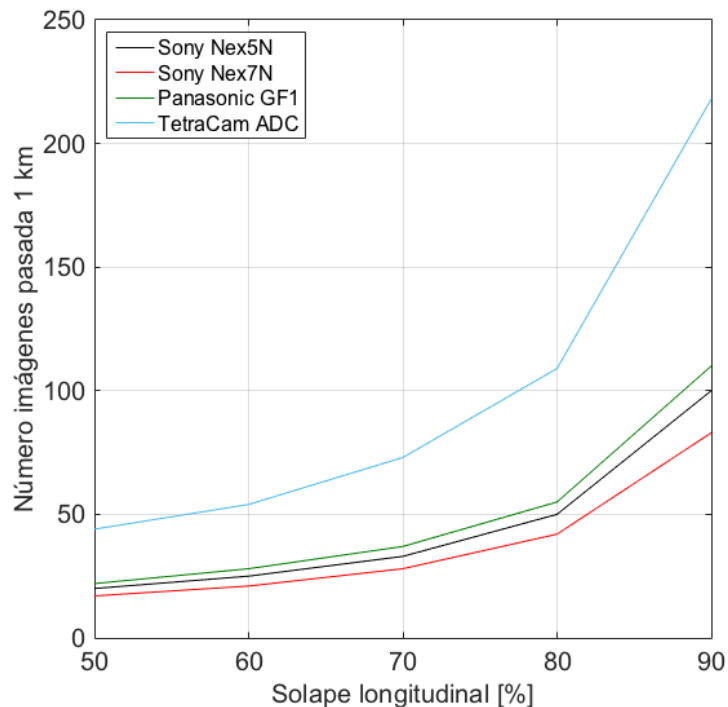


Figura 36 Comparativa solape longitudinal y número de fotogramas según cámara

Otro aspecto a tener en cuenta en la realización del vuelo son las condiciones del viento. Indudablemente, en primer lugar condiciones de vuelo con presencia de rachas de viento comprometen la estabilidad de la plataforma. Este aspecto puede ser solventado o amortiguado mediante el uso de una plataforma giroestabilizadora, que corrija movimientos y giros siempre y cuando estos no sean bruscos. El siguiente aspecto a tener en cuenta es cuando la plataforma esté volando con viento a favor, esta situación puede llegar a comprometer el éxito del vuelo por dos motivos:

- a) Presencia de imágenes borrosas. En el caso de haber planificado un vuelo con un elevado solape longitudinal y un adecuado tiempo de exposición, esta incidencia puede quedar minimizada dado el volumen de imágenes registradas.
- b) Reducción del solape longitudinal. El incremento de velocidad de la plataforma provoca que se recorra mayor distancia en menos tiempo. De este modo el porcentaje de solape longitudinal se verá reducido llegando incluso a peligrar la presencia de recubrimiento estereoscópico en la zona de trabajo.

Se ha realizado una simulación del comportamiento del solapamiento longitudinal tomando imágenes en *cruising mode* considerando:

- a) Dos velocidades de vuelo diferentes; la primera de ellas igual a 5 m/s correspondiente a un multirrotor y otra de 22 m/s desarrollada por un UAV de ala fija.
- b) Cuatro alturas de vuelo: 60, 80, 100 y 120 m AGL.
- c) Registrando imágenes a un intervalo de 5 segundos.
- d) Rachas de viento a favor correspondientes a: 0, 2, 4, 6 y 8 m/s.
- e) Cinco sensores: tres sensores RGB, una cámara multiespectral y un sensor termográfico.

La Figura 37 resume el comportamiento del solape longitudinal atendiendo a múltiples factores como son el tipo de sensor, la altura de vuelo, velocidad de viento, intervalo de tiempo entre imágenes y arquitectura de la plataforma. Considerando una franja entre el 60 y 80 % de solape longitudinal válida para posteriormente poder procesar con éxito un vuelo UAV se observa como una plataforma UAV de tipo ala fija presenta dificultades para alcanzar un solape longitudinal mínimo del 60% considerando la altura máxima permitida por la legislación vigente actual de 120 m AGL, debido a la velocidad a la que se desplaza. Tal aspecto se ve acentuado en el caso de sensores multiespectrales y termográficos donde el tamaño de la imagen es mas reducido que un sensor RGB convencional. Por lo tanto, en el caso de emplear un UAV ala fija es necesario programar el sensor para adquirir imágenes con un intervalo de tiempo lo mas bajo posible con objeto alcanzar el mínimo solape longitudinal requerido. En el caso de la plataforma de tipo multirrotor, dado que se desplaza a una velocidad 4 veces menor podemos observar como los sensores RGB no presenta problemas para alcanzar estos rangos de solape entre imágenes, incluso registrando una imagen con un intervalo de tiempo entre

imágenes mayor, el rango es alcanzado incluso empleando sensores termográficos o multispectrales.

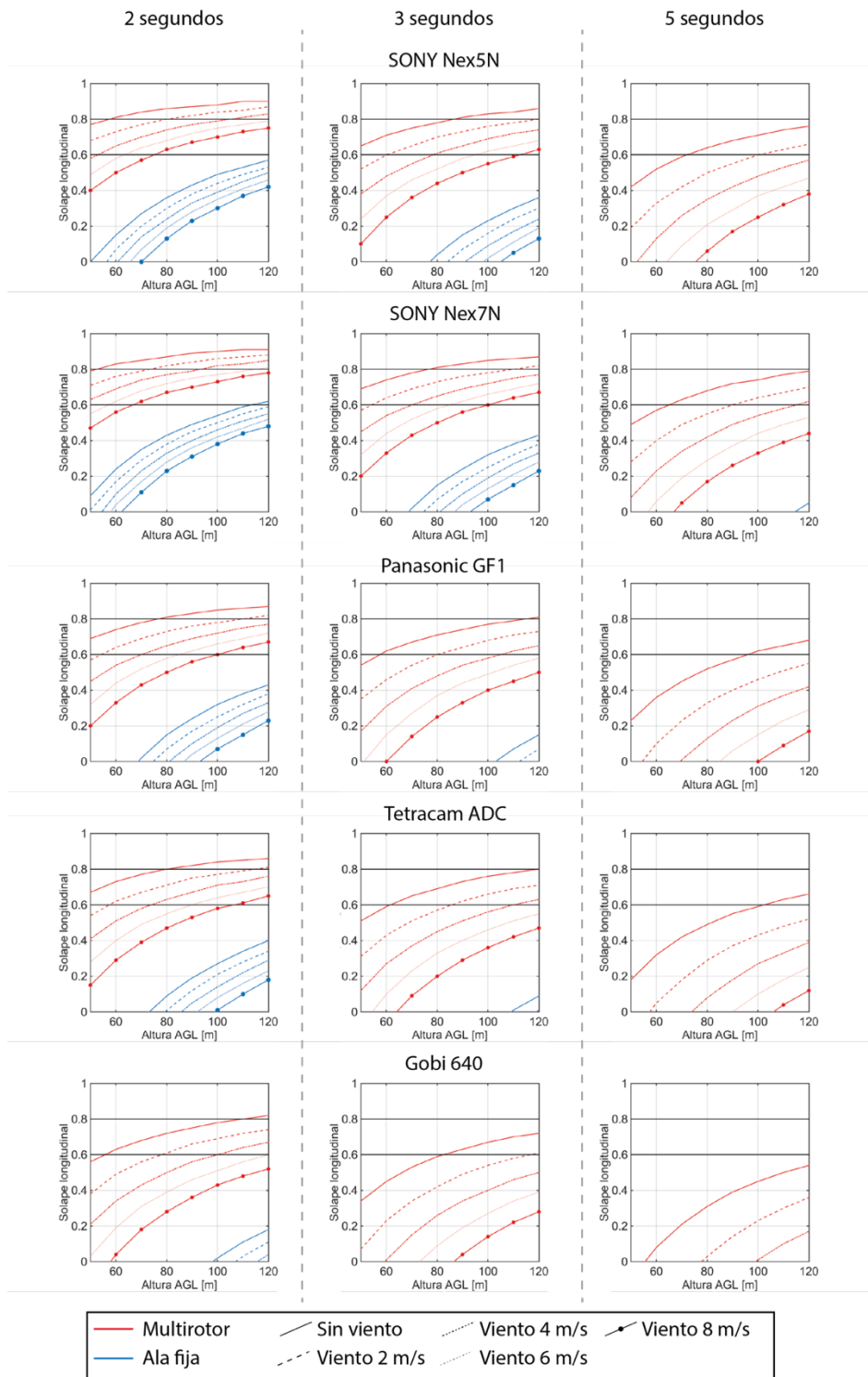


Figura 37 Comportamiento solape longitudinal según tipo de sensor, velocidad, intervalo de tiempo entre imágenes y tipo de arquitectura de plataforma.

Analizando la simulación realizada se observa como reduciendo el intervalo de disparo se incrementa notablemente el solape longitudinal. Esto hace que se tenga un respaldo en cuanto a imágenes de seguridad pero es evidente que el número de imágenes con el que trabajar aumenta considerablemente. Todas las cámaras analizadas registrando imágenes cada dos segundos permiten realizar vuelos sobre unos 120 m AGL con un solape mínimo del 60% empleando una plataforma multirotor. Si bien esto asegura uno de los aspectos fundamentales del vuelo como es la estereoscopía, a priori no se está siendo eficiente al tomar un exceso de información, máxime si la cámara empleada es de altas prestaciones donde los solapes llegan a alcanzar valores superiores al 80% según la altura de vuelo, sin embargo en el caso de plataformas UAV esta circunstancia es recomendable.

Otro factor importante a tener en cuenta es la altura de vuelo. A mayor altura de vuelo mayor es el recubrimiento longitudinal para un mismo intervalo de tiempo entre imágenes, de este modo siempre que el proyecto y/o la aplicación a desarrollar lo permita, se planificará el vuelo UAV a la mayor altura AGL posible. No obstante, si bien esto beneficia desde un punto de vista fotogramétrico hay que tener en cuenta por un lado que a mayor altura de vuelo más probabilidad aparece de presencia de turbulencias que afecten a la calidad de los Centros de Proyección (CdP).

En lo que respecta a la velocidad de vuelo se puede determinar que un aumento de esta reduce considerablemente el solape longitudinal, máxime si aparecen rachas de viento a favor en el movimiento de la plataforma. Igualmente un aumento en la velocidad de la plataforma incide negativamente en el consumo de energía lo cual se traduce en un menor tiempo de vuelo. La velocidad del sistema tiene que ser determinada conjuntamente con la presencia de la velocidad del viento. En condiciones de ausencia de viento no se presentan más problemas que los enumerados en los factores anteriores. Ahora bien, la simple presencia de una racha de viento a favor puede acarrear graves problemas que aseguren el cumplimiento de unos recubrimientos longitudinales mínimos. No es posible determinar una velocidad de crucero adecuada pues ésta depende tanto de la propia aeronave como del sensor, siendo necesario analizar este binomio de forma particular.

De los cuatro sensores analizados el que presenta mejor comportamiento y es más versátil en cuanto a condiciones de vuelo se refiere es la cámara Sony Nex7N, permitiendo realizar vuelos bajos de 100 m AGL y asumiendo mejor los inconvenientes

de volar con viento a favor dado las dimensiones de su sensor. Por otro lado la cámara que peores resultados ofrece es la TetraCam ADC, que permite realizar vuelos a 100 m AGL bajo ninguna circunstancia y presenta un comportamiento muy acusado a condiciones de vuelo, velocidad de navegación de la plataforma y el intervalo de registro de CdP.

4.2.6 Solape transversal

Al igual que se ha analizado el solapamiento longitudinal, es importante tener en cuenta el número de pasadas a realizar en el caso de que se esté volando una zona en forma de bloque.

En el apartado 4.2.4 del presente informe, se mostró la sección transversal cubierta por un fotograma según cada una de las cámaras analizadas. Esta gráfica pone de manifiesto como dependiendo de la cámara empleada se abarcará más o menos superficie del terreno según la sección transversal del vuelo. En el caso de plataformas UAV, este solape conviene aumentarlo por los mismos motivos expuestos en el solape longitudinal, frente a los valores adoptados en vuelos tripulados. Como consecuencia de esto hay que tener en cuenta el sensor que estemos empleando pues de él dependerá el hacer más o menos pasadas y por tanto el aumento en la exigencia de la capacidad de energía de las baterías así como el volumen de información a procesar. De los sensores expuestos en la Tabla 3, el sensor TetraCam es el que tiene que realizar mayor número de pasadas a igualdad de condiciones de vuelo. En segundo lugar aparece la cámara Panasonic GF-1, en el caso de querer realizar un vuelo con un solape transversal del 40% sobre un bloque de anchura 1000 metros sería necesario realizar 10 pasadas frente a las 8 y 7 pasadas de las cámaras Sony Nex5N y Nex7N respectivamente, lo cual se traduce en aumento importante de la duración del vuelo. Por tanto de nuevo, la cámara Sony Nex7N es la que mejor comportamiento presenta debido al tamaño de su sensor.

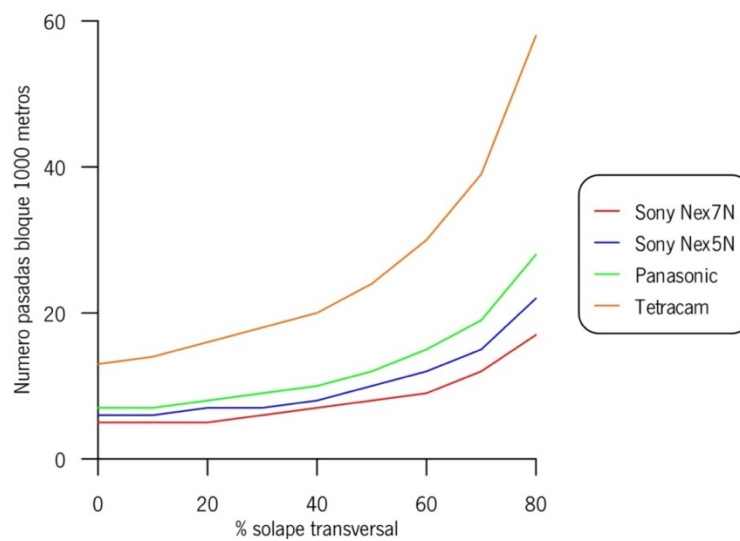


Figura 38 Comparativa solape transversal y número de pasadas según cámara

4.2.7 Plataforma giroestabilizadora

Uno de los motivos por los que se planifican y desarrollan vuelos con sistemas UAS con mayor porcentaje longitudinal y transversal que en vuelos tripulados es para poder garantizar la cobertura estereoscópica y así poder calcular la orientación de los fotogramas en la fase de procesado. Lógicamente tal aspecto va en contra de los costes temporales de los trabajos, este es uno de los motivos por el cual se emplea una plataforma giroestabilizadora que permite atenuar los efectos de las variaciones y oscilaciones del sensor durante el vuelo. Esta solución es comúnmente empleada en plataformas UAV de tipo multirotor. La Figura 39 pone de manifiesto las aportaciones de usar una plataforma giroestabilizadora durante el vuelo teniendo en cuenta el solape transversal. En el caso de este sistema, el solape está garantizado pese a pequeños giros de la plataforma (Figura 39.a), se observa como si bien se reduce el área de solapamiento en comparación con una toma de datos ideal (Figura 39.b), los efectos no son tan agresivos como en el caso de no emplear este sistema (Figura 39.c). En este último caso las condiciones de las tomas dificultan el proceso de orientación de los fotogramas que conforman el bloque.

Independientemente del tipo de plataforma de vuelo, los cambios en la dirección de vuelo son constantes a lo largo de la pasada, esto obliga a ir corrigiendo continuamente la trayectoria a fin de seguir la ruta trazada. En el caso de vuelos en forma de bloque una medida de seguridad es incrementar el número de pasadas aunque ello conlleve un aumento de los costes en la toma de datos y en el procesamiento de los mismos.

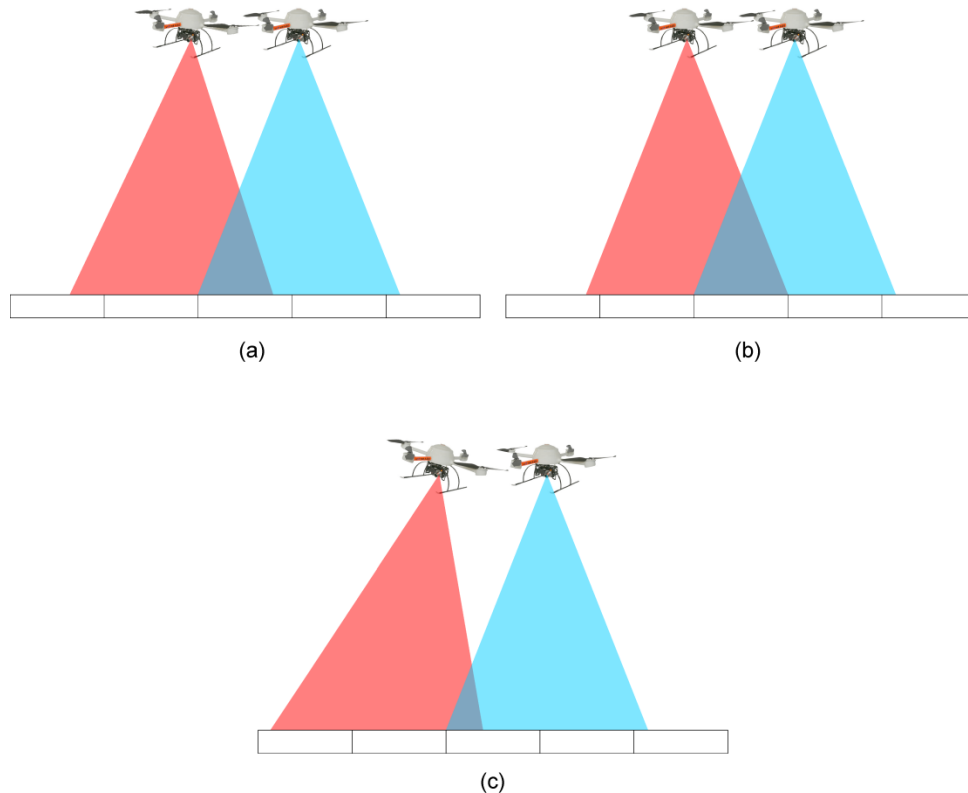


Figura 39. Efectos de emplear un sistema giroestabilizador: (a) solape transversal con plataforma giroestabilizadora, (b) caso ideal y (c) solape transversal sin plataforma giroestabilizadora.

4.2.8 Tamaño imágenes

El tamaño de las imágenes generadas dependerá del tipo de sensor empleado. A mayor número de Mpx mayor será el tamaño de la imagen como puede observarse en la Tabla 4. Este factor no es limitante en cuanto a la elección de la cámara a emplear en el proyecto. El volumen de imagen a registrar es relativamente pequeño en comparación con un vuelo fotogramétrico convencional debido en gran medida a la autonomía de vuelo. Igualmente el tamaño de las imágenes es considerablemente menor en comparación a las obtenidas por una cámara métrica de gran formato. En el caso de plataformas multirrotor, cualquier paquete fotogramétrico es capaz de gestionar de forma eficiente la información de un vuelo realizado mediante este tipo de plataformas. Empleando plataformas de ala fija el número de imágenes registrada es considerablemente mayor, siendo superior a 1.000. En este caso se hace necesario tener en cuenta los tiempos necesarios de procesado, estando vinculado al número de imágenes y por tanto a los parámetros de vuelo planificado.

Tabla 4 Tamaño imagen de 12 bits/pixel según cámara		
	Mpx	RAW (Mb)
Sony Nex7N	24.3	34.76
Sony Nex5N	16.1	23.03
Panasonic GF1	12.1	17.30
Tetracam	3.2	4.57

4.2.9 Calidad imagen

Sin duda alguna uno de los parámetros más importantes a la hora de evaluar y comparar cámaras es la resolución de éstas. Una caracterización de la resolución afín a los parámetros ópticos de un sensor óptico viene establecido por la la Función de Transferencia de Modulación (en adelante MTF). La MTF es una herramienta matemática que permite medir la resolución de una cámara. Una lente ideal transmitirá el 100% de la luz que la atraviesa. Dado que las lentes no son perfectas presentan pérdidas. Estas pérdidas si son medidas en términos de contraste se denominan modulación del contraste medida a distinta frecuencia espacial. Para la evaluación y determinación de la MTF de un sensor se fotografían patrones como la estrella de Siemens (Figura 40) o cualquier otro patrón definido (Figura 41).

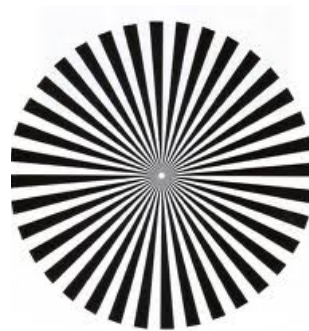


Figura 40 Estrella de Siemens

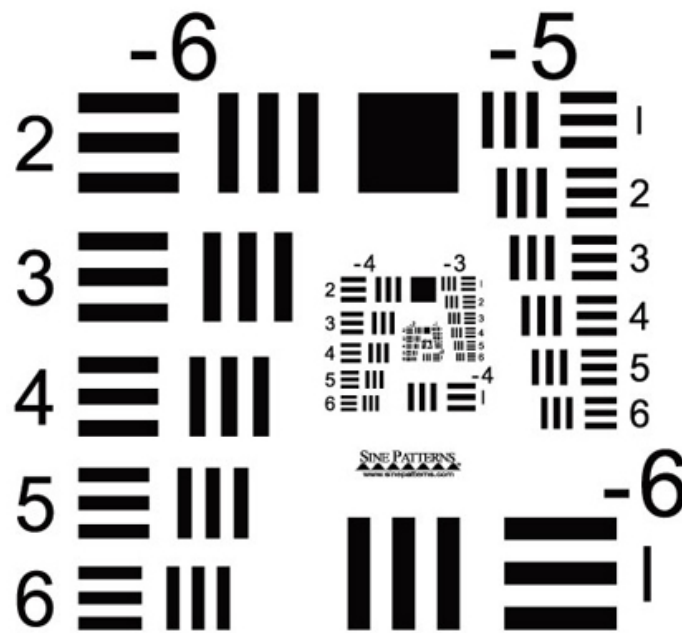


Figura 41 Patrón determinación MTF

En el caso de emplear la Estrella de Siemens la determinación de la MTF se determina siguiendo los siguientes pasos:

- Para el círculo máximo se localizan los píxeles de la bisectriz de cada sector.
- Se almacenan los valores digitales de los sectores blancos, realizando un promedio de estos. Igual proceso se desarrolla con los sectores negros.
- Se determina el factor de MTF como el cociente entre el contraste de la imagen y el contraste objeto, asumiendo este como el valor de contraste obtenido para las frecuencias espaciales más bajas.
- Se disminuye el radio en una unidad de pixel y se repite todo el proceso de cálculo.

Este proceso devuelve la Función de Transferencia del Contraste (CTF), la cual será una función decreciente y con valor máximo igual a la unidad para las frecuencias más bajas. La CTF se transforma a MTF mediante series numéricas de conversión de Coltman. La MTF es empleada para poder comparar el poder de resolución de los distintos sistemas, ofreciendo una representación completa de la pérdida del contraste del sistema para cada una de las frecuencias en las que se descompone el objeto.

Los aspectos a tener en cuenta a la hora de evaluar la MTF de un objetivo son:

- a) Cuanto más próximo al valor uno y más horizontal sea la representación mejor será el objetivo.
- b) Si la línea presenta valores superiores a 0.8 en todo el rango de valores el objetivo puede caracterizarse como excelente.
- c) En el caso de que los valores estén entre 0.6 y 0.8 el objetivo es calificado como bueno.
- d) Cuanto mayor sea la distancia entre curvas para una misma frecuencia mayor astigmatismo tendrá el objetivo de tal manera que no se podrá enfocar simultáneamente líneas verticales y horizontales.
- e) A menor astigmatismo y mas circular sea el orificio del diafragma mejor calidad en el desenfoque presentará.

En el caso de las cámaras Sony evaluadas en el presente informe, ambas montan un objetivo Sigma 19 mm F2.8 DN Lens. Este objetivo es de lente fija, con una distancia focal de 19 mm. La distancia mínima de enfoque es de 20 cm, siendo su máxima apertura igual a $f/2.8$ y la mínima $f/22$. El diámetro es igual a 60.0 mm, con una longitud de 45.0 mm y un peso de 160 gr. Su MTF aparece representada en la Figura 42.

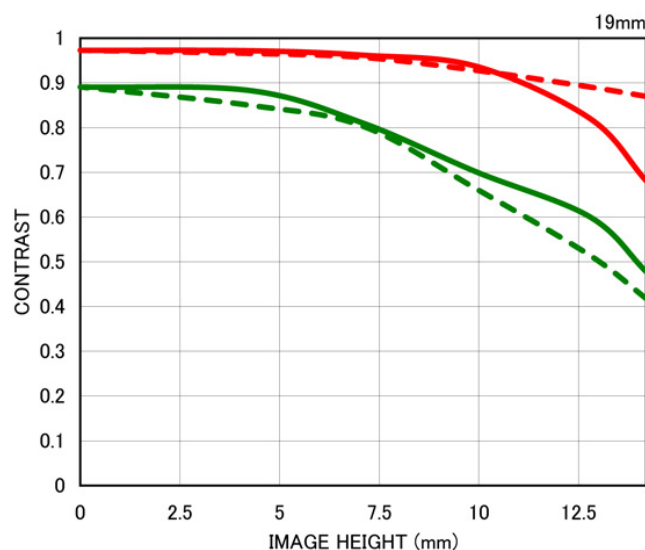


Figura 42 MTF objetivo cámaras Sony Nex5N (línea verde) y Nex7N (línea roja)

La cámara Panasonic GF1 monta un objetivo H-H020 de focal fija y equivalente a 20 mm. La distancia mínima de enfoque se corresponde con 20 cm. La máxima apertura es igual a $f/1.7$ y la mínima $f/16$. Presenta un diámetro de 63 mm, una longitud de 25.5 mm y un peso de 100 gramos. Su MTF aparece representada en la Figura 43.

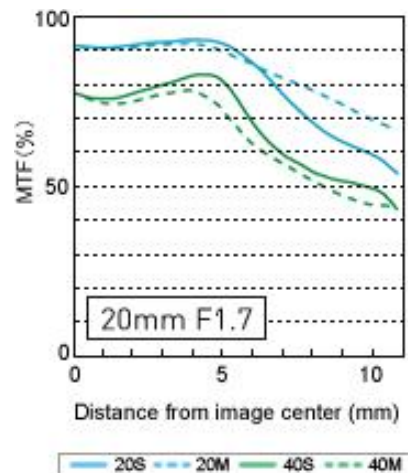


Figura 43 MTF objetivo H-H020

Con respecto a la cámara TetraCam ADC el fabricante no facilita información de la MTF y no ha sido posible analizar su comportamiento.

Comparando la MTF de los objetivos de las cámaras de la casa Sony y Panasonic puede verse como mientras en el caso de los modelos Sony para frecuencia de 10 l/mm (línea roja Figura 42) los valores están por encima de 0.8 en prácticamente toda la semidiagonal, no ocurriendo esto en el caso del objetivo H-H020 de Panasonic. En el caso de la frecuencia 30 l/mm (línea verde Figura 43) el mejor comportamiento lo presenta el objetivo montado en cámaras Sony, siendo en este caso la calidad del objetivo es definida como buena.

4.3 Instalación sensores

Según el tipo de plataforma UAV los sensores se instalan de una forma u otra y esto condiciona las operaciones que se puedan desarrollar con éstos; de este modo la instalación tiene un doble objetivo: (a) albergar y sustentar a los sensores y (b) poder realizar acciones con ellos tales como observar un punto determinado o tomar una imagen. De esta modo es posible que los sensores queden fijados al fuselaje de la plataforma de vuelo o bien empleen sistemas externos como gimbals o plataformas gitoestabilizadoras anclados a la plataforma de vuelo y sobre los que se instalan éstos. El primero de los casos es empleado por arquitecturas de ala fija y en el segundo caso tanto por multirrotor, ala fija, cometas, dirigibles, etc.

En el caso de la instalación sobre ala fija, los sensores aparecen anclados al fuselaje de la aeronave. En tal caso es necesario aislar el sensor de posibles vibraciones que

afecten a la calidad de las imágenes registradas, usando para ello tornillos anti-vibración. En este tipo de instalación, cualquier giro de la plataforma en la toma de la imagen no se verá corregido por ningún sistema y se verá reflejado en la toma. Como alternativa es posible instalar los sensores sobre una plataforma que corrija los giros del sensor, empleando para ello un sistema gimball. Este se encargará de corregir las variaciones en la orientación del sensor. Dependiendo del mecanismo empleado para la corrección de estas variaciones es posible distinguir entre gimball que usan servos o bien motores. En el primero de los casos (Figura 44.a), el sistema es más económico y ligero, presentando el problema que son algo más lentos en reaccionar que los basados en motores. Sin embargo, los segundos tienen un mayor coste económico y son más pesados, si bien el resultado que ofrecen es de mayor calidad. El peso de los motores empleados en el gimball tiene que ser proporcional al peso del sensor. En el caso de contar con distintos sensores a emplear de forma independiente, los gimball basados en servos no necesitan ningún tipo de acción preparatoria mientras que los basados en motores necesitan de una calibración. En este sentido, caso de realizar durante una jornada distintos vuelos con distintas cargas de pago, los trabajos se demoran en el tiempo, pudiendo cambiar las condiciones ambientales y perjudicando a los procesos y análisis sobre las imágenes registradas.

Además de la tecnología empleada es posible diferenciar entre gimball de dos (Figura 44.b) tres (Figura 44.c) o cinco ejes (Figura 44.d y e) dependiendo de la capacidad de actuación que ofrezcan. Igualmente, a mayor capacidad de movimiento el coste y el peso del sistema aumentarán.

El número de sensores para el registro de información dependerá del MTOW de la plataforma. De forma general se vuela con un solo sensor, si bien en aquellas plataformas con mayor potencia en los motores, e incluso volumen en la bodega en el caso de UAV se fija cabe la posibilidad de instalar dos o más sensores. Gimball con una capacidad superior a tres son empleados por plataformas de grandes dimensiones, peso, potencia y durabilidad en aire. Además de la instalación del propio sensor, en ocasiones éste necesita de la instalación de otros subsistemas como pequeñas unidades de almacenamiento de información, sistemas GNSS/IMU para la correcta orientación de la información, etc., los cuales también deben ser tenidos en cuenta en la definición de las necesidades del gimball a emplear.

Finalmente, pero no menos importante, es la seguridad de la instalación de la carga de pago, sobre todo en el momento del despegue y el aterrizaje. La instalación debe garantizar que los sensores no sufran impactos que provoquen desperfectos en el sistema óptico y/o electrónico.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 44 Tipologías instalación sensores: (a) gimbal basado en servos, (b) gimbal basado en motores de dos ejes, (c) gimbal de motores de tres ejes y (d) (e) gimball de cinco ejes y multisensores.

4.4 Sensores RGB

Esta familia de sensores son los mas populares y usados como carga de pago embarcada en una plataforma UAV, existiendo una amplia gama de posibilidades donde poder elegir (Figura 47). En una primera clasificación es necesario distinguir entre sensores compactos y réflex. Los primeros ofrecen unas dimensiones reducidas, son ligeros y fáciles en su uso. En cuanto a calidad de imagen, estos sensores compactos son menos evolucionados que los sensores digitales réflex de único objetivo (Digital Single Lens Reflex, DSLR). Igualmente estos sensores compactos presentan unos tiempos de exposición mas elevados que los sensores DSLR y una tasa de refresco de imagen bajos, generalmente 1 frame por segundo (frame per second, fps), aspectos que determinan que no sean los sensores mas adecuados en un vuelo UAV. Dentro de la categoría de sensores compactos destacar los modelos Sony W530, Casio Exilim EXS200 o Panasonic Lumix DMC-TZ218. Los sensores DSLR presentan una serie de ventajas frente a los sensores compactos, siendo de mayor interés para su uso características como un tamaño de sensor mayor, posibilidad de emplear distintos objetivos según necesidades, mayor sensibilidad, generalmente presentan un exposímetro integrado para la medida de la luz, etc. En esta categoría reseñar los modelos Sony Nex7, Panasonic Lumix GF1 o Canon EOS 750D. Una versión mas profesional dentro de los sensores DSLR son los denominados sensores bridge o cámaras de zoom largo. Estos sensores digitales son empleados en fotografía profesional, permitiendo una mayor control a la hora de registrar las imágenes. Éstos emplean objetivos de largo alcance, y si bien la calidad de las imágenes es excelente, el peso del sistema es mayor, lo cual reduce los tiempos útiles de la operación de vuelo. Además el objetivo de estos sensores no es posible quitarlo o intercambiarlo, siendo posible en algunos modelos acoplar filtros y lentes mediante un mecanismo de rosca. Dentro de esta categoría se encuentran los sensores Canon PowerShot S5, Sony DSC-HX200V, Nikon P520, Panasoni Lumix DMC-FZ45/100 u Olympus SP-600 UZ entre otros.

Una alternativa a los sensores digitales convencionales desde el año 2008 es el estándar creado por Olympus y Panasonic denominado Micro Four Thirds System (MFT) o cuatro tercios, diseñado desde un primer momento en un escenario completamente digital. El diseño de las lentes es significativamente menor frente a las empleadas por sistemas DSLR. Las dimensiones de estas cámaras son mas reducidas al tiempo que

el tamaño del sensor es mas grande, hasta nueve veces el de una cámara compacta, lo que permite registrar imágenes de una mejor calidad, si bien presentan una calidad ligeramente inferior a los sensores DSLR. En esta categoría como ejemplo aparecen los sensores Olympus E-5, Panasonic Lumix G2 o Kodak PixPro S1. Las especificaciones en el diseño de esta modalidad de sensores hace que no sea necesario tener en cuenta un espacio donde colocar el sistema de espejos y el pentaprisma, de este modo el cuerpo de la cámara es menor, una distancia focal menor y por tanto lentes mas pequeñas. Con carácter general las principales diferencias entre un sensor DSLR y uno MFT son:

1. Visor: Pese a que un sensor DSLR ofrece la posibilidad de tener un visor de la escena en tiempo real, su calidad es peor que el ofrecido por un sensor MFT de naturaleza electrónica, dado que entre otros aspectos muestra tal y como la imagen va a ser registrada.
2. Autofoco: Aquí reside la principal diferencia entre ambas tecnologías. Los sensores DSLR emplean un autofocus basado en comparación de fase mientras que los MFT emplean uno basado en la evaluación del contraste (Figura 45). El primero de ellos emplea un sensor dedicado a esta tarea que descompone la luz en dos imágenes y las enfoca hasta que las dos imágenes quedan unidas de forma conjunta en el sensor de enfoque, midiendo por tanto cuanta distancia hay entre las dos imágenes. El autoenfoco basado en evaluación del contraste se basa en el hecho de que una medida desenfocada presenta un menor contraste que una enfocada. Generalmente este último sistema es mas exacto que el primero si bien es mas lento.
3. Tamaño y peso: Los sensores MFT son considerablemente mas pequeños y ligeros que los sensores tipo DSLR.
4. Lentes: Las lentes empleadas en los sensores MFT son mas pequeñas y ligeras al tiempo que mas económicas que las de los sensores DSLR. No obstante no hay diferencias en cuanto a calidad de imagen se refiere.
5. Tamaño del sensor: El impacto puede variar mucho. Considerando el clásico formato de 35 mm, el factor de recorte empleado por los distintos sensores es muy variado tal y como muestra la Figura 46. El tamaño del sensor esta vinculado directamente con el campo de visión y con la distancia focal. Considerando la película de 35 mm como el tamaño estándar sobre el que comparar al resto de sensores se observa como un sensor MFT equivale a una distancia focal y una

profundidad de campo igual al doble. De este modo si se considera una lente de 25 mm f1.4 en 35 mm equivaldría en un sensor MTF a una lente 50 mm f2.8.

6. Calidad de imagen. Es similar en ambos tipos de sensores. Las diferencias aparecen en caso de baja luz en la toma, siendo de peor calidad la imagen en el caso de sistemas MTF.

La calidad en la imagen de un sensor analógico principalmente queda determinado por la calidad de las lentes debido a que una misma película es posible emplearla en distintos sensores. En el caso de los sensores digitales, tanto las lentes como las propias características del sensor determinan la calidad de éstas.

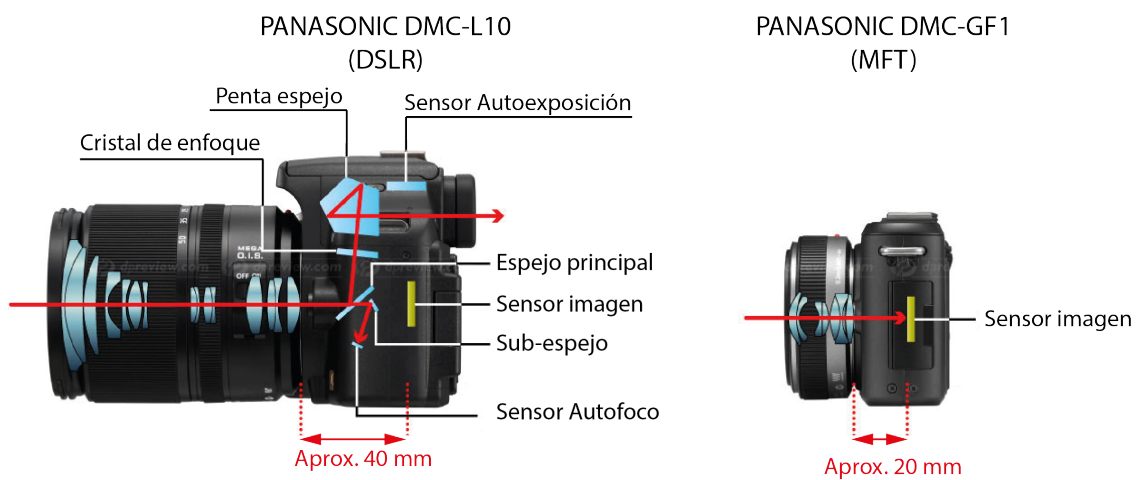


Figura 45 Comparativa sistema de enfoque sensores DSLR y MFT

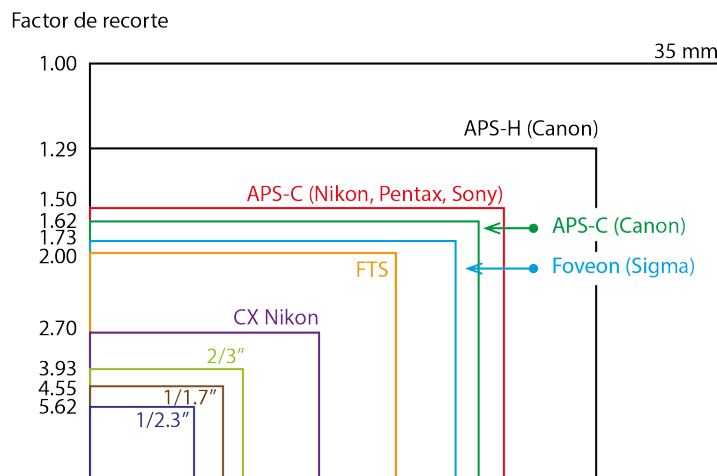


Figura 46 Variedad tamaño de sensor

Cámaras compactas



Sony W530



Casio EXILIM EX-S200



Panasonic Lumix DMC-TZ18

Cámaras DSLR



Sony Nex7



Nikon D80



Canon EOS 750D

Cámaras MFT



Olympus E-5



Panasonic Lumix G2



Kodak PixPro S1

Cámaras Brige



Canon SX510 HS



Sony DSC-HX200V



Panasonic Lumix DMC-FZ45/100

Figura 47 Tipos de cámaras RGB

4.5 Sensores multiespectrales

Las principales características en cuanto a los sensores multiespectrales embarcables en una plataforma UAV mas usados hoy día existentes en el mercado se resumen en la Tabla 5. Estos presentan distintas configuraciones, dimensiones, pesos y velocidades de adquisición de las imágenes, siendo su uso no generalizado y universal actualmente en todas las plataformas de vuelo, siendo necesario definir las prestaciones y características técnicas tanto de la plataforma de vuelo como del sensor de forma conjunta con objeto de afrontar la realización de un vuelo.

La firma Tetracam Inc ofrece distintas soluciones en cuanto a sensores multiespectrales se refiere, desde sensores de un único objetivo a conjuntos compuestos de 4, 6 o 12 sensores montados en un mismo cuerpo. En el primero de los grupos aparecen los

modelos Tetracam ADC Air (Figura 48.a), ADC Lite (Figura 48.b) y ADC Micro (Figura 48.c), mientras que en la segunda modalidad aparece el modelo Tetracam Multicamera Array (Figura 48.d). El modelo ADC Air tiene una resolución espectral igual a 3,2 micras, registrando imágenes en la región del espectro correspondiente al rojo, el verde y el infrarrojo. El tamaño de cada imagen es aproximadamente igual a 1 Mb., siendo las dimensiones de la imagen 2048x1536 px. El peso de la cámara es de 630 gramos. Presenta ciertos problemas con el rango dinámico de las imágenes trabajando con una resolución radiométrica igual a 8, pese a que es posible ajustar en modo manual la exposición. Tales problemas quedan solucionados configurando el sensor para trabajar en modo 10 bits (Huang, y otros 2010). Este modelo no es el más adecuado a emplear en un UAV de ala fija para volar a alturas AGL bajas dado a que el sensor necesita entre 3 y 10 segundos para obtener una imagen, lo cual no garantiza tener el mínimo solape longitudinal entre imágenes de la misma pasada. En el caso de un UAV multirrotor sería necesario emplear velocidades de movimiento horizontal no superior a 3 – 4 m/s siempre que sea posible garantizar un intervalo entre imágenes igual a 3 segundos. El modelo Tetracam ADC Lite es una versión más ligera de la ADC Air además de mejorar la velocidad en la captura de las imágenes, finalmente el modelo ADC Micro es el más rápido y ligero de los tres, aspecto a tener en cuenta a la hora de emplear en plataformas UAV tanto de tipo multirrotor por la mejora en la autonomía de vuelo, como en las de tipo ala fija por tener más solape longitudinal al ser mayor la cadencia en la toma de las imágenes. Estos tres modelos emplean la tecnología *rolling shutter* en la captura y formación de la imagen, lo cual dificulta los procesos de aerotriangulación del bloque de vuelo. De este modo Tetracam ofrece el modelo ADC Snap, similar al modelo ADC Micro pero con la diferencia que ésta emplea la tecnología Global Shutter para la toma de la imagen, aspecto muy a tener en cuenta si la cámara está destinada para la producción de ortofotografías. Los sensores descritos anteriormente presentan todos ellos una resolución espectral igual a 3. En el caso de necesitar mejorar ésta, la compañía Tetracam Inc ofrece una solución basada en una estructura matricial de sensores igual a 4, 6 o 12 denominada *Multi Camera Array* (MCA)(Figura 49). El producto desarrollado se presenta en dos versiones en cuanto a la formación de la imagen: *rolling* y *global shutter*, siendo este el más recomendable. Por defecto el producto ofrece unas bandas espectrales, si bien es posible solicitar unos filtros adaptados a las necesidades del usuario. Cada sensor es de tipo monobanda, registrando la imagen en una región concreta del espectro electromagnético. La Figura 50 presenta un fragmento de cada

una de las bandas espectral de una ortografía sobre un ensayo de olivar apreciándose las distintas respuestas según la región del espectro electromagnético captado. El sensor Tetracam miniMCA hace una diferenciación en la matriz de sensores entre sensor master y esclavos. El sensor master es el que gestiona el disparo, de forma que cuando llega una orden de registrar una imagen este se comunica con el resto de los sensores ordenando la captura. Dado que se trabaja en esta modalidad con seis sensores independientes desde un punto de vista geométrico, es necesario conocer la posición relativa de todos ellos con respecto al master en este caso, información aportada por el fabricante. Todos los sensores desarrollados por la empresa Tetracam se gestionan mediante el software PixelWrench2. Estos sensores se han empleado en proyectos relacionados con el análisis de variabilidad en viñedos (Primicerio, y otros 2012), estimación de los niveles de nitrógeno en cultivos como el arroz (Saberion, y otros 2013) o la determinación de la calidad de pastos (Von Bueren y Yule s.f.)

La compañía FluxData Inc. tiene desarrollado actualmente la serie de sensores multiespectrales FD-1665 (Figura 48.e) con 3, 5, 7 o 9 bandas. Cada banda se corresponde con un sensor CCD independiente basado en la cámara Basler Scout, empleando sensores monocromos ICX-618 de la compañía Sony. La separación de las distintas longitudes de onda de interés se realiza mediante un prisma VNIR. Su distribución se realiza según las necesidades del usuario, siendo posible elegir entre distintos tipos de sensores sensibles a distintas longitudes de onda y tamaño de pixel. El peso del sensor es superior a 1 kg, aspecto a valorar en la elección junto con la plataforma de vuelo empleada en cuanto a la MTOW y el tiempo de operación de los vuelos a realizar. Las experiencias de este sensor en agricultura son pocas, siendo utilizado en plataformas no tripuladas terrestres. Una alternativa de menor coste y peso es el sensor Micasense (Figura 48.f), con una resolución espectral de 5 bandas, éste tiene un peso de tan solo 125 gramos, lo cual lo hace ser una solución interesante a considerar en el caso de plataformas con poca capacidad de carga de pago. El disparo es de tipo *global shutter*, siendo capaz de registrar imágenes cada un segundo, facilitando alcanzar valores de solape longitudinal óptimos para posteriormente procesar el vuelo. El sensor Quest Condor (Figura 48.g) desarrollado por Quest Innovations se ofrece en 5 modalidades diferentes con 1, 2, 3, 4 y 5 sensores, pudiendo elegir entre un sensor monocromo, individuales para cada componente de color rojo, verde, azul y dos sensores mas para registrar longitudes de onda en el infrarrojo. En su versión de tres canales el sensor presenta 2.8 Mpx y un peso de 348 gr y 7.0 Mpx y un peso inferior a

los dos kilogramos en su versión de cinco canales. Ofrece una alta personalización y adaptación según las necesidades de la plataforma de vuelo. Si las necesidades de tasa de transferencia de datos es elevada, caso por ejemplo de plataformas de ala fija, es posible realizar la conexión con el subsistema de almacenamiento mediante fibra óptica. Si las necesidades de tasa de transferencia de datos es menor, es posible emplear la interfaz Gigabit Ethernet. La configuración permite incluso seleccionar entre la tecnología del sensor, filtro Bayer o Foveon en el caso del modelo Confor-1000 MS1. Por último, el sensor desarrollado PixelTeq SpectroCam (Figura 48.h) presenta un diseño conceptualmente distintos a los anteriores. El sensor se basa en una rueda de filtros rotatoria sincronizada con el sensor imagen, incluyendo una única lente en el sistema. Presenta la posibilidad de seleccionar los filtro de la rueda según las necesidades del usuario.

Una alternativa para la captación de información en la región del infrarrojo cercano es el empleo de sensores convencionales RGB modificados. El sustrato de silicio del sensor, bien sea CCD o CMOS, es con carácter general sensible entre las longitudes de onda 350 nm y 1100 nm, incluyendo por tanto la región del ultravioleta y la del infrarrojo cercano. Éstos sensores emplean un filtro Bayer para obtener la imagen RGB. En la fabricación del sensor se instala un filtro para anular la región del espectro no deseada. La solución de estos sensores modificados se basa en reemplazar el filtro de eliminación de la región del infrarrojo cercano por uno que permita la tramitancia de esta región. El filtro Bayer no es posible eliminarlo, de manera que dependiendo del filtro elegido cada canal será sensible a su color original y/o la radiación del infrarrojo. La Figura 51 muestra una comparativa entre una imagen captada con un sensor modificado RGB (Figura 51.a) y un sensor multiespectral (Figura 51.b). Actualmente no se tienen experiencias de aplicación de esta modalidad de sensores en agricultura.

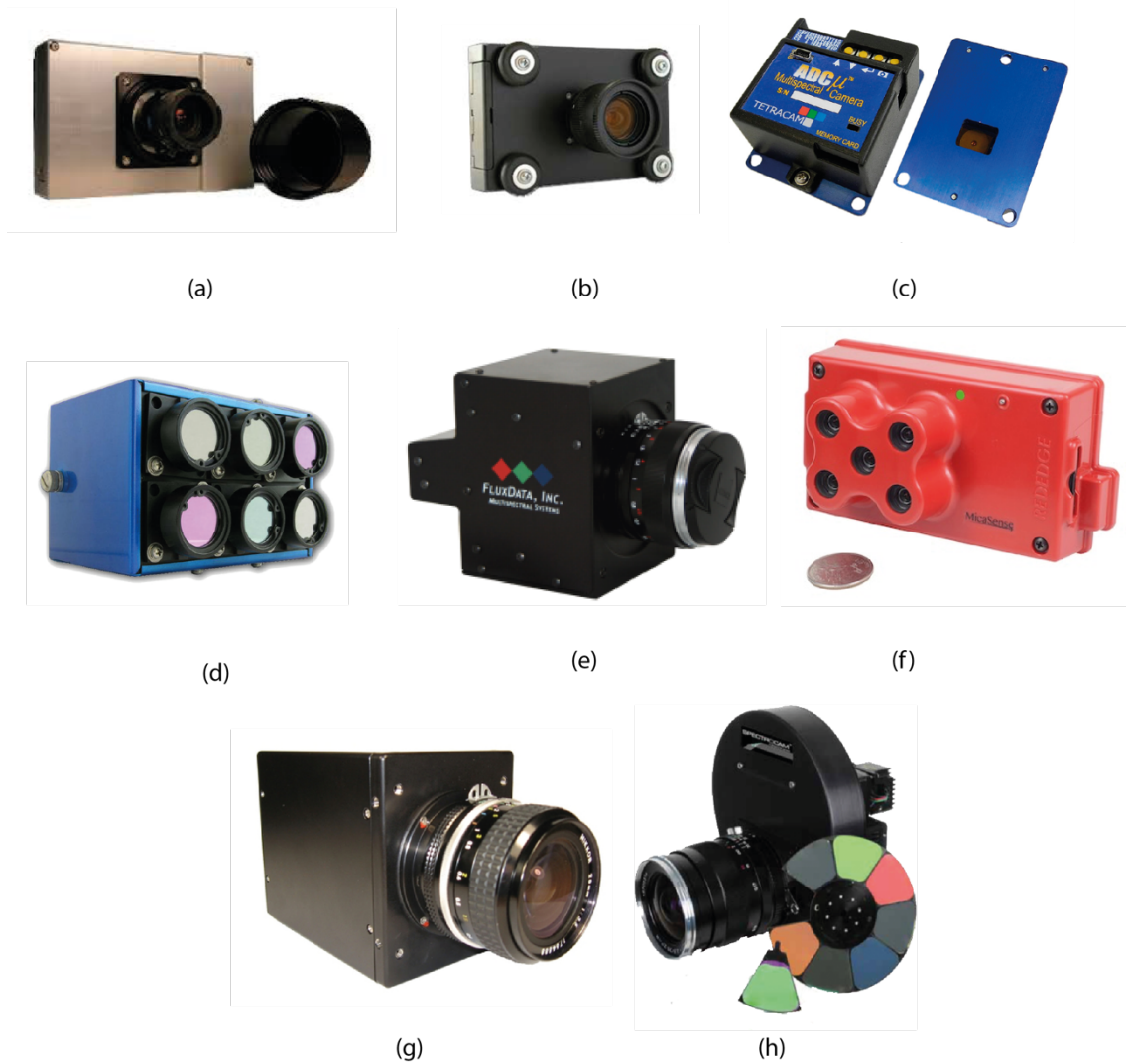


Figura 48 Sensores multispectrales: (a) Tetracam ADC Air, (b) Tetracam ADC Lite, (c) TetraCam ADC Micro, (d) TetraCam MultiCamera Array, (e) FluxData FD-1665-MS3, (f) Micasense, (g) Quest Condor 1000 MS4, (h) Pixelteq SpectroCam VNIR

Tabla 5 Resumen características sensores multispectrales

	ADC Air	ADC Lite	ADC Micro	Micro MCA	FluxData FD	Micasense	Quest Condor	SpectroCam
Focal [mm]		8		9.6	14 – 1500			
Tamaño pixel (µm)		3.2		5.2	5.5 – 9.9			6,45
Bandas (nm)		G: 520-600 R: 630-690 Nir: 760-900		490 - 950		Blue Green Red Red Edge Nir	400 – 1000	400 - 1000
Tamaño imagen (px)		2048x1536		1280x1024	659x494 / 1628x1236			1392 x 1040
Resolución espectral		3		4 / 6 / 12		5	1 / 2 / 3 / 4 / 5 /	8
Resolución radiométrica			8 / 10 bits		12 bit	12 bit		

Velocidad registro	3 – 10	1 – 7.5	0.5 – 6	0.5 - 5		1
Peso [gr]	640	200	90	497 / 530 / 1000	Según modelo	150

© TETRACAM INC. ANY REPRODUCTION IN PART OR IN WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF TETRACAM INC. IS PROHIBITED.

REV. DESCRIPTION DATE APPROVED

D USB CONNECTOR LOCATION

CAMERA SERIAL NUMBER: 221013

Channel	Filter	Exp. Adj.
Master (0)	<u>550-10</u>	<u>70</u>
Slave 1	<u>490-10</u>	<u>127</u>
Slave 2	<u>680-10</u>	<u>100</u>
Slave 3	<u>720-10</u>	<u>100</u>
Slave 4	<u>800-10</u>	<u>80</u>
Slave 5	<u>900-20</u>	<u>100</u>

B Master Camera Principle Point X 610 Y 480

COMPLETION DATE: 11/1/13

SHIP CONFIGURATION: USBDISK MODE NATIVE MODE

FIRMWARE REVISION: 5.167

A ② FINISH:
① MATL:

NOTES: UNLESS SPECIFIED OTHERWISE

5.28in [134.1mm]
3.05in [78.3mm]
1.50in [38.1mm]
3.45in [87.6mm]
1.7in [42mm]
4.63in [117.6mm]
4-40 UNC MOUNTING POINTS (2X) PER SIDE

REV. DATE APPR. BY DESIGNED BY CHECKED BY PARTS LIST

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES ARE: ±.01 ±.005 ±.01 ±.005 ±.01 ±.005

DO NOT SCALE DRAWING

SCALE: 1" = 1" CAD FILE: MIC-005 SHEET 1 OF 1

TETRACAM INC
21601 DEVONSHIRE ST. SUITE 310
CHATSWORTH CA, 91311
818 667-1731 FAX 818 718-7103

MICRO MCA
MIC-005

Figura 49 Vista a tres caras del sensor Tetracam miniMCA-6.

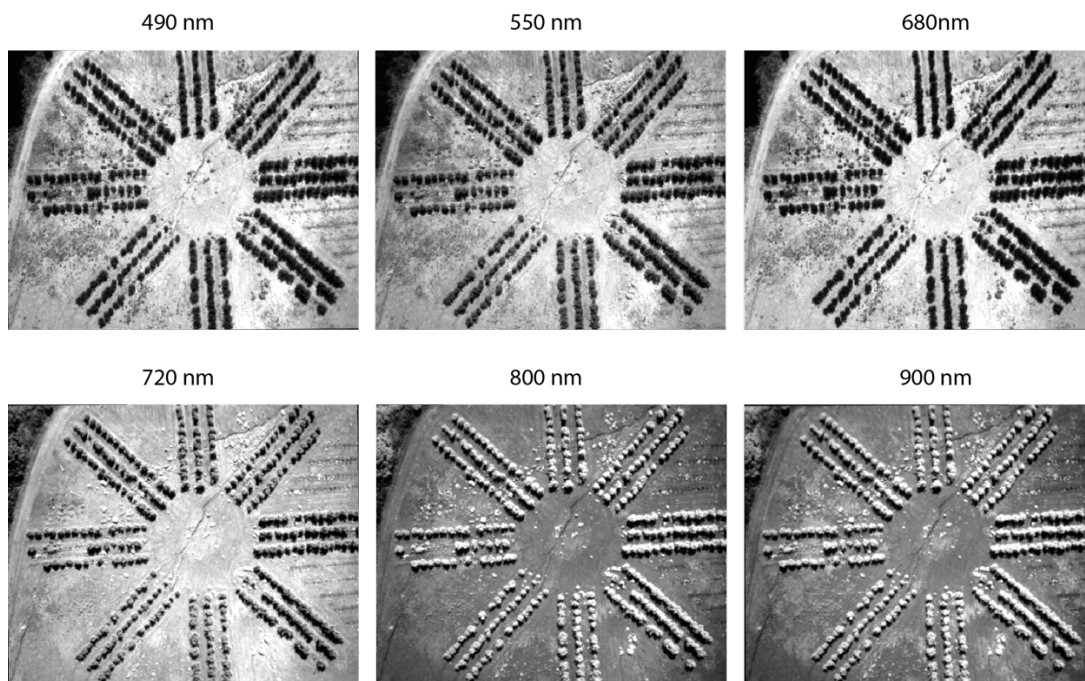


Figura 50 Muestra bandas espectrales del sensor Tetracam miniMCA-6 sobre ensayo de orientación en olivar

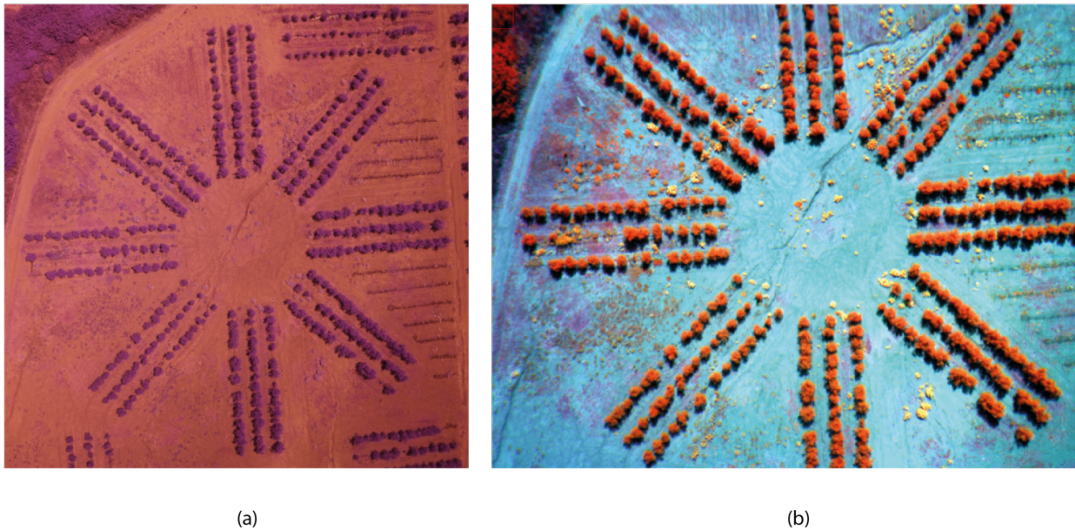


Figura 51 Comparativa entre imagen (a) sensor RGB modificado y falso color obtenido con (b) sensor multiespectral.

4.6 Sensores hiperespectrales

Esta modalidad de sensores son por lo general de tipo barrido, donde el sensor registra la información a lo largo de una línea del terreno, generando cientos de píxeles individuales en cada línea de escaneado (eje X), el movimiento de avance de la plataforma de vuelo genera en su desplazamiento el eje Y. Éstos registran información en cientos de bandas espectrales con un ancho espectral muy pequeño, lo cual permite trabajar sobre un rango espectral continuo a diferencia de los sensores multiespectrales que trabajan con una discretización del espectro electromagnético. La consecuencia es que para cada píxel se obtiene una información mucho más detallada a nivel espectral.

Al igual que los sensores multiespectrales, el desarrollo tecnológico ha permitido contar con sensores de dimensiones y peso más reducidos si bien no se ha llegado actualmente a alcanzar los niveles de los sensores RGB convencionales. Este aspecto hace que no puedan ser empleados por cualquier tipo de plataforma UAV, necesitando de aeronaves de altas prestaciones. Junto con el propio sensor es necesario embarcar en la plataforma un sistema GPS/INS que proporcione datos de posición y orientación de cada una de las líneas registradas (Figura 52.a) para su posterior corrección geométrica (Figura 52.b).

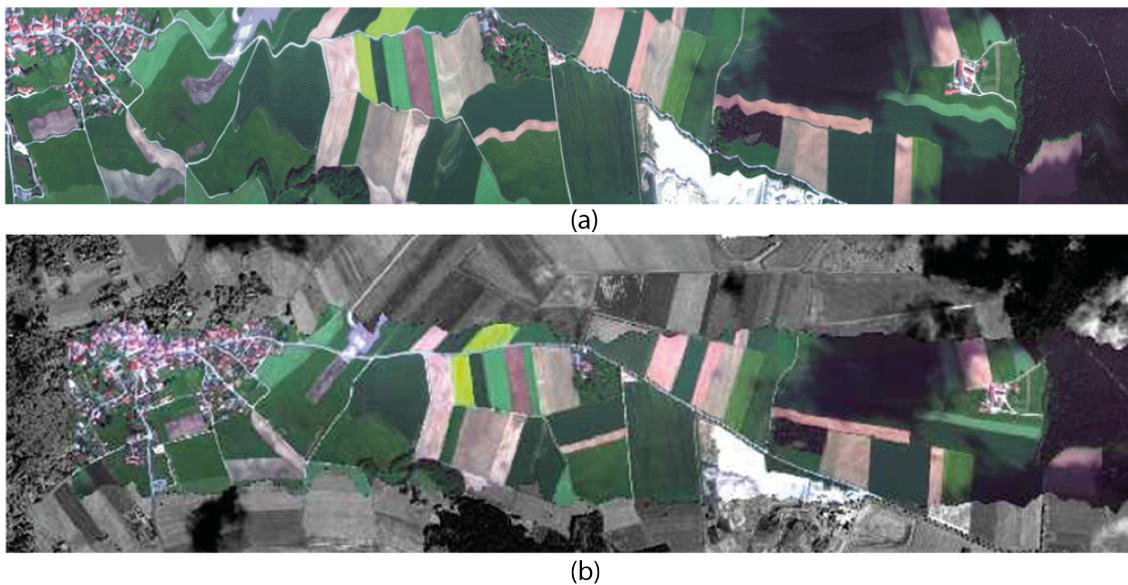


Figura 52 Imagen original (a) y resultado de una corrección geométrica (b) de un sensor de barrido (Oppelt y Mauser 2007)

La Tabla 6 resume las principales características técnicas de algunos sensores hiperespectrales empleados junto con plataformas UAV. Dentro de esta categoría, destacar en primer lugar el sensor desarrollado por Rikola Ltd. (Figura 53.a). El primer prototipo se desarrolló en 2012, empleando un sensor de imagen CMOS de 4.2 Mpx. Este sensor destaca por emplear la tecnología de área en la toma de información, no siendo necesario contar con un subsistema externo para la corrección geométrica de los datos. Lo que hace que el sensor reduzca considerablemente su coste económico para su puesta en funcionamiento. El tamaño de pixel es de 6.5 cm a 100 m AGL., registrando imágenes de 1010x1010 px.

Siguiendo la arquitectura clásica de sensores de empuje destacan los modelos desarrollados por Headwall Photonics Standard (Figura 53.b), Nano (Figura 53.c) y Micro (Figura 53.d). Su funcionamiento se basa en el empleo de un sistema de espejos cóncavos reflectivos con capacidad para la corrección de las aberraciones en la imagen y con una alta eficiencia holográfica libre de distorsiones, una relación señal ruido baja y luz parásita muy baja (Figura 54). El modelo Standard cubre distintos rangos espectrales según necesidades del usuario. El modelo Nano es un sistema completo hiperespectral diseñado para plataformas UAV donde la carga de pago es reducida. Este sistema integra tanto el sistema de adquisición de las imágenes como la posibilidad de integrar de forma sincronizada los datos de una unidad IMU/GNSS. Trabaja en el rango espectral entre 400 y 1000 nm, presentando un peso inferior a 700 gr. El tamaño

de imagen es de 640x480 y tiene una capacidad de almacenamiento de 480 Gb, aproximadamente unos 130 minutos. En el caso de la serie Micro, los modelos se distribuyen según tres configuraciones: VNIR, NIR y SWIR. Por último, el sensor SOC710-GX (Figura 53.e) desarrollado por Surface Optics Corp presenta un rango de espectral de operación de 400 a 1000 nm, siendo el ancho de barrido igual a 640 px. El sistema presenta un peso superior a un kilogramo, aspecto limitante a tener en cuenta para embarcar en algunas plataformas.



Figura 53 Sensores hiperespectrales: (a) Rikola camera, (b) Headwall Hyperspec standard, (c) Headwall Hyperspec Nano, (d) Headwall Hyperspec Micro, (e) SOC710-GX

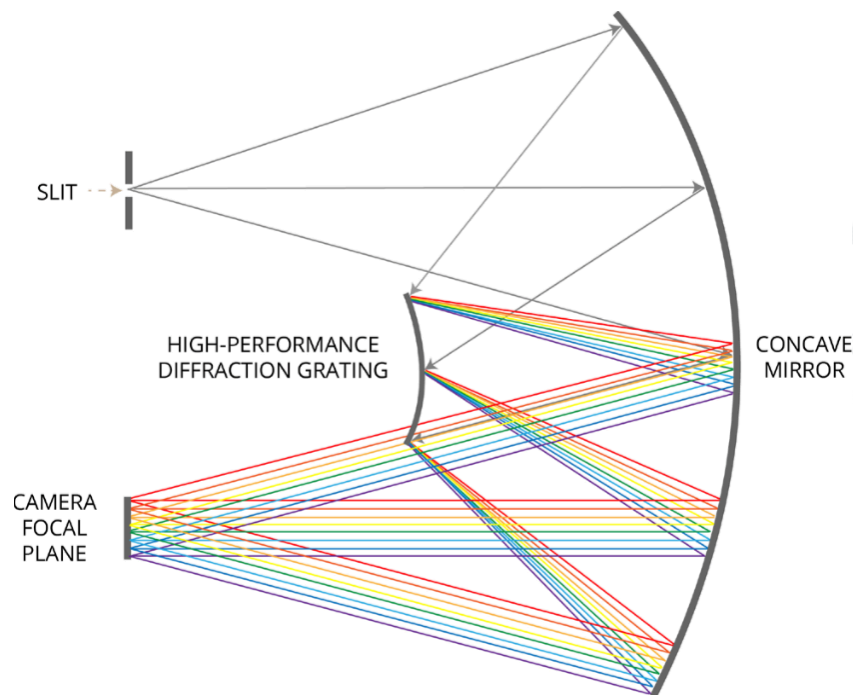


Figura 54 Esquema separación espectral de la fuente luminosa incidente en el sensor (<http://www.headwallphotonics.com>).

Tabla 6 Resumen características sensores hiperespectrales

	Rikola	Headwall Standard	Headwall Nano	Headwall Micro	SOC710-GX
Focal [mm]	9		17		
Tamaño pixel (μm)	5.5	5		7.4 – 15 - 30	9.9
Rango espectral	500-900	550-1700	400-1000	380-1000 900-1700	400 – 1000
Tasa de captura [frames/s]	30			90 -100	90
Intervalo espectral (nm)	1	5-7	2	1.9 – 6.4 – 12.9	4.2
Resolución espectral	380	250-287-239	270	335 – 125 - 62	120
Resolución radiométrica	12 bit	14	12	12 -14	12
Peso [gr]	720		680	790 - 1000	1250

4.7 Sensores de temperatura

Es posible emplear dos modalidades de sensores para registrar temperatura: térmicos y termográficos. Mientras que el primero mide las diferencias de temperatura entre los distintos objetos presentes en la escena, es decir, es un sensor de tipo cualitativo, el segundo mide y registra las temperaturas de éstos, es decir, es un sensor de tipo cuantitativo. Por lo tanto, para el caso de aplicación al sector agroforestal es este el que

tiene mayor interés para aplicaciones agronómicas. Además, pensando en el objetivo de generar una ortofotografía un sensor térmico adquiere las imágenes empleando siempre su máximo rango dinámico de manera que cada imagen es independiente de las demás dado que trabaja en modo relativo, por el contrario un sensor termográfico trabaja en modo absoluto de forma que las imágenes están relacionadas unas con otras, siendo posible su procesado desde un punto de vista fotogramétrico.

A diferencia de una cámara RGB, multi o hiper-espectral, la cual depende de la luz para la creación de una imagen, una cámara térmica y/o termográfica es capaz de detectar diferencias de temperatura y convertirlas en una imagen térmica. Por lo tanto estos sensores no necesitan una cantidad mínima de luz para la generación de la imagen. La primera cámara térmica fue diseñada para fines militares en el año 1958 por parte de AGA, empresa sueca que mas tarde sería la actual FLIR Systems. En su evolución tecnológica, no sería hasta 1965 cuando se desarrollase el primer sensor con fines comerciales, y hasta 1973 cuando se incorporase el calificativo "portátil". Este sistema era pese a esto muy voluminoso debido a que el sistema necesitaba de forma obligatoria rellenar el sensor de nitrógeno líquido con objeto de tener refrigerado el detector de infrarrojos. A mediados de la década de los 80 se presentarían los primeros sensores que no requerían refrigeración por nitrógeno líquido, que fué sustituido por un refrigerador criogénico. No sería hasta el año 1997 cuando se comercializase el primer sensor térmico con un detector no refrigerado, denominado microbolómetro. Éste se corresponde con un diminuto resistor de óxido de vanadio o de silicio amorfo con un elevado coeficiente térmico el cual se coloca sobre un elemento de silicio con una gran superficie, gran capacidad calorífica y buen aislamiento térmico. La radiación infrarroja incide sobre el óxido de vanadio y modifica su resistencia eléctrica. Los cambios de temperatura de la escena observada generan cambios en la temperatura del bolómetro, los cuales se traducen en señales eléctricas que se procesan a modo de imagen. La ventaja de emplear sensores no refrigerados es el menor peso de éstos frente a los refrigerados además de no presentar partes móviles en el propio sensor. Sin embargo, la calidad de la información registrada es mucho mejor en un sensor refrigerado, tal y como muestra la comparativa de la Figura 55. Mientras que un sensor refrigerado (Figura 55.a) no presenta ruido entendido como variaciones de temperatura en superficies homogéneas un sensor no refrigerado si (Figura 55.b). De este modo un sensor no refrigerado presenta como ventajas el coste económico, la inmediatez en la

toma de la imagen y un menor peso, por el contrario presentan mayor ruido en la señal y son menos sensibles que los detectores refrigerados.

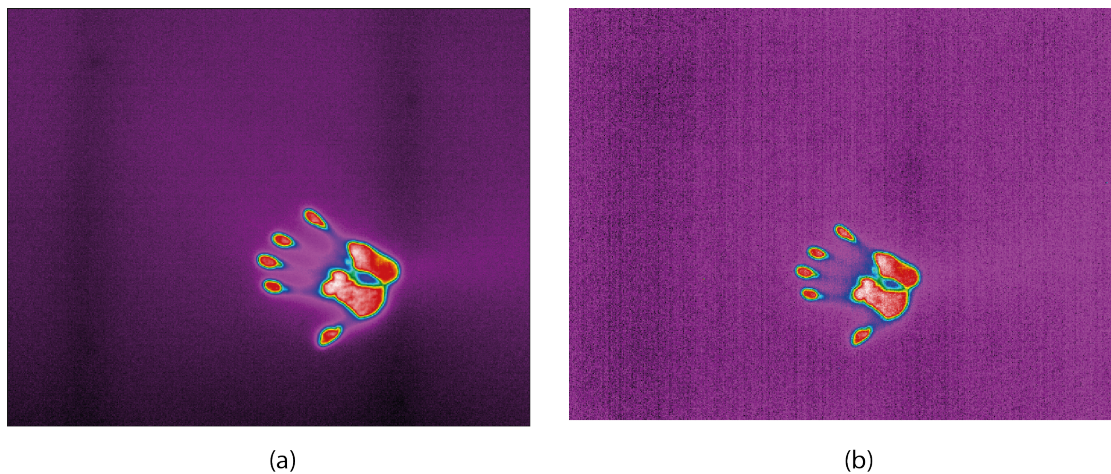


Figura 55 Comparativa sensor termográfico (a) refrigerado frente a uno (b) no refrigerado

De todos los sensores embarcados en un UAV, esta tecnología es la que más recorrido de desarrollo y evolución presenta entre otros factores por su novedad. Esto se refleja en sensores con dimensiones en imagen muy pequeños, máximo 640 x 480 píxeles, tamaños de CCD grandes y lentitud en la grabación de imágenes. Todo esto tiene como consecuencia directa que la planificación y procesamiento a partir de un vuelo necesite de un buen conocimiento de las características de la plataforma de vuelo. Es necesario volar a velocidades bajas que permitan tener una mínima base aérea debido a las reducidas dimensiones de las imágenes, se necesitan en la mayoría de las ocasiones material auxiliar para el almacenamiento de la información captada debido a que estos sensores están diseñados fundamentalmente para inspecciones en tiempo real de puntos calientes, etc.. La consecuencia es un aumento en el peso de la carga de pago, lo cual reduce los tiempos de vuelo de la plataforma. La Tabla 7 presenta un resumen de sensores termográficos válidos para ser empleados en un UAV. Dadas las características de éstos, no todos ellos ofrecen un entorno adecuado pensando en la generación de ortofotografías térmicas, siendo la mejor opción aquellos que presenten el mayor tamaño de imagen. De todos ellos, el sensor Flir A6700sc es el único que es refrigerado (Figura 56.a), aspecto que se ve reflejado en un mayor peso. En cuanto a sensores no refrigerados los sensores más empleados actualmente son Gobi 640 (Figura 56.d) y Miricle (Figura 56.e). Estos dos sensores presentan las mismas características técnicas, incluido el inconveniente de no almacenar los datos registrados, siendo necesario el desarrollo de una unidad de almacenamiento que

conecte con el sensor, lo que provoca un aumento de peso. El sensor TAU2 640 (Figura 56.f) presenta las mismas características que los dos anteriores, añadiendo la ventaja de tener ya diseñado en el propio sistema el almacenamiento de las imágenes registradas.

Tabla 7 Resumen características sensores termográficos

	Flir A6700sc	Flir A6x5sc	Optis PI-640	Gobi 640	Miricle	TAU2 640
Tamaño imagen	640x512	640x480	382x288	640x480	640x480	640x512
Tamaño pixel (µm)	15	17		17	25	17
Rango espectral (µm)	3-5 o 1-5	7,5-14,0	7,3 – 13	8 – 14	8 - 12	7,5 – 13,5
Refrigeración	Si	No	No	No	No	No
Rango temp. (°C)	-20 a 350°C	-40 a 150°C 100 a 650°C	-20 a 100°C	-20 a 100°C 50 a 400°C	-20 a 50°C	-40 a 80°C
Peso [kg]	2,3	0,9	0,32	0,26		



Figura 56 Sensores termográficos: (a) FLIR A6700SC, (b) FLIR A6X5SC, (c) OPTRIS PI-450, (d) Gobi 640, (e) Miricle y (f) TAU 640

4.8 Sensores LiDAR

Este tipo de sensores constituyen una tecnología novel en cuanto a su explotación por parte de plataformas no tripuladas, existiendo pocos sensores en el mercado al igual que experiencias con los mismos. Todos ellos necesitan de una adecuada integración, con sensores de navegación y orientación de altas prestaciones en cuanto a exactitud y precisión se refiere con objeto de orientar cada uno de los puntos observados. De este modo además de la adquisición del propio sensor es necesario adquirir el sistema de geolocalización y almacenamiento. Los problemas actuales de esta tecnología además de la necesidad de la integración son:

1. El alcance de los rayos es corto, en el mejor de los casos es de aproximadamente 100 m, lo que obliga a volar con alturas AGL relativamente bajas para plataformas de ala fija, siendo montadas en la mayoría de los casos actualmente en plataformas de tipo multirrotor.
2. El peso del toda la carga de pago es elevada, aspecto que va en detrimento del rendimiento de la plataforma de vuelo, máxime en el caso de plataformas de arquitectura multirrotor. Esto obliga a emplear sistemas de vuelo con una gran capacidad de carga de pago
3. Esta tecnología actualmente se encuentra en un estado embrionario, habiéndose realizado ensayos en aplicaciones de gestión forestal principalmente.

Los sistemas actuales se resumen en el modelo VUX-1 de la casa Riegl, YellowScan y los modelos Velodyne Puck y HDL-32. El primero de ellos, el VUX-1 (Figura 57.a), tiene un peso de 3,75 kg, la mínima distancia en la captura de información es de 3 m, alcanzando un rango máximo de 300 m AGL. La exactitud en la observación es de 10 mm y una precisión de 5 mm, empleando como mecanismo de escaneado el de espejo rotatorio. El producto se ha montado actualmente en plataformas multirrotor. El sistema YellowScan (Figura 57.b) presenta un peso de 2,1 kg incluyendo la fuente de alimentación. La exactitud planimétrica es igual a $0.10 \text{ m} + 1\% \cdot \text{altura}$ y en altimetría $0.10 \text{ m} + 0.5\% \cdot \text{altura}$, registrando 40.000 puntos por segundo. Se ha empleado tanto en plataformas multirrotor como ala fija, en estas últimas la altura máxima recomendada es de 75 m AGL y una velocidad máxima de 55 km/h para alcanzar una densidad de ecos por metro cuadrado de 12, con un ancho de barrido de 180 metros. Por último la firma Velodyne tiene en el mercado dos modelos, el modelo Puck (Figura 57.c) y el HDL-

32 (Figura 57.d). Si bien los dos modelos descritos anteriormente presentan una solución donde ya está integrado el sistema de almacenamiento y de orientación, siendo necesario solo la conexión de un sistema GNSS bifrecuencia, los modelos de la firma Velodyne necesitan del desarrollo de todo el subsistema sensor, puesto que estos solo se corresponde con el propio sensor LiDAR. Así pues se hace necesario desarrollar o adquirir el subsistema de almacenamiento, posición, orientación y sincronización. El VLP-16 presenta un peso de 830 gr al cual hay que añadir los citados subsistemas. Presenta una altura AGL máxima de trabajo igual a 100 m y una capacidad para registrar 300.000 puntos por segundo, ofreciendo una calidad de 3 cm según el fabricante. El modelo HDL-32 es un modelo anterior, con algo más de peso 1 kg y con unas mejores prestaciones, siendo capaz de registrar 700.000 puntos por segundo con una exactitud de 2 cm.

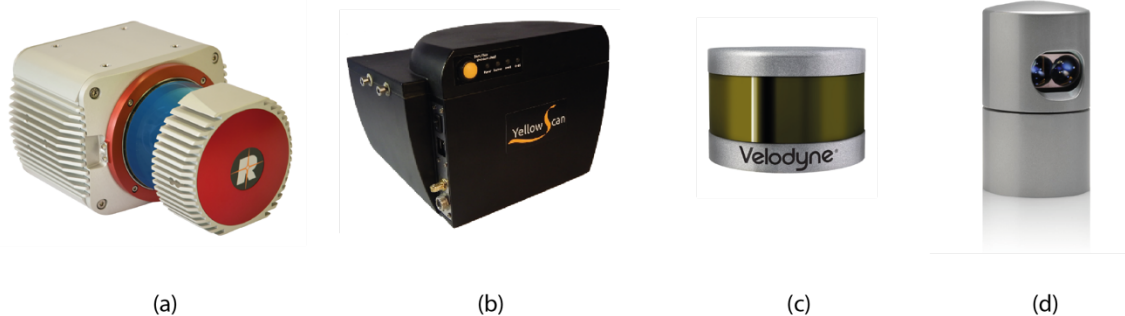


Figura 57 Sensores LiDAR: (a) Riegl VUX-1, (b) Yellowscan, (c) Velodyne Puck y (d) Velodyne HDL-32

4.9 Calibración métrica de sensores

Los sensores formadores de imágenes empleados como carga de pago en un sistema UAS son de tipo no métrico, de manera que presentan una geometría inestable y unos parámetros de orientación interna desconocida. Si bien estos sensores presentan como ventajas un reducido tamaño y peso así como una buena relación calidad/precio tienen una serie de limitaciones como son imperfecciones en las lentes del objetivo y una geometría interna desconocida. En el caso de emplear sensores métricos, como es el caso de fotogrametría clásica, éstos previamente calibrados en laboratorio, ofreciendo una geometría interna conocida y garantizada por un periodo de tiempo superior a un año. No es el caso de los sensores no métricos empleados con UAS, obligando al productor a determinar parámetros geométricos (distancia focal y coordenadas del punto principal) y parámetros físicos (distorsión radial y tangencial).

La formación de una imagen es una transformación de un espacio tridimensional a uno bidimensional basada en las leyes de la proyección central, de tal forma que:

1. Un punto objeto es representado por un solo punto en la imagen.
2. Un punto de la imagen puede representar a muchos puntos de la realidad por estar todos contenidos en el mismo rayo.
3. Una recta de la realidad es una recta en la imagen.
4. No se conservan los ángulos de manera que líneas paralelas en la realidad no son paralelas sobre la imagen.
5. Rectas paralelas al plano focal si son paralelas.
6. Otras líneas paralelas se cortan en un punto que denominado punto de fuga

En un sensor ideal, la transformación entre ambos espacios es de tipo lineal, pudiendo pasar de un espacio a otro y viceversa sin que existan variaciones en los puntos medidos. Dado que los sensores empleados se alejan de este tipo, la transformación entre ambos espacios es de tipo no lineal, poniéndose de manifiesto la necesidad de conocer de la mejor manera posible como es esta relación entre espacios a través de una calibración métrica. Según el modo en que se determinan los parámetros que explican la relación entre el espacio tridimensional, la realidad, y el bidimensional, la imagen, se diferencia entre calibración y autocalibración. La primera se realiza mediante la observación de patrones cuya geometría en el espacio 3D es conocida con un buen nivel de precisión mientras que la segunda se basa en el movimiento del sensor observando una escena estática, a partir de estos desplazamientos y empleando información de la imagen, siendo la "rigidez" de la realidad la que impone restricciones sobre los parámetros del sensor. En base a estas dos formas de trabajo se plantean tres posibilidades a la hora de determinar los parámetros internos del sensor:

1. Realizar una calibración fotografiando un patrón y determinando a partir de las imágenes registradas un conjunto de parámetros que serán empleados en el cálculo de la aerotriangulación. Éstos serán considerados como constantes y fijos en el ajuste del bloque fotogramétrico.
2. Calcular una aerotriangulación introduciendo los parámetros internos del sensor como unas incógnitas mas dentro del proceso de ajuste.
3. Una solución mixta pasa por realizar una calibración del sensor previa al vuelo. Dado que el sensor no es estable en el tiempo, se tienen unos parámetros internos que definen la relación entre el espacio 3D y 2D que pueden ser

considerados como unas aproximaciones iniciales mas exactas que las facilitadas por el fabricante. Además la toma de imágenes para la calibración del sensor no se realiza teniendo en cuenta las mismas condiciones que las obtenidas en vuelo. De este modo esos valores son empleados como aproximaciones iniciales en la fase de aerotriangulación que incluye una autocalibración.

Es posible emplear distintos tipos de cámaras si bien el modelo pinhole o modelo de cámara oscura (Figura 58.a) es un modelo conceptual que explica de forma adecuada el comportamiento real de un sensor. En este tipo la cámara presenta una apertura muy pequeña por donde pasan los rayos de luz, formándose la imagen a partir de la propiedad que tienen los rayos de luz de extenderse en línea recta. No obstante los sensores a emplear por lo general presentan un objetivo con varias lentes (Figura 58.b), si bien su fundamento es el mismo.

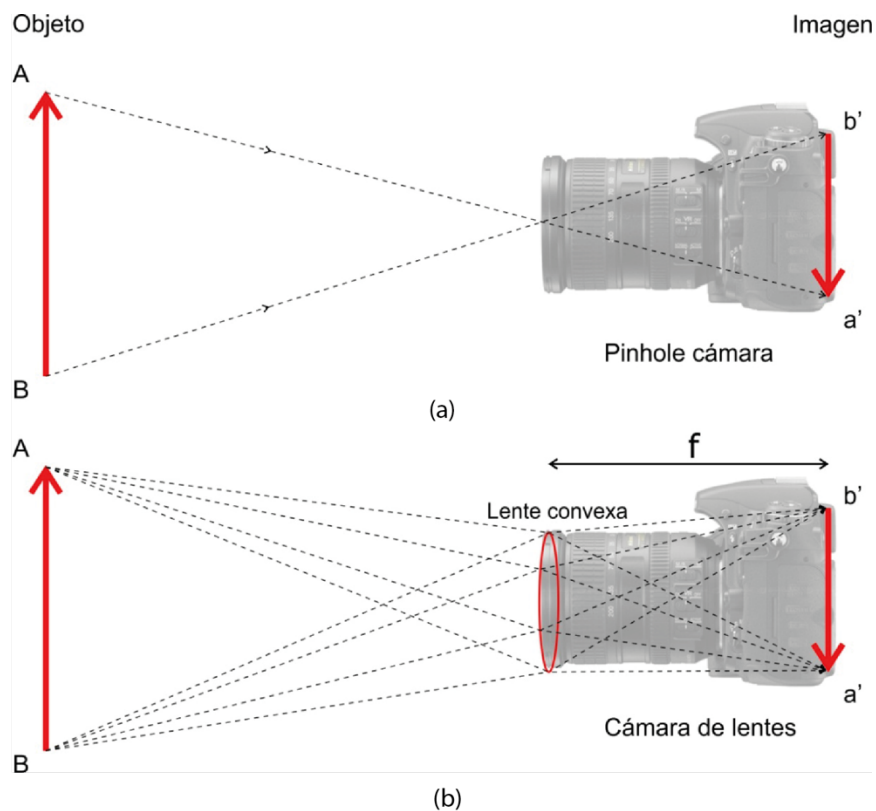


Figura 58 Modelos de cámara: (a) pinhole o cámara oscura y (b) cámara de lentes

Los dos sistemas de coordenadas manejados, 3D y 2D quedan definidos del siguiente modo (Figura 59.a). El sistema 3D presenta como eje Z la dirección hacia donde enfoca el sensor, denominándose a éste como eje óptico o eje principal. Perpendicular a él y

formando un triedro aparece los ejes X e Y, los cuales definen el plano principal. El plano imagen sobre el que se define el sistema de coordenadas imagen es el plano donde se proyecta lo captado por el sensor. Éste es paralelo al plano principal, apareciendo localizado a una determinada distancia denominada distancia focal y contenido a los ejes x e y del sistema de coordenadas imagen. De este modo es posible establecer una relación entre las coordenadas 3D y 2D de un punto de la forma (Figura 59.b) (Ec. 1):

$$x = f \cdot \frac{X}{Z} ; y = f \cdot \frac{Y}{Z} \quad \text{Ec. 1}$$

La relación definida en Ec. 1 se corresponde con el modelo general y no contempla la no relación lineal entre ambos sistemas de coordenadas. De esta manera es posible que el origen de coordenadas del sistema imagen no se encuentre localizado sobre el eje óptico de la cámara, el tamaño del sensor CCD no sea exactamente un cuadrado de forma que exista una relación de escala entre los sistemas diferente, es necesario contemplar la posibilidad de la presencia de un efecto de cizalla en la formación de la imagen así como distorsiones radiales, tangenciales y efectos de ojo de pez. De este modo es necesaria la determinación de parámetros extrínsecos, relativos a los sistemas de coordenadas, e intrínsecos, relativos a las propiedades ópticas de la cámara, que desarrollen el proceso de formación de la imagen.

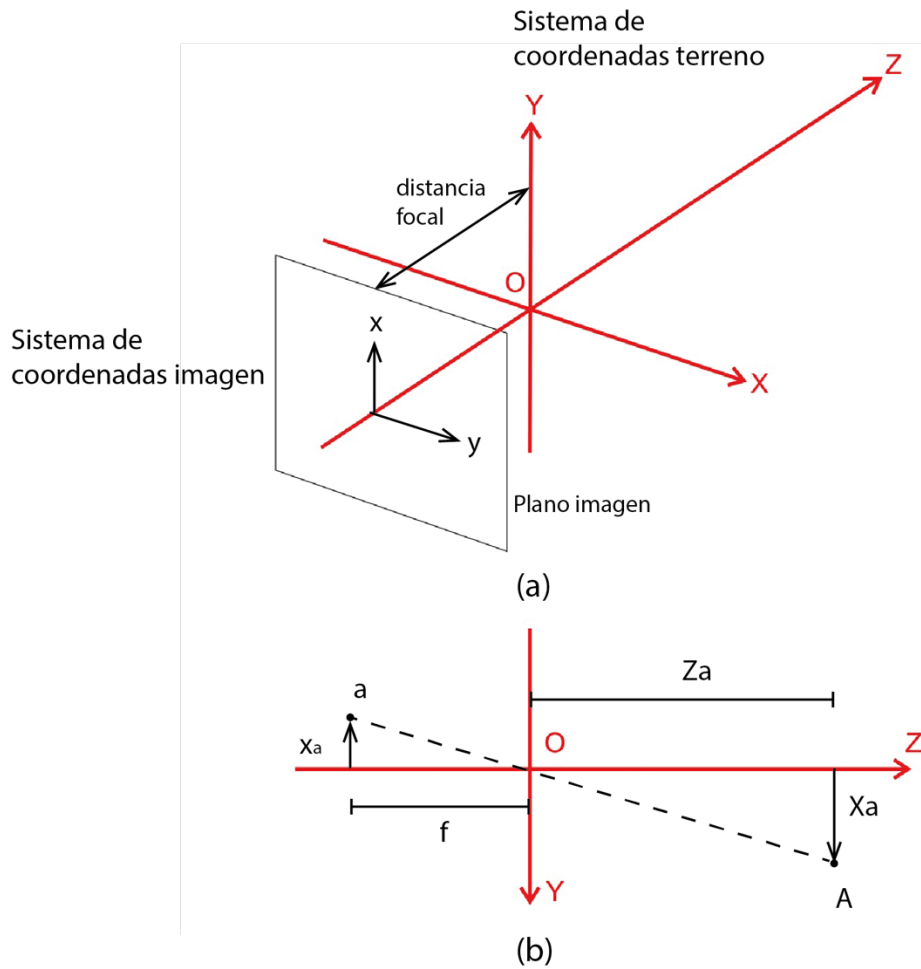


Figura 59 Cámara pinhole: (a) Definición sistemas de coordenadas, (b) relación espacial entre sistemas

La Ec. 1 queda expresada en forma matricial como Ec. 2:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 2}$$

En el caso de que exista una translación (t_x, t_y) entre sistemas de coordenadas, de forma que no exista una coincidencia entre el origen del sistema de coordenadas imagen y la intersección del eje principal con el plano imagen la relación será igual a Ec. 3:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & t_x \\ 0 & f & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 3}$$

Si además se presenta un relación de escala diferente para los ejes x e y (m_x, m_y), el modelo será definido como Ec. 4. El resultado será que el pixel será entendido como un rectángulo en lugar de un cuadrado.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f \cdot m_x & 0 & t_x \cdot m_x \\ 0 & f \cdot m_y & t_y \cdot m_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 4}$$

La ecuación Ec. 4 modela los parámetros extrínsecos que relacionan los sistemas de coordenadas. Además es necesario definir los parámetros intrínsecos que derivan en la presencia de distorsiones geométricas sobre la imagen, de este modo se presentan aberraciones cuya consecuencia es la presencia de algún tipo de defecto sobre los rayos de luz dirigidos hacia un punto exacto. Dos son las distorsiones a considerar, en primer lugar la distorsión radial, generada por el incorrecto pulido de las lentes, desplaza los puntos de la imagen radialmente a partir del centro, mientras que la tangencial los desplaza perpendicularmente a la línea radial y su origen se encuentra en la falta de alineación entre los componentes ópticos del sensor. Los valores de ambas distorsiones pueden ser expresados bien mediante un factor de deformación asociado a una distancia medida desde el centro de la imagen expresados a intervalos regulares o bien mediante coeficientes de un polinomio, siendo esta última la fórmula más empleada. De este modo las coordenadas de un punto sobre la imagen corregidas de distorsión será expresadas como (Ec. 5):

$$\begin{aligned} x_c &= x + dr_x + dp_x \\ y_c &= y + dr_y + dp_y \end{aligned} \quad \text{Ec. 5}$$

Siendo (x_c, y_c) las coordenadas imagen, (x, y) las coordenadas corregidas de distorsión radial, dr , y tangencial, dp .

El modelo matemático general para la determinación de la relación entre coordenadas imagen con y sin distorsión es el definido como Modelo de Distorsión de Brown's (Ec. 6):

$$\begin{aligned} x' &= x \cdot (+K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6) + P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) + 2 \cdot P_1 \cdot x \cdot y \\ y' &= y \cdot (+K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6) + P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2) + 2 \cdot P_1 \cdot x \cdot y \end{aligned} \quad \text{Ec. 6}$$

↓

$$u = x_c + x' \cdot f_x + y' \cdot skew$$

$$v = y_c + y' \cdot f_y$$

Siendo (x', y') y (u, v) las coordenadas de los puntos distorsionados proyectados en el plano imagen, (x, y) las coordenadas de estos puntos sin distorsión sobre un modelo de sensor ideal, r es definida como la distancia de cada punto respecto del centro de distorsión (x_c, y_c) que puede ser asumido como el punto principal. Finalmente K_n y P_n se corresponden con los coeficientes que modelan la distorsión radial y tangencial respectivamente.

La determinación de los parámetros se realiza a partir de la toma de un conjunto de imágenes de un patrón (Figura 60) del cual se conocen las coordenadas y relaciones espaciales de sus elementos. A la hora de fotografiar el patrón de calibración es necesario tener en cuenta emplear una adecuada iluminación, siendo recomendable apoyar el sensor sobre un trípode para evitar movimientos de éste en el momento de las tomas de las imágenes, buscando siempre el máximo encuadre posible. Este patrón será fotografiado desde distintos puntos de vista (Figura 61) y mediante algoritmos de reconocimiento de patrones y/o elementos geométricos, como esquinas, se medirán un conjunto de puntos del panel de forma automática con objeto de poder calcular todos los parámetros de interés.

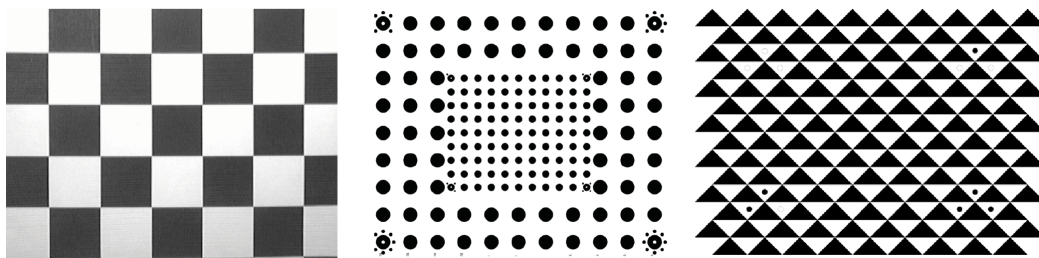


Figura 60 Ejemplos de distintos patrones de calibración

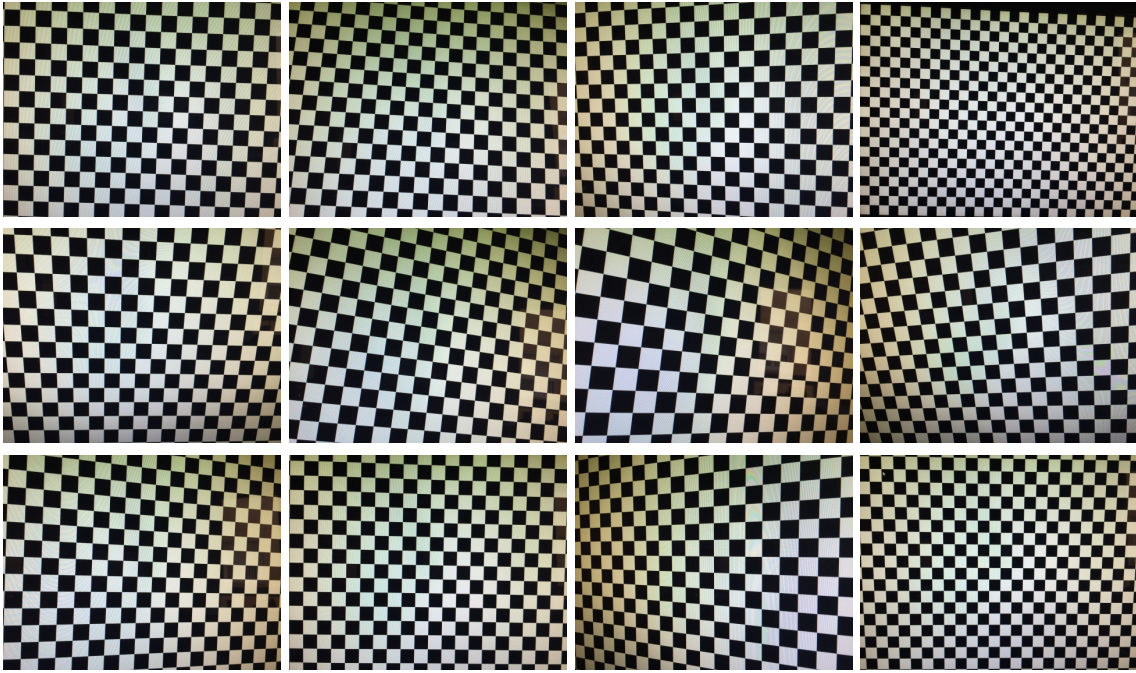


Figura 61 Imágenes captadas de un patrón desde distintos puntos de vista

5 OPERACIÓN EN VUELO

5.1 Planificación de vuelo

La planificación de un vuelo UAV no es diferente conceptualmente a como se desarrollaría con una plataforma tripulada convencional. Antes de comenzar cualquier tipo de planificación de vuelo necesaria en un vuelo UAV es necesario conocer y/o definir el uso que se pretende dar al vuelo. En este sentido es necesario considerar y no olvidar la adecuación al uso o "*fitness for use*", entendida como la totalidad de las características de un producto o servicio tal que le confieren su aptitud para satisfacer unas necesidades explícitas e implícitas.

En la mayoría de las aplicaciones en el sector agroalimentario, el objetivo final al que va a ir destinado el vuelo UAV será la generación de un producto cartográfico, bien sea una ortofotografía o un MDS/MDE. En función de las necesidades a cubrir se seleccionará la arquitectura UAV a emplear, generalmente multirrotor o ala fija, y el sensor a emplear para registrar las imágenes. Una vez establecidos estos dos aspectos se definirán los parámetros métricos del vuelo. La planificación de vuelo tiene que contemplar tres dimensiones diferentes e importantes: relativas a la zona de vuelo, a la plataforma de vuelo y al producto cartográfico.

En cuanto a la zona de vuelo es necesario no sobrepasar las limitaciones legales en cuanto a la altura máxima sobre el terreno, igual a 120 m AGL, y la distancia máxima de línea vista igual a 500 m. Igualmente importante es mantener la distancia de seguridad sobre zonas sensibles como aeropuertos, aeródromos, concentraciones de personas y

zonas urbanas. En el caso de emplear plataformas de ala fija es necesario hacer una inspección de la zona de trabajo para verificar la no presencia de obstáculos en la línea de despegue y aterrizaje, y finalmente confirmar la no presencia de interferencias en la frecuencia de trabajo del sistema.

Por lo que respecta a la plataforma de vuelo es necesario conocer a priori la capacidad de carga de ésta así como el volumen o espacio sobre el que irá instalada la carga de pago y la duración de las baterías, de tal modo que siempre se opere dentro de una ventana temporal de operación que minimice los riesgos de pérdida de potencia en los motores.

En cuanto a los aspectos métricos, se determinará la altura de vuelo o el tamaño del pixel (Ground Sample Distance, GSD), la localización de los centros de proyección (CdP) según los valores establecidos de solape transversal y longitudinal o intervalo entre imágenes y solape transversal. En función de estos parámetros la duración del vuelo será mayor o menor así como la superficie cubierta por una imagen. Dada la escasa duración de las baterías en el caso de plataformas multirrotor, es posible diferenciar entre dos modos de vuelo: cruising mode y stop mode, los cuales ofrecerán duraciones de vuelo diferentes.

El primer aspecto a la hora de empezar a definir la planificación de un vuelo es especificar la escala de vuelo, estableciendo el mínimo tamaño de los objetos a detectar en el producto elaborado así como la calidad espacial del mismo. Tal escala queda definida como la razón entre la focal de la cámara y la altura de vuelo AGL (Figura 62). El valor de GSD se obtendrá como el producto de la escala de vuelo y el tamaño del sensor (Ec. 7). De forma alternativa, es posible definir el GSD de vuelo de manera que conocida la distancia focal del sensor, se determina la altura AGL.

$$GSD = \frac{H}{f} \cdot CCD \quad \text{Ec. 7}$$

Siendo H la altura media de vuelo sobre el terreno para un fotograma, f la distancia focal de la cámara, CCD el tamaño de pixel del sensor y GSD el tamaño del pixel proyectado sobre el terreno

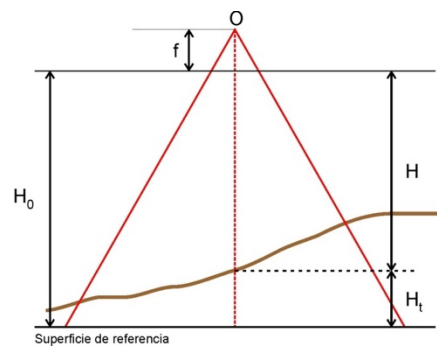



Figura 62 Determinación escala de vuelo

De la Ec. 7 se deduce que para una misma distancia focal, a mayor altura de vuelo menor será la escala de la imagen y a menor altura, mayor será la escala. Por esa misma razón, para una misma focal, a mayor altura de vuelo mayor será el GSD y viceversa. Por último, para una misma distancia focal, a mayor altura de vuelo mas superficie sobre el terreno abarcará una imagen, necesitando por tanto menor tiempo de vuelo para cubrir la zona de trabajo. El impacto que tiene por tanto las características internas del sensor (distancia focal, tamaño del sensor) sobre el GSD y/o la altura AGL de un vuelo es alta, además esta aparece íntimamente ligada actualmente al tipo de sensor. La Tabla 8 recoge el GSD, tamaño de imagen y superficie cubierta por una imagen captada por un sensor RGB, multiespectral y termográfico, considerando dos alturas de vuelo AGL diferentes. Como se observa, la modalidad de sensor RGB es la que mejores resultados ofrece desde el punto de vista de resolución espacial puesto que tiene una dimensión grande con respecto a los otros sensores, un tamaño de sensor imagen amplio y un tamaño de CCD muy pequeño. De este modo los resultados a 120 m AGL para un sensor Sony Nex7 son de 2,9 cm de GSD, cubriendo un fotograma una superficie de 175,5x117 m. En cuanto la altura AGL desciende a 80 m, el GSD es mas pequeño que a 120 m AGL, pasando a ser 2,0 cm, y como consecuencia también el tamaño de la imagen sobre el terreno. Considerando un sensor multiespectral se advierte como las dimensiones del sensor son mas reducidas y un tamaño de CCD mas grande de tal modo que las imágenes obtenidas para una misma altura presentarán tamaños de GSD mas grandes al tiempo que las imágenes cubrirán menos territorio. De este modo a 120 m AGL el GSD adopta un valor de 6.5 cm y a 80 m AGL 4.3, es decir, prácticamente se reduce la resolución espacial a la mitad que con respecto al sensor RGB analizado. En el caso de un sensor termográfico la perdida de resolución espacial es mucho mayor, con tan solo un tamaño de sensor imagen de 640x480 pixeles y un CCD de 17 μ m los valores de GSD alcanzados son 11,3 y 7,6 cm para las dos alturas

analizadas, siendo las imágenes de tan solo 72.5x54.4 m sobre el terreno. Con estos datos se observa como considerando la resolución espacial los sensores RGB son los que presentan mejores prestaciones, mientras que los sensores multispectrales, y de forma mas acusada los termográficos, adquieren imágenes de peor calidad a nivel espacial. Tal aspecto no hace que los sensores no sean de utilidad puesto que un sensor debe analizarse no solo por su resolución espacial sino también por otros aspectos como su resolución espectral o radiométrica. En este sentido ambos tipos de sensores ofrece una información muy valiosa desde el punto de vista agronómico que no ofrece un sensor RGB. En este punto resaltar que dado que el procesado fotogramétrico de un vuelo se realiza desde un punto de vista puramente geométrico, los sensores multispectrales y termográficos obligan a incrementar el número de imágenes y de pasadas durante el vuelo, lo cual tiene unas consecuencias negativas en cuanto a la duración del vuelo al aumentar éste, lo cual puede originar tener que realizar distintos vuelos para cubrir una explotación.

Tabla 8 Comparativa entre sensores RGB, multispectral y termográfica valores GSD, tamaño imagen y superficie de una imagen según altura AGL.

Sensor RGB	Sensor multispectral	Sensor termográfico
 <p data-bbox="343 1384 486 1417">Sony Nex7</p> <p data-bbox="239 1429 566 1541">Focal 16 mm Imagen 6000x4000 pixel CCD: 3.9 mm</p>	 <p data-bbox="654 1384 933 1417">Tetracam miniMCA-6</p> <p data-bbox="614 1429 941 1541">Focal 9.6 mm Imagen 1280x1024 pixel CCD: 5.2 mm</p>	 <p data-bbox="1109 1384 1236 1417">Gobi 640</p> <p data-bbox="997 1429 1292 1541">Focal 18 mm Imagen 640x480 pixel CCD: 17 mm</p>
Altura AGL= 120 m.		
<p data-bbox="239 1597 518 1709">GSD: 2.9 cm Imagen 175.5x117 m Superficie: 2.05 ha</p>	<p data-bbox="614 1597 901 1709">GSD: 6.5 cm Imagen 83.2x66.56 m Superficie: 0.55 ha</p>	<p data-bbox="997 1597 1284 1709">GSD: 11.3 cm Imagen 72.53x54.4 m Superficie: 0.39 ha</p>
Altura AGL = 80 m		
<p data-bbox="239 1765 502 1910">GSD: 2.0 cm Imagen 117.0x78 m Superficie: 0.91 ha</p>	<p data-bbox="614 1765 917 1910">GSD: 4.3 cm Imagen 55.47x44.37 m Superficie: 0.25 ha</p>	<p data-bbox="997 1765 1300 1910">GSD: 7.6 cm Imagen 48.36x36.27 m Superficie: 0.18 ha</p>

Una vez definida la escala y la altura de vuelo se procede a determinar la posición de cada uno de los Centros de Proyección (CdP) o puntos de disparo. Para ello es necesario tener en cuenta que éstos deben cumplir una serie de condiciones para obtener un modelo fotogramétrico válido. Este modelo consiste en asegurar unas relaciones espaciales de manera que existan zonas comunes entre fotogramas para obtener así visión estereoscópica de toda la zona de trabajo. El escenario para la toma de datos es la de un UAV que va volando y al mismo tiempo va registrando fotografías a intervalos regulares de tiempo dando lugar a la captura de una pasada o bien deteniéndose en cada CdP, en el caso de emplear una plataforma multirotor. De esta forma, se define la base aérea, B , como la distancia recorrida por el avión entre dos tomas fotográficas consecutivas. Hay que definir B de tal manera que todo punto de la zona de trabajo aparezca como mínimo en dos fotogramas simultáneamente. La parte común entre dos fotogramas consecutivos se denomina modelo estereoscópico, debiendo poder enlazarse estos modelos tanto longitudinalmente (Figura 63.a) como transversalmente (Figura 63.b) entre pasadas; de esta forma debe aparecer un solape longitudinal entre fotogramas de la misma pasada, y un solape transversal entre pasadas en el caso de que la zona de trabajo no pueda ser cubierta por una sola pasada. La distancia recorrida por la plataforma UAV entre dos imágenes consecutivas o base aérea se determina como:

$$B = S_1 \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right) \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

- B : Base aérea o distancia terreno entre centros de fotogramas en una pasada [m]
- S_1 : Anchura de la imagen sobre el terreno [m]
- P : Solape longitudinal (%)

La forma y extensión de la zona de trabajo determinará si es necesario emplear una o varias pasadas dispuestas en paralelo, de tal modo que presentarán una parte en común denominada solape o recubrimiento transversal (q). Este recubrimiento permitirá enlazar unas pasadas con otras permitiendo construir un bloque fotogramétrico, teniendo como finalidad el garantizar en todo momento la conexión entre pasadas. La distancia A entre pasadas sobre el terreno viene dada por:

$$A = S_2 \cdot \left(1 - \frac{q}{100}\right) \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

- A: Distancia terreno entre centros de fotogramas entre pasadas adyacentes [m]
- S_2 : Anchura de la imagen sobre el terreno [m]
- q: Solape transversal (%)

La Figura 63 representa la planta y el alzado resultado de realizar dos tomas fotogramétricas consecutivas dentro de una misma pasada (Figura 63.a), y por otra parte representa la relación espacial entre dos CdP pertenecientes a pasadas contiguas (Figura 63.b).

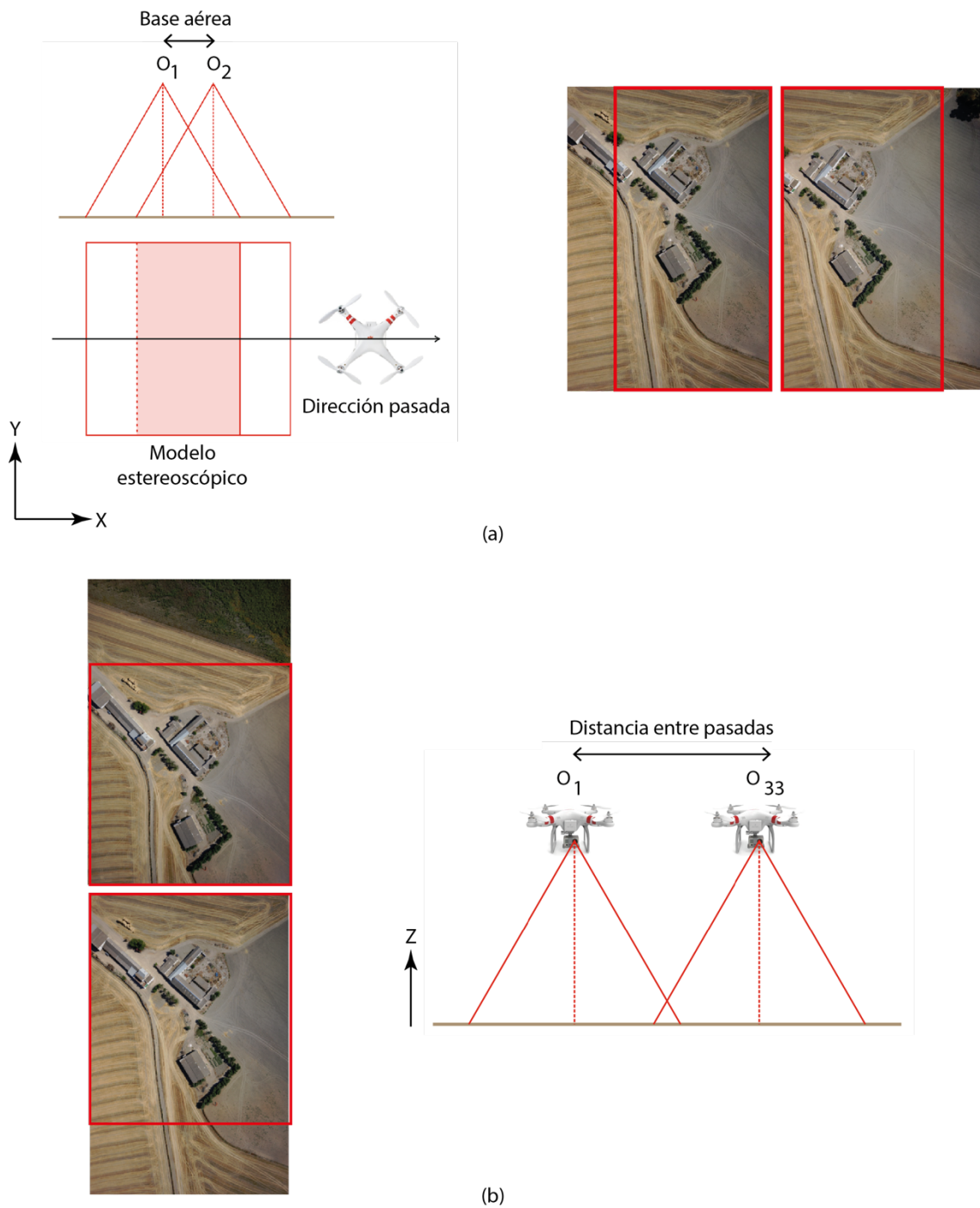


Figura 63 Solapamiento (a) longitudinal y (b) transversal

De la correcta elección de los valores para el solapamiento longitudinal y transversal dependerá la calidad espacial de los productos geomáticos derivados. En el caso de plataformas UAV estos solapes debe ser altos. En cuanto al solape transversal la consecuencia directa es que se puede incrementar el número de pasadas a realizar. En el caso de aumentar el solape longitudinal se incrementará el número de imágenes a

registrar por pasada. Dependiendo de la arquitectura de la plataforma UAV empleada, puede ser que el vuelo tenga que descomponerse en sectores de vuelo o directamente hacerse inviable empleando estas plataformas caso de ser necesario parar durante unos segundos sobre el punto de disparo la plataforma para su estabilización y toma de la imagen. Esto puede originar la necesidad de tiempos de vuelo que no puedan ser cubiertos por la duración de las baterías empleadas. Este inconveniente se plantea con las plataformas multirrotor considerando el modo de vuelo clásico. Desde este punto de vista es posible diferenciar entre dos modos de vuelo según la actitud de la plataforma en la realización del mismo:

1. Cruising mode (Figura 64.a): Esta modalidad puede desarrollarse tanto por plataformas de vuelo tipo ala fija como multirrotor. En esta modalidad la plataforma navega de un punto inicial de la pasada hasta otro final no parando en ningún momento. Para ello se determina el intervalo de tiempo entre dos fotos consecutivas conociendo la velocidad de desplazamiento y la base aérea necesaria según el porcentaje de solape longitudinal seleccionado. El sensor se programa para que tome imágenes según un intervalo de tiempo definido.
2. Stop mode (Figura 64.b): En este caso, la plataforma de vuelo se estabiliza durante unos segundos sobre cada CdP definidos previamente según el solape longitudinal deseado. Esta modalidad de vuelo solo puede ser empleada por plataformas multirrotor.

Ambos modos de vuelo son validos, pues garantizan la construcción del modelo geométrico a partir de las imágenes registradas, si bien el impacto en los tiempos de vuelo es alto en el caso de considerar *stop mode* usando una plataforma multirrotor. Una comparativa desarrollada con una plataforma MD4-1000 a distintas alturas AGL y un sensor Tetracam Mini MCA -6 muestra una relación de 4:1 en los tiempos de vuelo empleando *stop* o *cruising mode* (Mesas-Carrascosa, y otros 2015) (Tabla 9). Estos autores evaluaron el impacto en calidad posicional empleando uno u otro modo, siendo mejor en aquellos vuelos donde se voló en modo *cruising mode*. Uno de los motivos se debe a que en el modo *stop mode* la plataforma se encuentra orbitando sobre cada waypoint corrigiendo la posición de manera continua, lo cual se traduce en movimientos bruscos frente a un desplazamiento continuo, lo cual se refleja en la calidad de las imágenes registradas. Se recomienda emplear el modo *cruising mode* operando con plataformas multirrotor, como si fuera una plataforma de ala fija, debido a que permite

obtener mejores resultados en cuanto a resolución espacial al tiempo que se aumenta la superficie cubierta por un vuelo. Este último aspecto es importante puesto que el cambio de baterías puede generar cambios de iluminación y/o atmosféricos que hagan, en el caso de tratamientos posteriores aplicando técnicas de teledetección, que los resultados no se adapten a la realidad del estado del cultivo (Figura 65). En esta figura se realiza una comparativa de dos vuelos realizados con las dos modalidades descritas. En el primero de los vuelos, stop mode, (Figura 65.a) se hizo necesario dividir la zona en dos sectores de vuelo, siendo necesario aterrizar la aeronave para el cambio de baterías. En ese intervalo de tiempo cambió la cobertura nubosa, reflejándose este cambio de iluminación en la ortofotografía. Sin embargo durante el vuelo en cruising mode (Figura 65.b) la zona se pudo cubrir con una sola batería, no apreciándose diferencias radiométricas sobre ella.

Tabla 9 Comparativa tiempos de vuelo		
Altura AGL [m]	Stop mode	Cruising mode
60	38 min 11 sec	9 min 28 sec
80	18 min 24 sec	4 min 46 sec
100	11 min 56 sec	3 min 40 sec

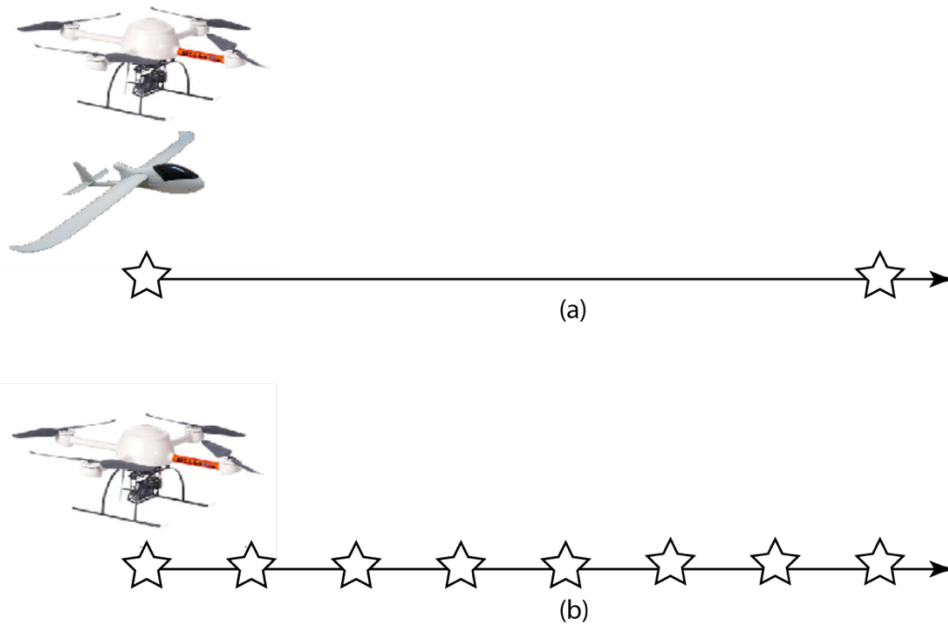


Figura 64 Comparativa modos de vuelo: (a) cruising mode y (b) stop mode

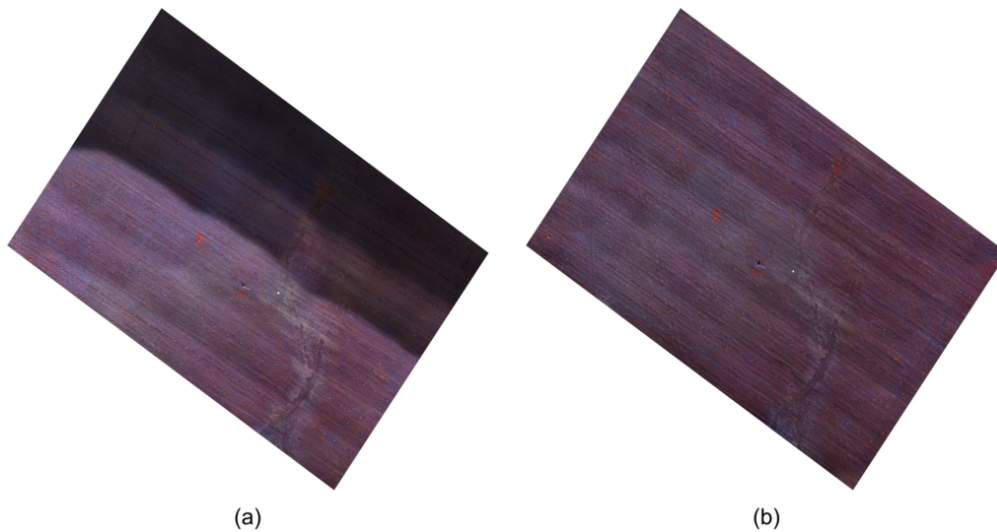


Figura 65 Cambios de iluminación sobre un vuelo UAV volando en (a) stop mode y (b) cruising mode.

Junto con la planificación del vuelo es necesario diseñar la campaña de puntos de apoyo. Dado que el objetivo es la producción de un producto cartográfico, es necesario que éste aparezca referido a un origen de coordenadas, con una correcta orientación y escala. Solo cumpliendo estos requisitos el producto podrá ser interoperable métricamente con otras fuentes de información y podrán desarrollarse estudios multitemporales, obtener magnitudes de distancias, superficies y/o ángulos. En el caso de emplear sensores de posicionamiento y orientación precisos en la plataforma de vuelo podrían tomarse la información procedentes de éstos para aplicar orientación directa, no siendo necesario para algunas aplicaciones realizar apoyo topográfico. Con carácter general las plataformas UAV empleadas no suelen emplear sistemas de navegación tan exactos y precisos, siendo necesario en algunos de los casos realizar adaptaciones particulares con objeto de mejorar sus prestaciones (Turner, Lucieer y Wallace 2014). Estos autores instalaron un sistema GNSS Novatel Flexpak-G2L con una placa OEMV-2 adaptada para poder ser instalada sobre un UAV OkToKopter. Durante el vuelo se estaciona una antena GNSS registrando datos de forma simultanea de tal forma que posteriormente puedan ser procesados los datos GNSS para obtener la trayectoria exacta de la cámara durante el vuelo. Los resultados ofrecidos mediante orientación directa ofrecieron una desviación estándar en el ajuste del bloque fotogramétrico igual a 0,02 m y un error medio absoluto de 0,11 m. En este marco de trabajo es posible por tanto suprimir la medición de puntos de apoyo, si bien es necesario realizar adaptaciones de la plataforma de vuelo, los cuales en algunos de los casos no

se pueden aplicar dado que, además del mayor coste económico, algunas plataformas son cerradas y no permiten realizar tales mejoras.

En el caso general se hace necesario registrar las coordenadas de una serie de puntos correctamente distribuidas sobre la zona de trabajo. Estos puntos definirán el marco geométrico y serán posteriormente medidos manualmente sobre las imágenes. Esta información, junto con un conjunto de puntos medidos con técnicas automáticas y la telemetría del vuelo, permitirán calcular la aerotriangulación del bloque fotogramétrico. Dado que el conjunto de puntos de apoyo tiene por objeto ser un complemento de información que permita calcular y conocer la orientación absoluta de cada imagen del vuelo es necesario tener en cuenta como se van a materializar estos puntos, el número y distribución de los mismos sobre la zona de trabajo y, por último, como se van a obtener sus coordenadas:

1. Materialización: Un punto de apoyo tiene que aparecer bien definido sobre las imágenes. Es por esto que se hace necesario monumentar éstos puntos mediante señales que permitan la adecuada localización e identificación en su medición. La Figura 66 muestra un ejemplo de dos puntos de apoyo de distinta configuración, donde se han obtenido las coordenadas de cada uno de ellos en el centro. El primero de ellos, consistente en una cruz de madera, presenta unas dimensiones donde se presta a interpretación la localización de su centro. En el segundo caso, la localización del centro es mucho mas sencilla y por tanto precisa. El primero de los casos la materialización del punto de apoyo no es adecuada para la realización del trabajo, siendo mas adecuada la señal redondeada.
2. Las coordenadas de los puntos de apoyo deben obtenerse empleando metodologías e instrumentación que ofrezcan una exactitud mejor que el propio GSD de las imágenes, en caso contrario estas generarán incertidumbre y transmitirán errores en el cálculo del ajuste del bloque fotogramétrico. Para vuelos cuyo GSD este alrededor de 5 cm es factible emplear sensores GNSS bifrecuencia, siendo recomendable trabajar en tiempo real con objeto de agilizar los trabajos de campo. En el caso de que se tengan valores de GSD inferiores a 2-3 cm, y las necesidades de resolución espacial sean elevadas, los sensores GNSS no ofrecen una calidad espacial suficiente, siendo necesario emplear métodos basados en topografía clásica. En cualquier caso, son las propias necesidades técnicas y las características

del producto a desarrollar las que marcarán los requisitos técnicos en cuanto a la tecnología a emplear.

3. La distribución de los puntos de apoyo tiene que cubrir toda la zona de interés. Como mínimo se debe monumentar un punto de apoyo en las esquinas del bloque y uno central. Es recomendable volar con un cierto margen de seguridad la zona de interés, dado que los errores del ajuste a realizar tienden a ir aumentando hacia la periferia del bloque. De esta manera la zona de interés presentará unos residuos dentro de los mínimos requisitos necesarios. La Figura 67 muestra la distribución de residuos obtenidos en el ajuste de un bloque fotogramétrico donde se han dispuesto cuatro puntos de apoyo, uno por cada una de las esquinas, y uno en la zona central. Se observa como los mayores residuos aparecen localizados en la periferia del bloque, presentando la zona central los errores mas bajos. El número y distribución de los puntos de apoyo dependerá de la forma del bloque de vuelo. En el caso de vuelos tipo corredor, como por ejemplo, el resultado de volar una canalización, donde aparecen cambios de dirección, se recomienda observar puntos de apoyo en las esquinas de cada bloque de vuelo asociado a una dirección de vuelo.

Debido a la dificultad en numerosas ocasiones para encontrar detalles sobre el territorio volado que presenten las condiciones adecuadas para ser identificados de forma exacta y precisa en las imágenes del vuelo, los puntos de apoyo serán necesarios monumentarlos antes de la realización del vuelo para que aparezcan en las imágenes del vuelo. La Figura 66 como se ha comentado presenta una comparativa de dos puntos de apoyo sobre una imagen tomada a 200 m AGL. El primero de ellos se corresponde con una superficie circular mientras que el otro presenta forma de cruz. Si bien ambos se identifican correctamente sobre las imágenes, el primero de ellos ofrece una identificación mas precisa no ocurre lo mismo con el segundo, donde se presenta un área donde el técnico tiene que interpretar donde se encuentra el centro de la señal. En este caso, el primer punto de apoyo es mas adecuado frente al segundo para esa altura de vuelo. Alturas de vuelo AGL mayores ofrecerán resultados distintos, siendo la señal de mayor tamaño la mas adecuada para su uso.

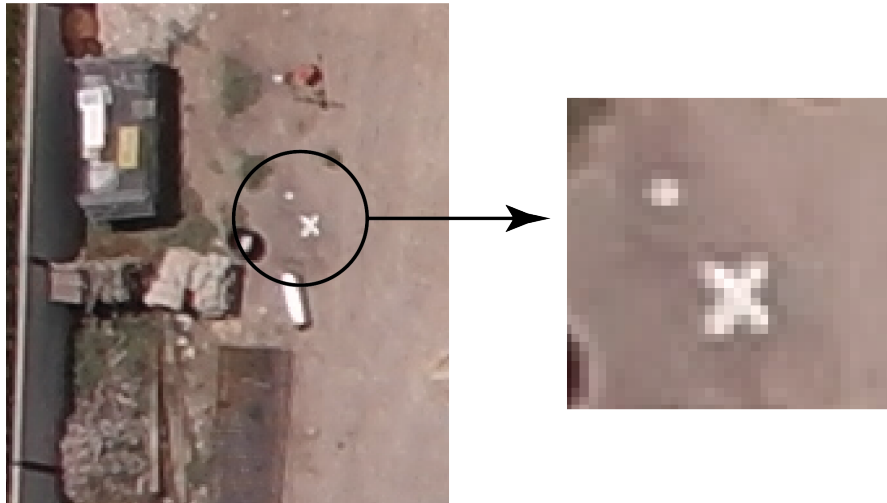


Figura 66 Comparativa tipología de puntos de apoyo

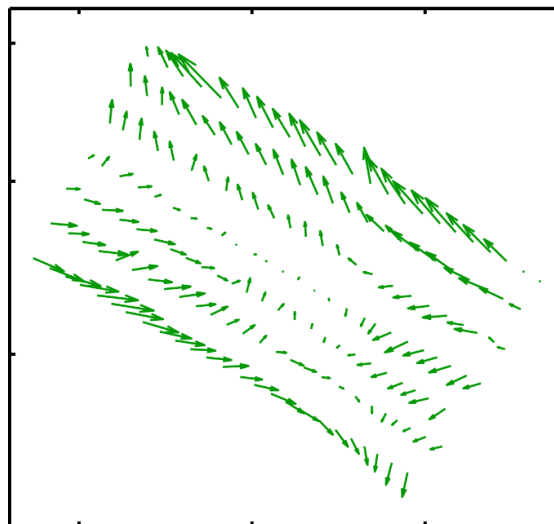


Figura 67 Distribución de residuos en coordenadas de un bloque fotogramétrico UAV con un punto de apoyo en cada esquina y uno central.

5.2 Acciones previas y durante al vuelo

Todas las indicaciones dispuestas en el presente apartado son independientes al tipo de plataforma de vuelo UAV empleada, siendo consideradas todas ellas como de la misma clase a efectos de procedimiento.

5.2.1 Acciones previas al vuelo

Antes de realizar una operación se tiene que tener la seguridad de contar con la habilitación requerida por la legislación vigente. En caso contrario será necesario

aplazar la operación, al menos, hasta cinco días después de comunicarlo a la Autoridad y se documente el inicio del tipo de operación conforme establece el artículo 50 de la Ley 18/2014, de 15 de octubre. Si no fuera posible cumplir, en los plazos legalmente establecidos, los requisitos para la habilitación para la realización de las operaciones previstas, estas deberán quedar inmediatamente suspendidas, hasta que la situación se normalice.

5.2.1.1 Alturas máximas de vuelo

Se debe verificar que esta será siempre, menor o igual a 400 pies (120 metros) AGL. En el caso de existir obstáculos en altura, el vuelo se deberá realizar a (de las dos, la mayor):

1. Una altura mayor de 20 metros sobre el obstáculo más alto situado en un radio de 150 metros desde la aeronave, siempre que ello no conlleve exceder el límite legal de 400 pies AGL.
2. Una altura suficiente para mantener a la vista del piloto la aeronave en todo momento -si el vuelo se realiza en condiciones VLOS- y siempre que ello no conlleve el exceder el límite legal de 400 pies AGL.

La altura de vuelo para el caso de activación de la función vuelta a casa automática, se debe fijar a (de las dos, la mayor):

1. 20 Metros AGL.
2. En caso de existir obstáculos en altura, a 20 metros sobre el obstáculo más alto ubicado en la zona de sobrevuelo, siempre que ello no conlleve el exceder el límite legal de 400 pies AGL o vulnerar las condiciones VLOS, si es el caso.

En el caso que para sortear posibles obstáculos sea preciso exceder el límite legal de 400 pies AGL, la operación de vuelo deberá replantearse, de manera que se compartimente el espacio y se evite el sobrevuelo de las zonas problemáticas.

5.2.1.2 Mínimas condiciones meteorológicas

Los vuelos deben realizarse siempre en condiciones meteorológicas tales que:

1. La visibilidad meteorológica mínima en horizontal debe ser de al menos 5 kilómetros, en toda la zona de operación, que es la requerida para vuelo visual en espacio aéreos de clase G, en los vuelos a altura igual o inferior al más elevado de 900

metros sobre el nivel medio del mar (Above Mean Sea Level, AMSL) o 300 metros AGL.

2. La visibilidad meteorológica mínima en la vertical debe ser de 500 pies (150 metros) AGL, en toda la zona de operación.
3. Libre de nubes por debajo de 500 pies en toda la zona de vuelo.

En cuanto a las condiciones de viento, humedad y temperatura, éstas deben estar por debajo de los máximos establecidos por el fabricante de la plataforma de vuelo empleada, no volando cuando acontezcan precipitaciones entre otros motivos por la exposición con agentes externos en muchos casos de los componentes electrónicos.

Las condiciones meteorológicas deben garantizar que la aeronave sea visible por el piloto en todas las fases del vuelo, cuando este se lleve a cabo en condiciones VLOS y hasta una distancia de 500 metros del piloto cuando las condiciones de la operación sean BVLOS. La estimación de la visibilidad meteorológica debe hacerse desde la ubicación prevista para el piloto estando de pie y cubriendo toda la zona de operación, para ello es recomendable emplear cartografía de la zona.

La estimación de las condiciones de viento se deben realizar tanto a nivel de suelo, para las fases de despegue y aterrizaje, como en altura, para la fase de crucero. La velocidad del viento en superficie se debe medir bien mediante una anemómetro de mano situado lo mas alto posible o bien mediante la escala empírica de Beaufort (Tabla 10). La estimación de la velocidad del viento en el nivel de crucero se debe realizar a partir del dato de velocidad a nivel del suelo. Una estimación sencilla es considerar un incremento en la velocidad del viento a razón de un factor de 0,5 de la estimada en superficie por cada 50 metros de altura. Cuando se requiera una mayor precisión en el cálculo de la velocidad del viento en altura, para garantizar la seguridad de la operación, es admisible utilizar la siguiente fórmula (Ec. 10):

$$\frac{V_0}{V_c} = \frac{\ln(h_0) - \ln(z_0)}{\ln(h_0) - \ln(z_0)} \quad \text{Ec. 10}$$

Siendo V_0 la velocidad del viento medida en el suelo y expresada en metros por segundo, V_c la velocidad del viento a nivel de crucero en metros por segundo, h_0 la altura a la que se realiza la medición en el suelo y h_c la altura de vuelo AGL para la fase de crucero, ambas expresadas en metros. Por último z_0 es un factor de cizalla según el tipo de superficie que adopta un valor según lo expuesto en la Tabla 11.

En cuanto a la fuente de información meteorológica a considerar, se recomienda emplear la proporcionada por la Agencia Estatal de Meteorológica (AEMET), siendo necesario contar con los conocimientos adecuados para la interpretación de las predicciones.

Tabla 10 Escala de Beaufort			
Nº	Velocidad	Denominación	Características Visuales
0	< 2 km/h	Calma	Humo Vertical
1	2 a 5 km/h	Ventolina	El humo se desvía, se mueven las veletas
2	6 a 11km/h	Brisa Suave	Se siente en la cara, las banderas se levantan
3	12 a 19 km/h	Brisa Leve	Se mueven las hojas de los árboles, las banderas flamean
4	20 a 28 km/h	Brisa Moderada	Se levanta polvo, las banderas se agitan
5	29 a 38 km/h	Vientos Refrescantes	Se agitan las ramas, se levanta polvo
6	39 a 49 km/h	Vientos Fuertes	Se mueven grandes ramas
7	50 a 61 km/h	Vientos muy Fuertes	Se agitan las copas de los árboles
8	62 a 74 km/h	Temporal	Daños en los árboles, se hace muy difícil caminar
9	75 a 88 km/h	Temporal Fuerte	Arrastra objetos, se hace imposible caminar contra el viento
10	89 a 102 km/h	Temporal muy Fuerte	Árboles arrancados, daños en construcciones
11	103 a 117 km/h	Tempestad	Daños y consecuencias variadas
12	> 118 km/h	Huracán	Vuelan coches, árboles, techos, etcétera

Tabla 11 Rugosidad para diferentes superficies	
Tipo se superficie	z_0 (Rugosidad, m)
Hielo	0.00001
Mar en calma	0.0001
Pasto cortado / pistas de aeropuertos	0.007
Campo abierto	0,05
Campos (con cercados, barreras, etc)	0,085
Arbolado abundante	0,2
Suburbios Urbanos	0,4
Bosques / Ciudad	1

5.2.1.3 Criterios para la elaboración de un plan de vuelo operacional

Se hace necesario elaborar un plan de vuelo operacional para cada ubicación de la estación de control (GCS), aún cuando los cambios de ubicación se deban a la necesidad de sectorización de la zona a sobrevolar, por la necesidad de cumplimiento de la normativa legal y de garantizar la seguridad de las operaciones.

El procedimiento de elaboración de un plan de vuelo operacional debe comprender los siguientes pasos:

1. Delimitación de la zona de operaciones, concretando las coordendas geográficas del rectángulo mínimo envolvente de trabajo, la localización de los accesos así como la ubicación de las zonas destinadas para el despegue y el aterrizaje.
2. Asignación de la plataforma de vuelo, estableciendo el tipo, marca y modelo tanto del vehículo como de la emisora empleada. Además será necesario establecer la carga o cargas de pago.
3. Determinar las limitaciones legales y técnicas. En caso de que la operación conlleve el incumplimiento de alguno de estos requisitos, deberá planificarse nuevamente para evitar tal situación o suspenderse definitivamente. Por lo tanto es necesario:
 - a) Confirmar que el espacio aéreo en el que se pretende realizar la operación es no controlado.
 - b) Comprobar que la zona de operaciones se encuentra a más de 150 metros de aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o de reuniones de personas al aire libre.

- c) Localizar aeródromos con y sin infraestructura para vuelo instrumental, a menos de 8 ó 15 kilómetros de la zona de operaciones, respectivamente, y determinación de los medios de coordinación requeridos.
- d) Para vuelos en condiciones VLOS y si es necesario por la extensión de la superficie a sobrevolar, definición de los sectores necesarios,
- e) Determinación de los horarios para la operación, acotando la ventana temporal para realizar los vuelos.
- f) Establecer los miembros del personal que intervendrán en la operación.
- g) Establecer las condiciones meteorológicas mínimas necesarias para llevar a cabo el vuelo, los criterios para aplazar o suspender el vuelo antes del desplazamiento del equipo a la zona de trabajo, y los criterios para el aplazamiento momentáneo del vuelo.
- h) Planificación de cada una de las misiones previstas durante la operación definiendo la trayectoria de las pasadas, localización de los CdP, establecimiento de las zonas de despegue y aterrizaje, velocidades de crucero, alturas AGL, duración estimada del vuelo y el tipo de navegación empleado: manual, automático o mixto.

5.2.1.4 Prevención de actos de interferencia ilícita

Con el fin de prevenir actos de interferencia ilícita durante las operaciones es conveniente delimitar y, en la medida que sea posible, señalar un perímetro de seguridad en torno a los puntos previstos para los aterrizajes y despegues, tanto los utilizados en condiciones normales, como los previstos para situaciones de emergencia, así como la localización de la GCS.

Las zonas de aterrizaje y despegue deben ser de fácil acceso para el piloto y/o los miembros de la tripulación, presentando contacto visual en todo momento con el piloto a fin de garantizar la seguridad. Estas deben presentar terreno firme, lo mas horizontales y llanas posibles, libres de obstáculos y objetos que pueden causar daños en la aeronave y/o en la carga de pago. Igualmente deben ser zonas despejadas y suficientemente amplias para cumplir los requisitos de longitud y anchura para las maniobras de aterrizaje y despegue, sobre todo en el caso de operar con plataformas de vuelo de ala fija.

Solo el piloto al mando designado para la operación estará autorizado para manipular el sistemas de mando y control de la plataforma de vuelo, accediendo solo al resto de

sistemas de la estación de tierra aquellas personas que se hayan incluido en la tripulación o formen parte del equipo de mantenimiento y servicio técnico, realizando únicamente las tareas específicas que les hayan sido asignadas por el operador. El acceso a las zonas delimitadas solo estará permitido a las personas que figuren en la lista de personas autorizadas para la operación, dispongan de la acreditación proporcionada por el piloto al mando y siempre que vayan equipadas con los equipos de protección individual adecuados. En el caso de acceso a la zona de ubicación de la GCS, es recomendable que las personas autorizadas no comprometan la seguridad de la operación. Finalmente, cuando el sistema UAS no esté en uso deberá almacenarse bajo llave en un lugar seguro.

5.2.1.5 Gestión de energía

La mayoría de las plataformas de vuelo empleadas van equipadas con motores eléctricos alimentados mediante baterías de polímero de litio (LiPo) que deberán cumplir en todo momento las especificaciones definidas por el fabricante. Otro tanto ocurre con la emisor de radio control y resto de dispositivos que componen el sistema. Tanto la plataforma de vuelo, la emisora de mando y control y resto de dispositivos de la GCS, así como la carga de pago disponen de indicadores del estado de la batería, mediante avisadores acústicos y/o luminosos. El personal a cargo de la operación deben conocer los niveles de carga críticos que requieren de la sustitución de las baterías. Tal aspecto debe ser respetado con objeto de no sufrir un accidente aéreo. Los vuelos se deben planificar de modo que la parte final se realice lo más cerca posible de una de las zonas previstas para el aterrizaje y con una autonomía de batería suficiente para la correcta maniobra de aterrizaje.

Cada batería empleada en los respectivos subsistemas se tiene que cargar con el cargador adecuado a su tipo, configuración y capacidad, conforme a las instrucciones del fabricante. Es necesario llevar un registro de las baterías así como un registro de ciclos de carga y descarga que permita el correcto mantenimiento de éstas. El registro de baterías será una ficha de inventario donde se indique aspectos como la capacidad de carga, el número máximo de ciclos seguros, peso, fecha de compra o la fecha del primer uso y la fecha de retirada. En cuanto al registro de ciclos es necesario anotar entre otros aspectos el número o identificador del vuelo, la duración del mismo, la fecha, la tensión inicial y final, etc. Este registro se debe realizar justo antes y después de cada vuelo.

Una buena práctica es disponer como un elemento mas dentro del sistema un generador que permita suministrar energía de forma ininterrumpida a los subsistemas de la GCS en tierra durante la operación.

5.2.1.6 Inspección de la plataforma de vuelo

Se hace necesario redactar procedimientos de actuación tanto a nivel de planificación del vuelo como de la operación con la plataforma de vuelo de manera que quede asegurada en todo momento la operación. Junto con el manual de operación es necesario establecer un plan de mantenimiento y revisión de la aeronave antes y después de un vuelo. Este mantenimiento del sistema ha de llevarse a cabo teniendo en cuenta en todo momento las indicaciones del fabricante, realizando tareas diarias, semestrales y anual o cada cierto número de horas de vuelo, siendo conveniente llevar un registro de dicho mantenimiento

El mantenimiento diario debe incluir una comprobación del estado de las hélices, de la fijación de las mismas, verificación del libre giro de los motores y del correcto funcionamiento del sistema de telemetría. Además se hace necesario verificar de forma rutinaria los sistemas de asistencia a la navegación como son las funciones de vuelta a casa automático, la navegación asistida por GNSS o el mantenimiento de la posición sobre un punto. Además es necesaria una inspección visual y manual del estado del chasis, del fuselaje y del tren de aterrizaje, verificando el apriete de toda la tornillería y del estado de las fijaciones del vehículo. En cuanto a la energía, tal y como se ha descrito anteriormente es necesario tener la certeza de que la tensión de la batería, tanto de la aeronave como de la emisora y de los sistemas de la estación en tierra son correctos. En cuanto a la carga de pago se debe verificar el correcto anclaje de ésta al soporte así como la fijación del soporte a la plataforma de vuelo.

Semestralmente es conveniente verificar los rodamientos de los motores, la no presencia de ruidos o rozamientos. También es importante la limpieza del filtro del sensor barométrico, una inspección visual de toda la electrónica, estado de los *silentblocks*, bridas y cualquier otro elemento de fijación y/o amortiguación.

Anualmente es necesario realizar sustituciones de elementos que tenga una naturaleza elástica, tornillería inoxidable o de nylon. En cuanto a la emisora es importante verificar que los movimientos son suaves, etc. Finalmente el tren de aterrizaje no debe presentar

fisuras o daños que puedan derivar en desperfectos en el vehículo en la operación de aterrizaje.

5.2.1.7 Últimas acciones antes del vuelo

Se verificará que tanto la señal GNSS, el estado de la batería como la telemetría son adecuados. Se realizará un escaneado de frecuencias con un aparato barredor para detectar posibles interferencias en la banda de comunicación entre la emisora y la aeronave.

Los sensores de navegación GNSS como cualquier sistema de telecomunicación se ven afectados por la influencia de tormentas solares, lo que puede derivar en problemas de navegación de la plataforma, con movimientos bruscos y violentos por la inconsistencia de las coordenadas aportadas por el sistema GNSS. Es por esto que se aconseja antes del vuelo consultar la actividad solar en servicios como el <http://www.spaceweatherlive.com/es/actividad-solar>.

En cuanto al sensor o sensores de la carga de pago se comprobará que están encendidos, la tapa del objetivo quitada y que estos funcionan correctamente mediante la toma de una o varias imágenes.

5.2.2 Acciones durante el vuelo

Se debe realizar un seguimiento continuo de la tensión de la batería con objeto de detectar cualquier posible anomalía que genere un accidente aéreo. En el caso de que el consumo de la batería sea elevado, bien por condiciones de viento adversas o bien por fallo de la misma, se activará el protocolo de cancelación de la operación, retornando la aeronave al punto destinado para el aterrizaje.

5.3 Aspectos particulares de operación según carga de pago empleada.

Lo especificado en apartados anteriores es general y de aplicación para sensores RGB, multi / hiper – espectrales y termográficos. En el caso de éstos últimos, dado que posteriormente se realizarán tareas y procesos empleando técnicas de teledetección, es necesario tomar información auxiliar que permitan realizar correcciones atmosféricas sobre las imágenes con objeto que los resultados obtenidos sean lo mas exactos posibles. Estas medidas puede ser desde la toma de información ambiental como presión, temperatura y humedad relativa para posteriormente calcular un modelo

atmosférico que simule las condiciones de la atmósfera en el momento del vuelo a toma de información mediante espectrorradiómetro de campo y/o pistola termográfica que permitan a posteriori establecer una relación entre el comportamiento real del cultivo y lo registrado por el sensor. De este modo, se tendrá la información necesaria para corregir del efecto atmosférico las imágenes captadas por los sensores embarcados en la plataforma de vuelo. La Figura 68 resume la toma de datos para una corrección atmosférica mediante medidas in situ de reflectividad, la Figura 68.a muestra un detalle de los paneles blanco y negro empleados, de tal forma que para la calibración radiométrica de las imágenes estos paneles son observados mediante un espectrorradiómetro de campo (Figura 68.b). Estas muestras junto con los valores de niveles digitales registrados en las ortofotografías producidas (Figura 68.c) permiten calcular los parámetros para modelar el efecto atmosférico.

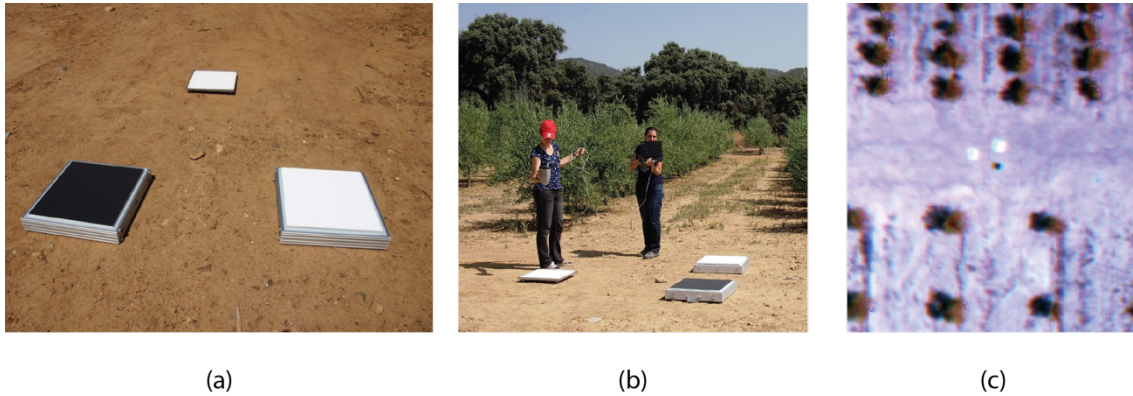


Figura 68 Toma de datos para corrección atmosférica: (a) detalle de paneles blanco, negro y spectralon, (b) toma de muestra con espectroradiómetro y (c) detalle de paneles sobre ortofotografía falso color.

6 PROCESADO DE VUELO UAV

El procesado de un vuelo fotogramétrico realizado con un UAV comprende las mismas fases de trabajo que un vuelo con fines cartográficos convencionales. Para ello se hará uso de técnicas fotogramétricas, sobre un entorno totalmente digital, lo que genera también que se entremezcle el procesado con aplicaciones y tratamientos de visión por computador. De este modo, el flujo de trabajo está definido y es independiente al tipo de plataforma UAV, estando la calidad de los productos generados así como las distintas etapas de procesado para su obtención relacionadas directamente con el plan de vuelo definido. Las fases o etapas en el procesado una vez realizado el vuelo dependen del tipo de producto a generar (Figura 69). En el caso de la producción de una ortofotografía se descomponen en aerotriangulación, generación de un MDS y/o un MDE, rectificación diferencial de cada una de las imágenes y finalmente el mosaicado de las imágenes. En el caso de querer generar una cartografía vectorial el proceso de trabajo una vez aerotriangulado el vuelo consiste en la propia fase de restitución fotogramétrica. Como fase previa a cualquier etapa de procesado será necesario generar un fichero de proyecto donde se indique el tipo de sensor empleado, identificar las imágenes a procesar, vincular a cada una de ellas sus datos de orientación directa obtenidos en vuelo, puntos de apoyo y cualquier información auxiliar útil y válida a emplear en las sucesivas etapas o fases de trabajo. Tal esquema de trabajo es independientemente de la suite informática empleada.

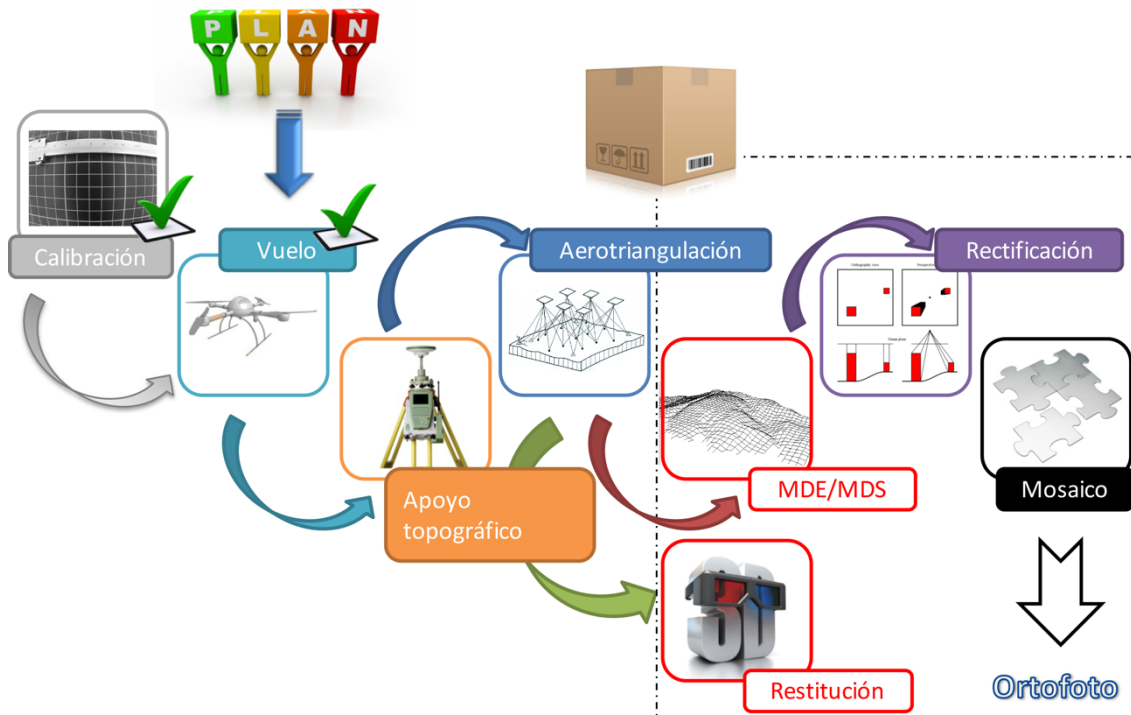


Figura 69 Flujo de trabajo procesado datos obtenidos a partir de un vuelo UAV

Cada una de las fases de trabajo presenta unos consumos temporal en su ejecución diferentes (Figura 70). En ella, el menor coste temporal cubre la fase de planificación. La realización del propio vuelo así como la toma de datos pie tierra como por ejemplo el apoyo topográfico abarca aproximadamente el 35% del volumen del trabajo, aspectos variables y dependientes tanto de la lejanía de la zona de vuelo como de sus condiciones en cuanto a la orografía y accesibilidad. El mayor coste temporal lo recogen las fases de aerotriangulación con un 20% del tiempo dedicado y la creación del MDS/MDE, con un 30%. En el primero de ellos, el usuario solo tiene que localizar y medir los puntos de apoyo, siendo el resto del proceso totalmente automático. En el caso de la producción del MDS/MDE, el proceso de creación es totalmente automático, siendo la labor del productor el control de calidad del mismo. Debido a la automatización de estas dos fases, las cuales acumulan el 50% del coste temporal de todo el trabajo, se recomienda emplear un equipo informático con la mejor configuración posible y con una tarjeta gráfica dedicada. Finalmente, la fase de rectificación y mosaicado suele ocupar el 10% del proceso, siendo misión del productor el control de calidad de los productos generados.

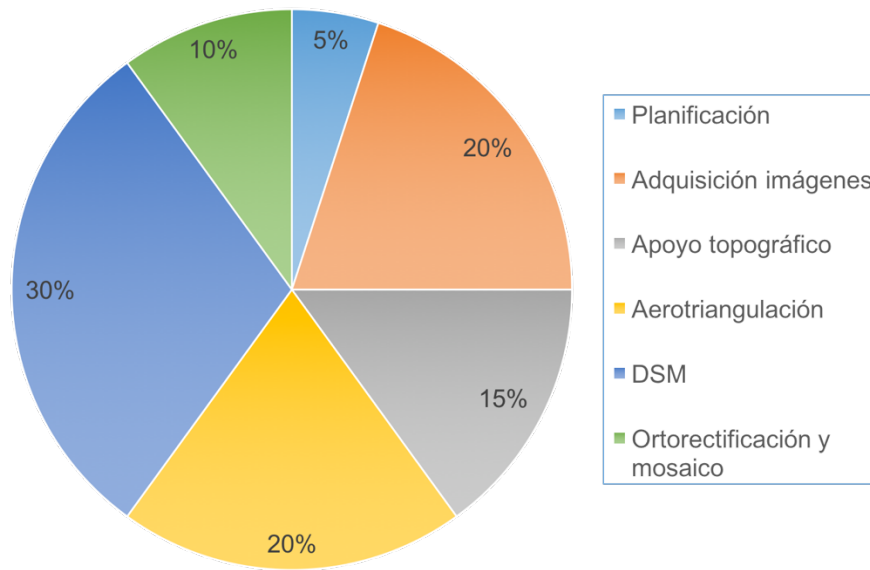


Figura 70 Estimación del coste temporal de cada una de las etapas en el procesado de un vuelo fotogramétrico UAV.

6.1 Creación proyecto

Como fase previa antes de realizar cualquier tipo de procesado se hace necesario crear un proyecto donde aparezcan relacionados todos los elementos necesarios a emplear en las distintas fases del trabajo, comprendiendo:

1. Sensor: Es necesario conocer la geometría interna del sensor, de este modo parámetros como la distancia focal, dimensiones del sensor, tamaño del sensor CCD, posición del punto principal o los parámetros de distorsión radial y tangencial son obligatorios dado que definirán el sistema de coordenadas imagen y como se han registrado las imágenes.
2. Imágenes: Comprende el conjunto de imágenes registradas durante el vuelo.
3. Sistema de referencia de coordenadas (SRC) del producto que se desea generar.
4. Telemetría: Cada evento realizado por parte del autopiloto de la aeronave con respecto al sensor empleado como carga de pago debe quedar registrado. De este modo para cada imagen debe existir registrado un evento que informe de la localización y orientación del sensor en el momento de la adquisición de éstas.
5. Puntos de apoyo: Coordenadas de cada uno de los puntos de control observados en campo mediante geodesia espacial o topografía clásica que se emplearán

como elementos para definir de forma exacta el marco del sistema de referencia de coordenadas empleado.

Con carácter general el producto a elaborar empleará como SRC planimétrico el definido por el sistema de coordenadas geodésico WGS84, proyección UTM (huso dependiente de la zona de trabajo). Tal sistema de referencia geodésico es compatible a efectos prácticos con el sistema de referencia geodésico ETRS89, oficial en España según R.D. 1071/2007. En el caso de la altimetría, se hace necesario realizar una transformación de coordenadas entre alturas elipsoidales y ortométricas que puede ser resuelta con el empleo de un modelo de geoide.

Como se ha citado anteriormente, se hace necesario asociar a cada imagen del vuelo un evento de telemetría. Esta fase de trabajo, si bien parece una tarea sencilla puede resultar complicada e inconsistente si no se trabaja de forma ordenada, máxime si se opera mediante el modo *cruising mode*. Esto se debe a que el o los sensores formadores de imágenes empleados en el vuelo registran la información por medio de un impulso eléctrico enviado por el autopiloto de la aeronave. En ese preciso momento el autopiloto registra el evento, asignándole un identificador, el cual no coincide con el identificador creado por el sensor. Por lo tanto, en una primera fase del trabajo se hace necesario vincular los eventos de telemetría con las imágenes registradas. En este sentido, uno de los medios más ágiles, consistentes y precisos es emplear marcas temporales que vinculen ambas fuentes. Este proceso puede realizarse obteniendo información de la especificación para formatos de archivos de imagen Exif (EXchangeable Image File Format), donde se metadatan la imagen, siendo una de las entradas la fecha y hora en la que se tomó la imagen. La especificación Exif es empleada por prácticamente todas las cámaras digitales RGB actuales, si bien no es muy común entre sensores multispectrales y termográficos. Una posible solución a tal inconveniente es emplear la fecha de creación del archivo digital de la imagen en la tarjeta de almacenamiento del sensor. Además, la vinculación entre telemetría e imágenes obligará a renombrar uno de los conjuntos de datos para que la asociación por parte del software empleado sea directa.

6.2 Aerotriangulación

En todo trabajo fotogramétrico el fin último es la determinación de las coordenadas terreno de un conjunto de puntos a partir de medidas realizadas sobre los fotogramas.

Este hecho se consigue a partir de la intersección de rayos homólogos. Para ello los fotogramas tendrán que colocarse tal y como se encontraban en el momento de la toma, es decir, deberán estar orientados. En la Figura 71 se observan dos fotogramas, los cuales están orientados respecto a un sistema de coordenadas terreno y por tanto se observa como pueden determinarse las coordenadas del punto P. El objetivo no es otro que calcular por tanto la orientación estereoscópica de las imágenes a emplear posteriormente en los procesos de restitución, generación de MDE/MDS y/o producción de ortofotografías.

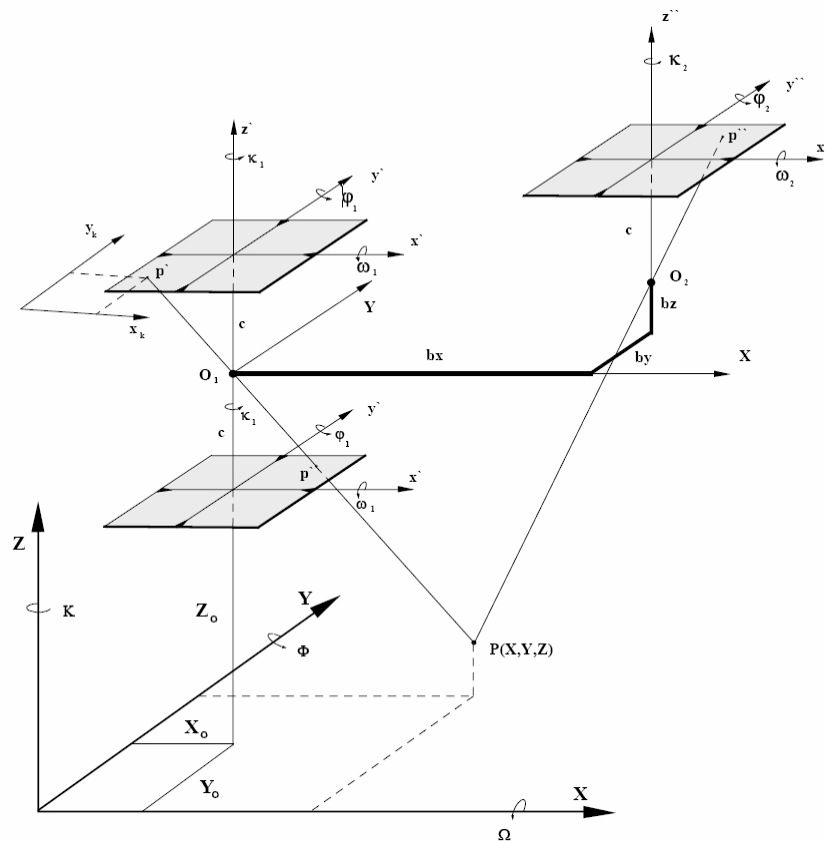


Figura 71 Ejemplo de bloque fotogramétrico de seis fotogramas.

Sobre la Figura 71 encontramos tres sistemas de coordenadas:

- Coordenadas imagen: Coordenadas de un punto respecto al sistema definido por fila / columna de la imagen digital, teniendo para cada punto del terreno sus correspondientes coordenadas respecto al fotograma izquierdo y fotograma derecho donde aparezca.
- Coordenadas modelo: Coordenadas de un punto en el modelo estereoscópico una vez realizada la orientación relativa.

- Coordenadas terreno: Coordenadas de un punto sobre el terreno obtenido a partir de medidas fotogramétricas una vez realizada la orientación absoluta.

La orientación de las imágenes se consigue mediante la aplicación de la condición de colinealidad. La condición de colinealidad establece que por el centro de proyección de la toma fotográfica (el punto de disparo), el punto sobre la imagen y el punto sobre el terreno pasa una recta de tal modo que la relación entre las coordenadas sobre la imagen y las coordenadas en el terreno será igual a:

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{m_{11} \cdot (X - X_0) + m_{12} \cdot (Y - Y_0) + m_{13} \cdot (Z - Z_0)}{m_{31} \cdot (X - X_0) + m_{32} \cdot (Y - Y_0) + m_{33} \cdot (Z - Z_0)} \\ y &= -f \frac{m_{21} \cdot (X - X_0) + m_{22} \cdot (Y - Y_0) + m_{23} \cdot (Z - Z_0)}{m_{31} \cdot (X - X_0) + m_{32} \cdot (Y - Y_0) + m_{33} \cdot (Z - Z_0)} \end{aligned} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

x, y las coordenadas en la imagen

f la distancia focal de la cámara

X_0, Y_0, Z_0 las coordenadas del punto de disparo

m_{ij} Elementos de la matriz de rotación

X, Y, Z las coordenadas del punto sobre el terreno.

Si esta condición se cumple en dos imágenes queda asegurado la intersección de rayos homólogos en el punto terreno de interés. Necesariamente tanto las coordenadas del punto de disparo de la fotografía así como los elementos de la matriz de rotación deben ser conocido, siendo obtenidos en la fase de aerotriangulación.

Considerando la Ec. 11, para la determinación de los parámetros de orientación absoluta de un solo modelo estereoscópico necesitaremos un mínimo de tres puntos de apoyo para resolver el sistema de ecuaciones formado a partir de dicha ecuación. En cualquier trabajo fotogramétrico no se trabaja solo con un modelo estereoscópico, es decir, se trabaja con un bloque de fotogramas. Este hecho implica que:

- Si se orienta cada modelo estereoscópico de manera individual se necesitaría un elevado número de puntos de apoyo, incrementando los costes económicos del proyecto.

- Lo deseado es una solución única de cada modelo estereoscópico dentro del bloque, no trabajando con modelos independientes.

El objetivo de la aerotriangulación es la determinación de las coordenadas de un conjunto de puntos mediante procesos fotogramétricos, reduciendo todo lo posible los trabajos a realizar en campo en la fase de apoyo topográfico. Por tanto se consigue la determinación de la orientación absoluta de cada uno de los fotogramas que conforman el vuelo fotogramétrico a partir de unos pocos puntos de coordenadas terreno, puntos de apoyo, junto con un conjunto de puntos medidos fotogramétricamente y de coordenada terreno desconocidas denominados puntos control. Los puntos de control se dividen en:

- Puntos de paso: Puntos medidos fotogramétricamente que tienen como objetivo enlazar modelos estereoscópicos individuales, por tanto aparecen en la zona común entre dos modelos estereoscópicos, o lo que es lo mismo, en tres fotogramas.
- Puntos de enlace: Puntos medidas fotogramétricamente que tienen como objetivo enlazar pasadas, por tanto aparecen situados en la zona de recubrimiento transversal.

El método de cálculo empleado es el conocido como ajuste de bloques por haces. En este ajuste se emplean coordenadas de puntos de apoyo, de control, orientación interna del sensor y unas aproximaciones iniciales de las orientaciones de cada uno de los fotogramas mediante la telemetría del vuelo. A consecuencia de los objetivos perseguidos en esta fase se deduce la importancia de los trabajos de apoyo topográfico pues tiene como objetivo encajar el bloque fotogramétrico en el sistema de coordenadas terreno. Estos puntos deberán quedar adecuadamente distribuidos para asegurar la calidad de los trabajos realizados en esta fase. La distribución de los puntos observados en campo dependerá del tipo de vuelo realizado.

Esta fase del flujo de trabajo es la más importante, y de ella dependerá la calidad de los resultados de las fases posteriores. La forma de resolver el cálculo de la orientación absoluta de cada imagen es muy diferente a la metodología seguida en el caso de un vuelo tripulado clásico para la generación de productos geomáticos. En este caso la plataforma, bien sea satélite o avión, es muy estable, las coordenadas y orientaciones de cada uno de los puntos de disparo se definen de forma precisa, los sensores empleados son métricos, conociendo por tanto su geometría interna, y finalmente las

condiciones en la toma de cada una de las imágenes es estable. En el caso de un vuelo UAV se tiene por un lado que la plataforma no es tan estable como las anteriores, las imágenes se registran con distintos ángulos y distancias respecto al objeto, los sensores no son métricos y la adquisición puede definirse como desestructurada. La consecuencia directa de todo esto es que se hace necesario el empleo de software fotogramétrico específico para tales condiciones de adquisición en la toma de las imágenes, no siendo válidas suites informáticas empleadas en fotogrametría digital clásica.

Cualquier aplicación informática empleada en el procesado de un vuelo UAV se apoya en una técnica basada en visión por computador denominada Structure from Motion (SfM), la cual trabaja siguiendo el mismo marco conceptual de la visión estereoscópica, de manera que es posible reconstruir una estructura tridimensional a partir de un conjunto de imágenes solapadas. Dadas las condiciones de adquisición de las imágenes descritas anteriormente, para que el algoritmo concluya con éxito el cálculo de la orientación externa de cada imagen se hace necesario una elevada redundancia de datos la cual es resuelta mediante un incremento en los solapes longitudinales y transversales entre imágenes y pasadas.

SfM se desarrollo en la década de los 90, teniendo su origen en el seno de la comunidad de la visión computerizada así como en el desarrollo de algoritmos de matching de elementos en la década anterior. La lógica empleada en SfM tiene que responder a un conjunto de preguntas sobre geometría desde múltiples puntos de vista:

1. Structure: Hace referencia a la geometría de la escena de tal modo que, dado un conjunto de puntos bidimensionales localizados en dos o más imágenes se tiene que resolver donde se encuentra su correspondiente punto en un espacio tridimensional.
2. Correspondencia: Mediante técnicas de stereo matching se tiene que localizar la posición de un punto sobre una imagen en otras imágenes.
3. Motion: Se corresponde con la geometría de la cámara de forma que, dado un conjunto de correspondencias de puntos en dos o más imágenes se determine la localización de cada uno de los puntos de vista.

SfM reconstruye de forma simultanea la geometría de la escena junto con la localización y orientación del sensor en cada toma de forma simultanea mediante la identificación automática de características sobre varias imágenes. Estas estimaciones se van

ajustando mediante sucesivas iteraciones mediante una solución mínimo cuadrática (Snavely, Seitz y A Szeliski 2008). A diferencia de un procesado fotogramétrico clásico, el resultado de la orientación externa de cada imagen carece de una escala, orientación y origen de coordenadas exacto y preciso, información aportada por los puntos de apoyo observados en campo por lo que la nube de puntos generada y orientaciones determinadas son relativas al sistema de coordenadas imagen. Este sistema deberá ajustarse al espacio objeto real mediante la identificación y medición del conjunto de puntos cuyas coordenadas se han obtenido por observación directamente en campo. De este modo, la mediación manual de puntos solo se realizará sobre un conjunto reducido de puntos, reduciendo la carga de trabajo referente a la mediación de puntos en procesos automáticos. Los puntos de apoyo medidos permitirán obtener un conjunto de parámetros que definirán una transformación tridimensional entre los sistema de coordenada imagen y objeto.

La identificación de puntos que aparecen en distintas imágenes de forma automática es la base de todo el procedimiento descrito. Una solución a tal problema reside en el método de reconocimiento de características Scale Invariant Feature Transform (SIFT) desarrollado inicialmente por David Lowe en 1999 (Lowe 1999). La lógica para la identificación de características en cada imagen se basa en que estas son invariantes a cambios de escala, giros y parcialmente invariantes a cambios de iluminación y posiciones del sensor.

La calibración métrica del sensor así como la determinación de la orientación externa de las imágenes como se advierte, es de suma importancia dentro de todo el flujo de trabajo. En procesos de producción cartográfica convencional, ambas fases de trabajo aparecen separadas de tal forma que en laboratorio se determinan de forma exacta y precisa los parámetros internos de la cámara y estos son empleados posteriormente en la fase de aerotriangulación. En el caso de plataformas UAV, dada la naturaleza de estos sensores, con carácter general, calibración y orientación suelen desarrollarse de forma conjunta, dando lugar a denominarse el proceso aerotriangulación con autocalibración. Advertir que si bien los resultados son adecuados, la calibración métrica del sensor en un proceso anterior e independiente dado que los parámetros de la cámara no forman parte del ajuste del bloque.

Para el cálculo de la orientación externa de las imágenes en esta fase se medirán dos tipos de puntos:

1. Puntos de enlace o "*tie points*". Este tipo puntos se medirán mediante procesos automáticos, donde el algoritmo empleado localizará e identificará características en cada una de las imágenes que las vinculará con las colindantes.
2. Puntos de apoyo. En este caso es el operador el que medirá de forma manual estos puntos. Dado que su número es reducido el coste temporal de dicha tarea es pequeña respecto al conjunto de tiempos empleados durante las distintas etapas de procesado.

Una buena práctica se basa en medir en campo tanto puntos de control como puntos de chequeo. Los puntos de control o puntos de apoyo son empleados por el software para fijar el marco de coordenadas dada la exactitud y precisión de su geolocalización. Los puntos de chequeo son puntos con la misma calidad que los anteriores, el operador los mide manualmente pero en este caso el software empleado no los utiliza dentro del proceso de ajuste del bloque para la determinación de los parámetros de orientación sino que los emplea para calcular las coordenadas que se obtendrían de éstos una vez realizado el ajuste. De la comparación entre las coordenadas obtenidas en campo de los puntos de chequeo y las obtenidas del ajuste se obtiene información sobre la calidad del ajuste realizado. Como resultado de esta etapa se tendrá para imagen del vuelo su localización actitud de forma exacta y precisa referida a un SRC.

6.3 Generación de modelos digitales de superficies y elevaciones

Desde un punto de vista geográfico un modelo queda definido como una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades (Joly 1988). Por tanto en la construcción de un modelo se establece una relación de correspondencia con la realidad. Los modelos pueden ser de diferentes tipos siendo el que nos interesa en este punto los de tipo simbólico. En un modelo simbólico un objeto de la realidad queda representado mediante una simbolización matemática (geométrica, estadística, etc.). Un Modelo Digital del Terreno (MDT) es un modelo de tipo simbólico donde un conjunto de datos numéricos describen la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, por ejemplo la temperatura la presión o la altimetría. Por tanto un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), Figura 72.a, es un tipo de MDT que describe la altimetría del terreno de una zona. Un MDE puede ser obtenido aplicando diferentes metodologías, en el caso general de uso de plataformas UAV se obtendrá mediante

correlación de imágenes, apareciendo actualmente los primeros sensores LiDAR instalados sobre plataformas UAV. Junto con el MDE se puede hablar de Modelo Digital de Superficies (MDS), Figura 72.b, definido como aquel MDT donde queda representada la altimetría del terreno junto con la de los objetos que hay sobre el. Con la determinación de la orientación externa de cada imagen calculada durante la fase de aerotriangulación se esta en disposición de generar un modelo digital de superficies y orientaciones, empleando para ello la misma lógica de extracción de características de las imágenes.

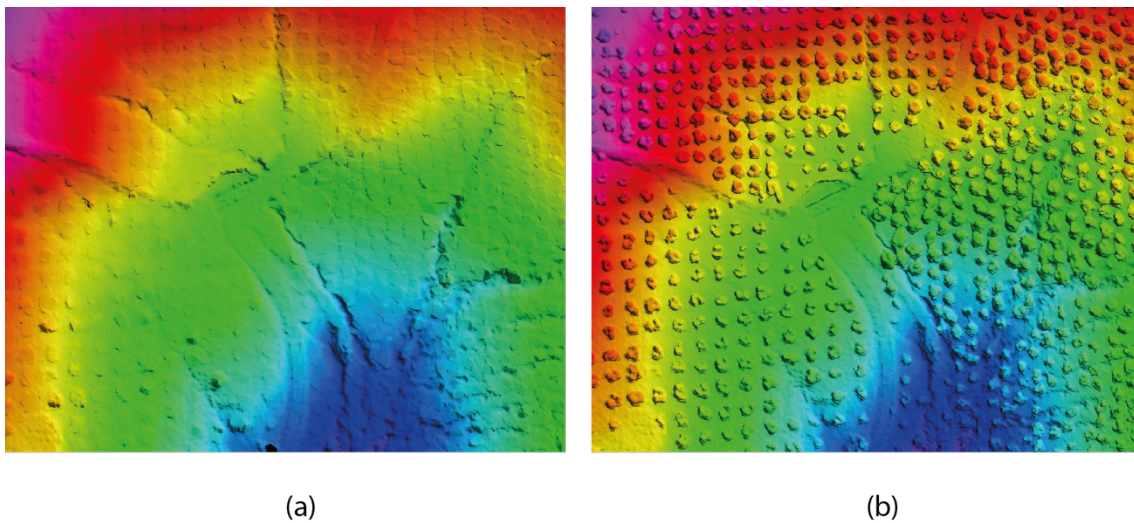


Figura 72: Comparativa (a) MDE y (b) MDS.

La nube de puntos generada mediante técnicas de correlación automática entre imágenes representa un MDS a partir del cual mediante filtrado automático de puntos es posible extraer el MDE. La calidad tanto del MDS como del MDE será función de la calidad de las imágenes registradas en vuelo como de los parámetros generados en la fase de aerotriangulación. La Figura 73.a y Figura 73.c presentan errores en el MDS y su reflejo en la imagen ortorectificada (Figura 73.b y Figura 73.d). Dado que es un proceso de producción en cadena, los posibles fallos y errores en el MDS o el MDE se verán reflejados en la fase de rectificación diferencial a través de deformación sobre las imágenes corregidas.

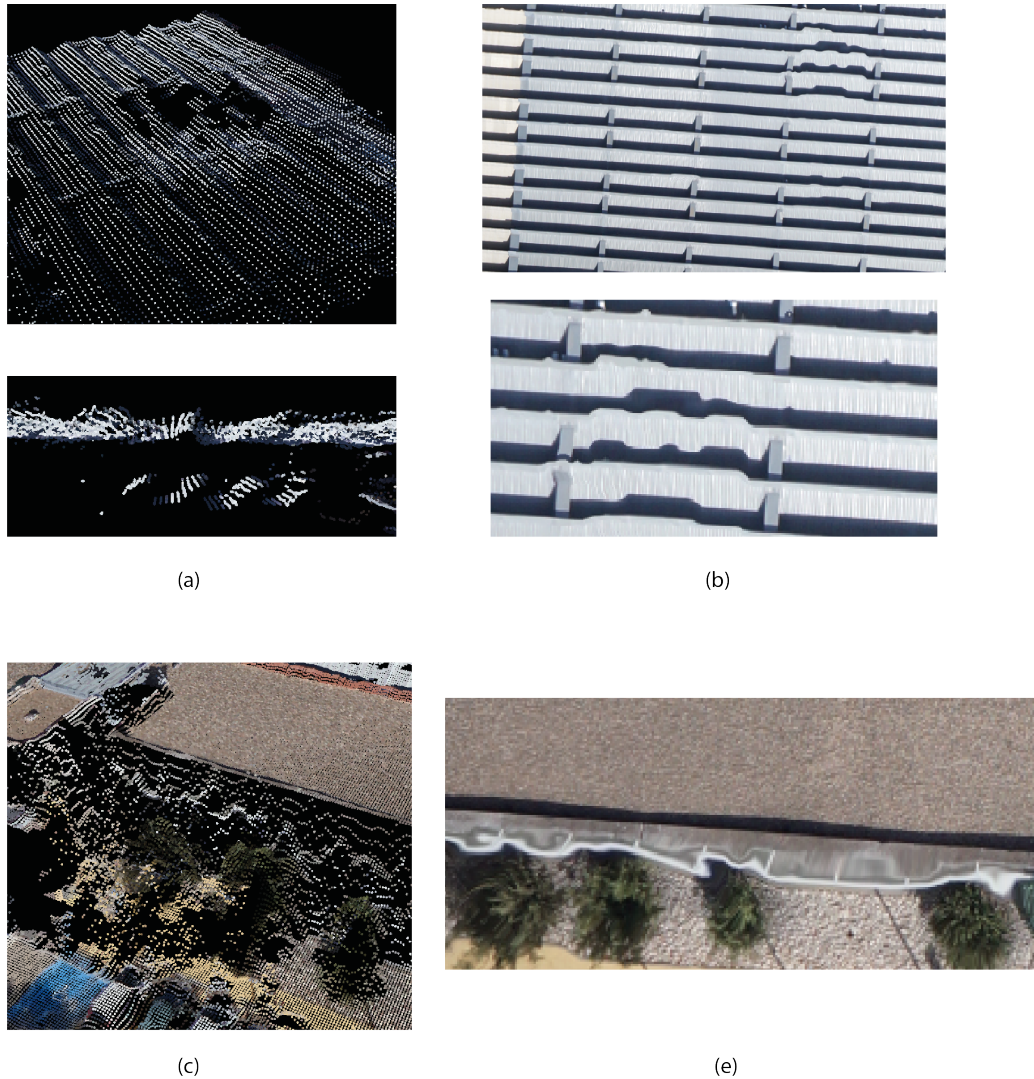


Figura 73 Error en MDS y su consecuencia sobre ortofotografía: (a) Error local sobre cubierta de edificio y (b) su reflejo en el proceso de ortorectificación. (c) Error introducido por mala delineación de línea de ruptura y (d) deformación sobre imagen ortorectificada.

6.4 Rectificación de imágenes y mosaicado

El motivo de emplear ortofotografías y no las imágenes obtenidas en vuelo directamente se encuentra en las propias características de ambos productos:

1. Un fotograma obtenido en vuelo presenta desplazamientos en la imagen a causa de la inclinación de la cámara en el momento de la toma y del relieve del terreno. No presenta una escala uniforme y por tanto no se puede medir una distancia al carecer de métrica.

2. Los efectos de la inclinación de la toma y del relieve de un fotograma se pueden eliminar mediante un proceso denominada rectificación el cual generará una ortofoto.
3. Una ortofoto presenta una escala uniforme, es decir, tiene métrica y por tanto se puede medir sobre ella.
4. Puesto que es un producto cartográfico se puede superponer con otros productos cartográficos, es decir, es interoperable espacialmente.

La Figura 74 muestra una comparativa entre una vista en perspectiva ofrecida por una imagen registrada por un sensor y una vista ortográfica.

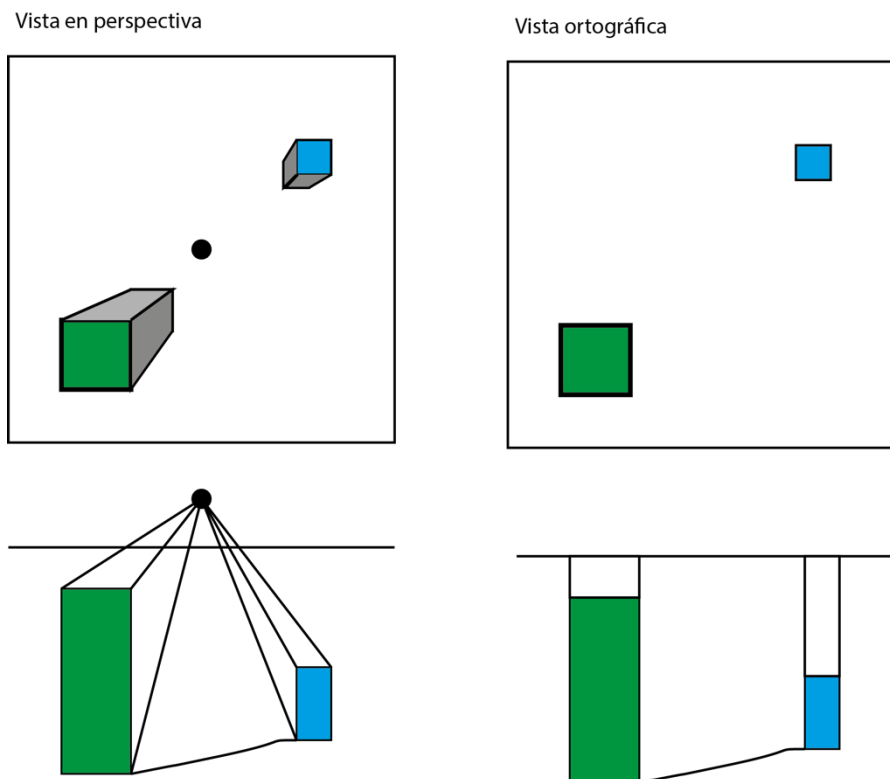


Figura 74 Comparativa entre vista en perspectiva y vista ortográfica

El término rectificación aparece íntimamente ligado al concepto de ortofoto. La rectificación es el proceso fotogramétrico por el cual se transforma una imagen en una proyección del terreno, enderezando el eje de la toma y corrigiendo los posibles desplazamientos del relieve. Por tanto, una ortoproyección es el método fotogramétrico para obtener ortofotografías corregidas de las deformaciones citadas mediante rectificación del fotograma original.

La rectificación de la imagen se puede abordar por tres métodos diferentes: polinómica, proyectiva o diferencial. De los tres métodos citados el que tiene mayor interés, dada la calidad de los resultados obtenidos y la variedad de sensores sobre los que se puede aplicar (sensores aerotransportados o espaciales), es la rectificación diferencial.

6.4.1 Rectificación diferencial

Recibe este nombre debido a que se rectifica la mínima unidad en que se compone un fotograma tomado en vuelo, es decir, se opera a nivel de píxel. De esta manera el resultado es una imagen donde se ha pasado de una proyección cónica a una proyección ortogonal, empleando para ello el principio de la colinealidad. La obtención de una ortofotografía se realiza a partir de una transformación inversa, es decir, a cada píxel de la ortofotografía se le busca su correspondiente punto en la imagen tomada por la cámara. De este modo se asegura que no aparezcan zonas sin información en el espacio de salida. En el proceso de rectificación se necesita conocer por lo tanto la Z del terreno, y por ello de la importancia de disponer de un buen MDS o MDE de la zona. Los elementos requeridos son pues:

1. Tamaño del píxel en la ortofotografía a generar.
2. Un MDE con una resolución determinada el cual estará en el mismo sistema de referencia geodésico que el resto de la información que se maneja.
3. Orientación externa de cada uno de los fotogramas, es decir, coordenadas del centro de proyección y los giros de la cámara.

Con toda esta información el proceso de generación de la imagen ortorectificada es la que aparece en la Figura 75. En ella se observa como se parte de un píxel de coordenadas terreno conocidas el cual no tiene valor asignado de nivel digital. De este modo se busca su coordenada Z en el MDE para así disponer de todos los datos necesarios para poder resolver la condición de colinealidad en ese punto y determinar la posición de su homólogo sobre el fotograma sobre la que se extraerá su correspondiente nivel digital el cual se asignará al píxel del que se partía.

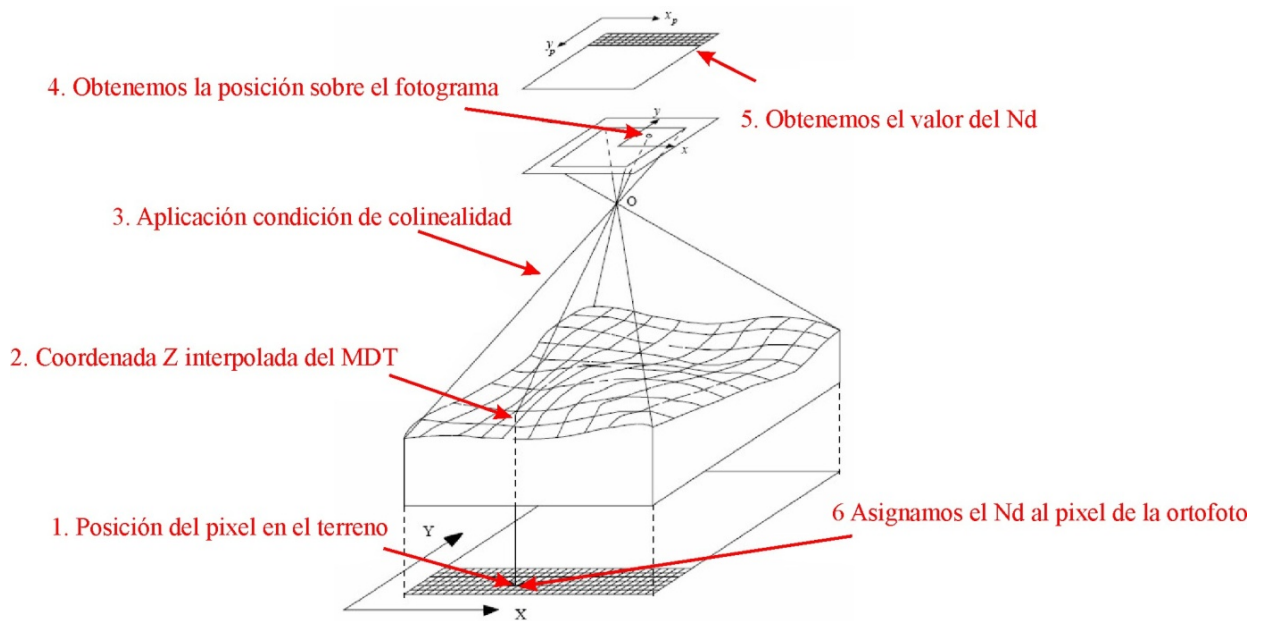


Figura 75 Esquema de generación de una imagen ortorectificada mediante transformación directa

El proceso descrito se denomina transformación indirecta pues como se ha indicado, partiendo de un píxel vacío de la ortofoto se va al fotograma para buscar su nivel digital. Otra alternativa es aplicar una transformación directa. En este caso el sentido del trabajo es del fotograma hacia la ortofoto. Esta última transformación es menos utilizada pues pueden quedarse píxeles sin valor siendo necesario por tanto una segunda pasada.

En función del tipo de modelo digital empleado se generará una ortofografía convencional o una ortofotografía verdadera. En el primero de los casos se emplea el MDE, corrigiendo las deformaciones por cambios en la altura del terreno, no siendo consideradas las alturas de los objetos sobre el mismo. En el caso de emplear un MDS, aparecerán corregidos geoméricamente los efectos derivados del relieve así como las alturas de los objetos sobre éste.

6.4.2 Mosaicado

De la aplicación del procedimiento de rectificación se obtendrá una imagen métricamente correcta con una escala uniforme. Por lo general con un único fotograma no se cubrirá toda la zona de trabajo y por tanto se debe cubrir ésta con diferentes fotogramas rectificados los cuales serán montados en una sola imagen denominada ortofotomosaico. La unión de estas ortofotografías individuales en una sola debe realizarse de tal manera que no se aprecien discontinuidades ni geométricas ni

radiométricas. El resultado es lo que se denomina generalmente ortofotografía si bien, esta será el resultado de la suma de las distintas ortofotografías individuales.

Todas y cada una de las ortofotos individualmente serán procesadas de forma que radiométricamente sean homogéneas con el resto, comprobando que presenten balances de color y contraste similares. De cada ortofoto individual se seleccionará la zona más central posible puesto que ésta es la que presentará una reducción de las posibles deformaciones propias de la perspectiva. Mediante procesos automáticos se generarán las líneas de cosido (*seamlines*). El objetivo de estas líneas es poder obtener un único producto mediante el ensamblado de cada una de las áreas de interés de cada ortofoto individual. Se deberá cuidar que las líneas de cosido no crucen elementos bien definidos como por ejemplo edificios. La Figura 76 muestra para un vuelo UAV de tipo corredor los resultados sin realizar balance radiométrico (Figura 76.a) y con balance (Figura 76.b). En el primero de ellos es posible delimitar los límites de las zonas individuales de las imágenes que definen el mosaico (Figura 76.c), mientras que en el segundo tal discontinuidad desaparece (Figura 76.d). Igualmente, en el primero de los procesados se observan en determinadas zonas discontinuidades geométricas (Figura 76.e) por fallos en el MDS, las cuales desaparecen una vez editado y depurado el mismo (Figura 76.f).

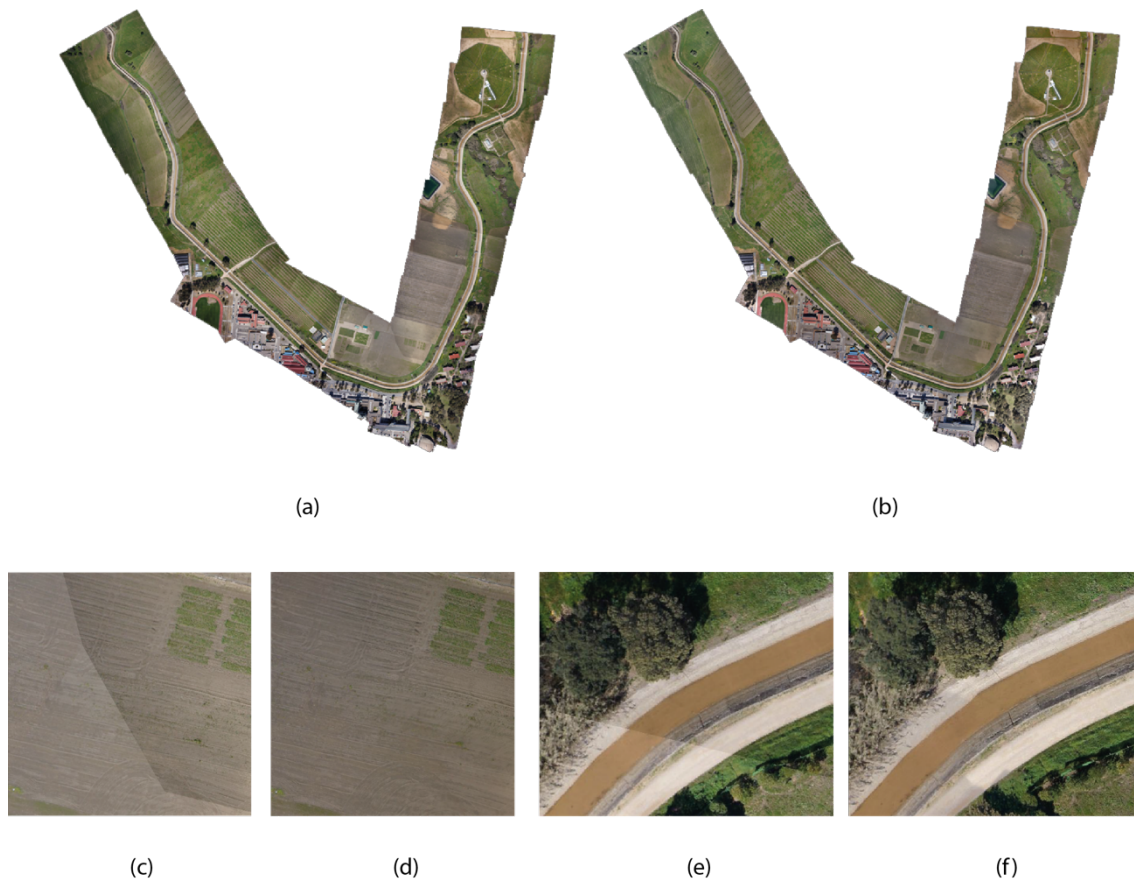


Figura 76 Ejemplos mosaicos: Vuelo UAV modo corredor (a) sin balance radiométrico y (b) con balance radiométrico. Detalle del vuelo con (b) discontinuidad radiométrica y (c) con (d) continuidad radiométrica. Detalle del vuelo con (e) discontinuidad radiométrica y geométrica y (f) sin discontinuidades radiométricas y geométricas.

La continuidad radiométrica se debe sacrificar en el caso de emplear sensores multiespectrales o termográficos con objeto de no alterar los valores de reflectancia o temperatura captados por el sensor a emplear posteriormente en tareas de teledetección. Como resultado final se habrá obtenido una imagen ortorectificada y un MDS y/o MDE válidos para aplicarse en una aplicación determinada.

6.5 Análisis de software actuales

Dadas las condiciones en la toma de las imágenes, cualquier suite o software de aplicación a vuelos fotogramétricos convencionales no genera resultados satisfactorios prácticamente en la mayoría de los trabajos UAV, y en caso de generarlos requieren de una importante carga de trabajo por parte del operador que invalida la metodología. De este modo se hace necesario e imprescindible contar con software específico para el procesamiento de vuelos UAV, es decir, que tengan en cuenta lo descrito en las

condiciones SfM. En este sentido aparecen soluciones tanto open source como privadas, las cuales presentan las mismas ventajas e inconvenientes que podrían plantear otro tipo de herramientas informáticas.

Paralelamente a la evolución experimentada por la visión artificial han aparecido distintos grupos de desarrolladores con el propósito de liberar para los usuarios distintas herramientas de código abierto. Estas herramientas permiten afrontar aplicaciones de mapeado 3D. Este tipo de herramientas open source presentan la ventaja del nulo coste económico, control absoluto de todos los parámetros que intervienen en los algoritmos, permitiendo adaptarlos a las necesidades concretas de un usuario y/o proyecto en particular. Dentro de este grupo destaca en primer lugar OpenCV, biblioteca de visión artificial desarrollada en sus inicios por Intel (<http://opencv.org>). Esta librería es multiplataforma, contando con versiones para Linux, Mac OS X y Windows. Presenta mas de 500 funciones y contempla una gran variedad de campos dentro de la visión computerizada como es la calibración de sensores, reconocimiento de objetos, detección de movimiento, visión estereoscópica, etc. Referente a la reconstrucción 3D, OpenCV ofrece algoritmos para detección de características, algunos de ellos reimplementados para trabajar sobre Unidad de Procesamiento Gráfico (GPU). Un buen complemento a esta librería es PCL o Point Cloud Library (<http://pointclouds.org/>) basada en el procesado de nubes de puntos. Igualmente es una librería multiplataforma, de código libre, sobre la cual están trabajando muchas organizaciones privadas y públicas. Otra solución es VisualSFM (<http://ccwu.me/vsfm/>), herramienta para la reconstrucción 3D de escenarios, empleando SfM. Es una herramienta de propósito general que permite incluso reconstruir escenarios tomadas con cámaras de baja calidad. Para que este tipo de imágenes puedan ser procesadas con éxito es necesario que las exigencias en cuanto a calidad por parte del algoritmo se relajen, perdiendo precisión para según que tipos de aplicaciones. El Instituto Geográfico Nacional francés inició en 2007 el desarrollo de un software con propósitos cartográficos denominado MICMAC/APERO (<http://logiciels.ign.fr/?-Micmac,3->), en el que frente a otras soluciones libres, los modelos matemáticos empleados son mas rigurosos y por tanto la calidad de los resultados obtenidos es mejor.

En cuanto a software privado se ofrecen soluciones tanto a nivel de procesamiento local como servicios cloud computing. Las soluciones mas empleadas actualmente se corresponden con UASMaster, Pix4D, PhotoScan y Ensomosaic. En el caso de

UASMaster, solución ofrecida por Trimble, esta se corresponde con una adaptación de todos los desarrollos fotogramétricos clásicos de la firma Inpho, con un amplio bagaje en procesos fotogramétricos, adaptadas a las particularidades de un vuelo con plataforma UAV. Los algoritmos desarrollados permiten trabajar con un volumen de imágenes elevado de forma ágil, aspecto importante en el caso de trabajos realizados con UAV tipo ala fija. De todas las soluciones actuales es la que mayor enfoque fotogramétrico tradicional presenta debido a sus orígenes. Pix4D es una solución desarrollada en el año 2011 la cual se adapta a las necesidades del usuario en cuanto a la adquisición de licencias, siendo posible la compra o alquiler de éstas. Inicialmente los servicios ofertados era cloud computing, si bien han migrado hacia un servicio de procesado local. Presenta como ventaja frente a otras soluciones la capacidad de trabajar con sensores multiarray tales como Tetracam mini-MCA 6. Igualmente su implementación permite procesar vuelos realizados con cámaras termográficas cuya calidad espacial es baja frente a otros sensores. De este modo se presenta como una solución multipropósito desde el momento que es capaz de procesar imágenes registradas con sensores de distintas calidad y características.

6.6 Calibración radiométrica de sensores

El análisis de los datos registrados por los sensores multi / hiper-espectrales y termográficos requieren del conocimiento previo de los parámetros de calibración radiométrica de cada una de las bandas espectrales.

El efecto de la atmósfera sobre los valores observados por el sensor a bordo de una plataforma UAV se debe a los aerosoles y vapor de agua de ésta, teniendo en cuenta por lo tanto la dispersión de Rayleigh debido a las fluctuaciones en la densidad del aire, el contenido de Ozono. El vapor de agua afecta en mayor medida a la región del infrarrojo próximo, de interés para aplicaciones agronómicas. Al igual que otros sensores alejados de la superficie terrestre los sensores a bordo de un UAV se ven afectados del efecto atmosférico. En el caso de sensores multi e hiper-espectrales esta calibración puede desarrollarse de diferentes maneras (Dingirard y Slater 1999), siendo similar a las correcciones aplicadas a imágenes captadas por plataformas espaciales o aéreas tripuladas:

1. Calibración en laboratorio previa al vuelo (*Preflight calibration*): Esta metodología es la mas rigurosa de todas, siendo necesaria para su realización una esfera

integrante o esfera de Ulbricht (Figura 77). Esta consiste en una cavidad esférica recubierta en su interior por un material de una alta reflectancia y con un comportamiento lambertiano. Se obtiene diferentes niveles de radiación conocida, determinando la relación lineal entre niveles digitales y reflectancia. Esta metodología si bien es la mas exacta y rigurosa es la mas costosa en términos económicos debido a la especificidad del instrumental a emplear.

2. Calibración a bordo (*On-board calibration*): Durante el vuelo se realizan comprobaciones mediante sensores embarcados en vuelo. Esta metodología aplicada a UAV presenta el problema del incremento en la carga de pago.
3. Mediante campañas de campo (*Vicarious calibration*): Consiste en hacer una calibración radiométrica absoluta ajustada a las condiciones del momento del vuelo. Se distinguen dos modalidades, el método basado en radiancias y el basado en reflectancia, consistentes en un ajuste empírico de tipo lineal.
4. Basado en datos de la propia imagen. Es el método menos preciso y de difícil aplicación en la mayoría de los casos en vuelos UAV. Se basa en asumir que en una imagen es posible detectar píxeles oscuros asociados a aquellos con irradiancia nula, por ejemplo una superficie de agua limpia de una cierta profundidad. Se recomienda no aplicar esta metodología.
5. Empleo de un modelo físico de transferencia radiativa. Esta basado en simular las condiciones de la atmosfera en función de las características físico-químicas de ésta, del día, de la hora y de la localización de la adquisición de la imagen.

De todos los métodos expuestos la metodología mas adecuada es la basada en una calibración mediante esfera integrante si bien es la menos accesible al usuario general. De este modo los métodos mas empleados consiste en realizar una calibración vicarious o una basada en un modelo de transferencia radiativa.

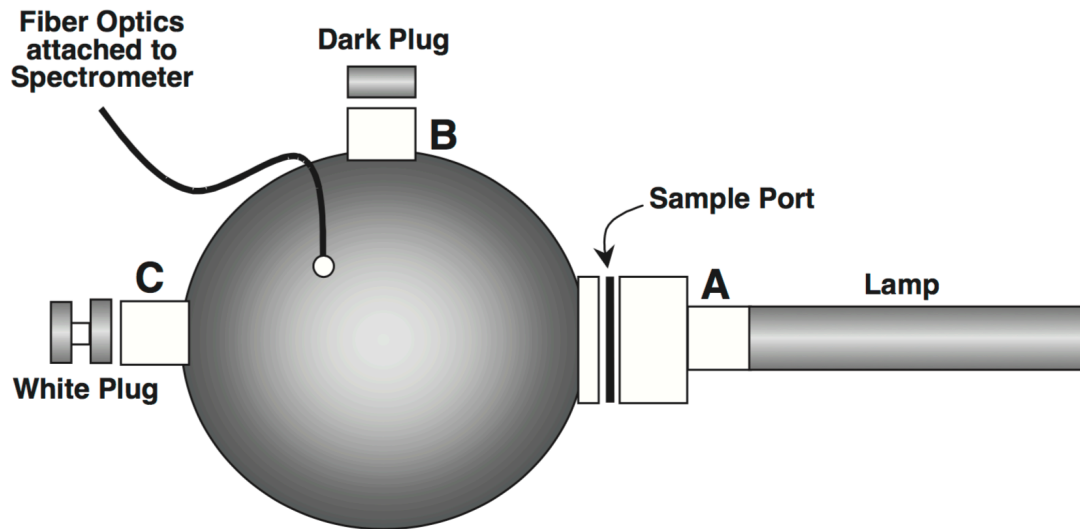


Figura 77 Esquema de la esfera integradora Li-Cor 1800-12

6.6.1 Vicarious calibration

Esta calibración hace uso de elementos o superficies naturales o artificiales lo más homogéneas y lambertianas posibles. En el caso de vuelos UAV, dadas las reducidas dimensiones de vuelo se emplean elementos artificiales, de entre todas las posibilidades se recomienda el uso de paneles de polímeros que garanticen un comportamiento próximo a un cuerpo lambertiano ideal. Las dimensiones de estos paneles tienen que ser tal que al menos garanticen según la altura de vuelo AGL la presencia de éstos en dos píxeles puros sobre las imágenes. Se hace necesario al menos contar con dos paneles, correspondientes al blanco y al negro o lo que es lo mismo, un panel que de máxima reflectividad y otro de nula (Figura 78).

Este método se basa en la determinación de una relación lineal directa entre el nivel digital (N_d) de cada píxel de la imagen y la reflectancia captada por el sensor. Para ello de cada una de las imágenes que representan las bandas del sensor se extrae el N_d y se determina una relación con los valores de reflectancia observados en campo mediante un espectroradiómetro. El modelo matemático es de la forma (Ec. 12)

$$L_{sensor} = C_0 + C_1 \cdot N_d \quad \text{Ec. 12}$$

Debido a que los paneles de referencia aparecerán en distintas imágenes, se realizará un ajuste mínimo cuadrático con los N_d extraídos de todas las imágenes de interés. La calidad del ajuste realizado va a depender por un lado de la calidad del sensor empleado

así como de la campaña de campo con espectroradiómetro. En este último caso es necesario seguir un protocolo de trabajo que asegure la correcta observación de los paneles y muestras.

Dado que el objetivo es determinar los parámetros a nivel de superficie y no a nivel de sensor se debe aplicar un modelo atmosférico que parametrice la afección de la atmosfera a la propagación de la radiación. A consecuencia de la delgadez de la columna atmosférica como consecuencia de altura AGL de los vuelos, esta queda desestimada. El resultado final es una transformación lineal de Nd a valores de energía. Los resultados obtenidos deben ser sometidos a un control de calidad con objeto de conocer la calidad del ajuste realizado, midiendo para ello otras superficies y validando el modelo derivado de las medidas a los paneles de referencia.



Figura 78 Paneles de calibración sobre el terreno durante el vuelo

6.6.2 Modelo de transferencia radiativa

Aplicado principalmente a sensores termográficos se basa en que la radiación del infrarrojo térmico en este caso al pasar del objeto sobre la superficie terrestre al sensor se ve afectado por la atmosfera de manera que la radiación detectada por el sensor se aleja del valor verdadero. La ecuación de transferencia radiativa describe la radiancia que llega al sensor ($L_{\lambda}^{at-sensor}$) para una longitud de onda como (Ec. 13):

$$L_{\lambda}^{at-sensor} = (\epsilon_{\lambda} \cdot B(\lambda, T_s) + (1 - \epsilon_{\lambda}) \cdot L_{\lambda}^{atm\downarrow}) \cdot \tau_{\lambda} + L_{\lambda}^{atm\uparrow} \quad \text{Ec. 13}$$

Siendo ε_λ la emisividad de la superficie, $B(\lambda, T_s)$ la radiación emitida por el cuerpo negro a una temperatura T_s (Ec. 14), entendida ésta como la temperatura de la superficie analizada, $L_\lambda^{atm\downarrow}$ la radiación descendente o *down-welling*, τ_λ se corresponde con la transmisividad de la atmosfera y $L_\lambda^{atm\uparrow}$ la radiación ascendente o *up-welling*

$$B(\lambda, T_s) = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T_s}\right) - 1} \quad \text{Ec. 14}$$

Siendo $c_1 = 1.19104 \cdot 10^8 \text{ w mm}^4 \text{ m}^2 \text{ sr}^{-1}$ y $c_2 = 1.43877 \cdot 10^4 \text{ mmK}$

A partir de las Ec. 13y Ec. 14 se establece la relación entre la radiación y la temperatura de la superficie. En el desarrollo de la formulación descrita se hace necesario simular el modelo atmosférico en base a software como MODTRAN o ATCOOR. Estas soluciones predicen parámetros atmosféricos como $L_\lambda^{atm\downarrow}$, τ_λ y $L_\lambda^{atm\uparrow}$ a distintos niveles de la atmosfera y distintas longitudes de onda. Como entrada para el desarrollo de dicho modelo se hace necesario medir en campo la temperatura, la presión y la humedad relativa. Esta información junto con la posición, la época del año y la altura del sensor permiten desarrollar el modelo atmosférico que permita obtener unas imágenes corregidas.

Al igual que en el método anterior, se recomienda tomar una serie de muestras en campo que sirva para contrastar la calidad de la corrección desarrollada.

(Página intencionada en blanco)

7 CARACTERIZACIÓN DE LAS PRINCIPALES UTILIDADES DESARROLLADAS EN EL ÁMBITO DE LA AGRICULTURA, LA AGROINDUSTRIA Y EL DESARROLLO RURAL

La agricultura de precisión consiste en el uso combinado de técnicas geoespaciales y sensores para la localización y detección de variaciones y afecciones sobre un cultivo y poder aplicar de forma localizada tratamientos puntuales. Por lo tanto, cualquier tecnología que ayude al aumento de la producción sin que ello lleve asociado un impacto negativo al medioambiente repercute directamente en un beneficio para la sociedad. De forma general, el propio concepto de agricultura de precisión sugiere que la práctica agrícola es posible realizarla con un cierto grado de precisión. Sistemas de navegación por satélite, sistemas de información geográfica o imágenes procedentes de plataformas espaciales o aéreas son algunos ejemplos de herramientas empleadas en este sentido, permitiendo generar mapas de malas hierbas, de deficiencias en nutrientes, infestación de plagas, deficiencias en el riego, etc. Con toda la información recogida en campo y su posterior transformación en productos se ofrece una asistencia de un alto valor para la toma de decisiones. Bajo este escenario, ante una situación adversa detectada en el control del cultivo se hace necesario visitar de forma recurrente la explotación para evaluar si las medidas adoptadas se están reflejando de forma positiva en el cultivo. La tendencia actual es hacia explotaciones cada vez más grandes, dificultando esta

inspecciones, siendo mas costosas caso de hacerlas pie tierra. Es por esto que el uso y explotación de imágenes registradas desde el aire se muestra como una herramienta de mucho interés en este contexto de trabajo. Tradicionalmente estas imágenes se han adquirido desde plataformas espaciales y/o aéreas tripuladas, y mas recientemente desde plataformas aéreas no tripuladas. La tendencia en la demanda y necesidad de estas imágenes por parte de usuarios es la de una alta o muy alta resolución espacial, añadiendo recientemente una muy alta resolución temporal, es decir, de máxima actualidad. En el caso de plataformas espaciales (Figura 79.a y Figura 79.b), la resolución espacial presenta niveles submétricos como los ofrecidos por misiones como Geoeye, WorldView, Pleiades o Komosat. En el caso de plataformas aéreas tripuladas, es posible alcanzar resoluciones espaciales centimétricas (Figura 79.c), estando en este sentido al mismo nivel que una plataforma aérea no tripulada. Estas dos plataformas se emplean para la toma de información con objeto de asistir en el control de crecimiento del cultivo (Yuping, y otros 2008), predicción de cosecha (Prasad, y otros 2006) o (Bastiaanssen, Molden y Makin 2000). Sin embargo, en el caso de plataformas espaciales su uso se ve limitado en muchas ocasiones debido a que los tiempos de revisita de la zona son largos para las necesidades de estas aplicaciones, se presentan nubes o las sombras de éstas sobre la escena, etc, ofreciendo limitaciones en cuanto a su uso (Moran, Inoue y Barnes 1997). En el caso de las plataformas aéreas tripuladas, el elevado coste de operación, o la propia complejidad de ésta limitan su uso (Rango, y otros 2009). Las ventajas que ofrece una plataforma no tripulada es una muy alta resolución espacial y temporal, unos costes económicos de operación relativamente bajos así como la posibilidad de adecuar su uso a las necesidades del usuario, siendo posible realizar la toma de la información en un momento determinado y de forma repetitiva a lo largo de la ventana temporal deseada. Como resultado, el interés y uso de estas plataformas de vuelo en el sector agroforestal es cada vez mayor.

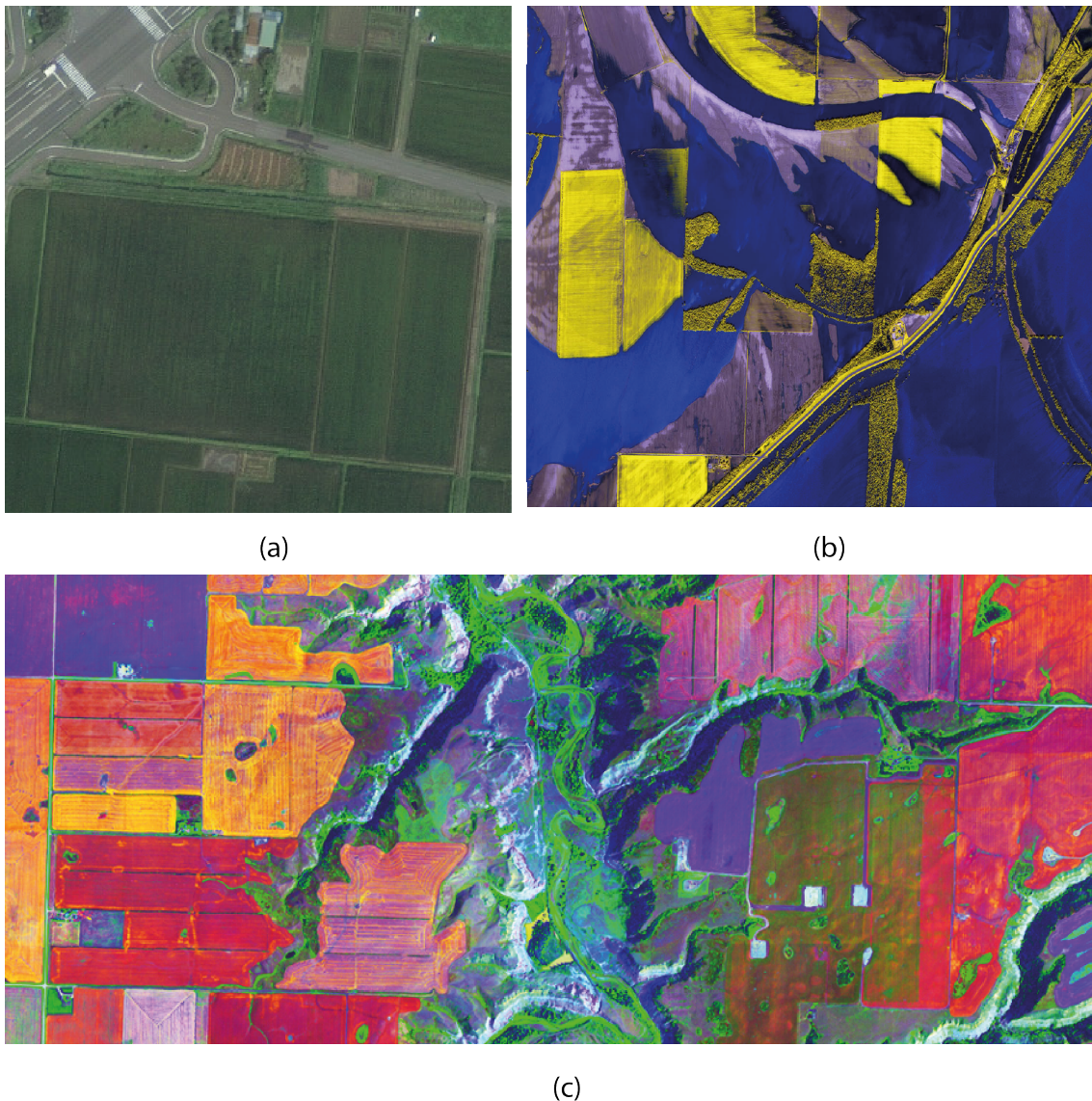


Figura 79 (a) Muestra Geocye sobre campos de arroz en Inakadate (Japón), Muestra WorldView sobre Cairo, Illinois (USA), (c) muestra escena sensor CASI-1500 aerotransportado.

7.1 ¿Por qué emplear UAS en agricultura?

Estos sistemas no dejan de ser máquinas, que permiten desarrollar operaciones y/o acciones rutinarias, peligrosas, constantes, etc. Bajo estos principios evitan pérdidas de atención por la monotonía de una acción por parte de un operador, minimizan los riesgos en la salud a la hora de aplicar un determinado producto o sustancia, etc. Por lo tanto, como cualquier máquina ofrecen repetibilidad y disponibilidad en el tiempo, esto permite volar una explotación de forma diaria u horaria, con un coste de operación relativamente bajo y con los riesgos de accidente del piloto eliminados. La diferencia frente a otros

dispositivos y maquinaria empleada en agricultura es que un UAV va moverse en el aire y que la tripulación no estará en el interior de la aeronave. Podría añadirse una tercera componente, el funcionamiento autónomo, si bien tal característica es compartida con otros sistemas empleados en agricultura, como la maquinaria robotizada.

Los sistemas UAV empleados actualmente presentan unas dimensiones y peso reducidos posibilitando el desarrollo de plataformas de vuelo mas potentes y mas económicas. El desarrollo tecnológico continuo esta permitiendo contar además con plataformas cada vez mas estables y seguras, siendo una alternativa fiable y segura para emplear en una explotación.

Frente a vehículos terrestres, un UAV se presenta como un vehículo mas ágil, sobre todo si es de tipo VTOL dado que puede permanecer sobrevolando sobre un punto y ofrece una buena maniobrabilidad, permitiendo un acercamiento al cultivo o al animal de una manera mas sencilla. Además, al no haber contacto con el terreno se elimina la necesidad de pistas o calles sobre el terreno, desaparece la necesidad de contar con áreas con un cierto grado de compactación y en consecuencia poder contar con una mayor superficie destinada al cultivo. Igualmente el acceso es mucho mas fácil y con menos restricciones a través del aire, de manera que en aquellas explotaciones donde aparezca zonas con pendientes pronunciadas, cárcavas, etc. el movimiento desde el aire facilita las tareas. Frente a estas ventajas actualmente los sistemas UAV presentan el problema de la autonomía y la capacidad de carga por lo que esta tecnología no se presenta como excluyente de otras.

Con carácter general, la agricultura de precisión comprende la adquisición de información, bien de forma remota o teledetección o mediante la integración de redes de sensores, el control de animales, cultivos, incendios, etc... y la aplicación de tratamientos químicos y biológicos, siendo las ventajas aportadas multidimensionales:

1. Optimización de tratamientos, aplicando fertilizantes y tratamientos donde y cuando se necesiten.
2. Reducción y prevención en la generación de residuos, por ejemplo mediante la gestión en el uso de agua.
3. Reducción del coste de mano de obra y materiales.
4. Reducción de la contaminación, en el caso de los sistemas UAV los motores empleados son eléctricos y no de combustión.

5. Reducción de los riesgos mediante el análisis automático y continuo de los procesos y los cultivos, construyendo un marco de trabajo preventivo.

7.2 Teledetección y agricultura de precisión: UAV

La teledetección es la ciencia y tecnología a partir de la cual es posible identificar y conocer características de objetos y/o superficies/cubiertas sin un contacto directo con éstos. Considerando tal definición, la teledetección juega un papel importante dentro de la agricultura de precisión en la adquisición de información de un cultivo, la generación de productos geomáticos mostrando la variabilidad en la explotación así como la asistencia en la toma de decisiones (Warren y Metternicht 2005). La calidad de las decisiones adoptadas va a depender en buena medida de la actualidad de la información registrada. Las plataformas tradicionales, espaciales y aéreas tripuladas, empleadas para la adquisición de la información presentan algunas limitaciones para su uso de forma generalizada por parte del usuario tales como su elevado coste económico, necesitan de un capacitación de alto nivel, son muy dependientes de las condiciones climatológicas (presencias de nubes, sombras de nubes, neblinas...), la resolución espacial no permite trabajar a nivel de planta, necesario en algunas aplicaciones, los periodos de revisita de la parcela son grandes, dificultando la puesta en servicio de proyectos de control y seguimiento diario o incluso semanal. Por el contrario las plataformas UAV permiten adquirir información del cultivo en el momento adecuado de necesidad, siendo factible la adquisición de información a diario junto con una muy alta resolución espacial, por ejemplo centímetros. Dependiendo de los sensores instalados en la plataforma de vuelo los usos y explotación son diferentes:

- a) Sensores RGB, Infrarrojo cercano, multi / hiperespectral: Es posible realizar análisis tanto de la planta (altura, crecimiento, salud e índices de vegetación) como del suelo (riego, humedad, erosión, componentes químicos específicos).
- b) Sensores termográficos: Las aplicaciones aparecen ligadas a riego, madurez y enfermedades del cultivo.
- c) Scanner Laser: Aplicados al análisis de plantas permiten determinar la altura y crecimiento de éstas, en cuanto al suelo es posible la obtención de la topografía actual de un terreno, modelización de taludes, erosión, etc.

Dada la posibilidad de incorporar la variable tiempo como una dimensión mas es posible afirmar que las imágenes adquiridas son bidimensional (x,y) o tridimensionales (x,y,t)

facilitando en gran medida el análisis multitemporal, siendo una oportunidad de trabajar en un marco de gestión muy avanzado y organizado para el riego, la fertilización y necesidades de tratamientos generales o particulares.

Las aplicaciones agronómicas de la teledetección empleando imágenes de satélite o registradas mediante vuelos tripulados abarcan desde la determinación de propiedades del suelo, detección y control de stress hídrico o malas hierbas, aplicación localizada de pesticidas, herbicidas y nutrientes, etc. En este contexto, empleando como plataforma de vuelo un UAV, este ofrecerá una alta resolución espacio temporal. Esta elevada resolución espacial es de especial interés a la hora de examinar las condiciones del cultivo al estar relacionado con el Índice de Área Foliar (*Leaf Area Index*, LAI). El LAI, definido como el área total de la superficie superior de las hojas por área de unidad de terreno que se encuentre directamente debajo de la planta, es un parámetro especialmente importante a partir del cual poder determinar dos procesos fisiológicos como son la fotosíntesis y la evapotranspiración. La mayoría de los modelos de estimación de cosecha y de crecimiento del cultivo requieren como entrada este parámetro. Además, los UAS se están empleando en la determinación de otros parámetros como la determinación de propiedades del suelo (d'Oleire-Oltmanns, y otros 2012), estrés hídrico en planta (Baluja, y otros 2012), contenido de nitrógeno (Pölonen, y otros 2013), detección de malas hierbas (Torres-Sánchez, y otros 2013), altura de cultivo (Zarco-Tejada, y otros 2014), volumen de biomasa (Bendig, y otros 2014) entre otros.

Muchas de estas aplicaciones se determinan mediante el uso de índices de vegetación, herramientas muy utilizadas en el campo de la teledetección, destacando entre otros el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), el Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) o el Crop Water Stress Index (CWSI). La Figura 80 muestra el detalle espacial y espectral que es posible obtener mediante la observación de sensores a bordo de estas plataformas, la Figura 81 Muestra resultados distintos índices de vegetación sobre ensayo de olivar. Figura 81 muestra un ejemplo de determinación de distintos índices de vegetación sobre un cultivo de olivar a partir de un vuelo UAV con cámara multispectral.

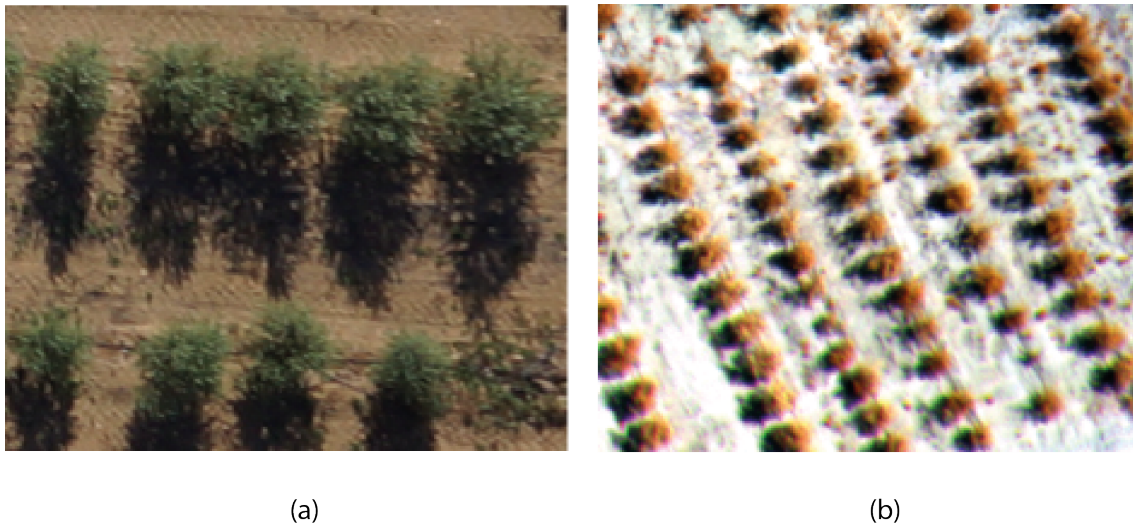


Figura 80 Ejemplo de imágenes registradas mediante plataforma UAV tipo multirotor: (a) Sensor Sony Nex7, (b) sensor multiespectral TetracamminiMCA 6.

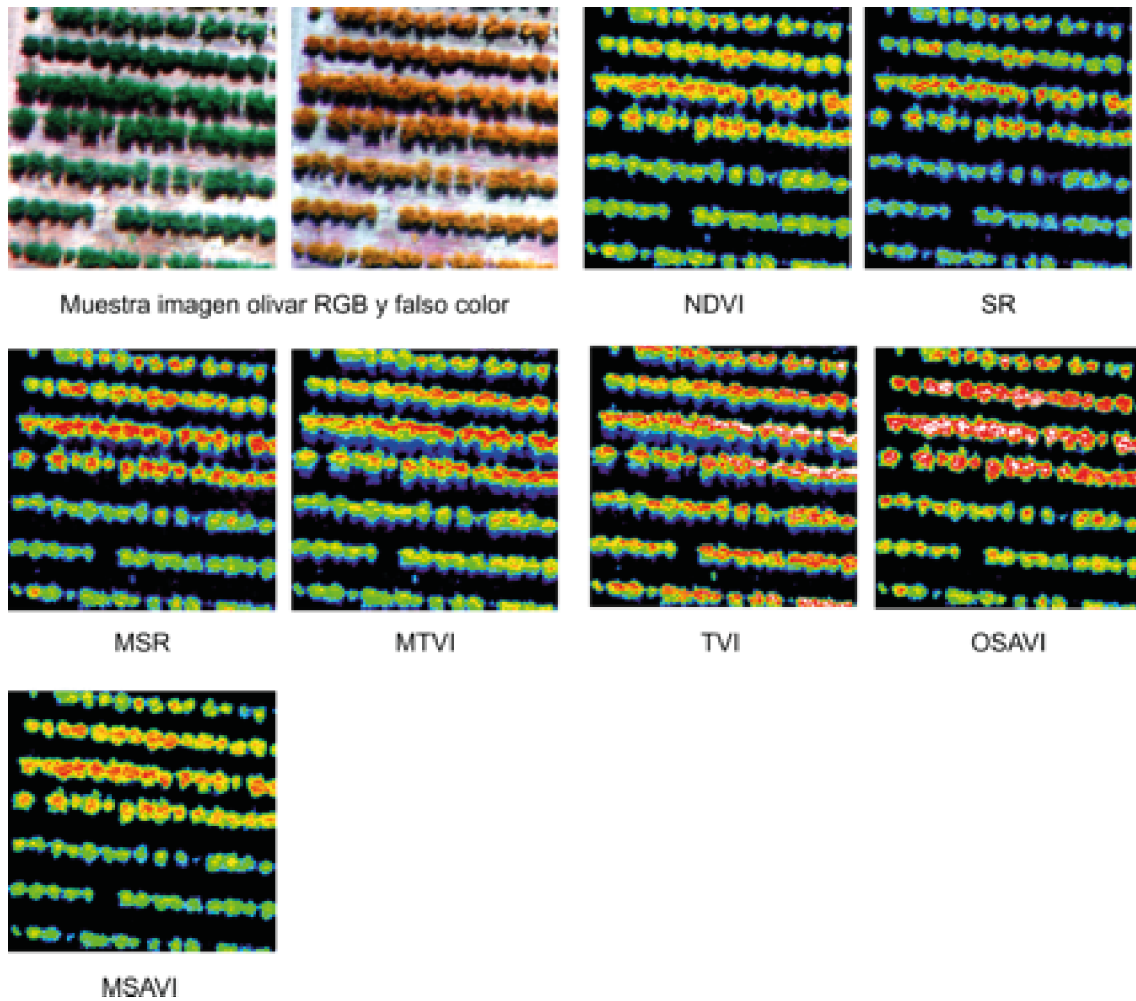


Figura 81 Muestra resultados distintos índices de vegetación sobre ensayo de olivar

El empleo de la teledetección como herramienta ha demostrado ser beneficiosa y ventajosa en muchos casos, si bien su uso dentro de la agricultura de precisión se encuentra limitado. El estudio desarrollado por la revista *Croplife* y el Center for Food and Agriculture Business (Erickson y Widmar 2015) muestra como la tecnología más empleada en el campo de la agricultura de precisión es el guiado de maquinaria asistido por sistemas GNSS, estando en cuarta posición la explotación de las imágenes de satélite o aviones tripulados. El uso de sistemas UAS aparece solo empleada por solo un 16% de los encuestados (Figura 82). Analizando la evolución temporal las imágenes de satélite / aéreas tripuladas y los sistemas de información han sido adoptados de una forma más intensa a partir del año 2011 (Figura 83). En el año 2015 se consideró por primera vez introducir en esta encuesta como tecnología los sistemas UAS, presentando un porcentaje del 16%, cifra que hace pensar que en los próximos años irá creciendo, generalizándose su uso. No obstante, el porcentaje de uso de las técnicas de teledetección no aparecen tan extendidas entre el gran público tal y como destacan algunos autores (Whipker y Akridge 2012). Entre otros motivos es posible destacar como las plataformas tradicionales de adquisición de imágenes no presentan la resolución espacial y temporal necesaria, dificultan la extracción de información de interés o la integración de los datos obtenidos en sistemas expertos junto con otras variables agronómicas. Servicios como la detección de malas hierbas donde es necesaria una muy alta resolución espacial son prácticamente inabordables con las plataformas tradicionales. Además las condiciones climatológicas son un importante impedimento en la explotación y adquisición de las imágenes dada la coincidencia con la época de lluvia, apareciendo artefactos como nubes sobre las imágenes. El uso de sistemas UAS salva importantes obstáculos, lo que hace pensar que en los próximos años tanto el uso de estos sistemas como el uso de la teledetección se incrementará. Desde el año 2010 han aparecido distintos sistemas UAS a nivel comercial por debajo de los 25 kg que están permitiendo el desarrollo de aplicaciones medioambientales y agronómicas dando lugar a un nuevo tipo de teledetección denominado Low Altitude Remote Sensing (LARS) o teledetección de baja altura. Las dos plataformas de vuelo empleadas principalmente son de tipo ala fija y multirotor, sobre las cuales se han instalado sensores de todo tipo para adquirir información de distintos cultivos con distintas resoluciones espaciales.

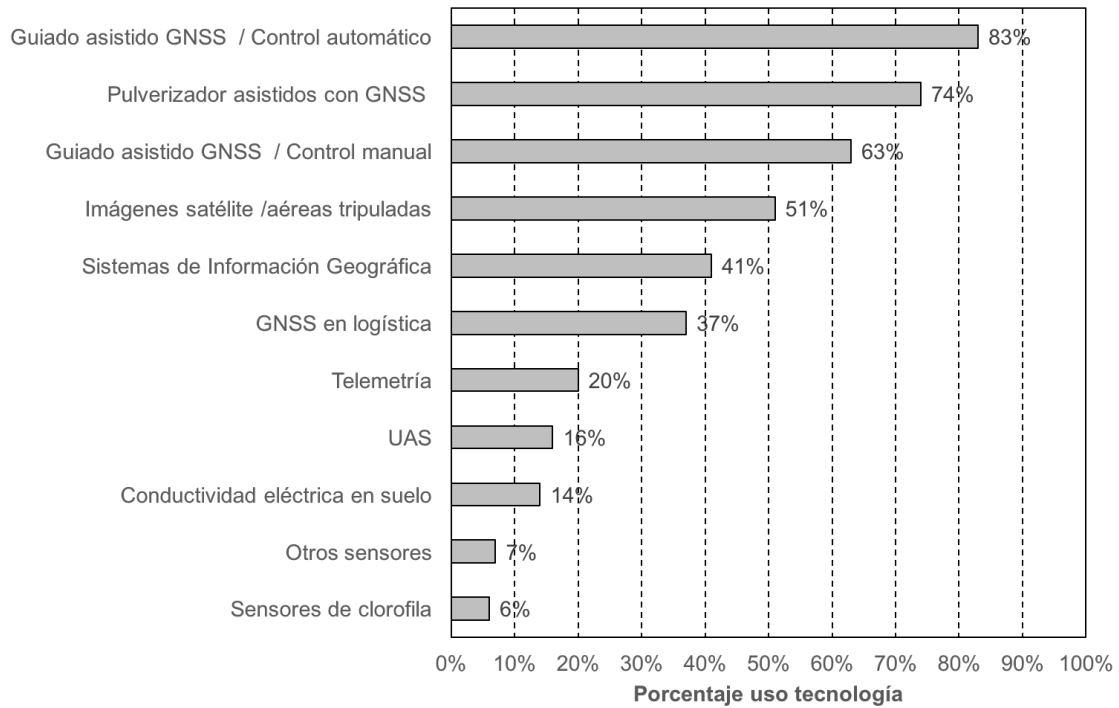


Figura 82 Tecnologías mas populares en la agricultura de precisión (Erickson y Widmar 2015)

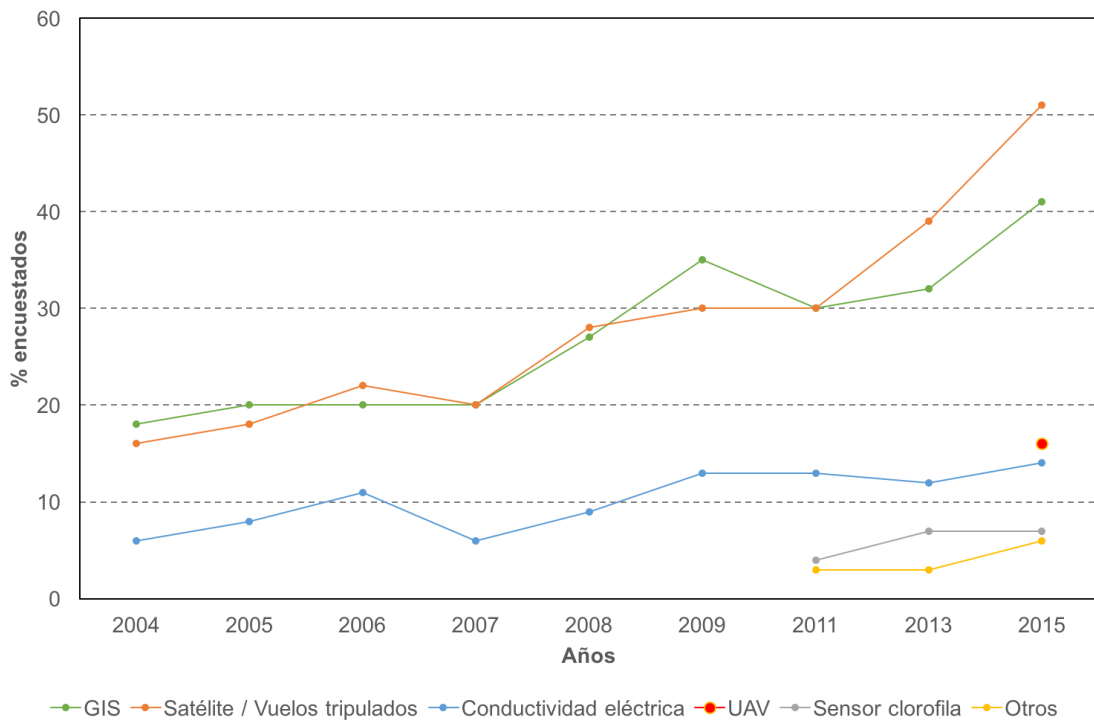


Figura 83 Uso de tecnologías *site-specific* a lo largo del tiempo (Erickson y Widmar 2015)

A modo de resumen, un trabajo UAV aplicado a la agricultura de precisión se descompone en cuatro fases bien diferenciadas (Figura 84). En primer lugar se hace necesario definir de la manera mas rigurosa posible cuales son las necesidades de la aplicación, posteriormente se realizará la campaña de vuelo, se procesarán los datos y de ellos se generarán distintos productos de interés para su aplicación en el cultivo. En la primera de las etapas es necesario responder a las preguntas que se desea evaluar, como es la parcela a evaluar y como se tomarán las muestras correspondientes a la verdad terreno. De este modo se seleccionará la plataforma de vuelo mas adecuada dependiendo del tamaño de la explotación y sobre ésta se embarcarán distintos sensores dependiendo de la característica a estudiar. Además del propio vuelo se hace necesario contar con información obtenida sobre el terreno que sirva para determinar y conocer el grado de fiabilidad de los parámetros e índices generados a partir de la información registrada.

Una vez definida la plataforma y el sensor se procederá a diseñar un plan de vuelo considerando la legislación vigente y todos los requisitos métricos, espectrales y temporales que aseguren la no presencia de problemas en la fase de procesado posterior. Junto con el vuelo, los trabajos de campo tendrán que contemplar la toma de un conjunto de puntos de apoyo topográfico para definir el marco geodésico de los trabajos. Además se incluirán todos los trabajos necesarios de captura de información que permitan poder realizar posteriormente la corrección atmosférica de las distintas bandas espectrales.

La fase de procesado presenta dos enfoques, geométrico y radiométrico. El primero de ellos tiene por objeto generar MDE/MDS y ortofotografías. Estas ortofotografías serán corregidas radiométricamente, derivando de ellas índices de vegetación, balances de energía, volúmenes, etc. Toda la información derivada deberá ser sometida a un control de calidad que defina la fiabilidad de los procedimientos desarrollados. Finalmente una vez validados los productos generados se correlacionará la información generada con datos de campo o mapas de estado y/o variables de interés del cultivo.

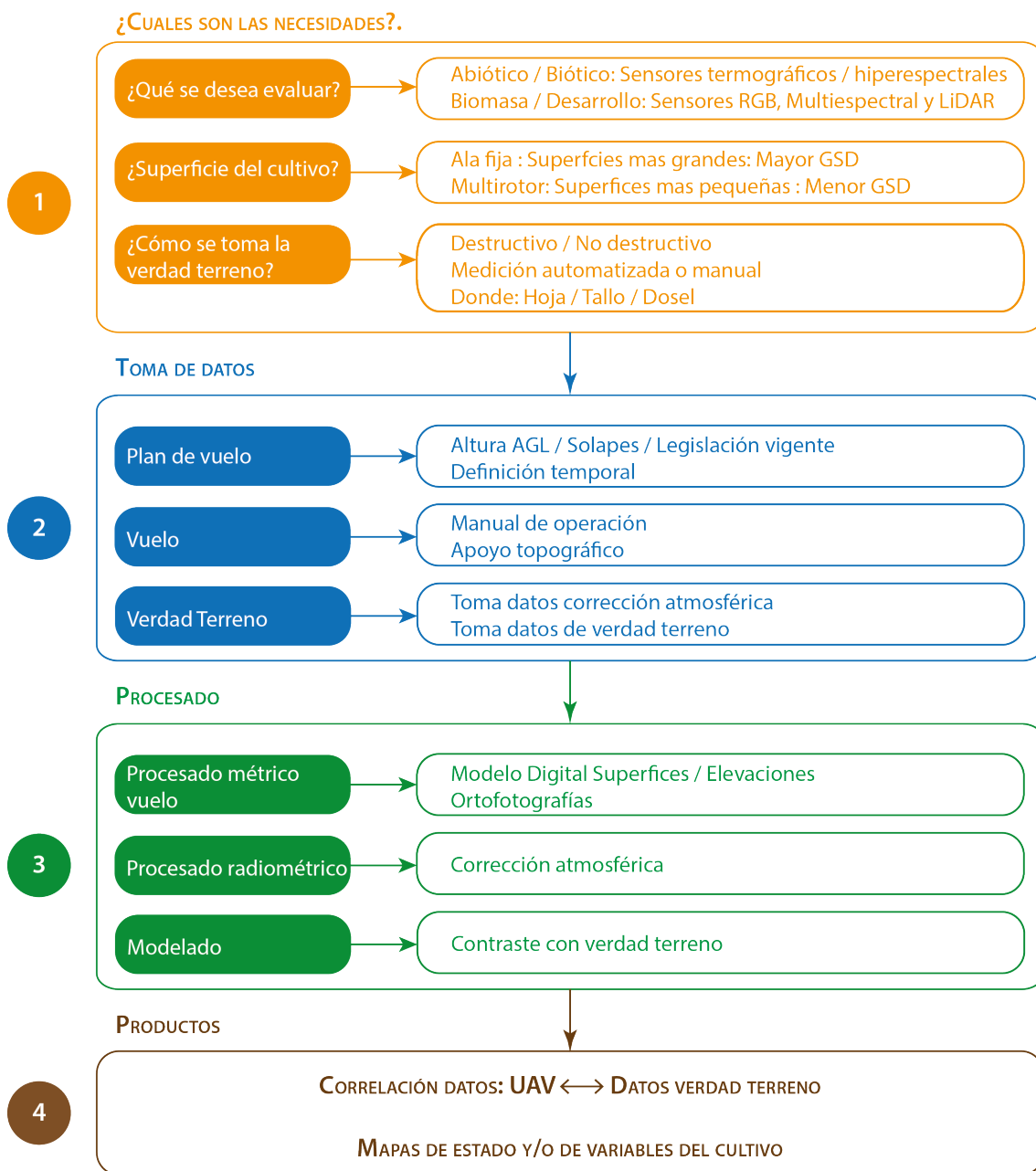


Figura 84 Fases de trabajo UAV aplicados a la agricultura de precisión

Además de la explotación de los sensores a bordo de la plataforma aérea mediante técnicas de teledetección, un UAV puede trabajar en colaboración con otras tecnologías. Dada su facilidad para moverse sobre el cultivo, este puede acceder hasta los distintos nodos que configuren una red inalámbrica de manera que a su paso este irá recopilando la información recogida en cada uno de los data-loggers individuales (Figura 85). De este modo, el módulo de transmisión dentro de la red empleará una tecnología mas sencilla y económica, no siendo necesario desarrollar una red de comunicación entre

nodos esclavos que mandan la información hacia un nodo master el cual se encarga de enviar esta información a un centro de control. Este escenario si bien hoy día es una realidad presenta en ocasiones dos problemas relacionados con el número de sensores a instalar en el cultivo debido al alcance mínimo necesario que garantice el flujo de información entre nodos. Por otro lado, en ocasiones no está garantizada la conexión a Internet en áreas rústicas, lo cual puede obligar a tener que visitar la explotación periódicamente para recoger la información de la red. Mediante el empleo de un UAV se puede recorrer diariamente una parcela, recogiendo los datos de cada nodo y enviando estos a la estación base.

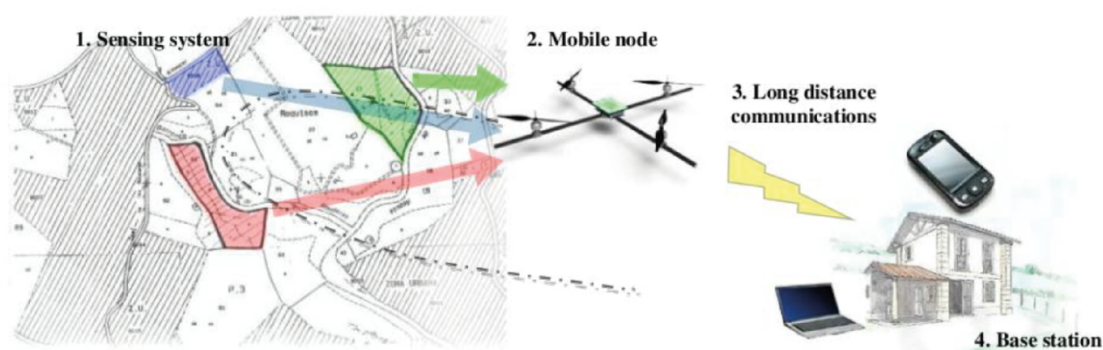


Figura 85 Integración de UAS en redes de sensores inalámbricos (Valente, y otros 2011)

La autonomía de vuelo que ofrecen algunas plataformas, con capacidad de vuelo superior a 2 horas en algunos de los casos, las convierte en una herramienta muy a tener en cuenta a futuro dentro de las tareas de inspección y control de campo de la PAC. Frente a metodologías tradicionales de medición pie tierra, el desarrollo de vuelos UAV se presenta como una alternativa. La Unión Europea tiene desarrollado un manual técnico que todos los Estados Miembros tienen que aplicar para evaluar y demostrar que las herramientas empleadas para la medida de superficies se encuentra dentro de los umbrales de calidad permitidos. Hasta ahora las metodologías validadas son mediciones con sensores GNSS e imágenes procedentes de plataformas espaciales. Siguiendo esta metodología (Mesas-Carrascosa, y otros 2014) han evaluado la utilidad de las ortofotografías obtenidas a partir de vuelos UAV, estando al mismo nivel que las fuentes de información convencionales. Si bien técnicamente estas herramientas son válidas para su uso, la legislación actual reduce su potencial dadas las condiciones de vuelo VLOS.

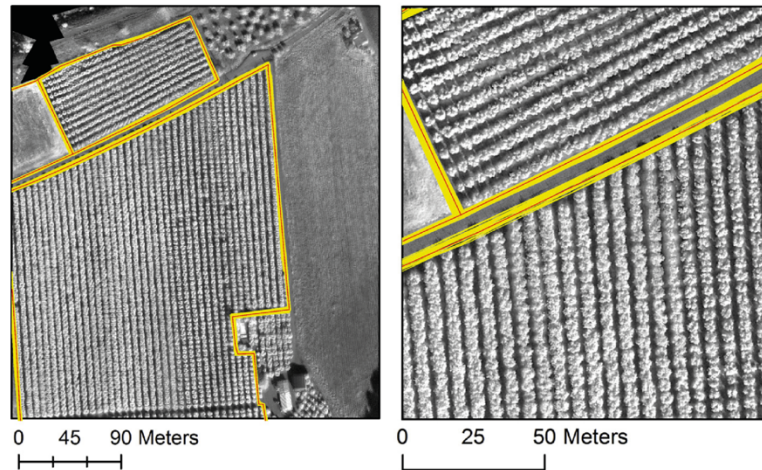


Figura 86 Ejemplo evaluación calidad en medición de superficies de parcelas agrícolas (Mesas-Carrascosa, y otros 2014)

Finalmente, dentro de las aplicaciones posibles a corto medio plazo de las plataformas UAV será la de dotarles de capacidad para la manipulación de objetos. Actualmente se encuentra en fase de desarrollo, trabajando distintos grupos de investigación y desarrollo en la manipulación de elementos, como por ejemplo el proyecto ARCAS (<http://www.arcas-project.eu/>). De este modo, sobre la plataforma de vuelo será posible instalar un brazo articulado (Figura 87) con el que poder cortar y tomar muestras en zonas inaccesibles del cultivo, asistir en la instalación de sensores, etc.

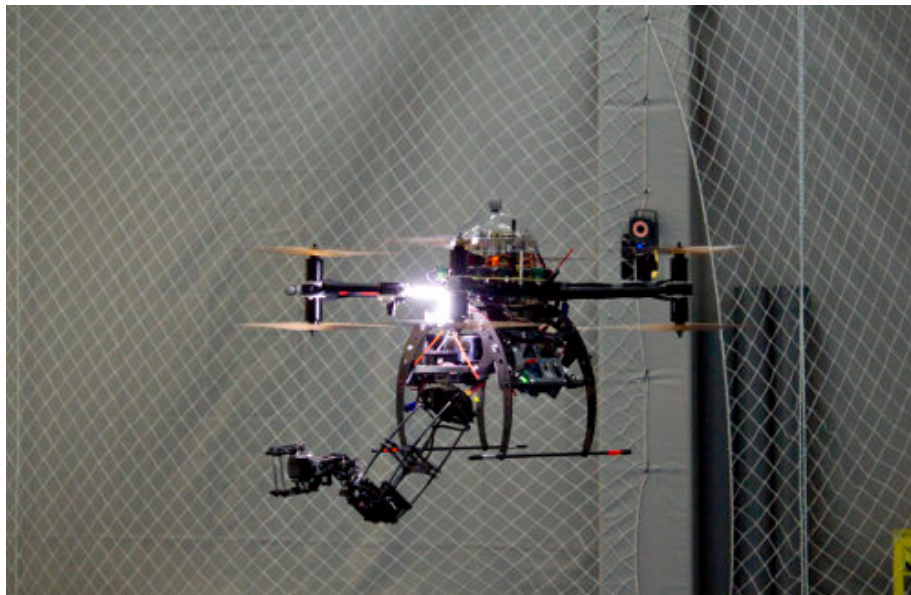


Figura 87 Prototipo de UAV multirotor equipado con brazo articulado

7.3 Limitaciones de un sistema UAS en la agricultura de precisión

Con respecto a las plataformas de vuelo, el empleo de motores eléctricos ofrece vuelos de duración corta, problemas de estabilidad y de maniobrabilidad en algunos de los casos. Además algunas de estas plataformas ofrecen problemas de seguridad en vuelo, apareciendo fallos relativos a los materiales de construcción empleados y roturas de motor. De este modo se recomienda el empleo de soluciones profesionales donde los elementos y componentes de los sistemas han sido sometidos a test de estrés y pruebas de uso.

Otro aspecto limitante se debe a las restricciones en cuanto a la carga de pago. Las limitaciones relacionadas con el peso de los sensores se encuentra entre el 20 y e 30% del peso total de la plataforma de vuelo. De esta manera se hace necesario la correcta elección de la plataforma de vuelo a emplear, debiendo establecer de forma precisa la carga de pago a emplear para que esta pueda ser instalada sin que suponga un problema en la ejecución del vuelo. Si bien la miniaturización de los sensores es ya un hecho, hoy día aparecen muchas limitaciones en cuanto a calidad de la óptica empleada, velocidad en la adquisición de la información, estabilidad en su funcionamiento, etc. Si bien la oferta de sensores convencionales tipo RGB es grande y con excelentes prestaciones, en cuanto a sensores multi / hiperespectrales, termográficos y LiDAR es escasa originando que los precios sean elevados, hecho que tiene como consecuencia que el coste de la carga de pago sea superior en muchos de los casos al de la propia plataforma de vuelo.

Considerando el marco legislativo, en el caso de la agricultura extensiva la legislación actual obliga a volar siempre en modo VLOS lo cual puede tener como consecuencia la necesidad de realizar diferentes vuelos para poder cubrir una explotación determinada. El resultado del intervalo de tiempo entre vuelos es la variación de las condiciones ambientales que afectan directamente a la información registrada por los sensores, su posterior procesamiento y extracción de información para asistir a la toma de decisiones.

Finalmente y no menos importante hay que resaltar que si bien en los últimos años han aparecido numerosos estudios e investigaciones donde se han empleado UAS para la adquisición de imágenes, no se ha realizado un análisis detallado de costes / beneficio que este tipo de tecnologías puede aportar en el caso de la agricultura de precisión. Este aspecto puede ser un factor clave para la introducción dentro del sector de estos sistemas dentro del proceso productivo.

Por lo tanto, los sistemas UAS aplicados en agricultura se encuentran actualmente en una situación inicial donde aun queda espacio para el desarrollo de plataformas de vuelo, sensores, software y desarrollo de aplicaciones que aporten mejoras y valor añadido. El éxito de la aplicación de estos sistemas es dependiente de que en los próximos años se desarrollen utilidades que realmente demuestren el beneficio, bien sea en ahorro de costes, reducción temporal de procesos o la mejora de la producción en este sector.

(Página intencionada en blanco)

8 RECOMENDACIONES Y PROPUESTAS

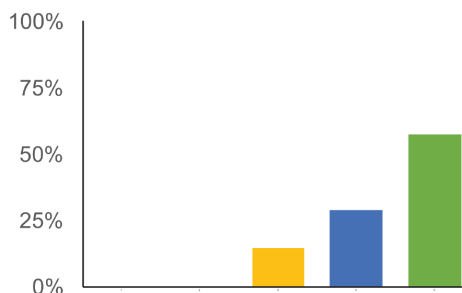
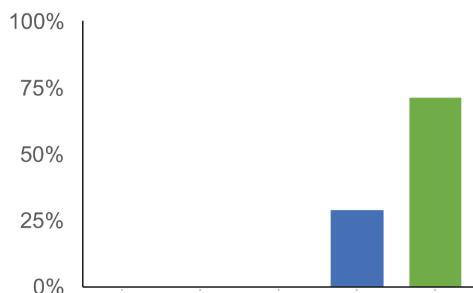
Se ha realizado una encuesta a través de un servicio WEB dirigida hacia usuarios del sector agroalimentario que emplean con cierta frecuencia información geográfica (<https://www.cognitofoms.com/UniversidadDeCordoba1/CuestionarioUAVEnAgricultura>) La encuesta aparece dividida en dos grupos de preguntas, en primer lugar se pregunta sobre la operatividad de estos sistemas comparándolos con plataformas tradicionales, espaciales o aéreas tripuladas. La segunda parte de la encuesta está relacionada con la información aportada por los sensores a bordo de un UAV.

Los resultados obtenidos en cuanto a la operatividad de las plataformas inferiores a 25 kg (Figura 88) muestran como los usuarios valoran como una característica muy importante la elevada resolución espacial de las imágenes captadas a partir de los sensores a bordo de estas plataformas. Esta tendencia se mantiene en cuanto a la resolución temporal, si bien, tal característica no es tan notable como la anterior, no alcanzando las cotas de la primera, de manera que no es tan importante una muy alta resolución temporal como la espacial. Esto se ve corroborado con el hecho de que el encuestado evaluó en términos generales los aspectos climáticos como algo interesante, de este modo, es posible deducir que no hay una clara preocupación ante la posible cancelación de un vuelo por ejemplo por condiciones de viento adversas. Como todo proceso productivo, el coste económico es importante y se ve reflejado en las encuesta de manera que en mas de la mitad de las respuesta se considera éste un factor muy importante. Por lo tanto, con carácter general, el potencial usuario esta

interesado desde un punto de vista operacional en alcanzar resoluciones espaciales muy altas en los productos generados a un menor coste económico.

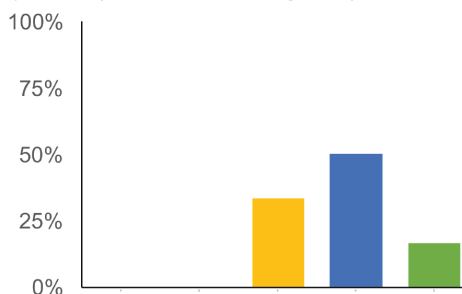
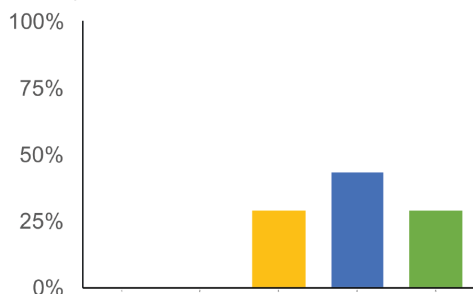
La resolución espacial es mayor en todos los tipos de imágenes, visibles, multispectrales o térmicas (5-15 cm)

Los satélites tienen una cadencia de toma de imágenes del mismo lugar, variable (resolución temporal) con los RPAS la toma de información es a la carta, el día que se necesita.)



No importa la cobertura nubosa ya que normalmente se vuela bajo esta.

El aspecto climático importante para el vuelo de RPAS, que puede impedir la toma de imágenes, pasa a ser el viento



Que los costes asociados a la toma de imágenes sean reducidos.

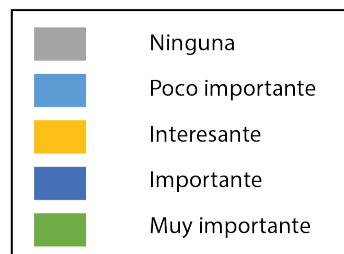
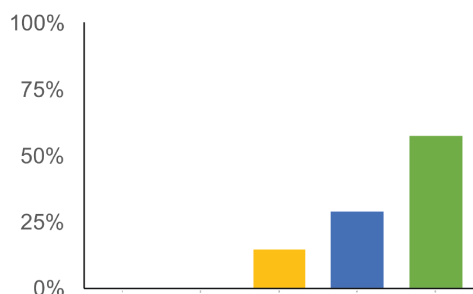


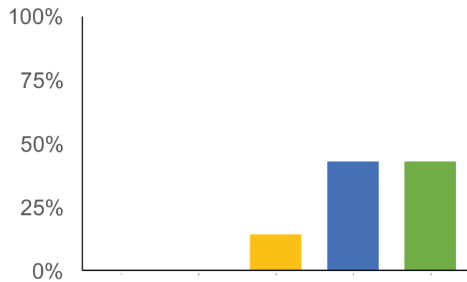
Figura 88 Operatividad de las plataformas UAV inferiores a 25 kg

Respecto de la información aportada por los sensores, el producto cartográfico de mayor resolución de interés por parte de los usuarios es la ortofotografía frente a los modelos digitales de superficies y elevaciones. De todas las aplicaciones posibles a desarrollar a partir de éstos son la detección temprana de enfermedades y la gestión del riego las de mayor interés (Figura 89, Figura 90 y Figura 91).

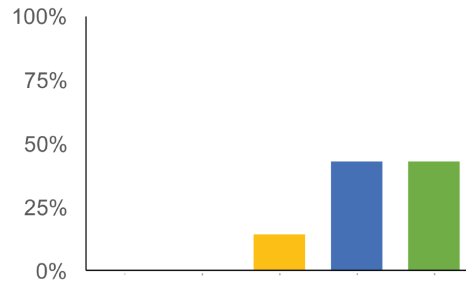
Destacar que todas las posibilidades de trabajo, aplicaciones así como las características han sido valoradas como mínimo con el calificativo de “interesantes”, no

teniendo respuestas en términos de “ninguna” o “poco importante”. Esto resalta las expectativas de este sector para con la agricultura. Al mismo tiempo muchos de los encuestados ponen de manifiesto la necesidad de conocer en que medida esta tecnología beneficia a una explotación en términos económicos y/o de mejora de la producción.

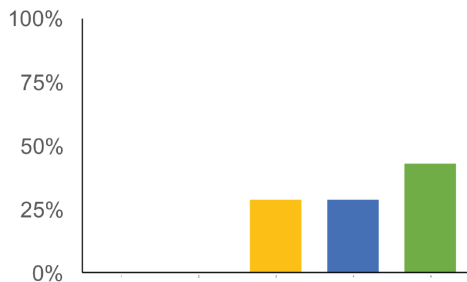
Es posible realizar ortofotos de explotaciones con gran resolución (5cm)



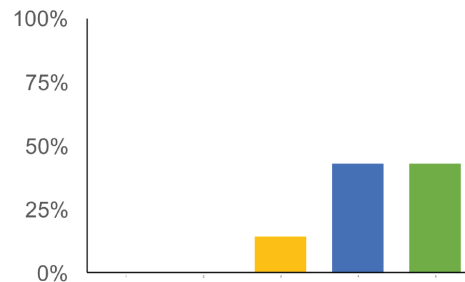
Es posible realizar ortofotos de ensayos con gran resolución (5 cm)



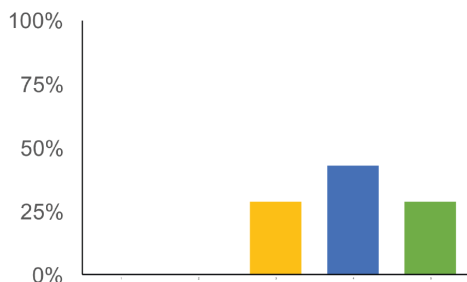
Se pueden realizar modelos de elevaciones del terreno (MDT), por autocorrelación digital, con precisiones centimétricas



Modelos digitales de superficie (MDS), esto es los elementos volumétricos que se encuentran encima del terreno.



Altura y diámetro de copa en árboles.



Altura y anchura de setos en plantaciones

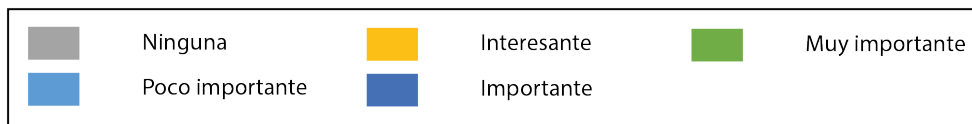
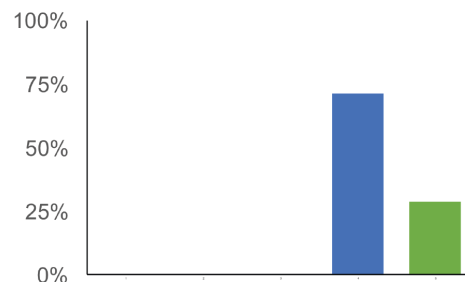
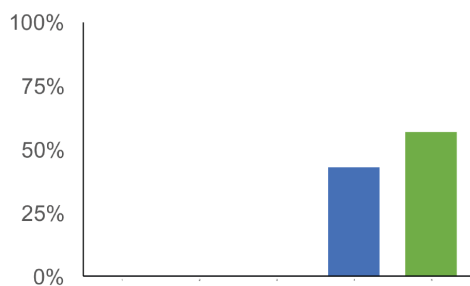
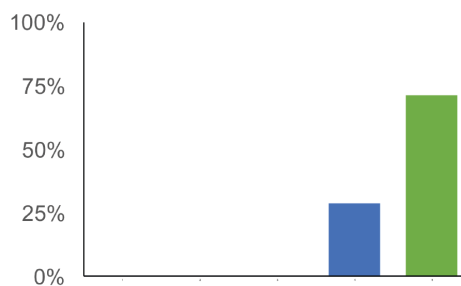


Figura 89 De las aplicaciones de las plataformas UAV inferiores a 25 kg (I)

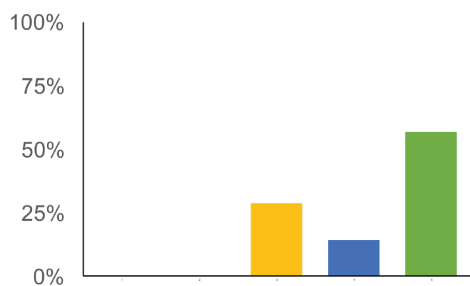
Estimación de biomasa en cultivos y plantaciones



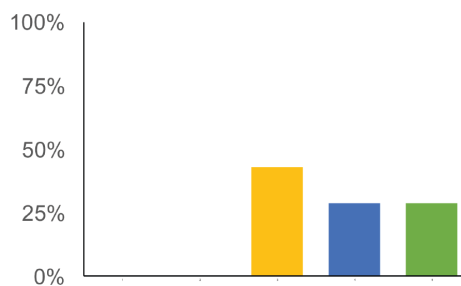
Determinación de índices de vegetación relacionados con el vigor a nivel de planta o árbol en una imagen de la parcela



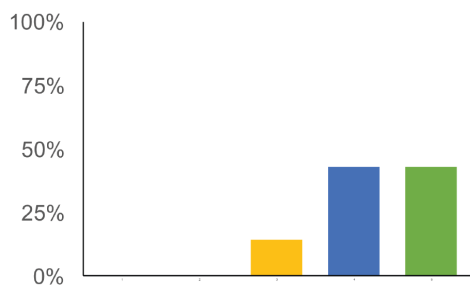
Posibilidad de cosecha selectiva en función del desarrollo, cuando se necesite.



Análisis de poda selectiva por desarrollo vegetativo



Relacionando con índices, optimización de la gestión del nitrógeno, con el consiguiente beneficio económico y medioambiental (contaminación difusa)



Determinación precisa de rodales de malas hierbas para su tratamiento localizado.

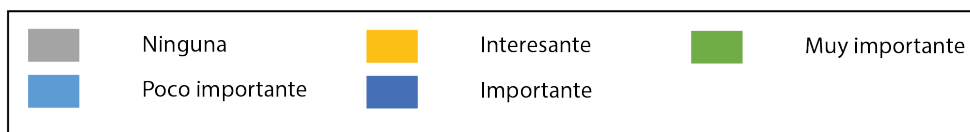
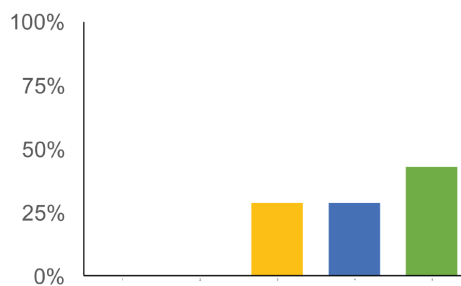
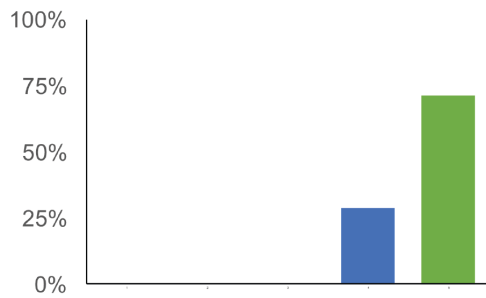
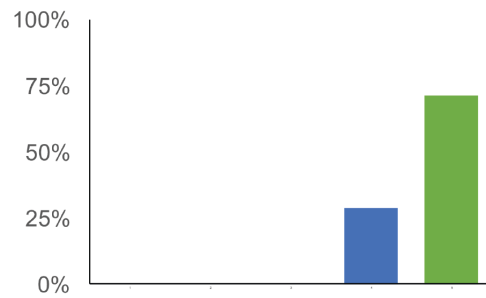


Figura 90 De las aplicaciones de las plataformas UAV inferiores a 25 kg (II)

Optimización de la gestión del riego a través de la determinación de índices de estrés hídrico en la banda térmica.



Detección temprana de enfermedades por afección a la estructura celular de las hojas en el infrarrojo cercano.



Detección temprana de enfermedades por afección al sistema vascular y reflejo estomático en el térmico.

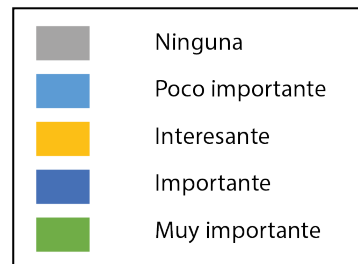
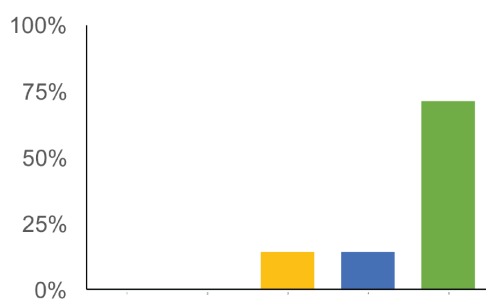


Figura 91 De las aplicaciones de las plataformas UAV inferiores a 25 kg (III)

(Página intencionada en blanco)

APÉNDICES

Apéndice 1 Normativa aplicable para la habilitación como operador RPAS

- Ley 30/1992, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común.
- Real Decreto 1398/1993, de 4 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento del Procedimiento para el ejercicio de la Potestad Sancionadora.
- Real Decreto 37/2001 de 19 de enero, por el que se actualiza la cuantía de las indemnizaciones por daños previstas en la Ley 48/1960, de 21 de julio, de Navegación Aérea.
- Ley 48/1960 de 21 de julio, sobre Navegación Aérea.
- Real Decreto 57/2002 de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de la Circulación Aérea (RCA).
- Ley 21/2003 de 7 de julio, de Seguridad Aérea.
- Real Decreto 98/2009 de 6 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento de Inspección aeronáutica.
- Reglamento (UE) No 1178/2011, de 3 de noviembre de 2011 por el que se establecen requisitos técnicos y procedimientos administrativos relacionados con el personal de vuelo de la aviación civil en virtud del Reglamento (CE) n o 216/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo.
- Reglamento (UE) No 290/2012 de la Comisión de 30 de marzo de 2012, que modifica el Reglamento (UE) no 1178/2011, por el que se establecen requisitos técnicos y

procedimientos administrativos relacionados con el personal de vuelo de la aviación civil en virtud del Reglamento (CE) no 216/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo (modifica el anterior).

- Reglamento de ejecución (UE) No 923/2012 de la Comisión de 26 de septiembre de 2012 por el que se establecen el reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea, y por el que se modifican el Reglamento de Ejecución (UE) n o 1035/2011 y los Reglamentos (CE) n o 1265/2007, (CE) n o 1794/2006, (CE) n o 730/2006, (CE) n o 1033/2006 y (UE) n o 255/2010.
- Orden FOM/3553/2011 de 5 de diciembre, por la que se modifica el Anexo 2 del Real Decreto 1749/1984 de 1 de agosto, por el que se aprueban el Reglamento Nacional sobre el transporte sin riesgos de mercancías peligrosas por vía aérea y las Instrucciones Técnicas para el transporte sin riesgos de mercancías peligrosas por vía aérea, para actualizar las Instrucciones Técnicas.
- Real Decreto 1749/1984 de 1 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento sobre el Transporte sin riesgos de mercancías peligrosas por vía aérea y las Instrucciones técnicas para el transporte sin riesgos de mercancías peligrosas por vía aérea.
- Decreto 416/1969 de 13 de marzo de 1969, por el que se aprueba el Reglamento del Registro de Matricula de Aeronaves.
- Decreto de 387/1972 de 10 de febrero, por el que se modifican los artículos 7, 8, 18, 19, 24, 25, 27, 36, 37 y 38, disposiciones adicionales y disposiciones transitorias del Reglamento del Registro de Matricula de Aeronaves, aprobado por el Decreto no 416/1969, de 13 de marzo (BOE No 50, de 28 de febrero de 1972).
- Orden de 22 de Septiembre de 1977, sobre Reglamento de Marcas de Nacionalidad y de Matricula de las aeronaves civiles.
- Real Decreto 2876/1982 de 15 de octubre, por el que se regula el registro y uso de aeronaves de estructura ultraligera.
- Reglamento (CE) No 785/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de abril de 2004, sobre los requisitos de seguro de las compañías aéreas y operadores aéreos.
- Resolución de 5 de julio de 2002, de la Dirección General de Aviación Civil, por la que se establecen procedimientos operativos específicos para operaciones de trabajos aéreos y agroforestales.
- Orden de 14 de julio de 1995, sobre títulos y licencias aeronáuticos civiles.

- Real Decreto 270/2000 de 25 de febrero, por el que se determinan las condiciones para el ejercicio de las funciones del personal de vuelo de las aeronaves civiles.
- Orden de 21 de marzo de 2000, por la que se adoptan los requisitos conjuntos de aviación para las licencias de la tripulación de vuelo (JAR-FCL) relativos a las condiciones para el ejercicio de las funciones de los pilotos de los aviones civiles.
- Orden FOM/2233/2002 de 4 de septiembre, por la que se adoptan los requisitos conjuntos de aviación relativos a los simuladores de vuelo, los dispositivos de entrenamiento de vuelo y los entrenadores de procedimientos de navegación y vuelo de avión.
- Resolución de 27 de febrero de 2008, de la Dirección General de Aviación Civil, relativa a la acreditación del nivel de competencia lingüística en idioma inglés de los pilotos civiles de avión y helicóptero.
- Orden FOM/896/2010 de 6 de abril, por la que se regula el requisito de competencia lingüística y su evaluación, modificada por Orden FOM/1841/2010.
- Resolución de 20 de septiembre de 2011, de la Dirección de Seguridad de Aeronaves de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea, por la que se convoca proceso selectivo para la designación y autorización de examinadores calificados para la realización de pruebas de pericia en vuelo y verificaciones de competencia atribuidas a la autoridad aeronáutica, para la obtención y mantenimiento de la validez de los títulos, licencias, habilitaciones y autorizaciones aeronáuticos civiles de avión y helicóptero y se establecen las bases para su desarrollo.
- Decreto de 13 de agosto de 1948, por el que se reglamenta la propaganda comercial realizada desde el aire (BOE no 281 de 7 de octubre de 1948).
- Orden de Presidencia del Gobierno de 14 de Marzo de 1957, y una "Instrucción" de la Dirección General de Aviación Civil de 1987 (Fotografía Aérea).
- Real Decreto 1919/2009 de 11 de diciembre, por el que se regula la seguridad aeronáutica en las demostraciones aéreas civiles.
- Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal (Título VI con rango de ley ordinaria).
- Real Decreto 1720/2007 por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo de la Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal.
- Cualquier otra que pueda afectar a la operación y a la aeronave que realice la actividad.

(Página intencionada en blanco)

9 BIBLIOGRAFÍA

Baluja, Javier, Diago, Maria P, Balda, Pedro, Zorer, Roberto, Meggio, Franco, Morales, Fermin, Tardaguila, Javier. «Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV).» *Irrigation Science* 30, nº 6 (2012): 511-522.

Bastiaanssen, Wim G.M, David J Molden, y Ian W Makin. «Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications.» *Agricultural Water Management* 46, nº 2 (2000): 137-155.

Bendig, Juliane, Andreas Bolten, Simon Bennertz, Janis Broscheit, Silas Eichfuss, y Georg Bareth. «Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging.» *Remote Sensing* 6, nº 11 (2014): 10395-10412.

Dingirard, M., y P. N Slater. «Calibration of space-multispectral imaging sensors: A review.» *Remote Sensing of Environment* 68, nº 3 (1999): 194-205.

d'Oleire-Oltmanns, Sebastian, Irene Marzloff, Klaus Daniel Peter, y Johannes B Ries. «Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco.» *Remote Sensing* 4, nº 11 (2012): 3390-3416.

Erickson, Bruce, y David A. Widmar. *Precision agricultural services dealership survey results*. West Lafayette, Indiana, 2015.

Gellus, C. *Attic nights. Book 10, Translated by Rolfe, J. C.,. 1927.*

Huang, Y., W. Hoffmann, Y. Lan, W. Wu, y B. Fritz. «Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform.» *U.S. Department of Agriculture*, 2008.

Huang, Yanbo, Steven Thomson, Yubin J Lan, y Stephan J Maas. «Multispectral imaging systems for airborne remote sensing to support agricultural production management.» *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 3, nº 1 (2010): 50-62.

Joly, F. *La Cartografía*. Oikos-Tau, 1988.

Lowe, D.G. «Object recognition from local scale-invariant features.» *Computer Vision* 2 (1999): 1150-1157.

Mesas-Carrascosa, Francisco Javier, María Dolores Notario-García, José Emilio Meroño de Larriva, Manuel Sánchez de la Orden, y Alfonso García-Ferrer Porras. «Validation of measurements of land plot area using UAV imagery.» *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 33 (2014): 270-279.

Mesas-Carrascosa, Francisco-Javier, Torres-Sánchez, Jorge, Clavero-Rumbao, Inmaculada, García-Ferrer, Alfonso, Peña, Jose-Manuel, Borra-Serrano, Irene, López-Granados, Francisca. «Assessing Optimal Flight Parameters for Generating Accurate Multispectral Orthomosaics by UAV to Support Site-Specific Crop Management.» *Remote Sensing* 7, nº 10 (2015): 12793-12814.

Moran, M.S., Y. Inoue, y E.M. Barnes. «Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management.» *Remote Sensing of Environment* 61, nº 3 (1997): 319-346.

OACI. *Circular 328, Sistemas de aeronaves no tripulados (UAS)*. 2011.

Oppelt, Natascha, y Wolfram Mauser. «The airborne visible/infrared imaging spectrometer AVIS: Design, characterization and calibration.» *Sensors* 7, nº 9 (2007): 1934-1953.

Pölonen, Ilkka, Heikki Saari, Jere Kaivosoja, Eija Honkavaara, y Liisa Pesonen. «Hyperspectral imaging based biomass and nitrogen content estimations from light-weight UAV.» *SPIE Remote Sensing*, 2013.

Prasad, Anup K., Lim Chai, Ramesh P. Singh, y Menas Kafatos. «Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters.» *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 8, nº 1 (2006): 26-33.

Primicerio, Jacopo, y otros. «A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture.» *Precision Agriculture* 13, nº 4 (2012): 517-523.

Rango, Albert, Laliberte, Andrea, Herrick, Jeffrey E., Winters, Craig, Havstad, Kris, Steele, Caiti, Browning, Dawn. «Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management.» *Journal of Applied Remote Sensing* 3, nº 1 (2009): 033542.

Saberioon, MM, MSM Amin, W Aimrun, AR Anuar, y Asa Gholizadeh. «Multi-spectral images tetracam agriculture digital camera to estimate nitrogen and grain yield of rice at different growth stages.» *The Philippine Agricultural Scientist* 96, nº 1 (2013).

Snavely, Noah, Steven M. Seitz, y Richard A Szeliski. «Modeling the World from Internet Photo Collections.» *International Journal of Computer Vision* 80, nº 2 (2008).

Torres-Sánchez, Jorge, Francisca López-Granados, Ana Isabel De Castro, y José Manuel Peña-Barragán. «Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for early site specific weed management.» (Plos One) 8, nº 3 (2013).

Turner, David, Arko Lucieer, y Luke Wallace. «Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery.» *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 52, nº 5 (2014): 2738-2745.

UVS-International. *RPAS Yearbook: Remotely Piloted Aircraft Systems: The Global Perspective 2013/2014. Technical Report.* 2014.

Valente, João, David Sanz, Antonio Barrientos, Jaime del Cerro, Ángela Ribeiro, y Claudio Rossi. «An air-ground wireless sensor network for crop monitoring.» *Sensors* 11, nº 6 (2011): 6088-6108.

Von Bueren, Stefanie, y Ian Yule. «Multispectral aerial imaging of pasture quality and biomass using unmanned aerial vehicles (UAV).» *Accurate and Efficient Use of Nutrients on Farms*, nº 29.

Warren, Georgina, y Graciela Metternicht. «Agricultural Applications of High-Resolution Digital Multispectral Imagery.» *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 71 (2005): 595-602.

Whipker, L.D., y J.T. Akridge. *Precision agricultural services dealership survey results.* 2012.

Yuping, Ma, Shili, Wang, Li, Zhang, Yingyu, Hou, Liwei, Zhuang, Yanbo, He, Futang, Wang. «Monitoring winter wheat growth in North China by combining a crop model and remote sensing data.» *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 10, nº 4 (2008): 426-437.

Zarco-Tejada, Pablo J, R Diaz-Varela, V Angileri, y P. Loudjani. «Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods.» *European journal of agronomy* 55 (2014): 89-99.