

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/322211531>

Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico

Book · December 2016

CITATIONS

0

READS

2,151

3 authors, including:



Jorge Flores-Velazquez

Mexican Institute of Water Technology (IMTA)

50 PUBLICATIONS 96 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Ronald Ernesto Ontiveros-Capurata

Mexican Institute of Water Technology (IMTA)

29 PUBLICATIONS 66 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



ESTUDIO AGROCLIMÁTICO, REQUERIMIENTO DE RIEGO Y REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO DE PASTOS EN TABASCO, MÉXICO [View project](#)



AGRICULTURA PROTEGIDA [View project](#)



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Coordinación de Riego y Drenaje



Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico

Waldo Ojeda Bustamante
Jorge Flores Velázquez
Ronald Ernesto Ontiveros Capurata

(Editores)

Diciembre 2016

IMTA
Coordinación de Riego y Drenaje

Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico

Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez
y Ronald Ernesto Ontiveros Capurata
Editores

México 2016

338.16 Ojeda Bustamante, Waldo; Flores Velázquez, Jorge; Ontiveros Capurata, Ronald Ernesto (eds.)

O73 *Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico /* Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez, Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, editores. - - Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua © 2016.

425 pp.

ISBN 978 -607-9368-71-5

1. Proyectos hidroagrícolas 2. Percepción remota 3. Cartografía

Autores:

Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez, Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, Alberto González Sánchez, Braulio David Robles Rubio, Abraham Rojano Aguilar, Helene Emmi Karin Unland Weiss, Anastasio Toledo Estrada, Mariana de Jesús Marcial Pablo, Sergio Iván Jiménez Jiménez, Bruno Lara Guzmán, Jorge Alberto Fuentes Pacheco, Jorge Hermosillo Valadez, Juan Manuel Rendón Mancha

Responsable de la edición:

Rebeca Gerardo Tavira

Coordinación editorial:

Fátima Sánchez Bonilla

Primera edición: 2016

D.R. © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532

62550 Progreso, Jiutepec, Morelos

México

www.gob.mx/imta

ISBN 978 -607-9368-71-5

Prohibida la reproducción parcial o total, por cualquier medio mecánico, electrónico, de fotocopias, térmico u otros, sin permiso de los autores

Impreso en México – Printed in Mexico

PRÓLOGO

En los años 70 el lanzamiento de satélites civiles marcó el inicio del monitoreo de la superficie terrestre mediante sensores remotos que capturaban imágenes espectrales, y fue a partir de entonces que surgieron aplicaciones en diversas áreas, entre ellas, la ingeniería. Los satélites mostraron ser capaces de adquirir información de grandes superficies, aunque con limitada resolución espacial para ciertas aplicaciones. Por otra parte, la periodicidad para la adquisición de imágenes resultó en información temporal, discontinua para situaciones donde los cambios de interés suceden en periodos cortos.

Restricciones de resolución, disponibilidad, economía y tiempo, fueron el impulso para buscar alternativas que cumplieran con las exigencias actuales. Es así como, gracias al desarrollo e innovación continua en electrónica, informática y los sistemas de navegación y comunicación, surgen los vehículos aéreos no tripulados (VANT), conocidos también como drones, que plantean alternativas para la adquisición de información de interés en el sector hídrico que demanda alta precisión en corto tiempo y a costo competitivo.

Los drones pueden equiparse con pequeños sensores multifuncionales y sistemas de navegación autónomos para adquirir información que muestra alta variabilidad espacio-temporal y que son determinantes para la ingeniería y producción agrícola. Los métodos de análisis, procesamiento y despliegue de información espacial aplicados a variables de interés generan insumos importantes para la planeación, gestión y evaluación de las obras de infraestructura civil y sistemas agrícolas.

Las aplicaciones con drones requieren equipos multidisciplinarios durante todo el proceso que incluye desde el armado del vehículo, planificación y ejecución de la misión, descarga y procesamiento de imágenes, hasta finalmente generar los productos cartográficos o extraer la información espacial de interés. El vertiginoso desarrollo de la tecnología de drones requiere, además, una importante adecuación institucional, motivada por la naturaleza y la alta especialización de estas nuevas tecnologías. La formación de recursos humanos, desarrollo de capacidades de trabajo en equipo y nuevos enfoques para la difusión y capacitación son requisitos indispensables para lograr que tecnologías innovadoras puedan impactar efectivamente a gran escala en la ingeniería sobre todo la relacionada al sector hídrico.

En la actualidad existe un amplio acervo documental sobre fotogrametría y cartografía aplicada usando imágenes de satélite y sensores remotos aerotransportados en vehículos tripulados; sin embargo, todavía son escasos los textos o libros sobre el uso, manejo y aplicaciones de drones en ingeniería. Si bien se registra un crecimiento acelerado del número de publicaciones en literatura especializada, la información está dispersa en revistas y ponencias de congresos y no integra las bases teóricas que la sustentan.

La motivación de este libro es ofrecer un compendio de los principios, metodologías y aplicaciones de los drones con énfasis en ingeniería hidroagrícola. Con este objetivo se conformó un equipo multistitucional y multidisciplinario que presentara de manera concisa y simple los principios físicos asociados a los sensores remotos, además de describir los componentes y actividades necesarias para realizar misiones que permitan obtener imágenes y videos de alta resolución.

Este libro constituye un aporte técnico sobre la aplicación sistemática de drones equipados con sensores remotos en los problemas de la comunidad hidroagrícola, y se deriva de las actividades que durante los últimos tres años emprendió la Coordinación de Riego y Drenaje del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Queremos agradecer a María Fernanda Vargas Rodríguez el apoyo mostrado a lo largo de un año en el seguimiento de las diferentes versiones del presente libro.

Los editores

Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE PERCEPCIÓN REMOTA Y FOTOGRAFÍA DIGITAL

Jorge Flores Velázquez, Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, Braulio David Robles Rubio y Anastasio Toledo Estrada

CAPÍTULO 2 PRINCIPIOS DE CARTOGRAFÍA, FOTOGRAMETRÍA Y SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO POR SATÉLITE

Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, Braulio David Robles Rubio, Jorge Flores Velázquez y Alberto González Sánchez

CAPÍTULO 3 VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (DRONES/VANT)

Waldo Ojeda Bustamante, Alberto González Sánchez, Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, Jorge Flores Velázquez y Abraham Rojano Aguilar

CAPÍTULO 4 OPERACIÓN Y PILOTAJE DE DRONES

Alberto González Sánchez y Jorge Flores Velázquez

CAPÍTULO 5 APLICACIONES A LA INGENIERÍA

Waldo Ojeda Bustamante, Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, Jorge Flores Velázquez, Braulio David Robles Rubio y Sergio Iván Jiménez Jiménez

CAPÍTULO 6 REFERENCIAS

ANEXOS

A GLOSARIO DE TÉRMINOS

Jorge Flores Velázquez, Alberto González Sánchez y Ronald Ernesto Ontiveros Capurata

B SISTEMAS DE PROPULSIÓN, ENERGÍA, CONTROL Y TELECOMUNICACIÓN

Jorge Alberto Fuentes Pacheco, Jorge Hermosillo Valadez, Bruno Lara Guzmán y Juan Manuel Rendón Mancha

C SIMULADORES DE VUELO PARA VANTS

Alberto González Sánchez

D ELABORACIÓN DE MISIONES DE VUELO USANDO EL SOFTWARE UGCS

Jorge Flores Velázquez, Sergio Iván Jiménez Jiménez y Mariana de Jesús Marcial Pablo

E ARMADO DE COMPONENTES

Jorge Flores Velázquez y Alberto González Sánchez

F CONSIDERACIONES SOBRE REGULACIÓN Y SEGURIDAD DE LOS DRONES
PARA LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Helene Emmi Karin Unland Weiss y Alberto González Sánchez

Autores¹

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

Alberto González Sánchez
Anastasio Toledo Estrada
Braulio David Robles Rubio
Helene Emmi Karin Unland Weiss
Jorge Flores Velázquez
Mariana de Jesús Marcial Pablo
Ronald Ernesto Ontiveros Capurata
Sergio Iván Jiménez Jiménez
Waldo Ojeda Bustamante



Universidad Autónoma Chapingo (UACH)

Abraham Rojano Aguilar



Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

Bruno Lara Guzmán
Jorge Alberto Fuentes Pacheco
Jorge Hermosillo Valadez
Juan Manuel Rendón Mancha



¹ Por orden alfabético

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1..... | 3 |
| 1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE PERCEPCIÓN REMOTA Y FOTOGRAFÍA DIGITAL..... | 3 |
| 1.1 Percepción remota e imágenes multiespectrales | 3 |
| 1.1.1 Introducción | 3 |
| 1.1.2 Principios de percepción remota..... | 4 |
| 1.1.3 El espectro electromagnético | 7 |
| 1.1.4 Interacción de la radiación solar y la superficie terrestre | 9 |
| 1.1.5 Firmas espectrales | 10 |
| 1.1.5.1 Vegetación | 13 |
| 1.1.5.2 Suelo..... | 14 |
| 1.1.5.3 Agua | 14 |
| 1.1.6 Introducción a los sensores remotos..... | 15 |
| 1.1.6.1 Marco teórico..... | 15 |
| 1.1.6.2 Principio de funcionamiento de los sensores remotos | 18 |
| 1.1.6.3 Tipos de sensores y cómo clasificarlos..... | 19 |
| 1.1.7 Conceptos básicos sobre imágenes espectrales..... | 21 |
| 1.1.7.1 Imágenes pancromáticas | 22 |
| 1.1.7.2 Imágenes multiespectrales | 22 |
| 1.1.7.3 Imágenes hiperespectrales | 22 |
| 1.2 Principios de fotografía digital | 23 |
| 1.2.1 Introducción | 23 |
| 1.2.2 Clasificación de cámaras..... | 24 |
| 1.2.2.1 Cámaras compactas | 26 |
| 1.2.2.2 Cámaras intermedias | 26 |
| 1.2.2.3 Cámaras réflex | 27 |
| 1.2.3 Características de las cámaras fotográficas..... | 28 |
| 1.2.3.1 Sensor..... | 28 |
| i. Tamaño del sensor..... | 30 |
| 1.2.3.2 Distancia focal | 31 |
| 1.2.3.3 Objetivo..... | 33 |
| 1.2.3.4 Diafragma y obturador..... | 34 |
| 1.2.4 Fotografía e imágenes digitales | 35 |
| 1.2.4.1 Profundidad de color en archivos digitales de mapa de bits | 37 |
| 1.2.4.2 Representación del color en la imagen | 37 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|--|--|-----------|
| 1.2.4.3 | Resolución de la imagen | 38 |
| Capítulo 2..... | | 43 |
| 2 PRINCIPIOS DE CARTOGRAFÍA, FOTOGRAMETRÍA Y SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO POR SATÉLITE | | 43 |
| 2.1 | Cartografía y geodesia | 43 |
| 2.1.1 | Introducción a la cartografía | 43 |
| 2.1.2 | Conceptos básicos de cartografía..... | 43 |
| 2.1.2.1 | Cartografía | 43 |
| 2.1.2.2 | Geoide, elipsoide y datum | 44 |
| i. | Geoide..... | 44 |
| ii. | Elipsoide..... | 44 |
| iii. | Datum | 48 |
| 2.1.2.3 | Sistema coordenadas y proyecciones para georreferenciación de rasgos | 48 |
| i. | Proyecciones por la figura | 50 |
| ii. | Proyecciones por la ubicación de la figura de proyección | 51 |
| 2.1.3 | Características de la información cartográfica del país | 54 |
| 2.1.3.1 | Productos cartográficos | 54 |
| i. | Planos topográficos o de reconocimiento | 55 |
| ii. | Mapas temáticos del medio..... | 55 |
| iii. | Cartas específicas..... | 56 |
| iv. | Modelo digital de elevación..... | 56 |
| 2.2 | Principios de fotogrametría | 56 |
| 2.2.1 | Elementos de fotogrametría y estereoscopía | 58 |
| 2.2.2 | Restitución de fotografías..... | 59 |
| 2.2.2.1 | Orientación interna | 61 |
| 2.2.2.2 | Función de distorsión del objetivo | 62 |
| 2.2.2.3 | Orientación externa | 62 |
| 2.2.2.4 | Puntos de control de apoyo en tierra | 63 |
| 2.2.2.5 | Ubicación de puntos de referencia | 63 |
| 2.2.2.6 | Ubicación de puntos de apoyo..... | 64 |
| 2.2.2.7 | Señalización en el terreno de los puntos de apoyo | 65 |
| 2.2.2.8 | Proceso de restitución | 66 |
| 2.2.3 | Productos a obtener con imágenes adquiridas desde VANT..... | 67 |
| 2.2.3.1 | Mosaico..... | 67 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|------------|--|-----------|
| i. | Sin control | 68 |
| ii. | Controlado | 68 |
| 2.2.3.2 | Ortomosaico..... | 69 |
| 2.2.3.3 | Modelo de elevación digital y curvas de nivel | 71 |
| 2.2.3.4 | Modelo digital de elevación | 71 |
| 2.2.3.5 | Curvas de nivel | 73 |
| 2.3 | Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) | 74 |
| 2.3.1 | Historia de los sistemas de posicionamiento | 74 |
| 2.3.2 | GNSS (Global Navigation Satellite Systems) | 77 |
| 2.3.2.1 | El sistema de posicionamiento GLONASS | 78 |
| 2.3.2.2 | El sistema de posicionamiento GALILEO | 78 |
| 2.3.3 | Descripción general del sistema NAVSTAR-GPS | 79 |
| 2.3.3.1 | Segmentos del sistema GPS (espacial, control, usuario)..... | 80 |
| i. | Segmento espacial | 81 |
| ii. | Segmento de control | 83 |
| iii. | Segmento usuario | 84 |
| 2.3.4 | Características de los receptores civiles (c/A) | 86 |
| 2.3.5 | Señal de los satélites, precisión, ángulo máscara | 87 |
| 2.3.5.1 | Formatos de la señal de GPS..... | 88 |
| 2.3.6 | Tipos de errores..... | 90 |
| 2.3.6.1 | Degradación intencional de la señal | 90 |
| 2.3.6.2 | Fuentes de error o errores no intencionales | 90 |
| i. | Tiempo (2 metros) | 90 |
| ii. | Ionósfera (5 metros) | 91 |
| iii. | Tropósfera (0.5 metros) | 92 |
| iv. | Efemérides (2.5 metros) | 93 |
| v. | Efecto multicamino (1 metro)..... | 93 |
| 2.3.6.3 | Medición de errores..... | 94 |
| 2.3.7 | Métodos de adquisición de datos | 95 |
| 2.3.7.1 | Recepción RTK (Real Time Kinematic)..... | 97 |
| 2.3.7.2 | DGPS (Differential GPS) GPS diferencial en tiempo real | 98 |
| 2.3.7.3 | Comunicación por radio (repetidoras de señal)..... | 98 |
| 2.3.8 | Sistemas de aumento de la señal | 99 |
| 2.3.8.1 | Funcionamiento y virtudes del sistema | 100 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|-------------------|---|------------|
| 2.3.8.2 | WAAS (Wide Area Augmentation System)..... | 102 |
| i. | Elementos del sistema WAAS | 102 |
| ii. | Estaciones de referencia de área amplia (WRS) | 103 |
| iii. | Estaciones maestras de área amplia (WMS)..... | 104 |
| iv. | Estaciones de comunicaciones (GES)..... | 104 |
| v. | Satélites geoestacionarios | 104 |
| vi. | Receptores del WAAS | 104 |
| 2.3.8.3 | EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) | 105 |
| i. | Elementos del sistema EGNOS..... | 105 |
| 2.3.8.4 | MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) | 107 |
| i. | Elementos del sistema MSAS..... | 107 |
| 2.3.9 | Tipos de receptores GPS | 108 |
| 2.3.10 | Aplicaciones de los GPS | 109 |
| Capítulo 3 | ..... | 113 |
| 3 | VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (DRONES/VANT)..... | 113 |
| 3.1 | Introducción a los DRONES /VANT | 113 |
| 3.1.1 | Sistema aéreo no tripulado | 114 |
| 3.1.1.1 | Controladora de vuelo | 115 |
| 3.1.1.2 | Acelerómetro | 116 |
| 3.1.1.3 | Giroscopio | 116 |
| 3.1.1.4 | Barómetro | 116 |
| 3.1.1.5 | Brújula | 116 |
| 3.1.1.6 | Receptor GPS | 116 |
| 3.1.1.7 | Fuselaje (estructura) | 117 |
| 3.1.1.8 | Motores..... | 117 |
| 3.1.1.9 | Control de velocidad electrónico | 117 |
| 3.1.1.10 | Transmisor y receptor de radio..... | 118 |
| 3.1.1.11 | Baterías | 119 |
| 3.1.1.12 | Enlace de telemetría | 120 |
| 3.1.1.13 | Monitor de la estación | 120 |
| 3.1.1.14 | Computadora de la estación | 121 |
| 3.1.2 | Clasificación de los VANT..... | 121 |
| 3.1.2.1 | De ala | 122 |
| i. | Drones de ala fija | 122 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|------------|---|------------|
| ii. | Drones multirrotor..... | 122 |
| iii. | Dirigibles o globos..... | 123 |
| iv. | De aleteo..... | 123 |
| 3.1.2.2 | Por el método de control | 123 |
| i. | Autónomo | 123 |
| ii. | Monitorizado | 123 |
| iii. | Supervisado..... | 124 |
| iv. | Pre-programado..... | 124 |
| v. | Controlado remotamente (R/C)..... | 124 |
| 3.1.2.3 | En función de su uso | 124 |
| i. | Drones militares..... | 124 |
| ii. | Drones civiles | 124 |
| 3.1.3 | Ventajas y desventajas de los VANT | 125 |
| 3.1.4 | Principales aplicaciones en la ingeniería | 126 |
| 3.1.4.1 | Aplicaciones generales de los VANT | 127 |
| i. | Seguimiento de meteoros..... | 127 |
| ii. | Inspección de obras civiles..... | 127 |
| iii. | Tráfico urbano: | 127 |
| iv. | Inspección de parques fotovoltaicos, termo-solares y eólicos | 127 |
| v. | Control de instalaciones industriales | 127 |
| vi. | Monitoreo de centrales hidráulicas, eléctricas, etc. | 127 |
| vii. | Monitoreo de flora y fauna en peligro de extinción | 127 |
| viii. | Control y monitorización de explotaciones mineras y de su impacto ambiental. | 127 |
| 3.1.4.2 | Aplicaciones topográficas | 128 |
| 3.1.4.3 | Monitoreo del estado de obras hidráulicas | 129 |
| 3.1.4.4 | Seguimiento de cultivos | 129 |
| 3.1.4.5 | Aplicaciones para la agricultura de precisión..... | 130 |
| 3.2 | Evolución de los VANT | 131 |
| 3.2.1 | De los globos de Austria a la Primera Guerra Mundial..... | 131 |
| 3.2.2 | El periodo entre guerras..... | 133 |
| 3.2.3 | De la Segunda Guerra Mundial a la Guerra del Golfo | 137 |
| 3.2.4 | Época actual..... | 146 |
| 3.3 | Sensores aerotransportados | 149 |
| 3.3.1 | Evolución de los sensores aerotransportados..... | 149 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|---|---|------------|
| 3.3.2 | Métodos de adquisición de imágenes | 151 |
| 3.3.3 | Características de los sensores | 154 |
| 3.3.3.1 | Resolución espacial | 154 |
| 3.3.3.2 | Resolución espectral | 155 |
| 3.3.3.3 | Resolución radiométrica | 157 |
| 3.3.3.4 | Resolución temporal | 158 |
| 3.3.4 | Clasificación de los sensores..... | 159 |
| 3.3.4.1 | Imágenes de muy alta resolución | 159 |
| 3.3.4.2 | Imágenes de alta resolución | 159 |
| 3.3.4.3 | Imágenes de resolución media | 159 |
| 3.3.4.4 | Imágenes de baja resolución..... | 160 |
| 3.3.5 | Tipos de sensores | 160 |
| 3.3.5.1 | Cámaras fotográficas aéreas | 160 |
| i. | Películas pancromáticas..... | 160 |
| ii. | Fotografía infrarroja..... | 160 |
| 3.3.5.2 | Sensores multiespectrales | 162 |
| 3.3.5.3 | Sensores infrarrojo térmico (TIR)..... | 163 |
| 3.3.5.4 | Otros sensores | 165 |
| i. | Video | 165 |
| ii. | RADAR..... | 165 |
| iii. | LiDAR (Light Detection And Ranging)..... | 166 |
| 3.3.5.5 | Aplicaciones de imágenes VIRC..... | 166 |
| 3.3.5.6 | Aplicaciones principales de imágenes infrarrojas térmicas | 167 |
| Capítulo 4..... | | 171 |
| 4 OPERACIÓN Y PILOTAJE DE DRONES | | 171 |
| 4.1 | Introducción..... | 171 |
| 4.2 | Planeación de la misión de vuelo | 172 |
| 4.2.1 | Selección del VANT | 173 |
| 4.2.2 | Revisión remota de las condiciones climatológicas..... | 174 |
| 4.2.3 | Las baterías | 174 |
| 4.2.4 | Tipo de cámara | 175 |
| 4.2.5 | Computadora portátil | 177 |
| 4.2.6 | Equipamiento adicional | 177 |
| 4.3 | Diseño de la misión de vuelo..... | 178 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.3.1 | Resolución espacial..... | 178 |
| 4.3.2 | La altura de vuelo | 179 |
| 4.3.3 | El traslape | 180 |
| 4.3.4 | Software de diseño de misiones de vuelo | 181 |
| 4.4 | Carga y manejo de baterías..... | 182 |
| 4.4.1 | Introducción | 182 |
| 4.4.2 | Las baterías de polímero de litio | 182 |
| 4.4.3 | Carga y balanceo..... | 183 |
| 4.4.4 | Traslado y resguardo | 185 |
| 4.5 | Ejecución de la misión de vuelo..... | 186 |
| 4.5.1 | Inspección de la zona de vuelo | 186 |
| 4.5.2 | Tiempo de traslado..... | 187 |
| 4.5.3 | Condiciones meteorológicas locales..... | 187 |
| 4.5.4 | Ubicación de puntos de control..... | 188 |
| 4.5.5 | Despegue y aterrizaje | 189 |
| 4.5.6 | Estimación del tiempo de vuelo | 190 |
| 4.5.7 | Preparación, configuración, y revisión de equipos y accesorios | 191 |
| 4.5.7.1 | Inspeccionar el dron..... | 191 |
| 4.5.7.2 | Revisión de tarjetas de memoria | 192 |
| 4.5.7.3 | Revisar voltaje de las baterías..... | 193 |
| 4.5.8 | Ejecución de la misión de vuelo..... | 193 |
| 4.5.8.1 | Aclimatamiento del VANT..... | 194 |
| 4.5.8.2 | Calibración de la brújula del DRON | 195 |
| i. | Asegurarse que la montura de la cámara este apagada..... | 195 |
| ii. | Despejar el area de calibración..... | 195 |
| iii. | Colocar todas las palancas de la emisora en posición hacia atrás (arriba, dada la ubicación de la emisora frente al operador) | 195 |
| iv. | Encender la emisora (deslizar el interruptor de encendido hacia arriba) | 195 |
| v. | Poner la emisora a modo GPS..... | 195 |
| vi. | Encender el dron con una batería..... | 195 |
| vii. | Poner en modo de calibración de la brújula | 196 |
| viii. | Poner la emisora en el suelo para trabajar con el dron | 196 |
| ix. | Girar el dron en su propio eje horizontal (Figura 4.18) | 196 |
| x. | Girar el dron en su propio eje, de forma vertical..... | 196 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|---------|---|-----|
| xi. | Colocar el dron para el vuelo | 198 |
| 4.5.8.3 | Configurar la opción “vuelta a casa” | 198 |
| 4.5.8.4 | Verificar la configuración de la emisora | 199 |
| 4.5.8.5 | Vuelo sin montura de cámara | 201 |
| i. | Asegurarse que el dron se aclimate a la temperatura ambiente..... | 202 |
| ii. | Comprobar la carga de las baterías | 202 |
| iii. | Colocar y sujetar baterías. | 202 |
| iv. | Calibrar la brújula..... | 202 |
| v. | Asegurar que el dron está calibrado, apagado y en posición de despegue..... | 203 |
| vi. | Encender el dron..... | 203 |
| vii. | Encender el pupitre del monitor..... | 203 |
| viii. | Ejecutar al software para planeación de misiones | 203 |
| ix. | Iniciar el vuelo..... | 203 |
| 4.5.8.6 | Vuelo con montura de cámara y misión preprogramada | 204 |
| i. | Asegurarse de que el dron se aclimate a la temperatura ambiente (ver Sección 4.5.8.1) | 204 |
| ii. | Comprobar la carga de las baterías | 204 |
| iii. | Calibrar la brújula: Ver sección 4.5.8.2 para calibración de la brújula del dron. | 204 |
| iv. | Encender emisora | 204 |
| v. | Encender dron y la cámara | 204 |
| vi. | Encender los pupitres de los monitores y la cámara | 204 |
| vii. | Encender la computadora personal y abrir el software para la planeación de misiones .. | 204 |
| viii. | Finalmente, conectar el módem de telemetría a la computadora personal | 204 |
| ix. | Verificar que el dron esté en modo GPS y comunicándose con la emisora..... | 205 |
| x. | Reconocimiento del punto de casa..... | 205 |
| xi. | Cargar misión al dron..... | 205 |
| xii. | Despegar del dron..... | 205 |
| xiii. | Colocar el dron a una altura segura que esté libre de obstáculos | 205 |
| xiv. | En la computadora ejecutando el software de ejecución de misiones, verificar la telemetría: voltaje, número de satélites, etc. | 205 |
| xv. | Iniciar la misión desde el software de planeación de misiones | 205 |
| xvi. | No perder de vista el dron y estar al tanto de la información telemétrica y de la toma de fotos en la pantalla de la emisora | 205 |
| xvii. | Al terminar la ejecución del trayecto programado, aterrizar el dron | 205 |
| xviii. | Apagar el dron: desconectar las baterías. Apagar la cámara y apagar la emisora | 206 |
| xix. | Retirar las memorias de las cámaras. Verificar y guardar la información del vuelo | 206 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|------------------------|--|------------|
| 4.5.9 | Desensamblado, almacenamiento y transporte del equipo..... | 206 |
| 4.5.9.1 | Desensamblado del equipo..... | 206 |
| i. | Apagar el dron | 206 |
| ii. | Apagar montura | 206 |
| iii. | Apagar la cámara visual | 206 |
| iv. | Apagar el monitor | 206 |
| v. | Apagar la emisora | 206 |
| vi. | Desmontar el monitor de la emisora | 206 |
| vii. | Desmontar el dron | 206 |
| viii. | Desmontar el patín de entrenamiento | 206 |
| 4.5.9.2 | Almacenamiento del equipo | 207 |
| 4.6 | Entrenamiento para el pilotaje de DRONES | 208 |
| 4.6.1 | Introducción | 208 |
| 4.6.2 | Simuladores | 209 |
| 4.6.2.1 | Definición | 209 |
| 4.6.2.2 | Funcionamiento | 210 |
| 4.6.2.3 | Clasificación..... | 212 |
| 4.6.2.4 | Beneficios del uso de simuladores | 213 |
| Capítulo 5..... | ..... | 217 |
| 5 | APLICACIONES A LA INGENIERÍA..... | 217 |
| 5.1 | Generación de planos topográficos | 217 |
| 5.1.1 | Conceptos básicos | 217 |
| 5.1.2 | Sistema de coordenadas..... | 218 |
| 5.1.3 | Escala cartográfica | 221 |
| 5.1.4 | Curva de nivel | 222 |
| 5.1.5 | Procedimiento para generar planos topográficos apoyados con drones | 227 |
| 5.1.5.1 | Misión de vuelo..... | 227 |
| 5.1.5.2 | Apoyo topográfico..... | 228 |
| 5.1.5.3 | Adquisición de imágenes | 229 |
| 5.1.5.4 | Procesamiento de imágenes | 229 |
| 5.1.5.5 | Estimación de la precisión..... | 231 |
| 5.1.5.6 | Curvas de nivel y planos topográficos..... | 231 |
| 5.2 | Productos derivados de imágenes multiespectrales tomadas con VANT | 233 |
| 5.2.1 | Monitoreo y manejo de cultivos..... | 233 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|------------|---|------------|
| 5.2.2 | Estudio y monitoreo de vida silvestre y conservación..... | 235 |
| 5.2.3 | Monitoreo de desastres naturales y zonas de alto riesgo | 237 |
| 5.2.4 | Monitoreo y cuantificación de la erosión de suelos | 239 |
| 5.2.5 | Geomorfología de glaciares | 242 |
| 5.3 | Inspección de obras hidráulicas..... | 244 |
| 5.3.1 | Accesorios requeridos para inspecciones..... | 245 |
| 5.3.2 | Tipos de inspección | 246 |
| 5.3.2.1 | Primer orden | 246 |
| i. | Cortinas..... | 249 |
| ii. | Vertedores | 251 |
| iii. | Obra de toma..... | 253 |
| iv. | Otros desfogues | 254 |
| 5.3.2.2 | Supervisión visual de presa Los Sabinos | 255 |
| 5.3.2.3 | Informe de la visita de inspección..... | 256 |
| i. | Cortina | 256 |
| ii. | Talud aguas arriba..... | 257 |
| iii. | Talud aguas abajo | 257 |
| iv. | Vertedor | 258 |
| v. | Obra de toma..... | 260 |
| vi. | Embalse..... | 262 |
| vii. | Recomendaciones..... | 262 |
| 5.3.2.4 | Seguridad | 263 |
| 5.3.3 | Supervisión de presas con drones | 263 |
| 5.4 | Agricultura de precisión | 265 |
| 5.4.1 | Estimación de altura y área foliar | 265 |
| 5.4.1.1 | Altura de árboles..... | 265 |
| 5.4.2 | Seguimiento de enfermedades en cultivos | 267 |
| 5.4.2.1 | Detección de enfermedades | 267 |
| 5.4.2.2 | Control de enfermedades | 269 |
| 5.4.3 | Seguimiento del cultivo | 270 |
| 5.4.3.1 | Estado del cultivo | 270 |
| 5.4.3.2 | Detección de malas hierbas | 272 |
| 5.4.3.3 | Patrones anormales del cultivo..... | 273 |
| 5.4.3.4 | Índices de vegetación..... | 274 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|-------------------|--|------------|
| 5.4.4 | Estimación de rendimiento de cultivos | 276 |
| Capítulo 6 | ..... | 285 |
| 6 | REFERENCIAS | 285 |
| 6.1 | Referencias del Capítulo 1..... | 285 |
| 6.2 | Referencias del Capítulo 2..... | 288 |
| 6.3 | Referencias del Capítulo 3..... | 290 |
| 6.4 | Referencias del Capítulo 4..... | 295 |
| 6.5 | Referencias del Capítulo 5..... | 296 |
| A | Anexo A | 3 |
| | GLOSARIO DE TÉRMINOS | 3 |
| | Anexo B | 3 |
| B. | SISTEMAS DE PROPULSIÓN, ENERGÍA, CONTROL Y TELECOMUNICACIÓN | 3 |
| B.1 | Sistema de propulsión eléctrico | 3 |
| B.1.1 | Motores sin escobillas | 3 |
| B.1.2 | Controladores electrónicos de velocidad | 4 |
| B.1.3 | Hélices | 6 |
| B.2 | Sistemas de energía | 6 |
| B.2.1 | Necesidad de corriente de los motores..... | 7 |
| B.2.2 | Tipos y características de Baterías..... | 7 |
| B.3 | Sistema de control | 8 |
| B.3.1 | Introducción | 8 |
| B.3.2 | Radiocontrol | 9 |
| B.3.3 | Sensores necesarios para el control | 11 |
| B.3.4 | Piloto automático | 11 |
| B.4 | Sistemas de telecomunicación | 12 |
| B.4.1 | Estación de control en tierra | 12 |
| B.4.2 | Aeronave pilotada a distancia | 13 |
| B.4.3 | Vista en primera persona | 14 |
| B.4.4 | Sistemas de telecomunicación | 14 |
| B.4.4.1 | Estación de control en tierra..... | 14 |
| B.4.4.2 | Aeronave pilotada a distancia..... | 15 |
| B.4.4.3 | Vista en primera persona..... | 16 |
| Anexo C | ..... | 3 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|----------------|--|-----------|
| C. | SIMULADORES DE VUELO PARA VANT | 3 |
| C.1 | DroneSim Pro Flight Simulator | 3 |
| C.2 | RealFlight Drone Flight Simulator | 4 |
| C.3 | Simulador Aerofly RC7 Quad | 5 |
| C.4 | Liftoff FPV de Immersion RC..... | 6 |
| C.5 | Heli-x UAV | 7 |
| C.6 | FPV Freerider App..... | 7 |
| C.7 | Phoenix RC | 8 |
| C.8 | Comparativo: Phoenix RC versus Simpro Real Flight Simulator | 10 |
| Anexo D | ..... | 3 |
| D. | ELABORACIÓN DE MISIONES DE VUELO USANDO EL SOFTWARE UgCS | 3 |
| D.1 | Configuración general | 3 |
| D.1.1 | Crear perfil..... | 3 |
| A.1.1.1.1.1 | Abrir el programa UGCS, se observara una pantalla como la Figura D.1 , dar clic en Menú, y posteriormente en Perfiles, ver Figura D.2 | 3 |
| A.1.1.1.1.2 | Seleccione el perfil o plataforma que más se asemeje a su dron y pulse clic sobre él, aparecerán tres opciones: <i>Copiar, Editar, Quitar</i> ; de clic en copiar. | 4 |
| A.1.1.1.1.3 | Cuando se tenga completado los pasos anteriores, dar clic en guardar, y se mostrara el nuevo perfil dentro de los ya existentes en orden alfabético. Hemos terminado de configurar nuestro propio perfil. | 8 |
| D.1.2 | Configurar la cámara | 8 |
| D.1.3 | Configurar nuevo vehículo..... | 9 |
| D.2 | Plan de vuelo o misión | 11 |
| D.2.1 | Crear nueva ruta | 11 |
| D.2.1.1 | Ruta desde cero | 11 |
| D.2.1.2 | Ruta desde un archivo existente..... | 13 |
| D.2.2 | Ruta con Waypoint | 13 |
| D.2.2.1 | Despegue | 14 |
| D.2.2.2 | Waypoint..... | 15 |
| D.2.2.3 | Aterrizaje..... | 15 |
| D.2.2.4 | Configuración de la cámara..... | 16 |
| i. | Modo de cámara..... | 16 |
| ii. | Cámara por tiempo | 17 |
| iii. | Cámara por distancia | 17 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|---|--|-----------|
| D.2.3 | Calcular ruta | 18 |
| D.2.3.1 | Ruta con escaneo de área | 18 |
| D.2.3.2 | Configuración de la cámara..... | 19 |
| i. | Modo de cámara..... | 19 |
| ii. | Cámara por tiempo..... | 20 |
| iii. | Cámara por distancia | 20 |
| D.2.3.3 | Calcular ruta..... | 21 |
| Anexo E | ..... | 3 |
| E. ARMADO DE COMPONENTES | ..... | 3 |
| E.1 Armado del hexacóptero | ..... | 4 |
| E.1.1 | Patín de entrenamiento..... | 4 |
| E.1.2 | Montura de un eje con patín de entrenamiento..... | 5 |
| i. | Colocar el patín de entrenamiento..... | 6 |
| ii. | Colocar la cámara multispectral | 6 |
| iii. | Colocar la cámara visible | 7 |
| iv. | Colocar la batería en la montura | 8 |
| v. | Sujetar la montura al hexacóptero | 9 |
| vi. | Conectar los cables de la montura al hexacóptero..... | 10 |
| E.1.3 | Montura de tres ejes | 10 |
| i. | Verificar que la emisora del dron y la emisora de la montura estén en canales diferentes | 11 |
| ii. | Colocar y fijar la cámara en el soporte de la montura..... | 11 |
| iii. | Conexión de cables de cámara y comunicación | 12 |
| iv. | Colocar las baterías de la montura y pupitre..... | 13 |
| v. | Colocación de la montura tres ejes al hexacóptero..... | 13 |
| E.2 Montado de las baterías | ..... | 14 |
| E.3 Encendido de componentes | ..... | 15 |
| i. | Emisora y pupitre..... | 15 |
| ii. | Montura y dron..... | 16 |
| Anexo F | ..... | 3 |
| F. CONSIDERACIONES SOBRE REGULACIÓN Y SEGURIDAD DE LOS DRONES PARA LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN | ..... | 3 |
| F.1 Introducción | ..... | 3 |
| F.2 Categorización de usos permitidos | ..... | 3 |

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | | |
|-------------|--|-----------|
| F.2.1 | Uso recreacional | 4 |
| F.2.2 | Uso para negocios | 5 |
| F.2.3 | Entidades gubernamentales | 6 |
| F.2.4 | Uso educacional..... | 6 |
| F.3 | Legislación por regiones geográficas..... | 7 |
| F.3.1 | Europa | 7 |
| F.3.2 | Estados Unidos | 8 |
| F.3.3 | América Latina y México..... | 8 |
| F.3.3.1 | Países de América Latina..... | 8 |
| F.3.3.2 | México..... | 8 |
| i. | VANT micro | 9 |
| ii. | VANT ligeros..... | 9 |
| a) | De uso recreativo | 9 |
| A.1.1.1.1.4 | De uso comercial..... | 10 |
| iii. | VANT pesados | 10 |
| a) | De uso recreativo | 10 |
| A.1.1.1.1.5 | De uso comercial..... | 10 |
| F.4 | Mejoras a futuro..... | 10 |
| F.5 | Bibliografía del capítulo | 11 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Principio básico de los sensores remotos (Van Leeuwen y Vargas, 2006)..... | 4 |
| Figura 1.2 Diagrama del principio de percepción remota..... | 5 |
| Figura 1.3 Interacción objeto mundo real de un sistema de percepción remota (Van Leeuwen y Vargas, 2006) | 6 |
| Figura 1.4 Concepción del proceso de teledetección (Van Leeuwen y Vargas, 2006)..... | 7 |
| Figura 1.5 Espectro electromagnético (NASA, 2007a) | 8 |
| Figura 1.6 Espectro electromagnético visible (NASA, 2007b) | 9 |
| Figura 1.7 a) Mecanismos de interacción de la energía con la superficie y b) Tipos de reflectancia (Adaptado de Jensen, 2006 y Sabins, 2007) | 9 |
| Figura 1.8 Firmas espectrales típicas de dos poblaciones de pinos a diferentes edades..... | 11 |
| Figura 1.9 Firmas espectrales para diferentes materiales (Alonso, 2006)..... | 12 |
| Figura 1.10 Firmas espectrales para diferentes cultivos | 12 |
| Figura 1.11 Imagen satelital LANDSAT de una zona agrícola en Sonora México. A) Banda pancromática, B) Combinación de bandas 1,2 y 3, C) Falso color a partir de las bandas 7, 3 y 1 | 14 |
| Figura 1.12 Diferentes plataformas para la observación remota (Aber <i>et al.</i> , 2010)..... | 16 |
| Figura 1.13 Tipos de orbitas espaciales de los satélites (Aranda, 2015) | 17 |
| Figura 1.14 Región espectral de acuerdo con su longitud de onda (Pérez, 2007) | 18 |
| Figura 1.15 Sensores remotos activos (Baumann, 2010) | 20 |
| Figura 1.16 Sensores pasivos (Baumann, 2010)..... | 20 |
| Figura 1.17 Composición de una imagen digital (Adaptado de Bense, 2007) | 21 |
| Figura 1.18 Esquema de una cámara fotográfica..... | 24 |
| Figura 1.19 Componentes de la cámara (Nikon, 2016) | 25 |
| Figura 1.20 Cámara compacta Sony DSC-W830B..... | 26 |
| Figura 1.21 Cámara intermedia Nikon Coolpix p350 | 27 |
| Figura 1.22 Cámara réflex Sony SLT-A58K | 27 |
| Figura 1.23 Sensor CMOS (Fran Lora, 2014) | 29 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.24 Sensor CMOS vs. CCD (Meroli, 2012) | 29 |
| Figura 1.25 Tamaño de sensores..... | 31 |
| Figura 1.26 Relación entre distancia focal y ángulo de visión | 32 |
| Figura 1.27 Objetivo (Manu, 2013) | 33 |
| Figura 1.28 Valores de f (Alicea, 2010) | 34 |
| Figura 1.29 Valores de obturación (Gutiérrez, 2015) | 35 |
| Figura 1.30 Imagen vectorial contra mapa de bits (Martínez,2012) | 36 |
| Figura 1.31 Representación de RGB..... | 38 |
| Figura 2.1 Construcción de un geoide de la tierra | 45 |
| Figura 2.2 Elipsoide ideal | 46 |
| Figura 2.3 Sistema de referencia geodésico | 47 |
| Figura 2.4 Construcción de proyecciones | 50 |
| Figura 2.5 Proyecciones de acuerdo con la superficie | 51 |
| Figura 2.6 En función de la posición de la figura de la proyección, p. ej., proyecciones cilíndricas..... | 52 |
| Figura 2.7 Proyección según el tipo de distorsión..... | 52 |
| Figura 2.8 Proyecciones geográficas según la posición y figura de proyección (Furuti, 2002) | 53 |
| Figura 2.9 Geometría de una fotografía aérea | 58 |
| Figura 2.10 Haz perspectivo..... | 59 |
| Figura 2.11 Intersección de rayos homólogos..... | 60 |
| Figura 2.12 Datos internos..... | 61 |
| Figura 2.13 Datos para orientación externa | 62 |
| Figura 2.14 Banco de la red geodésica de INEGI | 64 |
| Figura 2.15 Punto de apoyo sobre el terreno..... | 64 |
| Figura 2.16 Imágenes aéreas donde se observa el desplazamiento de los objetos a partir del centro..... | 68 |
| Figura 2.17 Imagen restituida | 70 |
| Figura 2.18 Ortomosaico..... | 71 |
| Figura 2.19 MDE con vista en perspectiva (INEGI) | 72 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.20 Modelo de elevación digital..... | 73 |
| Figura 2.21 Diferencias de elevación representadas en un plano mediante curvas de nivel..... | 74 |
| Figura 2.22 Sistema con un transmisor (A) y un receptor (NovAtel, 2016)..... | 75 |
| Figura 2.23 Sistema con dos transmisores (A) y (B) y un receptor (NovAtel, 2016)..... | 76 |
| Figura 2.24 Sistema con tres transmisores (A), (B) y (C) y un receptor (Tsui, 2005)..... | 76 |
| Figura 2.25 Segmentos del sistema GPS (El-Rabbany, 2002)..... | 80 |
| Figura 2.26 Proyección plana de la constelación GPS y sus orbitas (Kaplan y Hegarty, 2005) | 81 |
| Figura 2.27 Ejemplo de arreglo de antena helicoidal del satélite MCA-6010 (Aerospace online, 2016)..... | 82 |
| Figura 2.28 Constelación de satélites del sistema GPS (Bossler, 2010)..... | 82 |
| Figura 2.29 Partes del segmento de control (Hajiyev <i>et al.</i> , 2015)..... | 83 |
| Figura 2.30 Distribución geográfica de las estaciones de control del Sistema GPS (Huang y Cheng, 2010) | 84 |
| Figura 2.31 Estimación de la posición del receptor GPS respecto a la cantidad de satélites con 1, 2 y 3 satélites (DiBiase, 2016) | 85 |
| Figura 2.32 Estructura general del equipo usuario (Rajú, 2003) | 86 |
| Figura 2.33 Señales de satélite GPS (University of Colorado Boulder, 2016)..... | 87 |
| Figura 2.34 Estructura general de una sentencia GGA (El-Rabbany, 2002)..... | 88 |
| Figura 2.35 Error en la posición calculada debido a diferencia de tiempo entre reloj del satélite, receptor y posición verdadera (línea punteada) (Kaplan y Hegarty, 2005)..... | 91 |
| Figura 2.36 Distorsión de la señal a su paso por la ionosfera (Trimble, 2016) .. | 92 |
| Figura 2.37 Distorsión de la señal a su paso por la troposfera (Trimble, 2016) | 92 |
| Figura 2.38 Errores debidos a las efemérides del satélite (Yasuda, 2006) | 93 |
| Figura 2.39 Distorsión y retraso de la señal debido al efecto multicamino (Pfof y Casady, 1998) | 94 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 2.40 Relación de la geometría de los satélites con respecto a la precisión, (izquierda) buena geometría por tanto mayor precisión, (derecha) mala geometría por tanto menor precisión (El-Rabbany, 2002)..... | 95 |
| Figura 2.41 Principio de la adquisición puntual o estándar (El-Rabbany, 2002) . | 96 |
| Figura 2.42 Principio de la adquisición relativa o diferencial (El-Rabbany, 2002) | 96 |
| Figura 2.43 Sistema de adquisición de datos RTK (El-Rabbany, 2002) | 97 |
| Figura 2.44 Uso de repetidora para incrementar cobertura de radio (El-Rabbany, 2002)..... | 98 |
| Figura 2.45 Cobertura de los sistemas de aumento de la señal GPS (Gunn, 2016) | 99 |
| Figura 2.46 Elementos del sistema WAAS (Allred <i>et al.</i> 2008) | 102 |
| Figura 2.47 Cobertura de la señal WAAS (Burns, 2013)..... | 103 |
| Figura 2.48 Elementos del sistema EGNOS (European GNSS Agency, 2015) . | 106 |
| Figura 2.49 Red de estaciones terrestres del Sistema EGNOS (CNES-ESA 2011) | 106 |
| Figura 3.1 Esquema de las estaciones de un VANT (García, 2011) | 114 |
| Figura 3.2 Autopiloto de Cloud Cap Technology (Barton, 2012)..... | 115 |
| Figura 3.3 Fuselaje y motores de un hexacóptero | 118 |
| Figura 3.4 Radio control o emisora de mando remoto | 118 |
| Figura 3.5 Componentes para la transmisión de video en FPV (transmisor y receptor de radio, cámara FPV, antenas y cables) | 119 |
| Figura 3.6 Baterías y hélices de un VANT tipo hexacóptero..... | 120 |
| Figura 3.7 Monitor FPV de 5” (izquierda) y Gafas FPV (derecha)..... | 121 |
| Figura 3.8 Dron de ala fija..... | 122 |
| Figura 3.9 Dron tipo hexacóptero | 123 |
| Figura 3.10 Dron militar MQ-9 Reaper (Fuente: BBC 2012)..... | 124 |
| Figura 3.11 El torpedo aéreo (izquierda) y el “bicho” de Katterring (derecha) (Keane & Carr, 2013) | 132 |
| Figura 3.12 El Standard E-1 de la armada estadounidense (Johnson, E. & Jones, 2015)..... | 133 |
| Figura 3.13 Helicóptero no. 2 de Oehmichen (dos Santos, 2011) | 134 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 3.14 El Curtiss F-5L (Keane y Carr, 2013) | 135 |
| Figura 3.15 El RPA DH.82B Queen Bee y su estación en tierra (Newcome, 2004) | 136 |
| Figura 3.16 Regginald Denny de RadioPlane y su RP-1 ("Remote Piloted Aerial Vehicles - The Radioplane Target Drone", 2006) | 137 |
| Figura 3.17 La bomba-planeador alemana teledirigida Fritz X ("Fritz-X", s.f.). | 138 |
| Figura 3.18 Norma Jean Dougherty en el ensamblado del OQ-3 ("History of unmanned aerial vehicles", 2016)..... | 139 |
| Figura 3.19 Dron de asalto TDN-1 | 140 |
| Figura 3.20 Dron SM-62A Snark ("SM-62 Snark", s.f.) | 142 |
| Figura 3.21 Dron AQM-34, listo para su lanzamiento desde su portador, un DC- 130 (Ehrhard, 2010) | 143 |
| Figura 3.22 El Scout de Israel Aircraft Industries (Dalamagkidis <i>et al.</i> , 2012) | 144 |
| Figura 3.23 Elementos de la Fuerza Aérea Estadounidense alistan un dron Pioneer durante la Guerra del Golfo en 1991 (Cole, 2014) | 145 |
| Figura 3.24 El MQ-1 Predator (Dalamagkidis <i>et al.</i> , 2012) | 147 |
| Figura 3.25 VANT de ala rotatoria. A la izquierda el RQ-8 Fire Scout de Northrop Grumman. A la derecha el Draganflyer X6 (b) (Tetrault, 2009). | 148 |
| Figura 3.26 El Phantom 1 de DJI (" <i>Phantom (UAV)</i> ", s.f.) | 149 |
| Figura 3.27 Esquema de funcionamiento de un tubo fotomultiplicador (Rees, 2013)..... | 150 |
| Figura 3.28 Obtención de imagen del tipo "paso a paso" utilizando un detector bidimensional. Los elementos dentro del área de imagen se conocen como pixeles (Rees, 2013) | 151 |
| Figura 3.29 Obtención de imagen del tipo "por empuje" con un detector unidimensional, el detector captura la imagen de una hilera de pixeles a la vez, las hileras siguientes se captura después de que la plataforma se ha movido lo suficiente (Rees, 2013) | 152 |
| Figura 3.30 Obtención de imagen del tipo "barrido" por un escáner lineal. La imagen se forma por la captura instantánea de cada pixel mediante el movimiento de un espejo oscilador en el sensor hasta completar cada hilera; la siguiente hilera se captura cuando la plataforma se ha movido cierta distancia (Rees, 2013).. | 153 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 3.31 Dos sensores de diferente resolución espectral en la región del visible, arriba una banda espectral, abajo tres bandas espectrales una para cada color (CCRS, 2016)..... | 155 |
| Figura 3.32 Representación gráfica de la resolución espacial y temporal de un sensor aerotransportado (adaptado de Ciznicki <i>et al.</i> , 2012) | 156 |
| Figura 3.33 cámara MicaSense RedEdge 3 (izq) con cinco filtros de banda y el ancho de banda en función de la longitud de onda (der) (MicaSense, 2015).... | 157 |
| Figura 3.34 Comparación de dos imágenes de diferente resolución 2 bits (izquierda) y 8 bits (derecha) (CCRS, 2016) | 158 |
| Figura 3.35 Fotografía vertical y oblicua tomada por un dron desde las instalaciones del IMTA..... | 161 |
| Figura 3.36 Ortomosaico de las instalaciones del IMTA obtenido de una serie de imágenes espectrales | 163 |
| Figura 4.1 Los tipos de VANT más comunes. Ala fija (izquierda) y multirrotores (derecha) | 173 |
| Figura 4.2 Cámara Canon de 26.00 mm..... | 176 |
| Figura 4.3 Cámara multiespectral TETRACAM. Vista trasera izquierda, vista frontal derecha..... | 176 |
| Figura 4.4 Cámara visible SONY de 26 megapíxeles..... | 177 |
| Figura 4.5 Relación entre la altura de vuelo (H), el tamaño de píxel en el sensor (TPS) y el tamaño de píxel en el terreno (GSD) | 179 |
| Figura 4.6 Traslape longitudinal y transversal..... | 180 |
| Figura 4.7 Batería LIPO de 10000 mAh, 14.8V y constante de descarga 10C..... | 183 |
| Figura 4.8 Revisión de la carga de la batería..... | 184 |
| Figura 4.9 Equipo balanceador de carga de baterías | 185 |
| Figura 4.10 Zona de vuelo..... | 186 |
| Figura 4.11 Las zonas de despegue y aterrizaje | 187 |
| Figura 4.12 Dianas para la ubicación de puntos de control en el terreno (izquierda) y GPS diferencial (derecha) | 189 |
| Figura 4.13 Zona de estudio y búsqueda del área de aterrizaje..... | 189 |
| Figura 4.14 Zona de despegue de un dron tipo hexacóptero..... | 190 |
| Figura 4.15 Área de estudio inundada..... | 191 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 4.16 VANT aclimatándose en una parcela de caña | 194 |
| Figura 4.17 Encendido del dron con una batería | 196 |
| Figura 4.18 Calibración de la brújula: giro horizontal respecto al eje del dron.. | 197 |
| Figura 4.19 Calibrado de brújula, giro vertical respecto al eje del dron..... | 197 |
| Figura 4.20 Colocación del dron en el lugar de despegue..... | 198 |
| Figura 4.21 Movimiento de los bastones de la emisora y respuesta del VANT (modo 2)..... | 200 |
| Figura 4.22 Colocación de baterías en el dron sin conectar..... | 202 |
| Figura 4.23 a) Conexión de las baterías del dron y b) Colocación de los avisadores acústicos | 203 |
| Figura 4.24 Conexión del módem de telemetría a la computadora | 205 |
| Figura 4.25 Acomodo del dron en la caja de transporte | 207 |
| Figura 4.26 Cajas de transporte del equipo (monturas y accesorios)..... | 208 |
| Figura 4.27 Simulador de vuelo en computadora personal | 209 |
| Figura 4.28 Modelos presentes en un simulador de vuelo (Pereira, 2007) | 210 |
| Figura 4.29 Modelos de un simulador de vuelo (vista externa) (Pereira, 2007) | 211 |
| Figura 5.1 <i>Elipsoide terrestre</i> | 219 |
| Figura 5.2 Latitud y longitud del sistema de coordenadas geográficas | 219 |
| Figura 5.3 Proyección UTM..... | 220 |
| Figura 5.4 Zonas UTM del mundo (Dana, 2017)..... | 220 |
| Figura 5.5 Escala gráfica..... | 221 |
| Figura 5.6 Plano acotado | 222 |
| Figura 5.7 Curvas de nivel | 223 |
| Figura 5.8 Representación de plano topográfico | 224 |
| Figura 5.9 Perfil topográfico..... | 225 |
| Figura 5.10 Perfil longitudinal | 226 |
| Figura 5.11 Corte transversal al eje longitudinal..... | 226 |
| Figura 5.12 a) Área de estudio y b) área de vuelo | 227 |
| Figura 5.13 Ruta de vuelo con el software a) UgCS y b) Mission Planner..... | 228 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 5.14 Levantamiento de puntos de control | 228 |
| Figura 5.15 Imagen tomada con un VANT a 40 m de altura | 229 |
| Figura 5.16 Identificación de un punto de control, Sinaloa en una imagen de un canal de riego en Los Mochis, Sinaloa | 230 |
| Figura 5.17 Modelos digitales: a) de superficie y b) de terreno..... | 230 |
| Figura 5.18 Plano de perfiles longitudinal..... | 232 |
| Figura 5.19 Plano de perfiles transversales al eje longitudinal..... | 232 |
| Figura 5.20 a) Cuadricóptero y cámaras visible y multiespectral utilizado para la toma de imágenes, b) imagen multiespectral de un cultivo de maíz..... | 233 |
| Figura 5.21 (a) Imagen original. (b) Imagen procesada donde cada color representa una clase (negro = sin vegetación, blanco = cultivo y gris = maleza) | 234 |
| Figura 5.22 a) Prototipo de VANT equipado con cámara de video y fotográfica y sistema de pulverización para el control de malezas, b) procedimiento del sistema de control de malezas acuáticas a partir de un VANT (Göktoğan <i>et al.</i> , 2010) | 234 |
| Figura 5.23 (a) Imagen en tierra y (b) Imagen aérea de un grupo de elefantes. La línea amarilla punteada en ambas imágenes enlaza dos elementos referenciados (un elefante y un árbol). La imagen (c) es una ampliación de parte de la imagen aérea (Vermeulen <i>et al.</i> , 2013) | 236 |
| Figura 5.24 Monitoreo de vida salvaje mediante el uso de VANT a) VANT equipado con cámara RGB, b) Fotografía aérea de manatíes, c) fotografía aérea de cocodrilos, d) modelos de distribución de especies (Martin <i>et al.</i> , 2012)..... | 237 |
| Figura 5.25 a) Fotografía aérea tomada con un dron ICARUS, b) Dron cuadrirotor ICARUS c) Detección de fisuras en casas, d) Ubicación de bombas de alta presión, e) Ortomosaico elaborado a partir de fotografías aéreas (De Cubber <i>et al.</i> , 2014) | 238 |
| Figura 5.26 a) Multicóptero equipado con cámara fotográfica, b) área de estudio sobre la zona de inundación artificial, c) fotografía aérea de la zona inundada, d) sección transversal obtenida a partir del modelo de elevación digital (MDE) en el cual se aprecian con detalle las diferencias de altura de la vegetación y el canal (Watanabe & Kawahara, 2016)..... | 239 |
| Figura 5.27 a) Transectos altitudinales a lo largo del área de estudio sobre canales de escurrimiento y b) MDE construido a partir de fotografías tomadas con un VANT y fotogrametría (Pineux <i>et al.</i> , 2017) | 240 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 5.28 a) Ortofoto obtenida a partir de imágenes tomadas con un VANT, b) MDS obtenida por fotogrametría, c) MDE obtenido a partir de datos obtenidos con estación total y teodolito (<i>Permata et al., 2016</i>) | 241 |
| Figura 5.29 a) Ortomosaico del sitio de estudio, b) Modelo Digital de Superficie (MDS) elaborados con fotografías aéreas obtenidas con un VANT (<i>D’Oleire-Oltmanns et al., 2015</i>) | 242 |
| Figura 5.30 a) Ortofoto del glaciar estudiado. b) MDE de alta resolución obtenido a partir de fotogrametría con imágenes obtenidas por un VANT, c) Mapa geomorfomológico detallando características morfológicas del glaciar estudiado (<i>Ely et al., 2016</i>)..... | 243 |
| Figura 5.31 Supervisión de la construcción de una canal apoyada con drones en una zona de en el norte de Sinaloa, México | 244 |
| Figura 5.32 Montura especial de VANT para montar cámara de alta resolución para realizar actividades de supervisión de infraestructura hidráulica | 246 |
| Figura 5.33 Partes básicas de la cortina de una presa (CNA) | 247 |
| Figura 5.34 características de la presa con vertedor contralado | 248 |
| Figura 5.35 Inspección técnica a la presa de almacenamiento “Los Sabinos”, localizada sobre el arroyo Los Sabinos, en el municipio de Chapala, Jalisco. Fuente: Google Earth | 255 |
| Figura 5.36 Detalle del ancho de la corona de la presa Los Sabinos | 256 |
| Figura 5.37 Detalle del talud aguas arriba de la presa Los Sabinos | 257 |
| Figura 5.38 Aspecto del talud aguas debajo de la cortina de la presa Los Sabinos | 258 |
| Figura 5.39 Detalle del vertedor de demasías en la presa Los Sabinos | 258 |
| Figura 5.40 Características de las paredes del vertedor de la presa Los Sabinos | 259 |
| Figura 5.41 Detalle del paramento del vertedero..... | 259 |
| Figura 5.42 Muro de encauce en la margen derecha..... | 260 |
| Figura 5.43 Detalles de la obra de toma..... | 260 |
| Figura 5.44 Compuerta de toma..... | 261 |
| Figura 5.45 Detalle de la salida de la obra de toma | 261 |
| Figura 5.46 Embalse de la presa | 262 |
| Figura 5.47 Presa Miguel Hidalgo..... | 264 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 5.48 Detalle del desgaste del vertedor en la zona de convergencia de flujos | 265 |
| Figura 5.49 Rutas de vuelos usados (este-oeste y norte sur) para asegurar gran traslape de imágenes (Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2014) | 266 |
| Figura 5.50 Escena tridimensional generada con métodos de foto-reconstrucción usando plataformas basadas en VANT (Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2014) | 266 |
| Figura 5.51 Foto-reconstrucción de un árbol obtenida de un VANT (a y c) así como obtenidas con ortomosaicos usando DSM (b y d) para detallar la corona de los árboles (Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2014)..... | 267 |
| Figura 5.52 Imágenes aéreas adquiridas con un aeroplano (izquierda) y un VANT (derecha) con árboles sanos (H) e infectados con HLB (D) (García-Ruiz <i>et al.</i> , 2013)..... | 268 |
| Figura 5.53 Imágenes segmentadas en falso color de un árbol sano (a) e infectado (b). Imágenes izquierda obtenidas con un aeroplano y las de la derecha con un VANT (García-Ruiz <i>et al.</i> , 2013)..... | 268 |
| Figura 5.54 Imágenes adquiridas con VANT en falso color e imágenes con características espectrales significativas de árboles sanos e infectados (García-Ruiz <i>et al.</i> , 2013) | 269 |
| Figura 5.55 VANT usado para la aplicación precisa de agroquímicos (A) equipo de bombeo de pesticidas; (B) caja de controlador (Zhu <i>et al.</i> , 2010)..... | 270 |
| Figura 5.56 Mapa NDVI en Pseudocolor de una parcela de pasto en tres fechas para el año 2007 (Xiang y Lei, 2011) | 270 |
| Figura 5.57 Etapas del estudio para calibrar el modelo para estimar el Kc (Fernández-Pacheco <i>et al.</i> , 2014) | 271 |
| Figura 5.58 Resultados obtenidos (Kc y h) con el procesamiento de imágenes (Fernández <i>et al.</i> , 2014) | 271 |
| Figura 5.59 Microdron MD4-1000 volando sobre la zona de estudio (Torres-Sánchez <i>et al.</i> , 2014) | 272 |
| Figura 5.60 Imagen obtenida a 10 m de altura y la imagen después del proceso de clasificación de vegetación Torres-Sánchez <i>et al.</i> (2014) | 272 |
| Figura 5.61 Imágenes multiespectrales captadas por un VANT (Anderson, 2014) | 273 |
| Figura 5.62 Relación del valor de NDVI y el contenido de clorofila de las hojas | 274 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 5.63 a) VANT usado y (b) vista de cuatro cámaras CMOS integradas (Verger <i>et al.</i> , 2014)..... | 275 |
| Figura 5.64 Sensitividad espectral contrastante de las cuatro bandas asociadas a las cámaras del VANT usado (Verger <i>et al.</i> , 2014) | 276 |
| Figura 5.65 VANT en misión de monitoreo de un viñedo (Johnson <i>et al.</i> , 2003) | 276 |
| Figura 5.66 Variación de la cosecha en función de la conductividad eléctrica aparente (a) y el índice de verdor NDVI (b) (Fortes <i>et al.</i> , 2014)..... | 278 |
| Figura 5.67 Estimación espacial de la cosecha en función del índice de verdor NDVI (Fortes <i>et al.</i> , 2014) | 279 |
| Figura 5.68 Correlación entre el rendimiento real y el rendimiento pronosticado para diferentes parcelas, indicador de verdor, y satélite (Fuente: Al-Gaadi <i>et al.</i> , 2016)..... | 280 |
| Figura 5.69 Mapas de predicción del rendimiento de la papa para parcelas, indicador de verdor, y satélite (Fuente: Al-Gaadi <i>et al.</i> , 2016) | 281 |
| Figura B.1 Motor sin escobillas..... | 4 |
| Figura B.2 Controlador electrónico de velocidad Afro de 30 A para baterías LiPo (Litio Polímero) de 2 a 4 celdas..... | 5 |
| Figura B.3 Tarjeta de distribución de energía con 4 ESC's fijada en una estructura para cuadricóptero..... | 5 |
| Figura B.4 Hélices de fibra de carbono para cuadricóptero | 6 |
| Figura B.5 Batería de litio-polímero de 3 celdas del dron Cheerson CX20..... | 7 |
| Figura B.6 La figura muestra la batería inteligente del dron Phantom 4 de la marca DJI..... | 8 |
| Figura B.7 Radiocontrol de un dron Phantom 4 de DJI. Se puede apreciar el soporte para Tablet o celular, que no viene incluido con el control | 9 |
| Figura B.8 Palancas de mando del radiocontrol. Las palancas de mando tienen dos grados de libertad y se pueden mover en las siguientes direcciones: arriba, abajo, izquierda y derecha..... | 10 |
| Figura B.9 Piloto automático Ardupilot | 12 |
| Figura B.10 Sistema de radio telemetría..... | 13 |
| Figura B.11 Transmisor de radio de 6 canales..... | 14 |
| Figura B.12 Sistema de radio telemetría..... | 15 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura B.13 Transmisor de radio de 6 canales..... | 16 |
| Figura C.1 Simulación de vuelo en Simpro..... | 3 |
| Figura C.2 a) Escenario de muestra en el simulador. b) Contenido del paquete, incluye control remoto | 4 |
| Figura C.3 Cables adaptadores para usar el mismo control del VANT con el simulador Aerofly RC7 Quad..... | 5 |
| Figura C.4 Simulación de vuelo en Liftoff | 6 |
| Figura C.5 Simulación de vuelo en Heli X | 7 |
| Figura C.6 Simulación de vuelo de VANT en FPV Freerider App..... | 8 |
| Figura C.7 Simulación de vuelo de VANT en Phoenix RC | 9 |
| Figura D.1 Ventana principal del UGCS | 3 |
| Figura D.2 Ventana perfiles | 4 |
| Figura D.3 Nombre de perfil..... | 5 |
| Figura D.4 Agregar cámara | 5 |
| Figura D.5 Datos de batería, GPS y telemetría y otros | 7 |
| Figura D.6 Imagen de perfil..... | 7 |
| Figura D.7 Perfil creado..... | 8 |
| Figura D.8 Datos generales de la cámara..... | 9 |
| Figura D.9 Enlace de datos DATA LINK 2.4 G | 10 |
| Figura D.10 Editar vehículo..... | 10 |
| Figura D.11 Crear nueva ruta | 11 |
| Figura D.12 Nombre de la ruta y perfil del vehículo | 11 |
| Figura D.13 Configuración de la nueva ruta | 12 |
| Figura D.14 Ruta creada..... | 12 |
| Figura D.15 Ruta desde nuevo archivo..... | 13 |
| Figura D.16 Zona de plan de vuelo | 13 |
| Figura D.17 Punto de despegue..... | 14 |
| Figura D.18 Características del punto de despegue | 14 |
| Figura D.19 Ruta con Waypoint | 15 |
| Figura D.20 Punto de aterrizaje del dron..... | 16 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura D.21 Configuración cámara para el Waypoint 6. A) modo de cámara, B) cámara por tiempo, C) cámara por distancia | 17 |
| Figura D.22 Datos escaneo de área | 18 |
| Figura D.23 Ruta escaneo de área | 19 |
| Figura D.24 Configuración cámara. A) modo de cámara, B) cámara por tiempo, C) cámara por distancia..... | 20 |
| Figura D.25 Mensaje ruta procesada | 21 |
| Figura D.26 Mensaje error ruta calculada | 21 |
| Figura D.27 Ruta o plan de vuelo con escaneo de área | 22 |
| Figura E.1 Patín de entrenamiento | 4 |
| Figura E.2 a) Lugar donde va el patín, b) Colocación del arco, c) Unión del tubo al arco y d) Revisar que el hexacóptero se mantiene estable con el patín..... | 5 |
| Figura E.3 Cámara Visible SONY y multiespectral ADC Snap | 5 |
| Figura E.4 Extensión del patín de entrenamiento..... | 6 |
| Figura E.5 a) Proceso de desatornillado del tornillo que sujeta la cámara, b) Conexión del multiconector de la montura a la cámara, c) Acomodo y atornillado de la cámara, d) Colocación de la memoria micro-SD..... | 7 |
| Figura E.6 a) Conexión del cable HDMI, b) conexión del cable de control, c) colocación y sujeción de la cámara, d) conexión del cable HDMI al conversor HDMI | 8 |
| Figura E.7 Acomodo de la batería a la montura de cámara..... | 8 |
| Figura E.8 Acomodo de las garras de la montura en el eje del dron | 9 |
| Figura E.9 Colocación de la montura de un eje al hexacóptero | 9 |
| Figura E.10 Colocación del GPS en el hexacóptero (izquierda) y conexión a la montura de cámara (derecha)..... | 10 |
| Figura E.11 Conexiones de enlace de video, disparo de cámara y cabeceo..... | 10 |
| Figura E.12 Montura de 3 ejes | 11 |
| Figura E.13 Montaje de la cámara en la montura de cámara de tres ejes..... | 12 |
| Figura E.14 Conexión de los cables HDMI y el de Control para la comunicación entre la cámara y la montura | 12 |
| Figura E.15 Colocación de las baterías de la montura de cámara | 13 |
| Figura E.16 Montaje de baterías en el hexacóptero | 14 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura E.17 Forma en que deben sujetarse las baterías..... | 14 |
| Figura E.18 Baterías colocadas en hexacóptero con a) montura de tres ejes y b) Patín de entrenamiento..... | 15 |
| Figura E.19 a) Emisoras y b) Conexión de batería al monitor | 16 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1.1 Factor de recorte de acuerdo con el tamaño del sensor | 30 |
| Tabla 1.2 Bits de almacenamiento..... | 37 |
| Tabla 2.1 Modelos de geoides..... | 46 |
| Tabla 2.2 Comparación de semiejes entre elipsoides..... | 47 |
| Tabla 2.3 Diferencia de coordenadas entre datum geodésicos | 48 |
| Tabla 2.4 Características de la constelación de satélites | 83 |
| Tabla 2.5 Significado de términos de una sentencia GGA (El-Rabbany, 2002) | 89 |
| Tabla 3.1 Comparación de un VANT con respecto a un avión tripulado (Díaz <i>et al.</i> , 2014)..... | 126 |
| Tabla 5.1 Descripción de las características de la presa | 249 |
| Tabla 5.2 Las características de los vertedores..... | 251 |
| Tabla 5.3 Características de las obras de toma | 253 |
| Tabla 5.4 Características de otros desfogues | 254 |
| Tabla 5.5 Características del cauce de aguas abajo | 254 |
| Tabla 5.6 Capacidad de almacenamiento de la presa | 256 |
| Tabla 5.7 Clasificación de riesgos de acuerdo con la CONAGUA | 263 |
| Tabla D.1 Tipos de Plataforma disponibles en UGCS* | 4 |
| Tabla D.2 Modelos de cámaras disponibles en UgCS..... | 6 |

Principios básicos de percepción
remota y fotografía digital

1

Capítulo 1

PRINCIPIOS BÁSICOS DE PERCEPCIÓN REMOTA Y FOTOGRAFÍA DIGITAL

Jorge Flores Velázquez, Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, Braulio David Robles Rubio y Anastasio Toledo Estrada

1.1 Percepción remota e imágenes multiespectrales

1.1.1 Introducción

La percepción remota es una actividad antigua. Percibir los cambios de temperatura en el ambiente es la forma más básica de percibir la realidad a distancia. Estos cambios ocurren debido a factores externos y es posible apreciarlos en plantas y animales debido a diferencias de colores, frecuencias o longitud de onda, lo cual ocurre cuando alguna forma de vida animal diferenció algunas de sus células, volviéndolas fotosensibles.

El cuerpo humano puede sentir los cambios en el ambiente y observarlos, pero no siempre fue así. Tuvieron que pasar millones de años de evolución para que dicho rudimento fotosensible se convirtiera en un poderoso y sofisticado sensor, el ojo humano. Esta evolución ha sido ininterrumpida, de tal suerte que este ojo sirvió como base para crear un imitador mecánico, la cámara fotográfica, que hizo su aparición hace poco más de un siglo, y ha sido mejorado de manera constante. Fue durante la década de 1930 que se configura para ser aplicada en la adquisición de fotografías aéreas (Martínez, 2005).

La Segunda Guerra Mundial dió un gran impulso a la fotografía aérea, así como a formas incipientes de percepción remota aplicada a cuestiones civiles. Durante esta época se registra un gran avance en el uso de la fotografía aérea. No obstante, el despunte de esta tecnología se produjo en la década de 1960 con la introducción de las plataformas satelitales que reemplazaron a las plataformas aéreas, y de los sensores electrónicos multiespectrales acoplados con computadoras que reemplazaron a las cámaras fotográficas. Este esquema es el que predomina hasta la actualidad en la que el uso de satélites que orbitan la tierra permite una observación casi constante y en tiempo real de la superficie terrestre, y en muchos casos, contar con detalles que van más allá de dicha superficie. Comúnmente el esquema operativo de un satélite de observación

puede esquematizarse de forma simplificada (Martínez, 2005) como se muestra en la Figura 1.1.

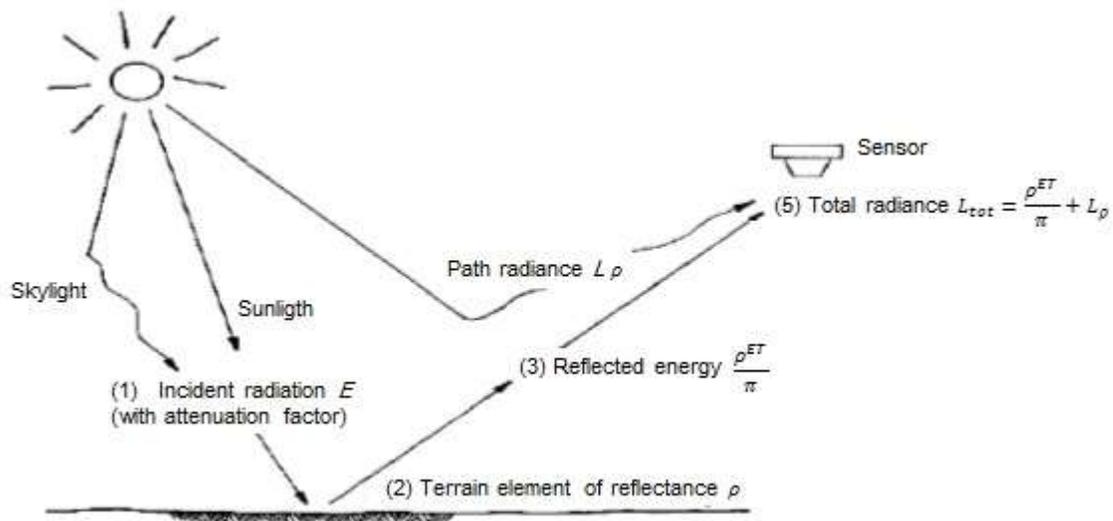


Figura 1.1 Principio básico de los sensores remotos (Van Leeuwen y Vargas, 2006)

1.1.2 Principios de percepción remota

La percepción remota (*remote sensing*) o teledetección está basada en la percepción de los objetos debido a la refracción de la luz en un rango específico de longitud de ancho. Así pueden percibirse de manera remota objetos en el espectro de luz visible al ojo humano o no mediante dispositivos especializados. Con base en su campo de estudio para hacer teledetección, es necesaria la aplicación de la ciencia para obtener información de uno o varios objetos analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto.

Cuando el agricultor va a su parcela después de una lluvia atípica y se da cuenta de que los surcos están llenos de agua, es una forma incipiente de hacer percepción remota. El suelo y las plantas reflejan una longitud de onda específica que atraviesa cierta distancia hasta que es capturada por un sensor, los ojos, que la envían a un procesador, el cerebro.

La aplicación de la percepción remota al estudio de los recursos naturales ha sido de gran interés porque permite tener información a partir de la cual se pueden detectar rasgos específicos de dichos recursos, tales como agua, vegetación, suelo, o cualquier objeto físico capaz de emitir ondas electromagnéticas.

En el diagrama de la Figura 1.2 se muestra el proceso de percepción remota que inicia en un emisor o fuente de energía, el cual emite ondas electromagnéticas a través de un medio de propagación (atmósfera). La energía recibida por el objeto es reflejada y enviada a través del mismo medio de propagación hacia el sensor remoto, cuyo detector de energía recibe las ondas reflejadas. La energía recibida es transformada y cuantificada para ser registrada en forma gráfica (fotografía) o en forma digital (cinta magnética). La información permanente, obtenida gráfica o digitalmente, debe ser analizada, procesada e interpretada a fin de cumplir con los objetivos del estudio, es decir, obtener la información semántica deseada (geológica, forestal, etc.).

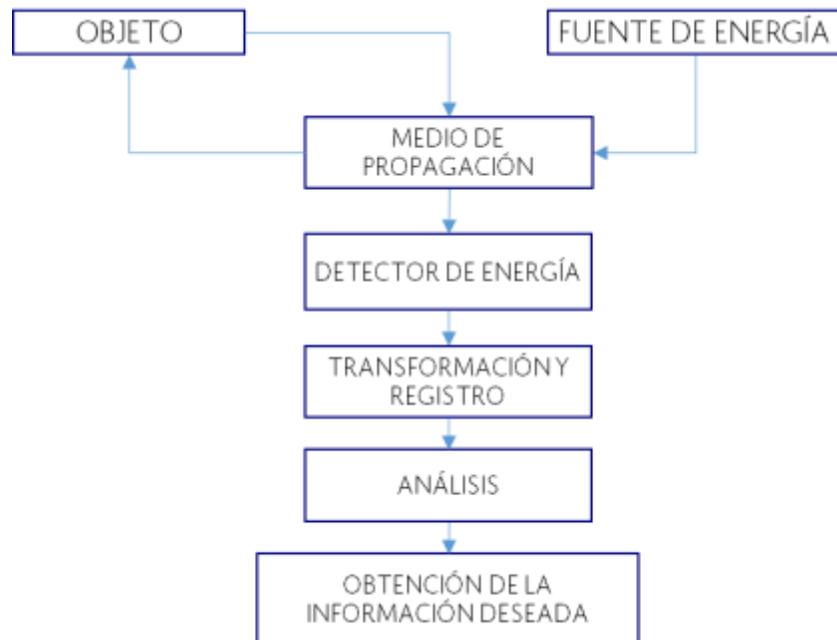


Figura 1.2 Diagrama del principio de percepción remota

El sol es la fuente de energía electromagnética cuyas ondas se propagan a través de la atmósfera hasta la superficie del terreno donde se localiza el objeto. La energía se refleja en este y vuelve nuevamente por la atmósfera hasta llegar a la cámara aérea cuyo sensor está representado por la emulsión fotosensible, en la cual la energía recibida es químicamente transformada, lo que produce una imagen fotográfica que es leída, analizada e interpretada para producir la información temática requerida.

En la actualidad, y gracias a la carrera espacial, es posible adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales (satélites). Se está suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea

por reflexión de la energía solar, de un haz energético artificial o emisión propia. A su vez, es necesario que ese haz energético recibido por el sensor sea transmitido a la tierra para que la señal pueda interpretarse y almacenarse (Figura 1.3). Este mismo principio es el usado en un dron, que hace las veces del satélite. En un dron se coloca el sensor y puede llevar a cabo la percepción del área sobre la que vuela de manera exacta.

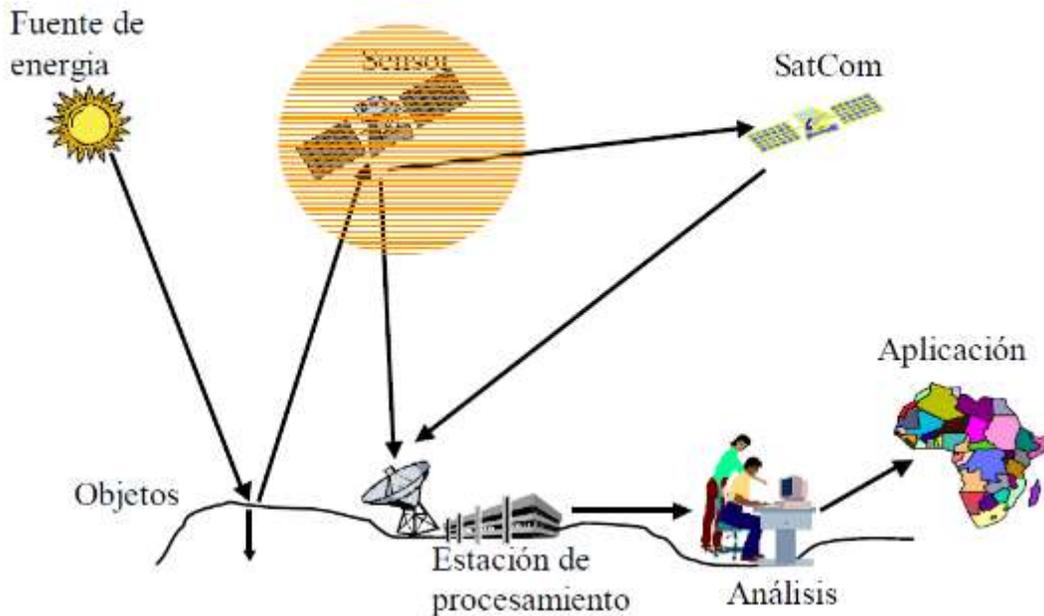


Figura 1.3 Interacción objeto mundo real de un sistema de percepción remota (Van Leeuwen y Vargas, 2006)

La percepción remota o teledetección involucra factores tales como:

- La fuente de energía o iluminación que aporte energía electromagnética al objeto de interés
- Atmósfera, ya que la energía interactúa con este elemento al viajar del sensor al objeto y viceversa
- Objeto físico, dependiendo de sus propiedades es la interacción o respuesta a la energía recibida y reflejada
- Sensor remoto, que recoge y graba la radiación electromagnética reflejada o emitida por el objeto y la atmósfera. Este instrumento se monta en una plataforma que puede ser un satélite

- e. Transmisión, recepción y procesamiento. La energía grabada por el sensor se transmite a una estación receptora, en donde los datos se procesan y son convertidos a imágenes digitales
- f. Interpretación y análisis, consiste en interpretar la imagen para extraer la información de los objetos captados
- g. Usuario final que le da una aplicación a la información extraída de las imágenes para un mejor conocimiento de los objetos de interés

De acuerdo con Martínez (2005) los objetos terrestres iluminados por la radiación solar la reflejan luego de interactuar entre sí, lo cual les confiere una particularidad del objeto conocida como firma. Esta radiación reflejada es capturada por los sensores del satélite. La radiación es filtrada y por lo tanto va siguiendo una ruta diferente. Una parte es procesada y retransmitida a estaciones receptoras terrestres, información que el ingeniero puede procesar y analizar de acuerdo con un fin específico (fuente emisora, sensor, cerebro) (Figura 1.4).

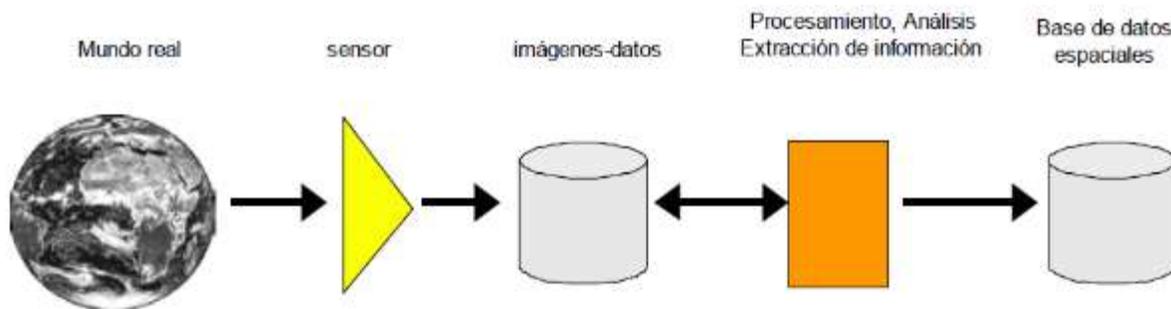


Figura 1.4 Concepción del proceso de teledetección (Van Leeuwen y Vargas, 2006)

1.1.3 El espectro electromagnético

La totalidad del espectro de energía electromagnética (EEM) es un arreglo continuo de radiación, ordenado de acuerdo con su longitud de onda (amplitud de la onda) o frecuencia (cantidad de ondas por unidad de tiempo). Se reconoce que el espectro electromagnético incluye longitudes de ondas que se extienden desde micrones hasta kilómetros. No existen instrumentos o mecanismos que puedan detectar la emisión de

energía a lo largo de todo el espectro, razón por la cual se divide en varias regiones espectrales para su medición.

Así, hay dispositivos que miden el espectro visible, pistolas de infrarrojo, ceptómetros para medir la radiación fotosintéticamente activa, entre otros. Dado el carácter continuo del espectro, los límites tampoco son fijos y pueden variar según distintos autores. Aún con equipos modernos resulta difícil emitir o recibir energía correspondiente a una determinada longitud de onda. En general, se trabaja con una pequeña banda del espectro, ya que aislar energía de una determinada frecuencia es un proceso realmente complejo. La Figura 1.5 representa esquemáticamente el espectro electromagnético con la subdivisión en regiones e indicación de longitud de onda y frecuencia.

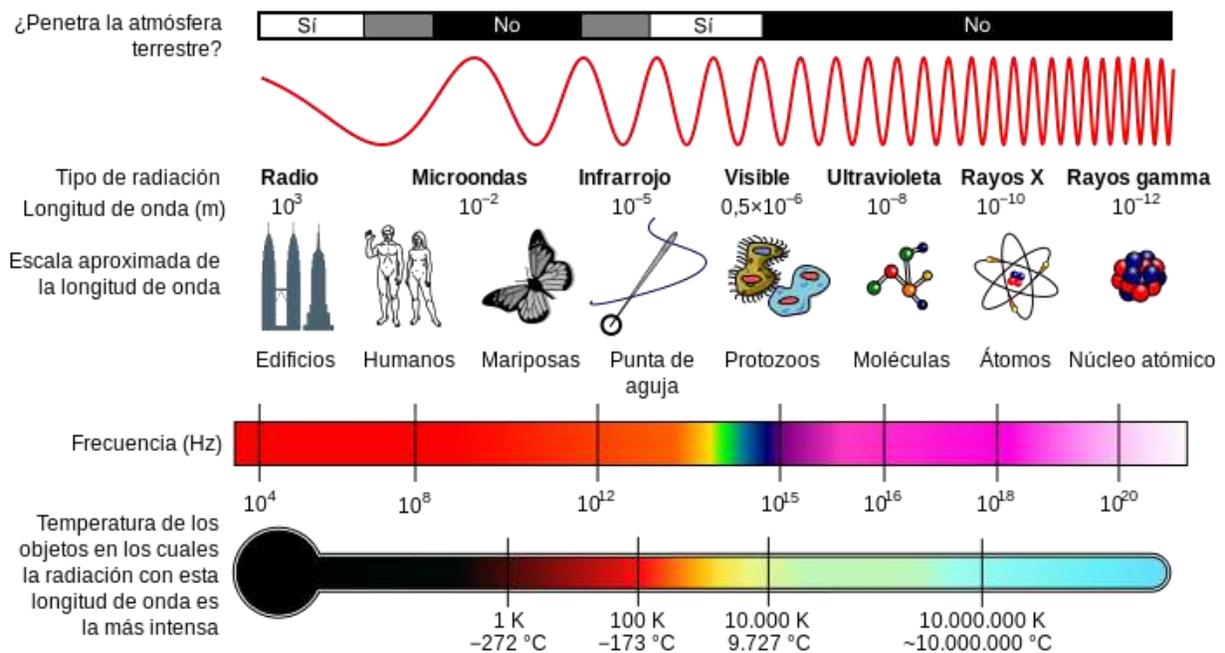


Figura 1.5 Espectro electromagnético (NASA, 2007a)

Las longitudes de onda de la infrarroja a la ultravioleta (Figura 1.6), que incluye la porción visible, es la región del espectro electromagnético más utilizada con fines de percepción remota.

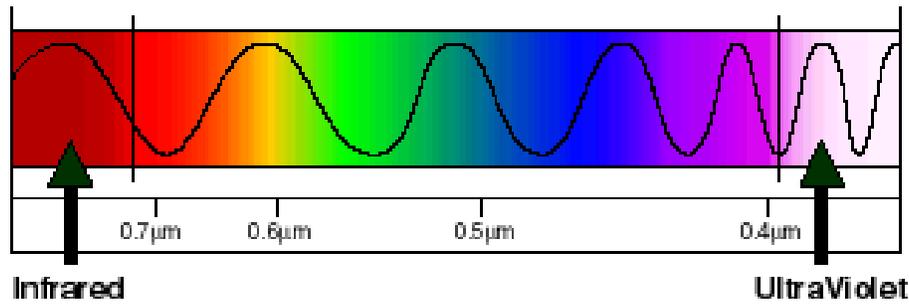


Figura 1.6 Espectro electromagnético visible (NASA, 2007b)

1.1.4 Interacción de la radiación solar y la superficie terrestre

La energía que llega a la superficie terrestre puede ser absorbida, transmitida o reflejada. En este capítulo se considera solo la energía reflejada ya que es la más sencilla de medir con los sensores remotos que actualmente están disponibles en el mercado. Si esta energía es medida en algunas regiones de onda se obtiene una determinada característica de los objetos en la superficie terrestre. La Figura 1.7 muestra las diferentes maneras en las que la energía que llega a la superficie terrestre puede reflejarse.

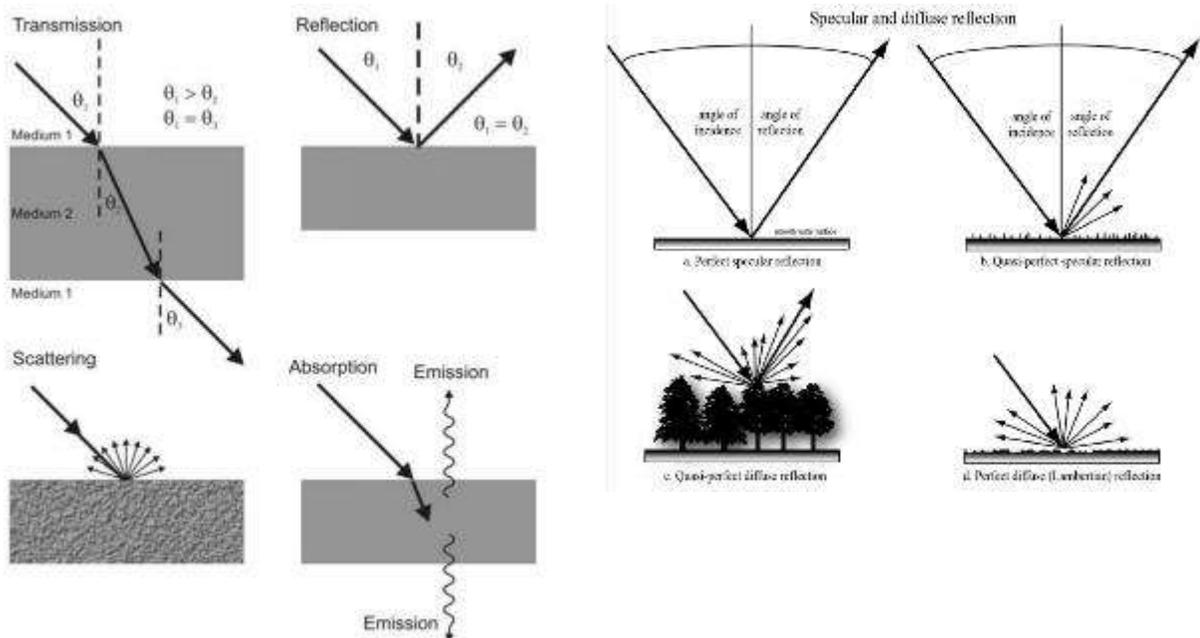


Figura 1.7 a) Mecanismos de interacción de la energía con la superficie y b) Tipos de reflectancia (Adaptado de Jensen, 2006 y Sabins, 2007)

La reflectancia con respecto a las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético facilita la identificación de características o rasgos de objetos de la superficie terrestre. Cada tipo de material (suelo, vegetación, agua, etc.), refleja la radiación incidente de distinta forma, lo que permite distinguirlo de los demás. Adicionalmente, existen diferencias en reflectancia de un mismo objeto con diferentes propiedades, por ejemplo suelo seco o húmedo, con y sin vegetación.

Por ejemplo, la reflectancia de la nieve es alta en todas las longitudes de onda, así mismo, el agua tiene una reflectancia muy baja en varias porciones del espectro ya que tiene la capacidad de absorber casi toda la radiación incidente, principalmente en las bandas del infrarrojo próximo y medio. La turbidez del agua contribuye al aumento de la reflectancia en el verde y en el infrarrojo reflejado.

La vegetación tiene una reflectancia baja en el espectro visible, pero se observan máximos en el color verde debido a la presencia de clorofila. Su reflectancia es muy alta en el infrarrojo cercano debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta región. En el infrarrojo medio hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua de la planta absorbe la energía.

En general, en las regiones visibles e infrarrojo la reflectancia tiene un comportamiento inverso a la cantidad de agua contenida en un objeto o superficie; si el contenido de humedad disminuye la reflectancia será mayor. Esta propiedad es particularmente útil para inferir el estado sanitario de las plantas, ya que la reflectancia disminuye en el infrarrojo y aumenta en el rojo y azul para el caso de vegetación enferma. De la misma manera, una planta hidratada tendrá una reflectancia contrastante con respecto a una planta bajo estrés hídrico.

En el caso del suelo, su reflectancia es baja en todo el espectro y aumenta en el infrarrojo cercano. Al igual que la vegetación, la reflectancia del suelo estará en función del contenido de humedad, de la composición química, contenido de minerales y textura. Por ejemplo, un suelo arcilloso muestra zonas de baja reflectancia en el infrarrojo cercano que corresponden a las longitudes de onda de máxima absorción del agua. En cuanto a suelos arenosos, las zonas de baja reflectancia aparecen más claramente si el contenido de agua aumenta.

1.1.5 Firmas espectrales

La curva que relaciona la intensidad de radiación de la energía reflejada o emitida por un determinado objeto en las diferentes longitudes de onda del espectro se denomina firma espectral (Figura 1.8).

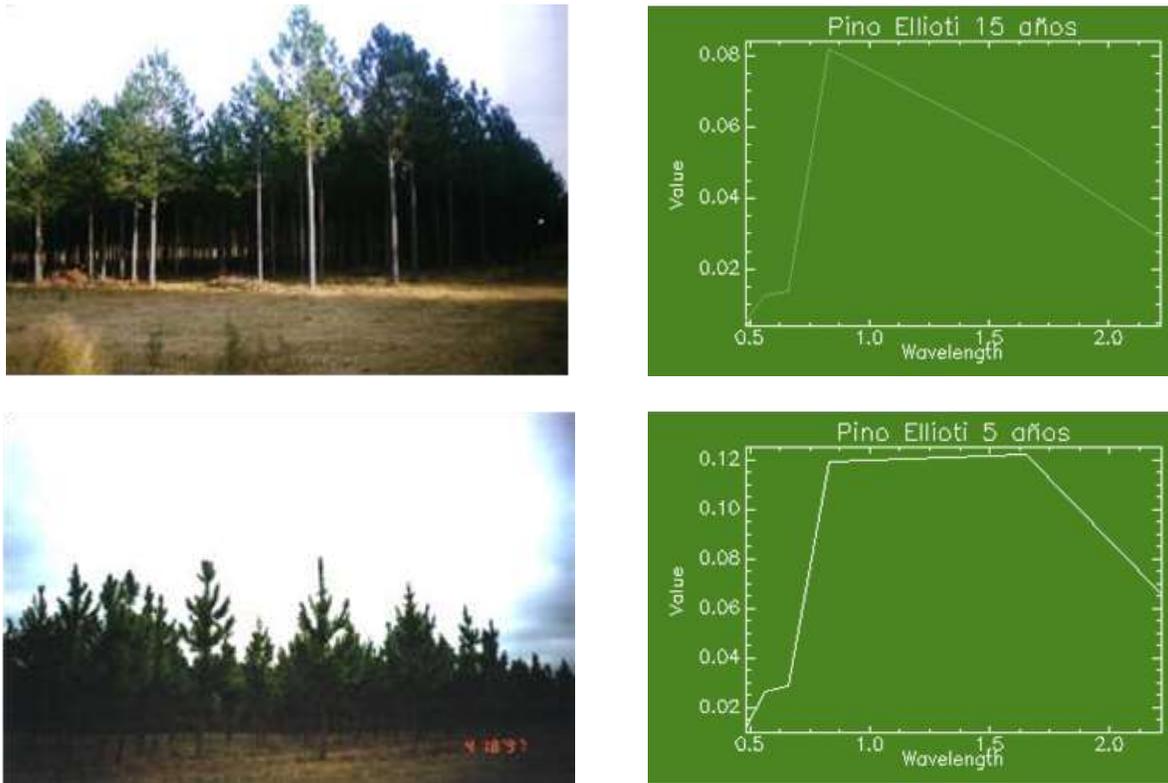


Figura 1.8 Firmas espectrales típicas de dos poblaciones de pinos a diferentes edades

Una vez adquirida la información en una imagen espectral se debe clasificar. Para llevar a cabo la discretización frecuentemente se emplean técnicas multiespectrales. Este procedimiento consiste en agrupar colores, píxeles con valores de reflectancia similares, y se separan los píxeles con características diferentes. Si en una imagen espectral se observan diferentes colores, se trata de una forma de clasificación visual. Este principio es usado por las computadoras para hacer una clasificación pixel por pixel con el fin de poder hacer una clasificación numérica.

Las técnicas de análisis multiespectral sirven para evaluar distintos tipos de alteraciones fisiológicas de los cultivos y para detectar el estrés de humedad atribuible a condiciones medioambientales dependiendo del tipo de región (templada, cálida o semiárida). Esta información se analiza conjuntamente con datos meteorológicos auxiliares sobre el terreno y del desarrollo fenológico del cultivo.

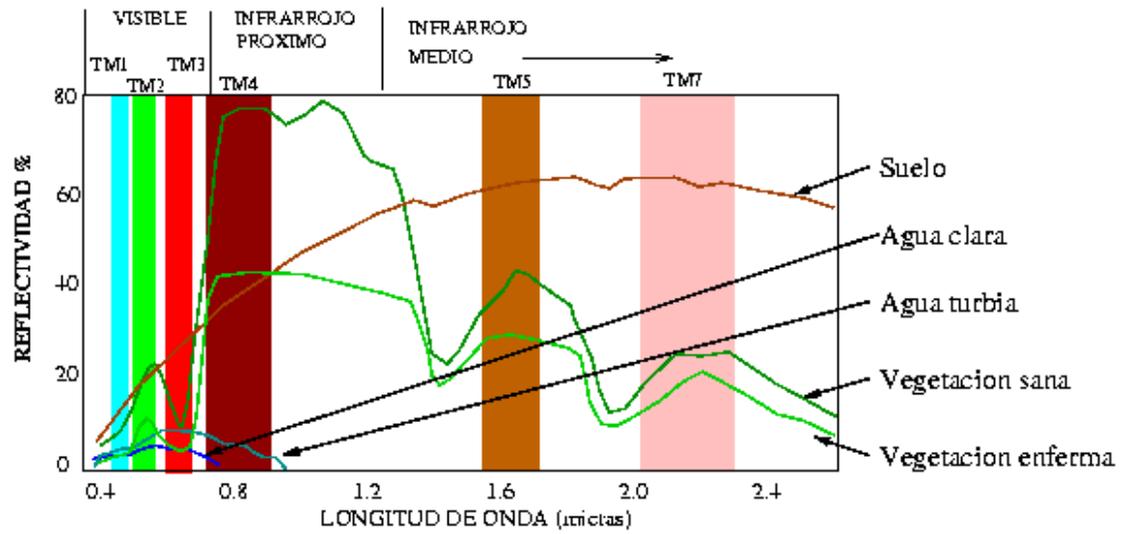


Figura 1.9 Firmas espectrales para diferentes materiales (Alonso, 2006)

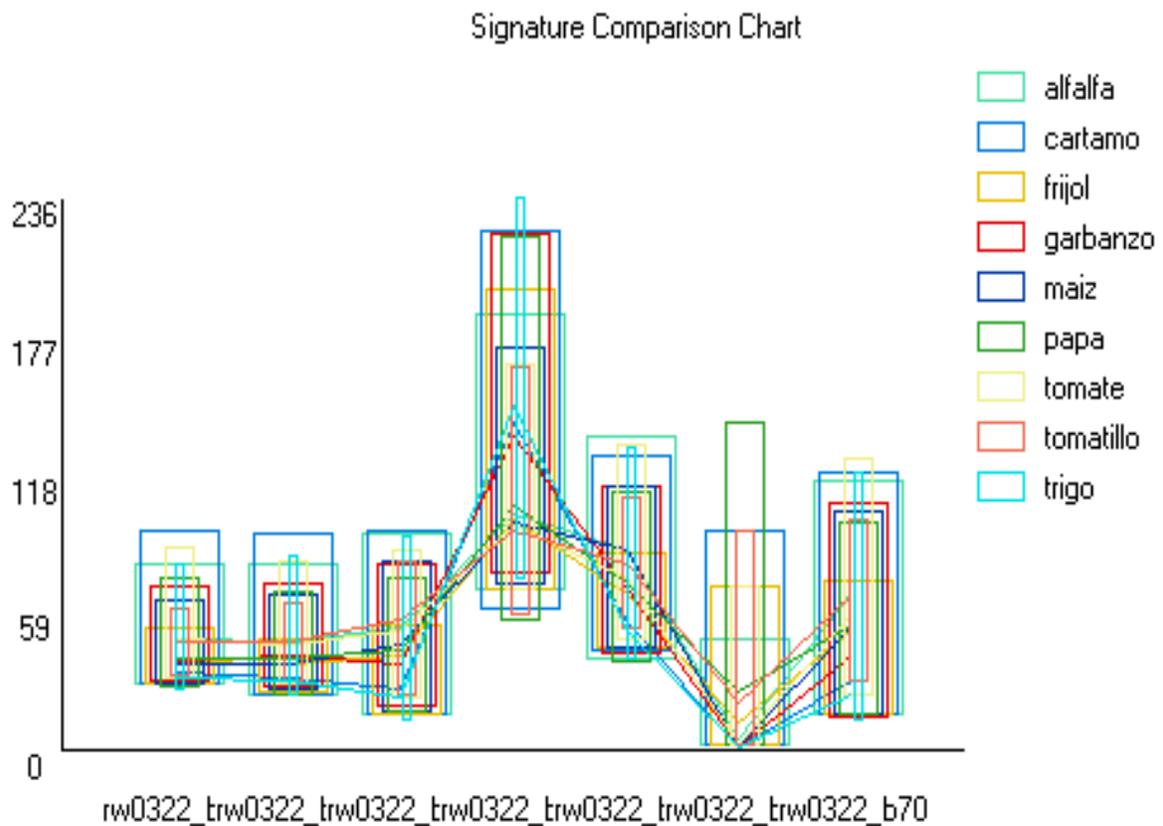


Figura 1.10 Firmas espectrales para diferentes cultivos

El proceso de clasificación mediante información multiespectral está basado en la diferenciación de píxeles no solo teniendo en cuenta sus valores en una determinada longitud de onda, sino considerando la combinación de los valores del píxel en las diferentes bandas empleadas en la clasificación. Así, se pueden distinguir cuerpos o superficies que tienen una misma respuesta espectral diferencial en algunas longitudes de onda, como se muestra en la Figura 1.10 para diferentes cultivos.

1.1.5.1 Vegetación

Todas las partes de la planta reflejan energía, con lo que se obtienen diferentes respuestas según la región del espectro electromagnético que permiten clasificar la reflectancia de acuerdo con los intervalos espectrales, como se indica a continuación:

a. Visible (0.4 – 0.7 μm)

En este rango de longitud de onda la respuesta está ligada a los pigmentos presentes y, en el caso de la vegetación, el principal pigmento que reacciona en este rango es el verde, debido a una mayor absorción relativa de la radiación que llega a las hojas y a que las cantidades de energía reflejadas y transmitidas en todas las longitudes de onda son pequeñas. La clorofila presenta dos bandas importantes de absorción en el azul y el rojo, pero alta reflectancia en el verde.

b. Infrarrojo próximo (0.7 – 1.3 μm)

Los pigmentos ya no intervienen en la respuesta espectral, es la estructura anatómica de las hojas la que controla la reflectancia en este rango. La cantidad de radiación absorbida es muy pequeña (< 10 %) mientras que la reflejada y la transmitida son grandes (45-50 %). Al variar la estructura de las hojas según el tipo y desarrollo de la planta, la reflectancia también cambia por la disposición y forma de las células, espacios intercelulares, organización en capas de las células, etcétera.

c. Infrarrojo medio (1.3 – 2.5 μm)

Las propiedades ópticas de las hojas se ven afectadas por su contenido de agua, contenido de humedad y grosor. Hay tres longitudes de onda, 1.45 μm , 1.95 μm y 2.50 μm , con intensa absorción de la radiación debido al contenido de agua. Entre estas se producen dos picos de reflectancia a 1.65 μm y 2.50 μm que, dependiendo del contenido de agua, pueden aumentar o disminuir.

El conocimiento de la fenología de la planta y de la correspondiente firma espectral en cada caso permite detectar el contenido de humedad, las enfermedades y plagas, y el estrés osmótico entre otras, de forma anticipada a sus manifestaciones visibles.

1.1.5.2 Suelo

Las características intrínsecas del suelo son directamente detectables en suelos desnudos. La reflectancia del suelo aumenta progresivamente desde el visible al infrarrojo medio. Al igual que ocurre con la vegetación y debido a la absorción del agua, se produce una disminución de respuesta a $1.45 \mu\text{m}$. En general, el suelo refleja más que la vegetación en el visible, menos en el infrarrojo próximo y más en el infrarrojo medio. De un tipo a otro de suelo la forma de las curvas de reflectancia es semejante, pero los valores pueden variar en función de diversos elementos directamente detectables tales como materia orgánica, contenido de caliza, hierro, pedregosidad superficial, color del suelo, rugosidad y humedad.

1.1.5.3 Agua

La curva de reflectancia es regularmente decreciente desde el visible hasta el infrarrojo cercano, donde el valor de la reflectancia es muy débil y cercana a cero. Si el agua está cargada con partículas en suspensión, la curva presenta la misma forma pero las reflectancias son más elevadas. Otros factores que influyen en la respuesta espectral del agua son la temperatura (en el infrarrojo térmico), la coloración y la pureza. En resumen, las firmas espectrales de vegetación, suelo y agua presentan formas diferentes, por lo que en el análisis de una imagen deberán tenerse en cuenta dichas respuestas para cada longitud de onda (o canal) del sensor.

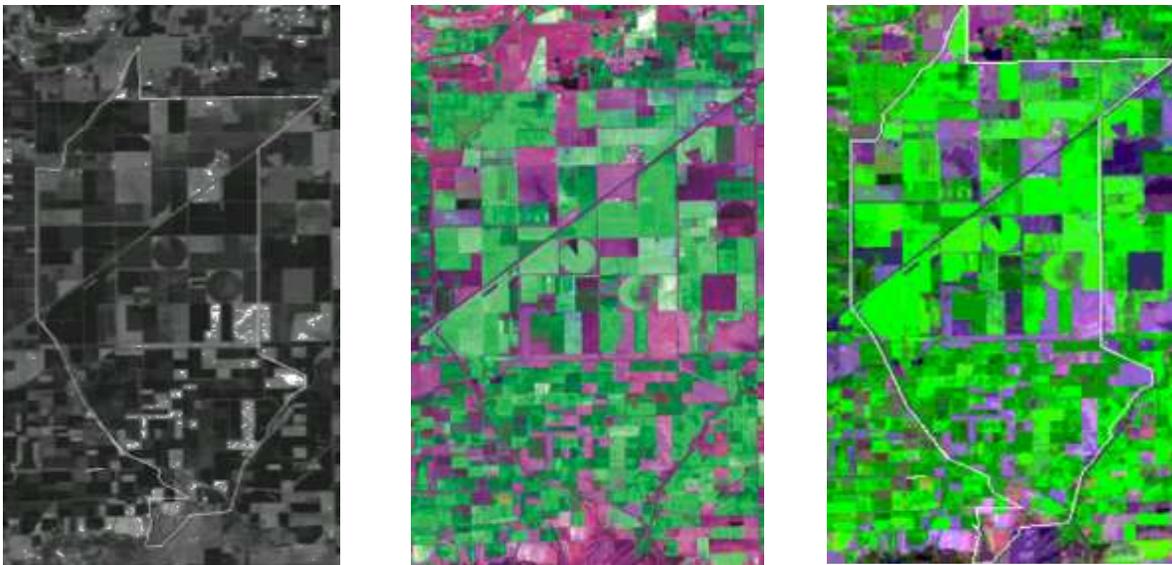


Figura 1.11 Imagen satelital LANDSAT de una zona agrícola en Sonora México. A) Banda pancromática, B) Combinación de bandas 1,2 y 3, C) Falso color a partir de las bandas 7, 3 y 1

Como ejemplo, una imagen del satélite LANDSAT en la banda de grises, con una tecnología de 8 bits, aportaría características como las que se muestran en la Figura 1.11 A; cuando se combinan las bandas 1, 2 y 3, se observa la imagen de la Figura 1.11 B, y si queremos observar la calidad del cultivo, podemos hacer una imagen en falso color con las bandas 7, 3 y 1 (Figura 1.11 C). Este último efecto visual se logra al usar filtros de color rojo, verde y azul; en este caso, donde va la azul se pone la verde, la roja en la verde, y la infrarroja cercana en la banda del rojo.

1.1.6 Introducción a los sensores remotos

1.1.6.1 Marco teórico

Existe un desarrollo tecnológico con avances significativos en torno al uso de los sensores remotos con fines civiles o ingenieriles. A raíz de los resultados obtenidos en ámbitos de seguridad o bélicos se inicia la carrera para encontrar aplicaciones con fines diferentes como el civil. El uso de plataformas aéreas fue en gran medida uno de los mayores logros para colocar un sensor y desde ahí obtener información. La placa o el film fotográfico fue el tipo de sensor remoto por excelencia. Luego se usaron los aviones o globos para aerotransportar los sensores, a partir de lo que se desarrolló la percepción remota. Con la adquisición de datos obtenidos de las fotografías que se pudieron tomar desde estas plataformas se pudo identificar el gran potencial de la fotografía.

A partir de este impulso, pronto fue posible obtener imágenes desde el espacio gracias a las misiones espaciales lanzadas principalmente por Estados Unidos entre las que destacaron Mercury, Gemini y Apolo a partir de 1961. El Apolo 9 realizó la primera experiencia de fotografía orbital multiespectral para el estudio de los recursos terrestres. Estas experiencias fueron continuadas en misiones posteriores (Skylab, Apolo-Soyuz Test Project, etc.).

Una vez iniciada la carrera espacial, el desarrollo tecnológico en temas de teledetección y percepción remota ha sido continuo. En la década de los 70 destaca el lanzamiento de un vehículo Delta, el primero de una serie de satélites ópticos especialmente destinada a monitorear recursos terrestres. Dicha serie, que se denominó ERTS (Earth Resources Technology Satellites) que posteriormente se llamaría LANDSAT, constó de 8 versiones de satélites, de los cuales aún permanecen operando el LANDSAT-5, el LANDSAT-7 y el LANDSAT 8 (o LDCM). Este último fue puesto en órbita recientemente con objetivos muy específicos de teledetección de recursos naturales.

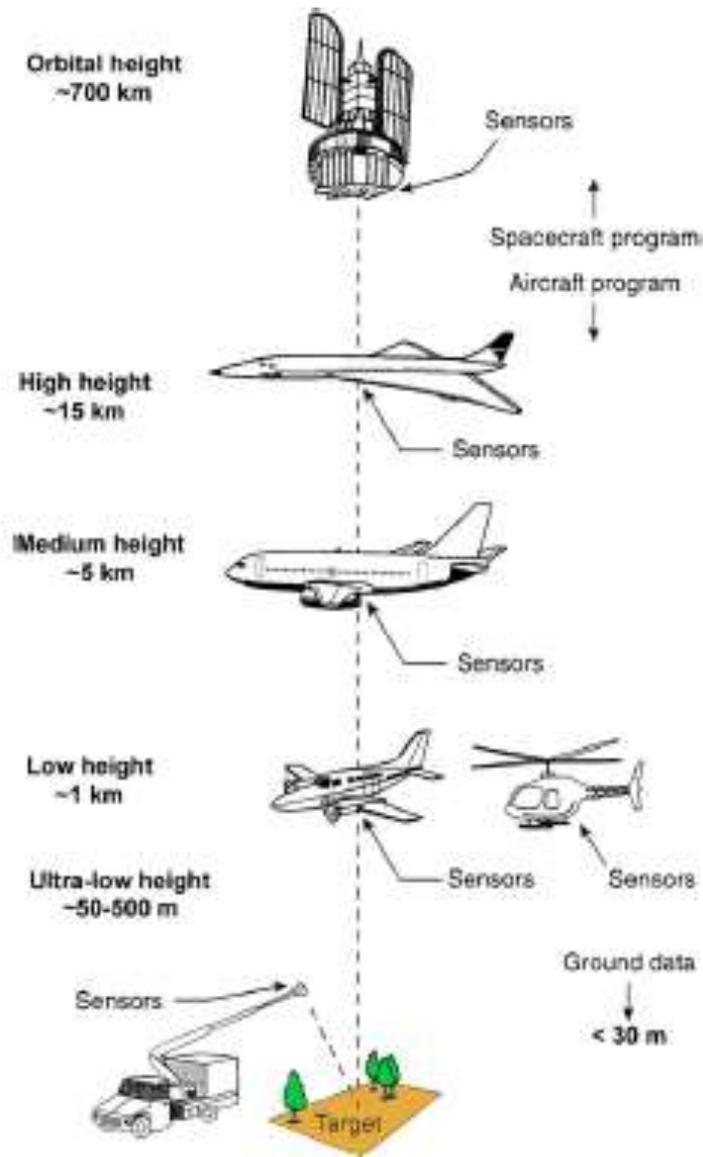


Figura 1.12 Diferentes plataformas para la observación remota (Aber *et al.*, 2010)

Independientemente de la plataforma aérea que se utiliza para llevar a cabo la teledetección y obtener la información, (Figura 1.12), sea con placas o films fotográficos o sensores electrónicos, la aplicación del uso de sensores remotos se ha incrementado en los últimos años. Las plataformas satelitales, por ejemplo, tuvieron un gran impulso a partir de 1960, cuando se comenzó a compartir su rango de aplicaciones con las tecnologías de teledetección desde plataformas satelitales (Figura 1.13).

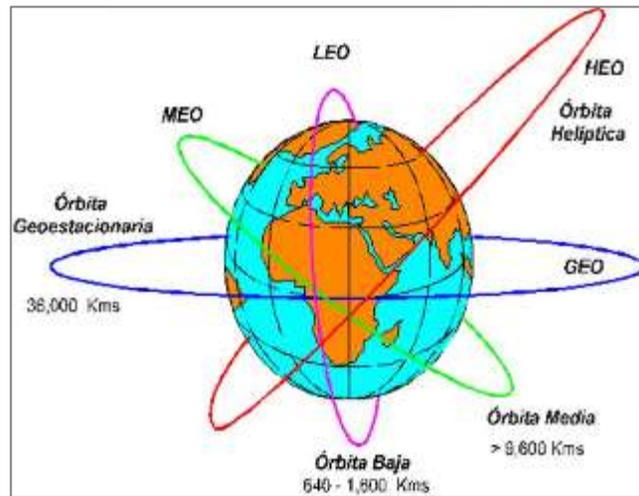


Figura 1.13 Tipos de orbitas espaciales de los satélites (Aranda, 2015)

Por otro lado, Francia, con la participación de Suecia y Bélgica, lanzó en 1986 en un vehículo Ariane el primer satélite de la serie SPOT (Satellites Pour l'Observation de la Terre). Continúan operando SPOT-2, SPOT-4, SPOT-5 y SPOT-6. Actualmente existen numerosas plataformas satelitales similares a LANDSAT y SPOT pertenecientes a diferentes países (EUA, India, Rusia, Japón, etc.). También existen otros sistemas satelitales destinados sobre todo a estudios meteorológicos y ambientales, como por ejemplo, los de la serie NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y los meteorológicos geostacionarios como los de la serie GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) y los de la serie Meteosat.

Distintos factores han condicionado el desarrollo de técnicas y dispositivos que ha llevado a la percepción remota a un uso verdaderamente comercial y, en el caso de la gestión de los recursos naturales, ha permitido tener resultados precisos. Entre los factores que permitieron dicho avance está precisamente la liberación de los satélites para usos civiles, reservados hasta entonces para uso militar. Por otro lado, en los últimos años el uso de vehículos aéreos no tripulados, llamados comúnmente drones y que llevan a bordo sensores parecidos a los montados en satélites, se ha intensificado gracias al desarrollo de la computación, la electrónica y el internet. Esta tecnología, también reservada en sus inicios al uso militar, está demostrando ser tan precisa como la utilizada en los satélites y permitirá obtener mejor información en un tiempo oportuno.

1.1.6.2 Principio de funcionamiento de los sensores remotos

Las características de la superficie terrestre se pueden visualizar gracias a que parte de la energía que llega del sol es interceptada por la atmósfera, absorbida por el suelo o reflejada. Esta última porción y la emitida por la superficie es captada por los sensores. Se denomina banda espectral a la porción de radiación electromagnética que presenta un comportamiento similar y la organización de estas bandas según la longitud de onda o frecuencia se conoce como espectro electromagnético.

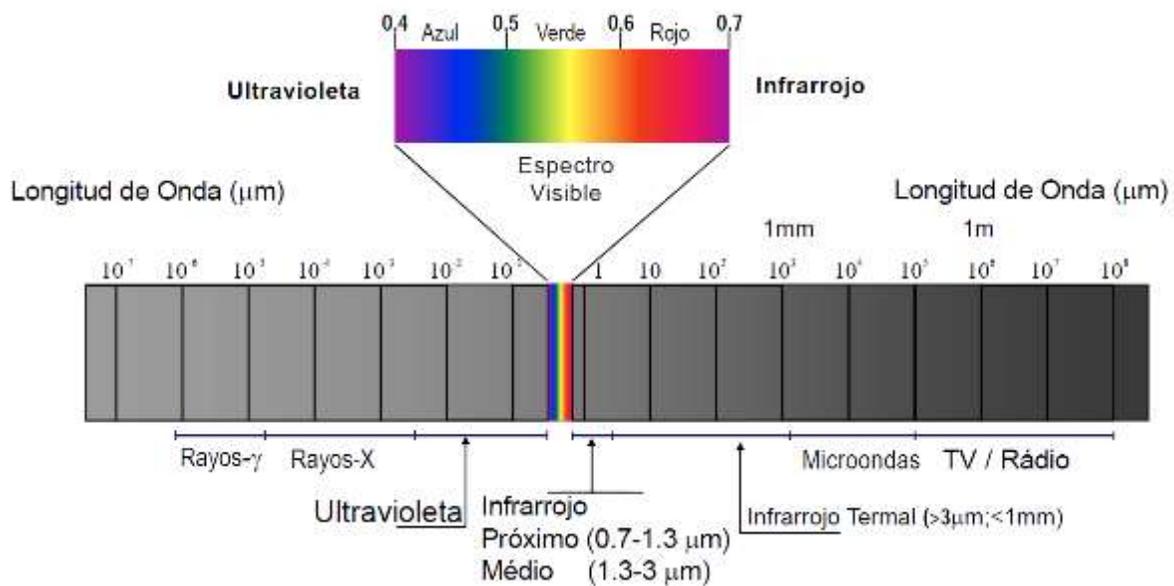


Figura 1.14 Región espectral de acuerdo con su longitud de onda (Pérez, 2007)

Hay bandas del espectro que permiten distinguir mejor cada elemento de su entorno (Figura 1.14) lo cual es particularmente útil en el reconocimiento de cada objeto sobre la superficie terrestre. En teledetección se emplean las siguientes bandas espectrales:

- Espectro visible (0.4 a 0.6 μm). Se llama así porque es la única radiación que puede percibir el ojo humano. Dentro de este rango se suelen distinguir tres bandas elementales o colores primarios, azul, verde y rojo. Este tipo de bandas se encuentra en las cámaras fotográficas visibles.
- Infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 μm). Es de gran importancia por su capacidad de discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad. En estas longitudes de

ondas es donde las moléculas orgánicas presentan vibraciones que pueden ser utilizadas para estimar su composición química.

- Infrarrojo medio (1.3 a 8 μm). Es donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. En estas longitudes de onda es posible observar los efectos del contenido de agua y de algunos compuestos inorgánicos.
- Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm). Incluye la fracción emisiva del espectro.
- Microondas (a partir de 1 mm). De gran interés por ser un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa.

1.1.6.3 Tipos de sensores y cómo clasificarlos

Los sensores remotos se pueden clasificar principalmente considerando la manera en que se recibe la energía procedente de las cubiertas, lo que genera dos grandes tipos:

1. Activos

Son sensores que pueden emitir su propio haz de energía, y que posteriormente se recoge tras su reflexión sobre la superficie objetivo. El equipo más común es el radar, que trabaja en la región de las microondas y que no se ve afectado por las condiciones climáticas (Figura 1.15). Los sensores activos poseen su propia fuente de energía, por lo tanto pueden operar en la noche y penetrar nubes.

2. Pasivos

Se limitan a recoger la energía electromagnética procedente de las cubiertas terrestres, ya sea reflejada de los rayos solares o emitida en virtud de su propia temperatura (Figura 1.16). Los sensores pasivos registran la luz reflejada y la emisión termal (termografía infrarroja-TIR).

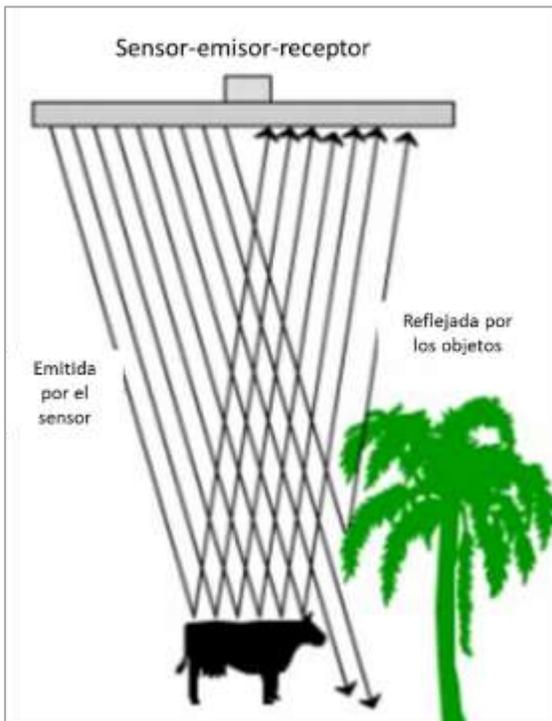


Figura 1.15 Sensores remotos activos (Baumann, 2010)

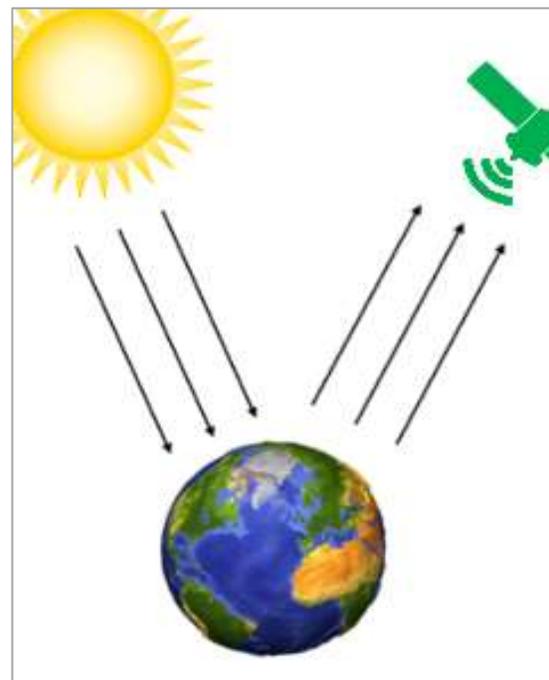
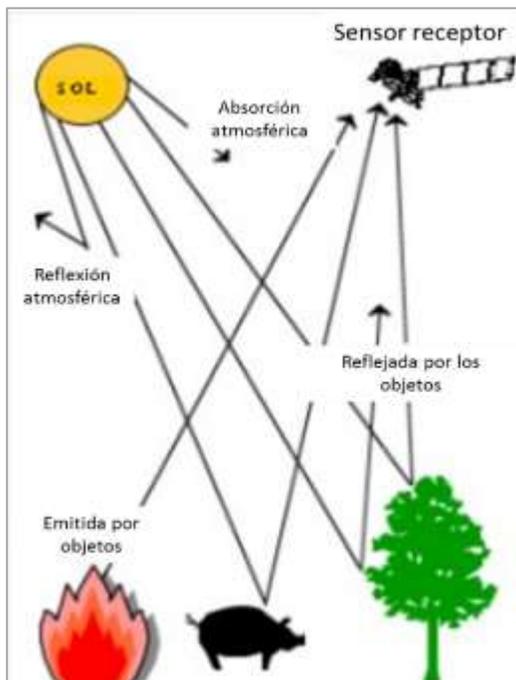


Figura 1.16 Sensores pasivos (Baumann, 2010)

1.1.7 Conceptos básicos sobre imágenes espectrales

Una imagen es la representación gráfica de un objeto producida por un aparato óptico o electrónico. La imagen digital es un tipo de imagen en la que los objetos están representados de manera bidimensional empleando bits, y está formada por un conjunto de elementos no divisibles de un mismo tamaño llamados píxeles, que dentro de un gran rectángulo definen una imagen. Cuando esta estructura incluye coordenadas geográficas para cada píxel, constituye una imagen georreferenciada. En la Figura 1.19 se presenta el esquema de la composición de una imagen digital por píxeles ubicados en la intersección de cada fila i y columna j en cada una de las bandas k correspondientes a una escena dada.

De acuerdo con Bense (2007) cada píxel en cada banda está en perfecto registro geométrico con sus equivalentes de las bandas restantes. Asociado a cada píxel existe un número (número digital, DN) que mide la radiancia promedio o brillo correspondiente al área de la escena abarcada por dicho píxel. En una base binaria de 8 bits el DN poseerá 28 valores en un rango de 0 a 255. Estos valores pueden ser modulados para producir en la pantalla de una computadora una escala de grises que va desde el negro (DN=0) hasta el blanco (DN=255). Es decir, que para cada píxel en una escena que consta de k bandas espectrales habrá asociados k niveles de grises. Estos definen un espacio espectral k dimensional en el que cada píxel es representado por un vector que constituye su firma espectral y que permitirá, a través de operaciones de clasificación basadas en algoritmos matemático-estadísticos, asignar dicho píxel a clases temáticas definidas.

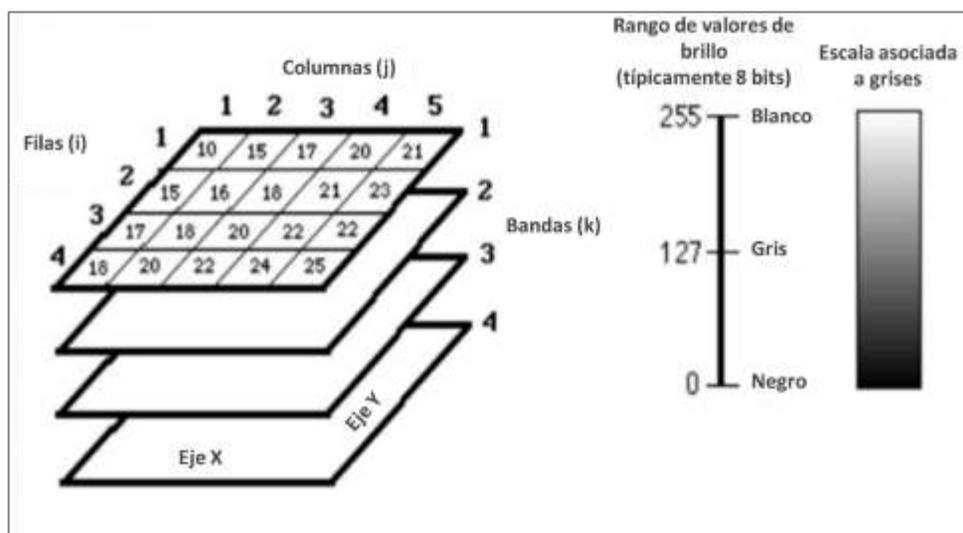


Figura 1.17 Composición de una imagen digital (Adaptado de Bense, 2007)

Las imágenes se pueden dividir en pancromáticas, multiespectrales o hiperespectrales de acuerdo con el número de bandas que las compongan. A continuación se describen de manera general estas imágenes.

1.1.7.1 Imágenes pancromáticas

Se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia de energía en una amplia parte del espectro electromagnético. Para los sensores pancromáticos más modernos, esta única banda suele abarcar la parte visible y de infrarrojo cercano del espectro. Los datos pancromáticos se representan por medio de imágenes en escala grises. En imágenes a color hay tres bandas (azul, verde y roja), con 8 bits por canal, es decir, 256 tonos de grises en cada banda; cada una muestra la reflectancia de un objeto en determinadas áreas del espectro electromagnético. De la misma forma, los satélites y los VANT colectan información en bandas espectrales que van principalmente del visible al infrarrojo.

1.1.7.2 Imágenes multiespectrales

Se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia en varias bandas; generalmente se considera que una imagen es multiespectral cuando tiene de 2 hasta 10 bandas. Por ejemplo, un conjunto de detectores puede medir energía roja reflejada dentro de la parte visible del espectro mientras que otro conjunto mide la energía del infrarrojo cercano. Es posible incluso que dos series de detectores midan la energía en dos partes diferentes de la misma longitud de onda. Estos distintos valores de reflectancia se combinan para crear imágenes de color.

1.1.7.3 Imágenes hiperespectrales

Una imagen hiperespectral es una imagen que tiene varias bandas espectrales de información a través de todo el espectro electromagnético. Las imágenes hiperespectrales normalmente están formadas por un mayor número de bandas que siempre son contiguas. Con una imagen multiespectral se pueden obtener los valores de intensidad en las longitudes de onda discretas en las que el sistema capte radiación, mientras que con una imagen hiperespectral lo que se obtiene es el espectro continuo o firma espectral del objeto de análisis representado en un continuo espacial.

Las cámaras en color tradicionales suelen proporcionar tres bandas de información por cada imagen (rojo, verde y azul), que tratan de imitar el proceso de visión del sistema humano. Sin embargo, en una imagen hiperespectral, el número de bandas empleadas para representar una escena aumenta considerablemente. Dependiendo del tipo de

sensor utilizado se puede disponer desde 11 hasta cientos de bandas por cada imagen. De hecho, ya existen algunos sensores que son capaces de proporcionar más de 1 000 bandas. Todas las bandas de una imagen hiperespectral representan una misma escena, pero cada una de ellas contiene información de un rango de longitudes de onda diferente, que pueden cubrir tanto el espectro visible como el infrarrojo. El ancho de cada banda varía y puede estar entre 5 y 10 nm según el sensor utilizado; para cada punto de la imagen se dispone de una curva espectral que proporciona una gran cantidad de información para el punto correspondiente en la escena observada.

La primera de las aplicaciones que tuvieron los sensores hiperespectrales fue la observación de la Tierra. Diversos sensores hiperespectrales han sido instalados en diferentes satélites y la enorme cantidad de información que proporcionan permite analizar cambios climáticos, monitoreo de cultivos y otras aplicaciones.

1.2 Principios de fotografía digital

1.2.1 Introducción

La palabra *cámara* proviene del griego *kamára*, que significa ‘bóveda’ o ‘habitación abovedada’. Pasó al latín como *camara* con el mismo significado, y hacia la Edad Media adquirió el significado de ‘habitación’. Más tarde acumuló diversos significados, tales como ‘cámara nupcial’, ‘cámara legislativa’, ‘cámara frigorífica’, ‘cámara fotográfica’, ‘cámara oscura’, etc. En una habitación con un orificio minúsculo, la luz que penetra por este y después de pasar por un cristal, proyecta una imagen del exterior en la pared opuesta de forma invertida. Esta técnica motivó el desarrollo de cámaras oscuras para esbozar escenas proyectadas por la cámara, que con el tiempo llegaron a ser pequeñas cajas a las que se les agregaron lentes ópticos para obtener imágenes más nítidas. La fotografía surgió de la combinación de la técnica de las cámaras oscuras combinada con el descubrimiento de sustancias sensibles a la luz.

En el año de 1816, el físico francés Nicéphore Niépce consiguió fijar una imagen mediante una cámara oscura y un procedimiento fotoquímico. Sin embargo, fue el francés Louis Jacques Mandé Daguerre el primero en realizar fotografías sobre planchas cubiertas con yoduro de plata, material sensible a la luz. Durante el siglo XIX la fotografía continuó su desarrollo hasta que en 1884 el inventor estadounidense George Eastman patentó una película que consistía en una larga tira de papel recubierta con una emulsión sensible. A partir de ahí realizó la primera película flexible y transparente en forma de tiras de nitrato de celulosa. Ya en el siglo XX se perfeccionó la tecnología para la construcción de cámaras fotográficas y las películas para la impresión de la imagen.

El cambio de utilizar una película para la impresión de la luz que capta la lente a utilizar un sensor que guarde valores numéricos para interpretar la luz que pasa por la lente, fue el paso a la tecnología de las cámaras digitales. En 1975 Kodak desarrolló la primera cámara digital con una calidad equivalente a 0.001 megapíxeles. A partir de ahí la fotografía digital ha avanzado hasta los dispositivos actuales que usan detectores CCD (Charge Coupled Devices) para convertir energía electromagnética en energía eléctrica, de esta manera se captura y almacena imágenes con una resolución de decenas de megapíxeles.

1.2.2 Clasificación de cámaras

Las cámaras se pueden clasificar de diferentes maneras, ya sea por el tamaño del sensor, de la película, del tamaño de la cámara o del grado de automatización. Sin embargo, debido a la evolución reciente de los equipos fotográficos, es más común clasificar las cámaras por el soporte en que se almacenan las imágenes (analógico y digital). Si bien tanto la cámara analógica como la cámara digital se basan en el mismo principio, (ambas conducen la luz al interior a través de un objetivo óptico), la diferencia está en que en la cámara analógica la luz se imprime sobre una película produciendo una imagen en negativo de la luz captada, a la cual luego de un proceso se imprime en positivo sobre un papel; la cámara digital, en cambio, lo hace sobre un sensor que analiza e interpreta la luz en forma numérica. Este sensor puede ser un CCD (Charged Couple Device) u otro (Figura 1.18).

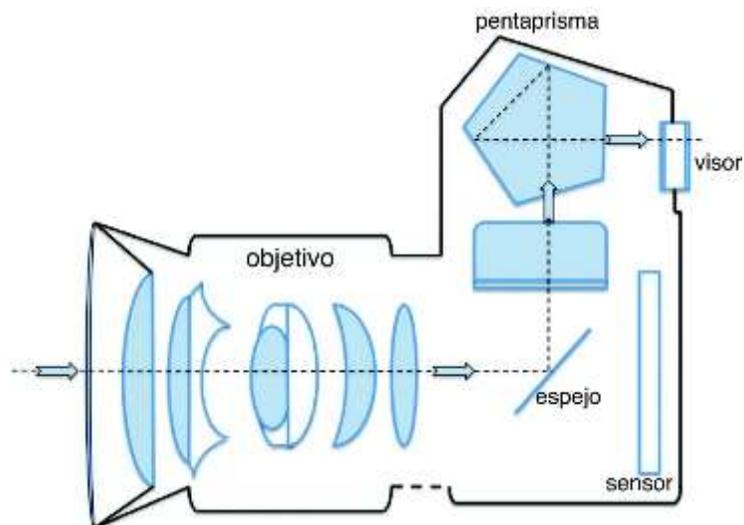


Figura 1.18 Esquema de una cámara fotográfica

Otra diferencia entre los dos tipos de cámaras es la posición del sensor que captura la imagen. En la cámara analógica la película que guarda la imagen está en el plano donde se proyecta la luz por lo que requiere de un diseño con una distancia fija entre el lente y la película. En la cámara digital el sensor se ubica en el mismo lugar donde penetra la luz y la tarjeta de memoria, que es donde se almacena la imagen, puede ubicarse en cualquier parte dentro del cuerpo de la cámara, lo que posibilita un diseño diferente según convenga a la aplicación, aunque en la práctica se mantiene la estética de las cámaras tradicionales. En una cámara analógica el negativo tiene tanto la función de captar la luz como de guardar la información. En una cámara digital el mismo proceso se lleva a cabo en tres pasos: analizar la luz, interpretarla de forma numérica y guardar la información generada en un sistema de almacenamiento.



Figura 1.19 Componentes de la cámara (Nikon, 2016)

De manera general, las cámaras están compuestas de tres partes principales: el objetivo, el cuerpo y el obturador. El objetivo consta de los lentes que permiten el paso de la luz hacia la cámara, y que la proyectan dentro del sensor para obtener la imagen fotográfica. El cuerpo es lo que soporta el lente y contiene los mecanismos para ver la imagen proyectada. Entre estos mecanismos están el visor, que puede ser independiente del objetivo (como las pantallas en las cámaras de hoy en día o el visor réflex que recibe la imagen proyectada directamente desde el objetivo a través de un espejo), el sensor

o película donde se captura la luz recibida del exterior y el medio de almacenamiento en el caso de las cámaras digitales. Finalmente, el obturador es el que captura la imagen que proyecta el lente y que contiene la fotografía que puede ser vista mediante post-procesado digital o revelado químico (Figura 1.19).

A partir de la distinción entre las cámaras analógicas y digitales se pueden encontrar diferentes tipos de cámaras de acuerdo con el tamaño y el equipamiento. Una clasificación por tamaño podría ser como la que se describe en los siguientes apartados.

1.2.2.1 Cámaras compactas

Son cámaras sencillas, llamadas también de apuntar o disparar, su objetivo no es desmontable y su sensor es pequeño. Se destinan para aplicaciones de aficionado, ya que no cuentan con muchas opciones para el control de los parámetros fotográficos. Son ligeras y aunque lleven visor, este es limitado y el encuadre se hace desde una pantalla montada en el cuerpo (ejemplo en la Figura 1.20).



Figura 1.20 Cámara compacta Sony DSC-W830B

1.2.2.2 Cámaras intermedias

También conocidas como cámaras *bridge*, son un poco más grandes que las compactas y con más funciones. El sensor es ligeramente superior al de las compactas lo que supone un aumento en la calidad y nitidez de las fotos. Con estas cámaras se pueden obtener impresiones de mayor tamaño y mejor calidad. Las lentes son de una calidad aceptable, cuentan con visor electrónico, objetivos de largo alcance y con más versatilidad generalmente no intercambiable (Figura 1.21).



Figura 1.21 Cámara intermedia Nikon Coolpix p350

1.2.2.3 Cámaras réflex

Las cámaras réflex tienen características más profesionales que permiten un control mayor sobre los parámetros fotográficos. En primer lugar, la escena a fotografiar se proyecta sobre un visor óptico, aunque ahora cuentan con pantallas donde se puede proyectar la misma imagen. Sin embargo, el visor óptico evita el error de paralaje, es decir, la desviación aparente del objeto a fotografiar, ya que el visor se encuentra montado en el mismo eje del objetivo, y la luz que entra se refleja en un espejo que llega al visor (de ahí el término réflex o reflejo). Estas cámaras cuentan con sensores de mayor capacidad, por lo tanto la nitidez y la calidad de las fotos es muy superior. Las cámaras réflex permiten el intercambio de objetivos, lo que les da una mayor versatilidad para la captura de imágenes (Figura 1.22).



Figura 1.22 Cámara réflex Sony SLT-A58K

1.2.3 Características de las cámaras fotográficas

Los equipos fotográficos han migrado cada vez más hacia el formato digital dejando atrás el formato analógico, debido a los avances y reducción de costos de los sensores y medios de almacenamiento digital. En ambos formatos el principio es el mismo, conducir la luz al interior de la cámara a través de la óptica. El cambio radica en que mientras en el formato analógico la luz se concentra en el negativo, en la cámara digital se concentra sobre un elemento capaz de analizar la luz e interpretarla en forma numérica.

Una diferencia importante consiste en el proceso de revelado e impresión. En las películas analógicas se requiere de equipo y conocimiento de técnicas especializadas. En el formato digital la imagen queda impresa en el medio de almacenamiento desde la toma de la fotografía y posteriormente solo hay que descargarla a un medio de almacenamiento externo. Aunque la resolución en el formato analógico posee una calidad en muchos sentidos superior al formato digital, los avances en la tecnología han mejorado la resolución y rapidez de captura.

Sin embargo, cada una de estas mejoras aumenta el valor del producto y su accesibilidad, aunque cada vez hay mayor acceso a los equipos digitales, lo que ha abierto la posibilidad de su uso en diferentes áreas del arte y la ingeniería. Actualmente, con un equipo básico de fotografía digital y un vehículo aéreo no tripulado, se pueden obtener productos cartográficos con una calidad comparable al procesamiento fotogramétrico tradicional, que es caro y requiere equipo y técnicos especializados para su operación.

En la fotografía intervienen diferentes elementos y técnicas para la toma de las imágenes que tienen que ver con aspectos como la iluminación, la profundidad de la toma, el tiempo de exposición, y que involucran tanto los componentes de la cámara, como la destreza del fotógrafo para operar el equipo y controlar la luz en la escena. Los equipos actuales permiten el control de estos elementos en forma automática, lo que facilita su uso en actividades además de la recreación o la fotografía artística. Sin embargo, es necesario conocer las partes del equipo y su manejo para obtener las escenas con la calidad adecuada. En el caso del uso de equipos fotográficos para la aplicación en fotogrametría, los elementos sobre los que debemos tener control son los que se describen a continuación.

1.2.3.1 Sensor

El sensor se encuentra alojado en el cuerpo de la cámara. En las cámaras analógicas es la película que captura la luz que pasa tras el lente y que se mueve para tomar una nueva fotografía. En el caso de las cámaras digitales el sensor es un elemento fijo donde se

proyecta la imagen que es guardada en el dispositivo de almacenamiento. Nos concentraremos en el sensor de la cámara digital. El sensor es un chip compuesto de celdas que son sensibles a la luz, cada celda en el sensor corresponde a un pixel de resolución. De acuerdo con la tecnología utilizada los sensores pueden ser CCD (Charged Coupled Device), que es el más común en las cámaras, o CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Ambos funcionan de manera similar en cuanto a que captan la luz que viene del objetivo y lo traducen a un valor numérico. La diferencia entre ellos es que los sensores CCD son más sensibles a la luz, por lo que crean imágenes de mayor calidad, pero su consumo de energía es alto comparado con los sensores CMOS (Figura 1.23 y 1.24).

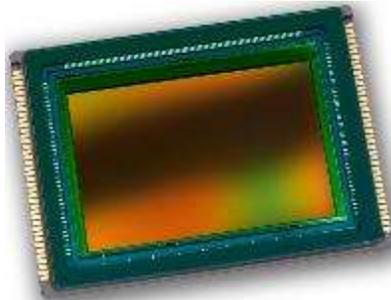


Figura 1.23 Sensor CMOS (Fran Lora, 2014)

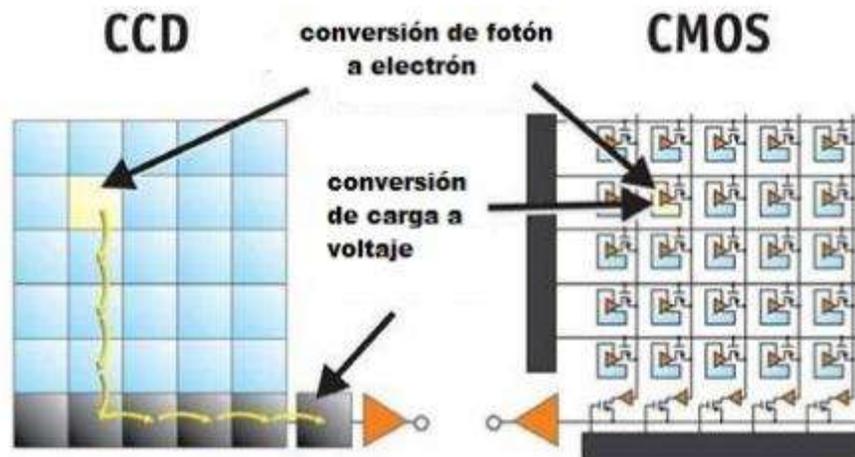


Figura 1.24 Sensor CMOS vs. CCD (Meroli, 2012)

Los sensores están contruidos por millones de pequeños conductores de silicio que captan los fotones (elementos que componen la luz); mientras más intensidad de luz pase por el lente mayor carga eléctrica será generada. Los fotones desprenden electrones dentro del sensor, los cuales son transformados en un valor numérico que crea un pixel de la imagen. Esto ocurre en toda la superficie del sensor y los valores ya traducidos a formato binario se guardan en el medio de almacenamiento de la cámara. La resolución de los sensores se mide en megapíxeles y el tamaño depende de la resolución de la imagen que genera el sensor, es decir, el número de píxeles que tenga a lo largo y ancho. La resolución es la densidad de puntos o píxeles que tiene una imagen, es decir, la cantidad de píxeles que hay en una determinada medida de longitud (habitualmente en pulgadas o centímetros). Si se conocen las dimensiones de la imagen (sus líneas y columnas) se pueden calcular la cantidad de píxeles de la misma.

i. Tamaño del sensor

La calidad de la imagen no depende completamente de la resolución (la cantidad de píxeles de la imagen), sino también de la óptica, es decir, de la calidad del lente y el tamaño del sensor. El tamaño estándar para las cámaras réflex es de 35 mm de ancho (Full Frame), y a partir de este valor hay diferentes tipos de sensores que son una fracción de este estándar, conocidos como formatos APS, en los que se produce una pérdida o recorte en el campo de visión, lo que afecta la distancia focal o el ángulo de visión (Figura 1.25).

En los sensores de menor tamaño hay un factor de recorte respecto al tamaño del sensor Full Frame. Así, cuando se dice que una cámara tiene un factor de recorte de 1.5x se debe a que el tamaño del sensor es 1.5 veces inferior al del sensor de referencia. Esto afecta la distancia focal del objetivo, ya que por ejemplo el resultado de sacar una fotografía con un objetivo focal de 100 mm en una cámara con un factor de recorte de 1.5x es menor al campo de visión que se hubiera obtenido con una cámara con un sensor Full Frame, y sería el equivalente a un objetivo de 150 mm. En la Tabla 1.1 se muestran algunos ejemplos de tamaños de sensor y su relación con el factor de recorte.

Tabla 1.1 Factor de recorte de acuerdo con el tamaño del sensor

| Tamaño del sensor | Factor de recorte |
|-------------------------------|-------------------|
| 35 mm full frame (36 x 24 mm) | x1 |
| APS-C (23.6 x 15.7 mm) | x1.5 |
| Micro 4/3 (17.3 x 13 mm) | x2 |

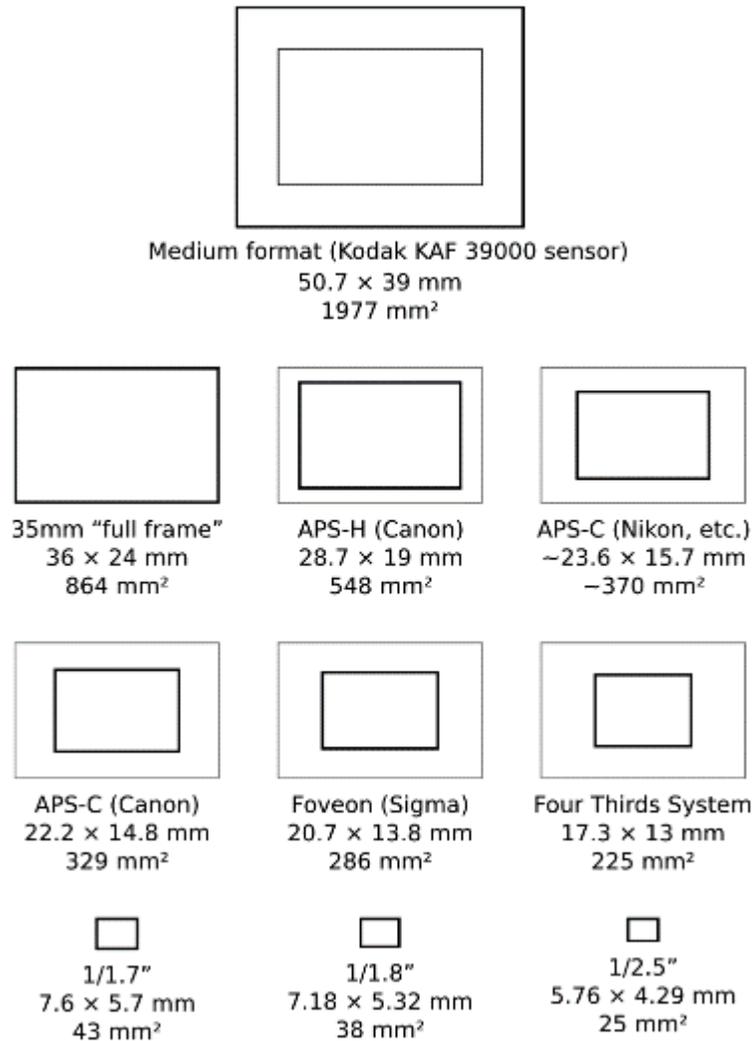


Figura 1.25 Tamaño de sensores

1.2.3.2 Distancia focal

La distancia focal es el espacio entre el plano de la imagen y el plano de la óptica; se mide en milímetros y varía en función del tipo de cámara. Así, mientras en una réflex de 35 mm está en rangos de 28 a 85 mm, para las ópticas más comunes en una compacta digital se pueden encontrar valores habituales de entre 7 y 32 mm. El plano de la imagen es la superficie del interior de la cámara donde se concentra la luz que entra por el objetivo y bien puede ser el sensor en las cámaras digitales o la película en las cámaras analógicas. La distancia focal va desde el plano hasta el diafragma del lente. La distancia

focal se relaciona con el ángulo de visión en una relación inversa. Un valor bajo implica un ángulo de visión amplio; uno alto, un ángulo de visión reducido (Figura 1.26).

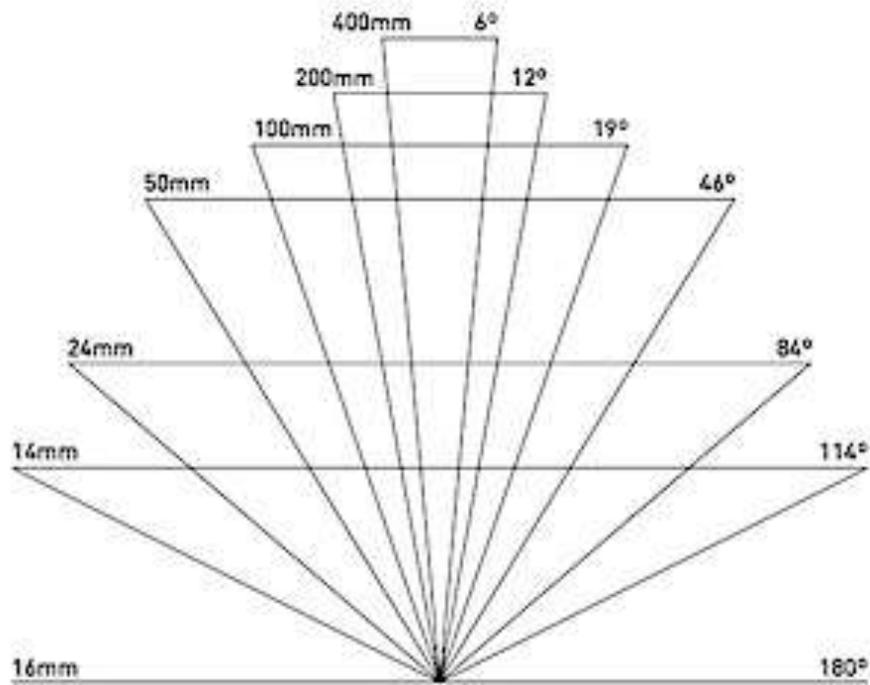


Figura 1.26 Relación entre distancia focal y ángulo de visión

Al modificar la distancia focal, el campo de visión cambia en una relación inversa, es decir, al aumentarla se acerca y al reducirla se aleja, lo que modifica la proporción que los objetos ocupan en la foto; ocurre lo mismo con el fondo. De este modo, cuando el zoom se acerca a un objeto, también se acerca al fondo. Los objetivos pueden ser de distancia focal fija o variable, y dependiendo de su valor, se pueden clasificar de la siguiente forma:

- De distancia focal corta (ojo de pez). Proporcionan un campo de visión amplio que puede llegar hasta los 180°. Las imágenes están claramente deformadas y presentan una curvatura de líneas muy visible. Los valores para este tipo de lentes llegan hasta los 28 mm y en valores inferiores a 18 mm.
- De distancia focal normal. Proporcionan un ángulo de visión similar al de la vista humana. La imagen tiene poca deformación. El objetivo normal para este tipo de distancia es el de 50 mm.

- De distancia focal larga. Son objetivos con distancias focales muy altas, a partir de los 85 mm. Permiten cerrar el plano y hacer acercamientos sin tener que acercarse al objeto a fotografiar.

1.2.3.3 Objetivo

El objetivo contiene las lentes que permiten el paso de la luz hacia la cámara proyectándolas en su interior para conformar la imagen fotográfica. Los objetivos se identifican por su distancia focal, que es la distancia en milímetros entre el plano focal y el centro óptico del lente cuando se encuentra enfocado al infinito. Se pueden encontrar lentes con longitud focal fija y lentes de longitud focal variable (Figura 1.27).

Un objetivo con un buen lente es fundamental para obtener una buena calidad en las fotos. Una lente simple puede cumplir con la función de capturar la luz, pero no con un nivel de suficiente calidad, ya que puede presentar aberraciones en la imagen. Cámaras mejor equipadas cuentan con objetivos con lentes que corrigen las aberraciones de lentes más simples.



Figura 1.27 Objetivo (Manu, 2013)

En los objetivos se pueden configurar algunas características dependiendo del tipo de fotografía a realizar. Por ejemplo, se puede configurar la apertura del diafragma y del obturador (que en conjunto controlan el tiempo y el grado de apertura para dejar pasar la luz), la distancia focal que da el ángulo de apertura de la imagen y por lo tanto el cubrimiento de la misma, los objetivos que pueden tener una distancia focal fija o variable y la distancia mínima de enfoque (distancia a partir de la cual se puede enfocar y debajo de la cual la imagen sería borrosa). El enfoque puede ser automático o manual.

1.2.3.4 Diafragma y obturador

El diafragma es la parte del objetivo que limita el rayo de luz que entra en la cámara. Consiste en un mecanismo que abre en mayor o menor medida el objetivo, permitiendo el menor o mayor paso de luz. El grado de apertura del diafragma es lo que se llama apertura de diafragma y se mide en número de f . El salto de un valor f al siguiente se denomina paso. Los valores comunes de f se muestran en la Figura 1.28. Menores valores de f suponen un diafragma abierto completamente y a medida que avanza el diafragma se cierra. Cada valor corresponde al doble de luz del denominador que da lugar al número f .

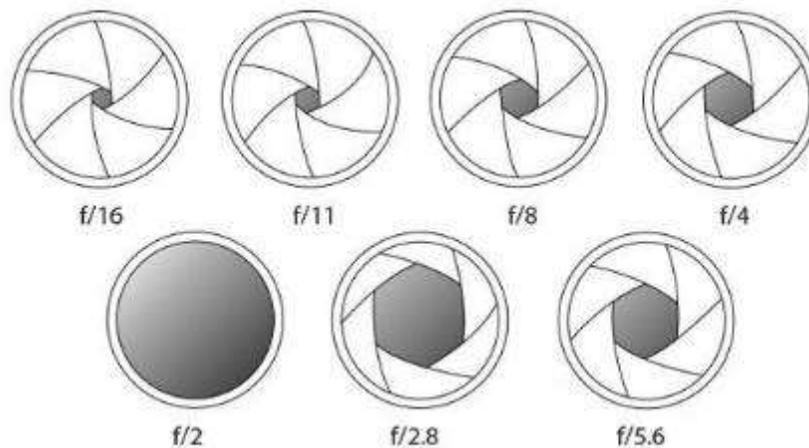


Figura 1.28 Valores de f (Alicea, 2010)

Cada objetivo tiene una apertura de diafragma máxima. Si son objetivos con distancia focal fija la apertura máxima es fija. En los lentes con zoom la apertura máxima puede cambiar según varía la distancia focal o puede ser fija, dependiendo del diseño del objetivo. La luminosidad o la cantidad de luz que puede dejar pasar el diafragma es uno de los factores que determina su calidad. Un objetivo con buena luminosidad tiene la ventaja de que los objetos serán más fáciles de fotografiar porque se pueden tomar fotografías con menos luz.

El otro mecanismo que regula el paso de la luz desde el objetivo al sensor o la película es el obturador. La correcta operación de ambos permite la exposición correcta de la imagen y determina su calidad. El mecanismo del obturador deja pasar hacia el sensor la cantidad de luz que permite el diafragma durante un determinado tiempo. En las

cámaras analógicas el obturador es una cortina que se abre y se cierra para dejar pasar la luz, mientras que en las digitales el tiempo de exposición es controlado de manera electrónica, y la exposición depende del tiempo en que se activan las celdas electrónicas para captar la luz que entra a la cámara. Los tiempos de exposición en las cámaras varían desde segundos a milésimas de segundos. Los tiempos más usuales se muestran en la Figura 1.29.



Figura 1.29 Valores de obturación (Gutiérrez, 2015)

El tiempo de obturación se debe seleccionar dependiendo de la escena y de la cantidad de luz. Escenas con muy poca luz requieren de tiempos de exposición de segundos; escenas muy rápidas, como objetos en movimiento, precisan que el obturador cierre muy rápido para que la escena no salga borrosa, así que se requieren tiempos de exposición de milisegundos.

1.2.4 Fotografía e imágenes digitales

La información digital es toda aquella representada por valores numéricos discretos basados en un sistema binario. Comparada con la información en forma analógica, la digital es una representación fiel de la información original sin ninguna degradación de la misma en copias subsecuentes. Por el contrario, y debido a que el número de datos que la compone es infinito, es imposible reproducir fielmente la información analógica, por lo que en copias sucesivas se va deteriorando o perdiendo parte de la misma.

En una fotografía digital la imagen reproduce con tonos continuos la realidad. Si se hace un acercamiento a la misma, se pueden encontrar los elementos que la componen, los píxeles, derivados de un análisis numérico de la luz que hace el sensor al captar la escena. En digital, los archivos de imágenes se pueden almacenar físicamente en dos formatos:

- a. Imágenes vectoriales
- b. Imágenes de mapas de bits

Las imágenes de tipo vectorial se representan con trazos geométricos controlados por cálculos y fórmulas matemáticas. A partir de un punto o puntos de referencia en la imagen, y utilizando como formas básicas una línea o puntos, se construye el resto de la escena. En estos archivos no se almacena cada punto de la imagen, sino la descripción matemática de las líneas y curvas de la imagen, definida por las posiciones de los puntos y la función que describe el camino entre los mismos; a estos trazos se les llama vectores. Su principal ventaja consiste en que el archivo que se genera es muy compacto, ya que solo almacena los elementos básicos para reconstruir imagen y las propiedades como ancho de línea o color de relleno se asocian a las formas básicas.

Por otro lado, la calidad de las imágenes vectoriales no se degrada al aumentar de tamaño, ya que el dibujo se reconstruye a partir de expresiones matemáticas que reproducen las formas geométricas de la imagen, recalculando la posición y longitud de cada uno de los elementos. Sin embargo, un archivo digital en forma vectorial no es muy eficaz para representar una escena fotográfica, por lo que normalmente las imágenes vectoriales son resultado del análisis de una imagen fotográfica donde se resaltan ciertos rasgos de la escena.

Las imágenes de mapas de bits están compuestas por pequeños puntos que contienen los valores que representan una característica de la imagen. En el caso de los mapas de bits obtenidos de un equipo fotográfico, se refiere a la luz captada por el sensor (Figura 1.30). El conjunto de puntos constituyen la imagen y cada uno de estos elementos se denomina pixel (*picture element*). Cada pixel posee tres características:

1. Su forma cuadrada
2. Su posición relativa al resto de los pixeles dentro de un mapa de bits
3. El valor que representa el color dentro de la composición

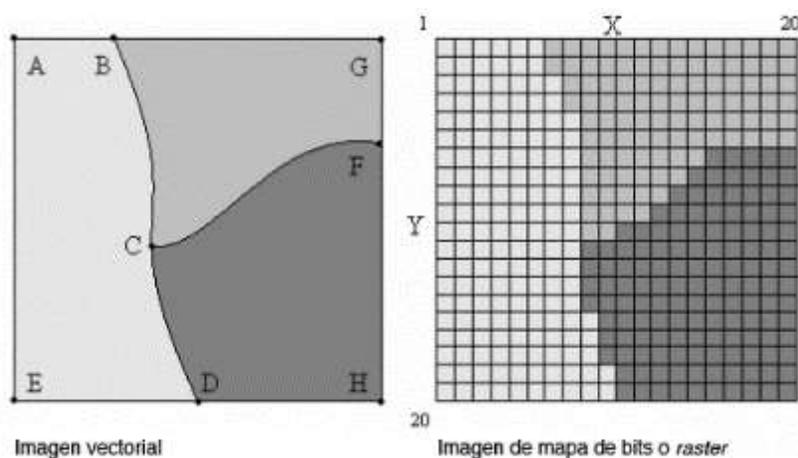


Figura 1.30 Imagen vectorial contra mapa de bits (Martínez,2012)

Sus principales inconvenientes respecto a una imagen almacenada en forma vectorial, es que requieren más espacio de almacenamiento, ya que se guarda un valor para cada punto de la matriz de la imagen y al ampliar su tamaño, se empieza a deformar porque los píxeles conservan su valor y su resolución espacial, es decir, el tamaño que representan en la realidad.

1.2.4.1 Profundidad de color en archivos digitales de mapa de bits

La profundidad de color en la imagen se refiere a la cantidad de colores diferentes que puede almacenarse por cada píxel de la imagen. Es decir, para cada píxel de la imagen se reserva un espacio para almacenar el código del color. A mayor profundidad de color será necesario reservar mayor espacio ya que la representación de la imagen tendrá mayor detalle. El espacio reservado para cada píxel se expresa en bits, la unidad básica de almacenamiento en los equipos de cómputo, y la cantidad a reservar se da en números de base 2. Así, se puede usar desde 1 bit por píxel para representar dos tonos (2^1), usualmente imágenes en blanco y negro, hasta 24 bits por píxel (2^{24}), que representaría aproximadamente 16 millones de colores (Tabla 1.2).

Tabla 1.2 Bits de almacenamiento

| Colores por píxel | Bits por píxel | Fórmula |
|-------------------|----------------|-----------------|
| 2 | 1 | 2 ¹ |
| 4 | 2 | 2 ² |
| 16 | 4 | 2 ⁴ |
| 256 | 8 | 2 ⁸ |
| 4 096 | 12 | 2 ¹² |
| 32 768 | 15 | 2 ¹⁵ |
| 65 536 | 16 | 2 ¹⁶ |
| 16 777 216 | 24 | 2 ²⁴ |

1.2.4.2 Representación del color en la imagen

Las imágenes capturadas por el sensor se pueden almacenar en tonos de gris o imágenes en color. Las imágenes en color se forman a partir de la combinación de los colores básicos combinados en tres capas, una para el rojo, otra para el verde y una más para el azul. A estas imágenes se les llama RGB (Figura 1.31), código estándar desarrollado

por la Comisión Internacional de Iluminación y que consiste en la representación del espacio de color a partir de tres rayos monocromáticos, con los siguientes colores y sus longitudes de onda

- Rojo, 700 nm
- Verde, 546.1 nm
- Azul 435.8 nm

Esto corresponde a la codificación de los colores en un equipo de cómputo para su visualización en la pantalla o en forma impresa. Cada uno de estos colores básicos se codifican en un byte (2^8) por lo que pueden representar 256 tonalidades para cada uno de ellos, es decir, para cada pixel hay un espacio de almacenamiento de 24 bits, por lo que en teoría se pueden representar 16.7 millones de tonos de color.

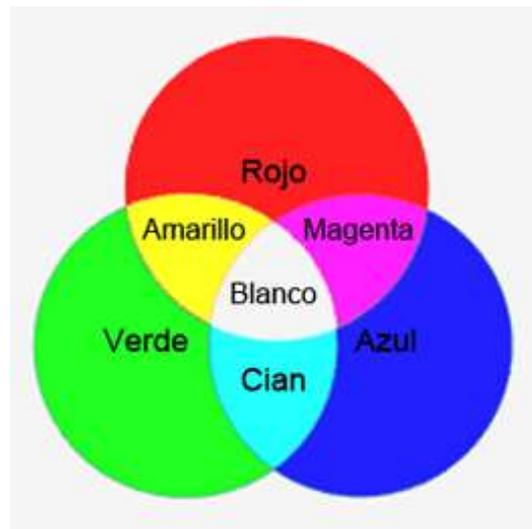


Figura 1.31 Representación de RGB

1.2.4.3 Resolución de la imagen

La resolución de una imagen está definida por la cantidad de píxeles o su densidad y que dan una idea del nivel de detalle de la misma. Su tamaño en píxeles se obtiene del producto de la cantidad a lo largo y ancho de la imagen, mientras que la densidad se determina por la cantidad de píxeles en una determinada medida de longitud, ya sea pulgadas o centímetros. Cuanta más alta sea la resolución, más píxeles contiene una imagen y por lo tanto su tamaño en almacenamiento es mayor. Imágenes con alta resolución permiten tener un mayor detalle de los elementos que componen la escena, aunque la calidad tiene que ver también con la densidad de la misma.

La resolución puede estar dada por su tamaño o por su densidad. La resolución por tamaño se expresa mediante los píxeles de ancho por los píxeles de alto que determinan el área rectangular que ocupa la imagen, mientras que la resolución por densidad se expresa en dpi (dots per inch o puntos por pulgada), es decir, cuántos píxeles hay en un largo de pulgada.

Principios de cartografía,
fotogrametría y sistemas de
posicionamiento por satélite

2

Capítulo 2

PRINCIPIOS DE CARTOGRAFÍA, FOTOGRAMETRÍA Y SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO POR SATÉLITE

Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, Braulio David Robles Rubio, Jorge Flores Velázquez y Alberto González Sánchez

2.1 Cartografía y geodesia

2.1.1 Introducción a la cartografía

Desde el punto de vista del manejo de los recursos naturales, la posibilidad de captar información en mapas temáticos de la superficie terrestre, sus rasgos y composición ha sido sin duda uno de los mayores avances. Cartas topográficas, orográficas, climáticas, etc., constituyen la base para la gestión y toma de decisiones en el ámbito agrícola. La idea surge con la intención de tener una visión de los paisajes terrestres que sobrepasara la limitada perspectiva de la visión humana, y poder plasmarlo en una forma de registro la cual pueda ser manipulada, y que se ha convertido en un instrumento clave en un gran número de áreas de estudio.

Los rasgos de una carta, además de los de la superficie terrestre, son características finas que han hecho de esta técnica una herramienta robusta de análisis y planeación. Además, contempla sistemas de clasificación de tal suerte que sea fácil su localización y guarde proporcionalidad con el resto de ellas. Canevá geográfico, ortogonal, escala y clave, son solo algunas de las características que la cartografía ha aportado para hacer de su uso, un arte. Con apoyo en imágenes de satélite, fotografía aérea y drones, actualmente es posible generar cartas temáticas que representan con gran exactitud los rasgos de la superficie terrestre, pero más aún, con una georreferenciación tal que pueden ser ubicados en cualquier parte del globo terráqueo, con base en un sistema de coordenadas.

2.1.2 Conceptos básicos de cartografía

2.1.2.1 Cartografía

La cartografía se refiere a un conjunto de técnicas, arte y ciencia con el objetivo de crear mapas temáticos o cartas, su interpretación y manejo de información relacionada. Un

aspecto que resalta de esta técnica es la posición de los rasgos a una cierta escala, pero sobre todo en un sistema de coordenadas tal que puedan ser colocadas de manera ordenada en un plano real sobre la superficie terrestre, en específico las zonas agrícolas. Conformar información precisa sobre el volumen y composición de la geografía, ubicación de zonas de interés y clasificación de esas zonas. Para interpretar la superficie de la tierra se usan técnicas como mapas, esferas o sistemas de georreferenciación. Con la tecnología satelital se facilita la confección de mapas. El uso de los satélites permite a los ingenieros diseñar, operar y manejar estructuras como puentes, sistemas de riego y zonas agrícolas con gran exactitud. Este mismo principio puede aplicarse con productos generados a partir de un DRON.

2.1.2.2 Geoide, elipsoide y datum

Uno de los principales logros de la georreferenciación ha sido generar su propio sistema. En la actualidad es muy fácil trazar una ruta de viaje para todos los sistemas de transporte, pero no siempre fue así. Por ejemplo, solo se pudo trazar una ruta en mar abierto hasta que se dispuso de cartas de navegación. Durante mucho tiempo fue un obstáculo poder alejarse de las costas por completo y aventurarse en el océano, hasta que se pudo obtener una longitud geográfica. Para poder hablar en la actualidad de una carta topográfica con sus tres coordenadas geográficas se han tenido que desarrollar una serie de conceptos y convencionalismos que permitan tener un punto de georreferenciación, como el geoide, el elipsoide y el datum. Los primeros dos conceptos establecen una línea de referencia y el tercero, un punto. Referencias tales como altura sobre el nivel del mar, GRS80 o NAD 27 tienen que ver con esos tres términos.

i. Geoide

Un geoide es la aproximación de la superficie terrestre en una línea continua que representa el promedio de montañas, cañones y en general los accidentes topográficos del planeta. En consecuencia un elipsoide se refiere al modelo que mejor aproxime el geoide y puede ser convencional para ciertas regiones; uno de los más usados es el de Clark (1866). En función de un elipsoide es que se crean también puntos fijos, que son tomados como base para la georreferenciación. En el caso de México uno de los más usados es el Datum del Norte América de 1983 (NAD 83), que fue colocado con base en el elipsoide GRS 80 (Geodetic Reference System de 1980).

ii. Elipsoide

Para poder georreferenciar un rasgo de la superficie y relacionarlo con su entorno será necesario usar sistemas universales de localización geográfica. Una de las técnicas a las que se recurrió fue suavizar la superficie de la tierra en una línea continua, a la que se

denominó geoide. Los modelos geoide y elipsoide se utilizan en los sistemas de posicionamiento global por satélite actuales (GPS), tal como la constelación NAVSTAR.

Los sistemas de GPS utilizan el modelo elipsoide como línea de base para medir la altura de un lugar determinado en la Tierra. Sin embargo, algunos sistemas actuales de GPS utilizan el modelo geoide para representar mejor las elevaciones. Las medidas exactas son de mayor utilidad para los topógrafos, cuyo trabajo es desarrollar la mayor cantidad posible de medidas precisas de la superficie de la Tierra. En la Figura 2.1 la línea azul es una representación idealizada de la tierra, con los picos en las montañas y en el fondo el mar. La línea naranja es la representación ideal de referencia a partir de la cual se mide la altura que se quiera representar.

De la misma manera se han desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, National Oceanographic & Atmospheric Administration) diversos sistemas que representan geoides de la tierra, principalmente atendiendo a las características regionales o continental de la tierra, esto en la medida de obtener un mejor promedio de la superficie de la tierra, atendiendo no solo las montañas más altas sino la profundidad de los océanos.

De los modelos más recientes planteados, se pueden mencionar modelo híbridos y gravimétrico, la Tabla 2.1 muestra algunos de ellos (NOAA, 2017). Los modelos híbridos están ligados al NAD83 mientras que los modelos gravimétricos del geoide, permiten la fijación al NAVD 88.

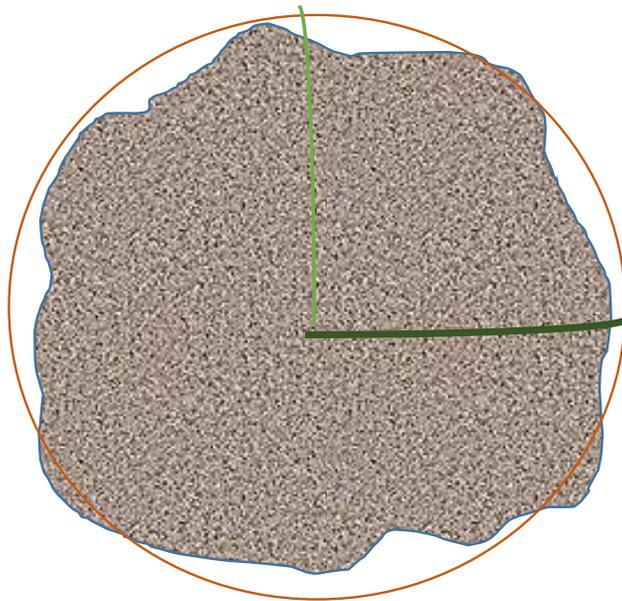


Figura 2.1 Construcción de un geoide de la tierra

Tabla 2.1 Modelos de geoides

| Geoide híbrido | Geoide gravimétrico |
|---------------------------------|---------------------|
| GEOID12B | USGG2012 |
| GEOID12A (replaced by GEOID12B) | USGG2009 |
| GEOID12 (replaced by GEOID12A) | USGG2003 |
| GEOID03 | G99SSS |
| GEOID06 | CARIB97 |
| GEOID99 | MEXICO97 |
| GEOID96 | G96SSS |
| | GEOID93 / ALASKA94 |
| | GEOID90 |

A partir de esta figura geoide, también es posible suavizar mejor la superficie de la tierra mediante una elipse. Una elipse vista en un plano tiene la forma de la Figura 2.2 y se diferencia de otras elipses en función de los ejes a y b que son medidos a partir del ecuador hacia el polo a y del centro de la tierra hasta el ecuador b. Si esta elipse se gira sobre un eje, se obtiene un modelo tridimensional también llamado esferoide.

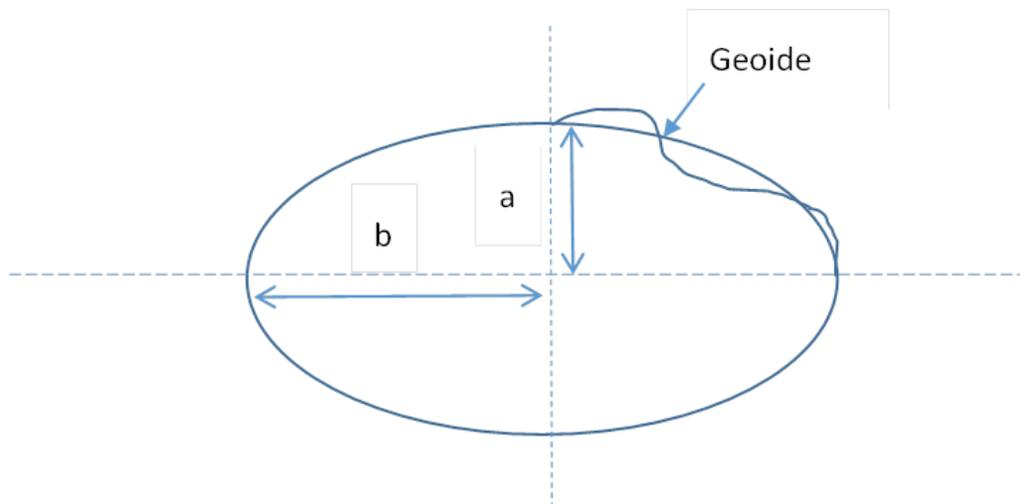


Figura 2.2 Elipsoide ideal

| | |
|---|--|
| Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico | 2. Principios de cartografía, fotogrametría y sistemas de posicionamiento por satélite |
|---|--|

Son precisamente las distancias a y b las que definen la elipse o esferoide a usar dependiendo de las necesidades topográficas, geodésicas, de agrimensura, etc. Tres de los elipsoides usados en América se enlistan en la Tabla 2.2. El modelo geoide atenúa las diferencias de altura. Definir qué tipo de geoide, elipsoide y datum usar dependerá de la necesidad del proyecto. Es común usar un sistema geodésico conformado por el geoide y el elipsoide para hacer mapas (Figura 2.3).

Tabla 2.2 Comparación de semiejes entre elipsoides

| Año | Elipsoide | Semieje mayor (m) | Semieje menor (m) |
|------|-----------|-------------------|---------------------|
| 1841 | Bessel | 6377297.155 | 299.15281(1/atache) |
| 1866 | Clarke | 6378206.4 | 6356583.8 |
| 1980 | GRS80 | 6378137 | 6356752.31414 |
| 1960 | WGS60 | 6378165.0 | 298.3 (1/atache) |
| 1984 | WGS84 | 6378137 | 6356752.31424518 |

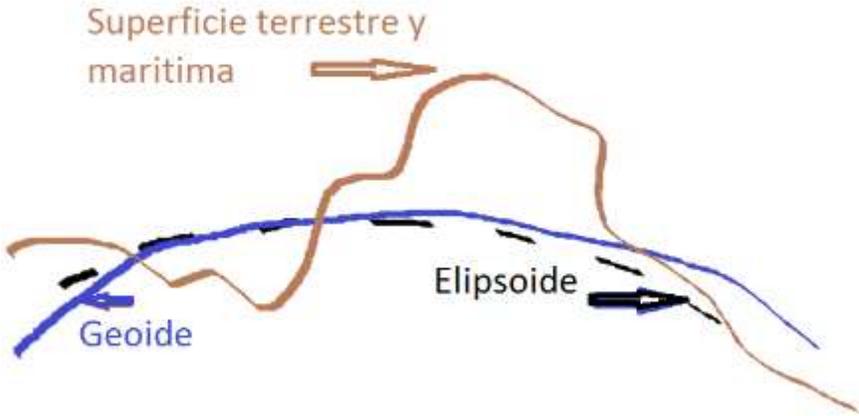


Figura 2.3 Sistema de referencia geodésico

Los datos geodésicos originalmente se utilizaron para referir levantamientos cartográficos, catastro, análisis espacial de cartografía temática (estudios hidrológicos, geodinámica, etc). De hecho es esta rama de la ciencia la que está aportando respuestas y soluciones a problemas sociales, económicos y de conservación del medio ambiente, por lo que el uso de los vehículos aéreos no tripulados se consolida ante las necesidades

| | |
|---|--|
| Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico | 2. Principios de cartografía, fotogrametría y sistemas de posicionamiento por satélite |
|---|--|

actuales y se perfila como la herramienta idónea ante los retos tecnológicos del siglo XXI.

iii. Datum

En la necesidad de mejores modelos, evolutivamente se han generado numerosos elipsoides para cada zona que se desea cartografiar con la mayor precisión. En este sentido los DATUM han resultado muy útiles, ya que cada uno presenta variaciones significativas que oscilan entre centímetros y metros comparativamente para una misma coordenada con diferente sistema de referencia. El datum se define como el punto tangente al elipsoide y al geoide, donde ambos son coincidentes. De la Tabla 2.3 se puede observar la diferencia entre el NAD 83 y el NAD 27; ambos con diferente sistema geodésico, el WGS 84 Y el de Clark 1866 respectivamente. Existe un punto llamado “fundamental” en el que el elipsoide y la tierra son tangentes, este punto “fundamental” se le define por sus coordenadas geográficas longitud y latitud, además del acimut de una dirección con origen en el punto de “fundamental”.

Tabla 2.3 Diferencia de coordenadas entre datum geodésicos

| Datum | Elipsoide | DX | DY | DZ |
|----------------------------|-------------|----|-----|------|
| North American Datum 1927 | Clarke 1866 | -8 | 160 | 176 |
| North American Datum 1983 | GRS 80 | 0 | 0 | 0 |
| World Geodetic System 1972 | WGS 72 | 0 | 0 | -4.5 |
| World Geodetic System 1984 | WGS 84 | 0 | 0 | 0 |

2.1.2.3 Sistema coordenadas y proyecciones para georreferenciación de rasgos

Poder identificar un punto específico implica definir un marco de referencia de coordenadas. Uno de los más usados es el sistema de coordenadas geográficas, mayormente usado para proyectos geoespaciales. Este sistema permite la representación detallada y sin deformaciones de cualquier rasgo del territorio a nivel global. El sistema de coordenadas se usa para definir en forma sencilla, la posición de puntos sobre la superficie terrestre, es decir, la identificación de un punto sobre la esfera terrestre. Cada punto de la superficie terrestre, tiene una coordenada única y en consecuencia, permite la identificación única de esos puntos. Normalmente los datos están formados por un conjunto de números.

Los datos espaciales son similares, sin embargo, ninguno puede ser exactamente el mismo, por lo tanto, es importante incluir información numérica que le permite colocarla en algún lugar sobre la tierra. Para lograr lo anterior fue necesaria la introducción de

sistemas de coordenadas. Entre estos sistemas, los más utilizadas son coordenadas geográficas o georreferenciadas, es decir, sobre una proyección, ya sea cónica, transversa o planimétrica. Los números para identificar una coordenada forman parte de un sistema que proporcionan un marco de referencia de los datos, para colocar entidades sobre la superficie de la tierra; la esencia es mantener una relación entre ellos, de tal manera que varios objetos puedan ser colocados gradualmente y en un momento dado poder verlos como un todo, para realizar análisis espaciales precisos y para crear mapas.

Todos los datos espaciales se crean en un sistema de coordenadas. Varios datos pueden manipularse como puntos, varios puntos pueden convertirse en líneas, polígonos, y en un caso específico, volúmenes. La representación de estos puede lograrse en diversas plataformas, las cuales puedan admitir un formato escalar o raster. En el sistema de coordenadas geográficas, la manera de especificar la posición de un punto o un lugar pueden ser dados, como grados decimales. Sin embargo, pueden existir sistemas arbitrarios que permiten dicha representación en pies, metros o kilómetros. De hecho, se puede utilizar cualquier forma de medición como sistema de coordenadas. Los sistemas de coordenadas pueden ser de tres tipos: geográficos, proyectados y locales.

Un sistema de coordenadas proyectadas se define sobre una superficie plana de dos dimensiones. A diferencia de un sistema de coordenadas geográficas, un sistema de coordenadas proyectadas posee longitudes, ángulos y áreas constantes en las dos dimensiones. Un sistema de coordenadas proyectadas siempre está basado en un sistema de coordenadas geográficas basado en una esfera o un esferoide. Existen diferentes opciones para representar las coordenadas geográficas, entre las cuales se puede mencionar la sexagesimal, es decir, grados, minutos, segundos y formato decimal, transformando los segundos y minutos como fracción del grado. Un grado son 60 minutos y un minuto 60 segundos.

Representar un punto de la superficie terrestre en un sistema de coordenadas geográficas se establece a partir de latitud y longitud; es decir, la distancia angular medida en grados sobre un meridiano y el ecuador, sobre el ecuador entre el punto y el meridiano de Greenwich. En un sistema de coordenadas proyectadas, las ubicaciones se identifican mediante las coordenadas X, y en una cuadrícula, con el origen en el centro de la cuadrícula. Cada posición tiene dos valores de referencia respecto a esa ubicación central. Uno especifica su posición horizontal y el otro su posición vertical. Los dos valores se denominan coordenada X y coordenada Y. Utilizando esta notación, las coordenadas del origen son $X=0$ y $Y=0$

De manera análoga, una vez definida la base geodésica es posible establecer una proyección cartográfica. Cualquier proyección elegida deformará la figura de la superficie terrestre. Esta deformación se denomina anamorfosis. La base conceptual de proyectar obedece al reto de transformar una elipse que representa el planeta en un

plano. En este proceso se pueden producir tres tipos de anamorfosis; lineal, de superficie y angular. En ese orden cada proyección produce deformaciones en cada uno de esos pasos, debido a que no existe una proyección que conserve distancias, áreas o ángulos. La selección de cada una de estas dependerá de las necesidades del proyecto. Las proyecciones geográficas se pueden clasificar por la figura y posición sobre la cual se proyectan y por el tipo de distorsión que generan.

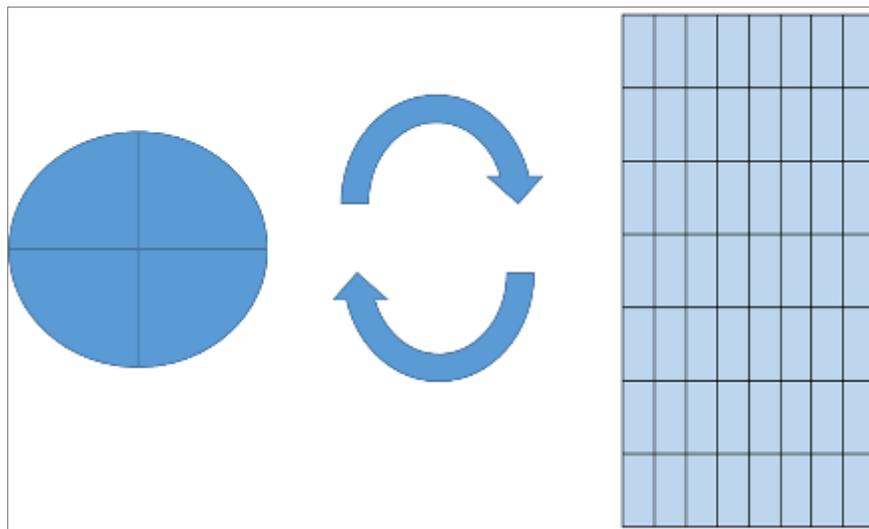


Figura 2.4 Construcción de proyecciones

i. Proyecciones por la figura

Se distinguen tres tipos de proyecciones geográficas por la figura sobre la cual se proyectan: plana o azimutal, cilíndrica y cónica (Figura 2.5).

a. Proyecciones planas o azimutales

La proyección se hace directamente sobre un plano tangente al elipsoide, una característica de este tipo de proyección, en todas sus variantes, es presentar como líneas rectas todos los círculos máximos que pasan por el centro de la proyección. Lo anterior y su contorno circular, permiten reconocer una proyección plana.

b. Proyecciones cilíndricas

Se basan en circunscribir un cilindro alrededor de la esfera terrestre. Las proyecciones cilíndricas se caracterizan por su capacidad para representar toda la superficie de la

tierra. Teniendo en cuenta la inclinación de eje del cilindro respecto de eje de la esfera, las proyecciones cilíndricas se pueden clasificar en normal, oblicua o transversal.

c. Proyecciones cónicas

Basan su principio en transferir la red geográfica del globo a un cono que después es desarrollado para formar un plano. Las proyecciones cónicas se desarrollan analíticamente, los valores se asignan por medio de fórmulas matemáticas.

Los meridianos son líneas rectas que convergen en un punto en los polos, norte o sur. Los paralelos son arcos de círculos concéntricos, cuyo centro se halla en los polos norte o sur. Una proyección cónica no puede representar el globo completo, y normalmente no llega a representar ningún hemisferio.



Figura 2.5 Proyecciones de acuerdo con la superficie

ii. Proyecciones por la ubicación de la figura de proyección

Las proyecciones se clasifican según la ubicación de la figura de proyección, de acuerdo con el centro de origen y la porción que se requiera representar con menor distorsión. Entre ellas están la proyección normal, transversal y oblicua (Figura 2.6).

La proyección normal es aquella en la que el eje polar coincide con el eje del cilindro o cono de proyección, por lo tanto los meridianos se representan como líneas verticales y los paralelos como líneas horizontales que forman ángulos rectos. En el caso de proyecciones transversales el eje polar forma un ángulo recto con el eje de la figura de proyección, y en la oblicua el eje polar forma un ángulo entre 0 a 90 grados con el eje de la figura de proyección.

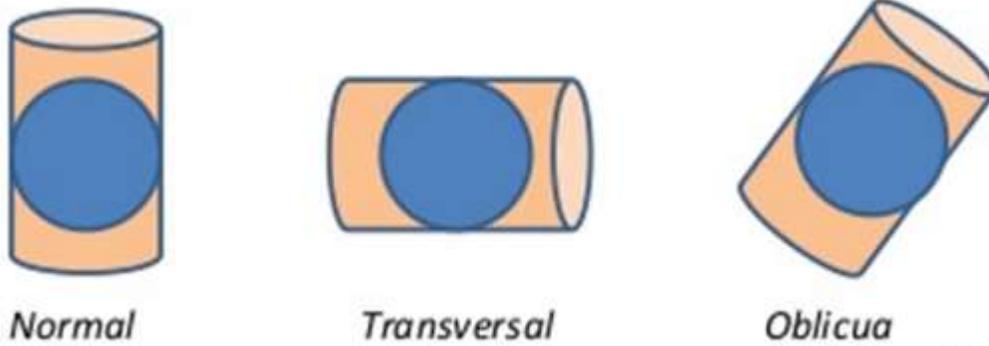


Figura 2.6 En función de la posición de la figura de la proyección, p. ej., proyecciones cilíndricas

Las proyecciones geográficas generan distorsiones en área, distancia o forma, por lo que se pueden clasificar según esta característica en conformes, cuando mantienen la forma y distorsionan el área y la distancia, equivalentes cuando mantienen el área y distorsionan la forma y la distancia, y equidistantes cuando mantienen la distancia y distorsionan la forma y el área (Figura 2.7). En resumen, las proyecciones más utilizadas según la forma y la posición se muestran en la Figura 2.8.

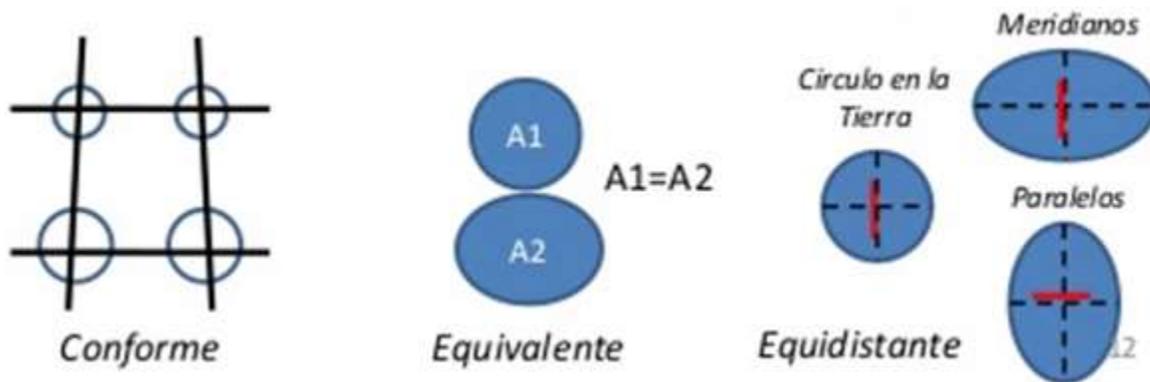


Figura 2.7 Proyección según el tipo de distorsión

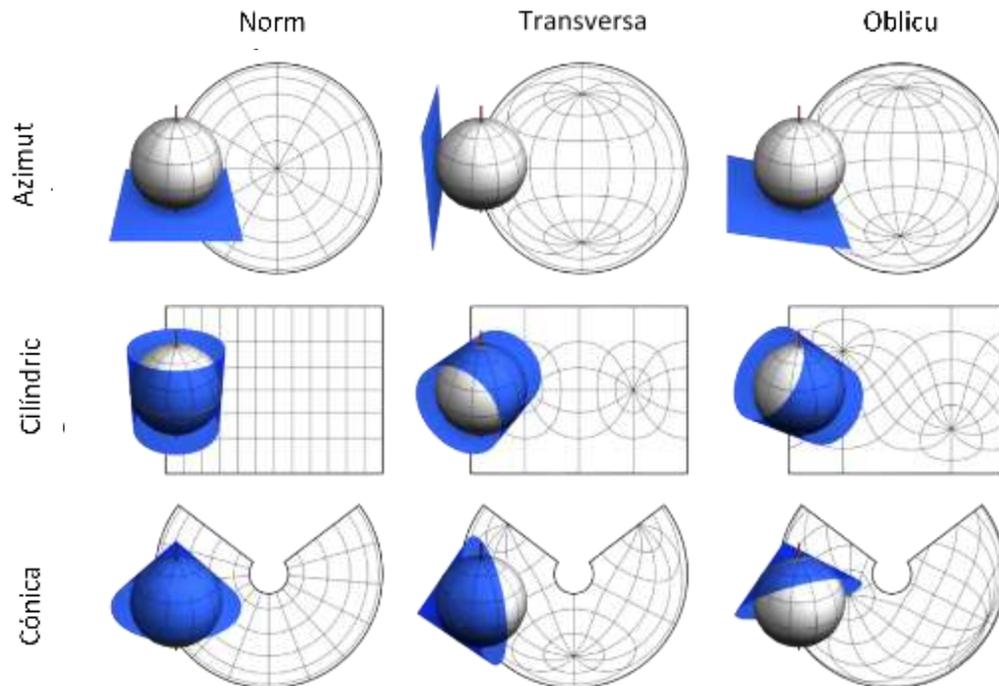


Figura 2.8 Proyecciones geográficas según la posición y figura de proyección (Furuti, 2002)

Una de las proyecciones más utilizadas y que da origen a un sistema de coordenadas son las llamadas Transversal, establecida por Mercator UTM (Universal Transverse Mercator). Esta proyección establece un plano con 60 divisiones y es actualmente el sistema de proyección cilíndrica que se utiliza con carácter universal. La superficie cilíndrica se encuentra tangencial al meridiano o eje del cilindro de igual al diámetro de la circunferencia ecuatorial. El meridiano tangente a dicha superficie se transforma en el eje de coordenadas Y, y el ecuador se transforma en el eje de coordenada X. Este sistema emplea como unidades de medida los metros por lo que resulta fácil de operar y es posible obtener distancias, superficies etc. en la misma unidad.

Esta proyección emplea como figura un cilindro con posición trasversal (Figura 2.5). La tierra se divide en dirección O-E en 60 husos horarios de 6° cada uno, lo que implica 3° de cada lado cada lado del meridiano de origen. El punto de partida de los meridianos es el meridiano de Greenwich. En la dirección N-S se presentan 20 zonas de 8° , con excepción de la última zona que alcanza los 12° . Cada zona UTM está dividida en 20 bandas, desde la C hasta la M en el hemisferio sur, y las bandas N a X en el hemisferio norte. La línea central de una zona UTM se hace coincidir con un meridiano del sistema geodésico tradicional, al que se le llama meridiano central y define el origen de la zona UTM.

En el ámbito de los VANT esta sería la mejor proyección para generar aeromosaicos georeferenciados y ortofotos, apoyado en los programas computacionales. Los parámetros a considerar en México serían la proyección UTM, las posibles zonas de la 11 a la 16, cuyo meridiano central es 87° , el falso este sería de 500 000 m, el falso norte 0 m y un factor de convergencia de 0.9996.

2.1.3 Características de la información cartográfica del país

La representación cónica de las coordenadas geográficas presenta algunas ventajas, tales como el hecho que se evita la deformación debido a que ambas son entidades geométricas elipsoidales. Las mediciones angulares son precisas y con ello el uso de coordenadas geográficas se vuelve un estándar en el manejo del GPS de bolsillo. No obstante, existen otros sistemas de georreferenciación.

El INEGI propuso el modelo MEX97, el cual es un modelo de elevación geoidal de alta resolución. Fue elaborado usando valores de gravedad terrestre y marina, y el método de cálculo fue Transformación Rápida de Fourier (FFT) para estimar la forma del geoide, y combinado con un moldeo geopotencial subyacente EGM96. El MEX 97 ha sido elaborado con base al elipsoide GRS80 y fue georreferenciado al ITRF94.

Los esfuerzos en México por contar con un sistema cartográfico para la georreferenciación han sido valorados, no obstante, dicho elipsoide mantiene las mismas dimensiones que el ITR92 establecido en 1988, que es el DATUM oficial de uso en México, por lo que cuando se compara el MEX97 con las alturas elipsoidales del GPS, se estiman variaciones del orden de los -25 cm.

En México la proyección utilizada para georreferenciación es la UTM, idónea en la generación de aeromosaicos georeferenciados y el tratamiento de ortofotos. Apoyado en los programas computacionales, los parámetros usados son:

- Proyección UTM
- Posibles zonas de la 11 a la 16
- Meridiano central 87°
- Falso este de 500 000 m
- Falso norte cero m
- Factor de convergencia de 0.9996

2.1.3.1 Productos cartográficos

El uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT o DRONES) ha evolucionado en una herramienta en la adquisición de datos espaciales, al ser una plataforma que puede

transportar el dispositivo que hará las veces del satélite. Por lo tanto las verdaderas ventajas están relacionadas con la precisión, el tiempo de adquisición y los costos.

Ya que la geografía, cartografía y fotogrametría tuvieron su desarrollo previo, y presentaron los productos a partir del cual sería posible el análisis de los recursos naturales, existe un cúmulo de documentos que dan fe de ello, por lo que con los VANT, resulta relativamente accesible la presentación de productos cartográficos, tales como los planos o mapas, pero además la posibilidad de modelos de elevación digital, y mapas temáticos con información especializada de acuerdo con las diferentes bandas del espectro, así será posible presentar índices de vegetación y características térmicas.

Algunos de los productos que se pretenden obtener mediante el uso de VANT son fotografías que permitan resguardar el aspecto actual de la infraestructura y posibles afectaciones debido a diferentes fenómenos naturales o antropogénicos, producir cartografía de referencia geográfica temática de los recursos naturales en el país, y fotografías aéreas oblicuas que faciliten las tareas de análisis, evaluación y gestión de aspectos relevantes de seguridad hídrica, protección civil, etc.

El empleo de la tecnología VANT considera la interacción de recursos de fotografía digital para potenciar las aplicaciones a los diversos campos de la ciencia y en este caso de la infraestructura hidroagrícola o del sector agrícola en general. Los productos que se pretende generar mediante el uso de VANT pueden ser del siguiente tipo:

i. Planos topográficos o de reconocimiento

Usualmente los planos son documentos de información gráfica relativos a un aspecto específico de la misma, y son ampliamente usados en proyectos de ingeniería o información especializada dibujados a grandes escalas. En función de la escala pueden estar referenciados en un sistema local de coordenadas cartesianas, cubriendo extensiones relativamente reducidas. Contar con información topográfica de una cuenca, un módulo de riego, o una parcela, tiene una gran relevancia para el uso y manejo del agua. Un VANT equipado con una cámara en el espectro de luz visible es suficiente para generar este tipo de productos.

ii. Mapas temáticos del medio

Un mapa es una representación gráfica con información relativa a toda o una parte de una superficie real o ideal, que contiene información seleccionada, generalizada y simbolizada, sobre una cierta distribución espacial. La información es de carácter general y se presenta en escalas relativamente reducidas con referencia a un sistema de coordenadas universal. A mayor escala puede constituirse un mapa temático de manera gradual, usando el mismo procedimiento que una superficie pequeña y luego mediante

el sistema de coordenadas hacerla parte de una superficie mayor, ubicada en algún punto del globo.

iii. Cartas específicas

En México el término carta es sinónimo de mapa. Sin embargo, en la cartografía universal, la diferencia entre carta y mapa está en el carácter específico de la información contenida en las cartas, orientada a la satisfacción de determinadas necesidades. En el mapa, la información es de índole general, de interés para la mayoría de los usuarios; en la carta, la información es de carácter especializado, de interés para determinados usuarios. Fuera de esto, las características de las cartas son las mismas. Tanto en el caso del plano como en el de mapas y cartas la información es de vista vertical, como si fuera observada desde una plataforma elevada.

iv. Modelo digital de elevación

Constituyen una representación gráfica de información en tres dimensiones, vista en perspectiva, a una escala muy reducida. El modelo puede ser en forma de maqueta, o bien simulando en un plano la tercera dimensión, ya sea por técnicas manuales o con programas de computadora. Actualmente existe en el mercado un amplio número de programas que pueden generar este producto, la diferencia será la precisión que se requiera, lo cual a su vez depende del uso de dicho modelo. La elaboración de un modelo requiere normalmente la existencia de un programa de apoyo que permita generar este producto, generalmente deber estar apoyado en productos previos como planos y curvas de nivel. En la actualidad, este tipo de productos se deriva mayormente del tratamiento computacional de modelos digitales de elevación.

2.2 Principios de fotogrametría

La fotogrametría es una técnica que permite obtener mediciones con precisión a partir de imágenes obtenidas desde vehículos aéreos o a nivel del terreno. A partir de las imágenes corregidas, es posible la determinación de información espacial como áreas, distancias y volúmenes, así como la interpretación de las características de los objetos en la imagen para su análisis. La American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) define a la fotogrametría como el arte, ciencia y tecnología de obtener información fiable de objetos físicos o del medio ambiente, a través de procesos de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos. La International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) la define como el arte, ciencia y tecnología para obtener información

fiable acerca de la Tierra y su medio ambiente, o de otros objetos físicos, a partir de imágenes procedentes de sensores y mediante procesos de grabación, medición, análisis y representación...

Ambas definiciones coinciden en que a partir del procesamiento y análisis de información contenida en una imagen, se puede obtener información confiable sobre un objeto, la segunda es más específica en señalar que se pueden obtener mediciones y características de objetos terrestres a través de sensores remotos. Según la ASP (1989), la fotogrametría es el arte, ciencia y tecnología de obtención de información confiable sobre los objetos físicos y el medio ambiente a través del proceso de registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas, patrones de imágenes de radiancia electromagnética y otros.

La fotogrametría se puede definir entonces como la ciencia desarrollada para obtener medidas reales de objetos a partir de fotografías del mismo (tanto terrestres como aéreas), para la elaboración de mapas topográficos. Es una herramienta indispensable para la producción de cartografía de todos los países del mundo; de hecho, la mayoría de la cartografía topográfica de nuestro planeta ha sido realizada por medio de esta disciplina.

Si bien la fotogrametría se inició con el levantamiento de fachadas arquitectónicas y plantas de edificios, mediante el uso de fotografías terrestres, pronto se utilizaron las fotografías aéreas para el levantamiento de la cartografía de base, lo que le dió el tremendo auge que se ha mantenido hasta nuestros días. Esta capacidad de cartografiado de base la convierte también en la fuente primigenia de información para la cartografía temática y para los sistemas de información geográficos. Como consecuencia de la utilización de la fotografía aérea, se desprendió de la fotogrametría la disciplina de la fotointerpretación, la cual comparte sus fundamentos básicos con la fotogrametría aérea.

A partir de los años ochenta, el desarrollo acelerado de la computación, condujo al establecimiento de la teledetección como consecuencia lógica de la evolución de la fotointerpretación, así como al desarrollo de técnicas de tratamiento computarizado de imágenes digitales y al desarrollo de la visión por computadora. Actualmente, con el apoyo de la computación, la fotogrametría se ha convertido en una disciplina indispensable en el campo de la cartografía, a la vez que aumenta el número de sus usuarios debido a que los equipos fotogramétricos de elevado costo, están siendo desplazados por programas de precio menor, o por programas desarrollados por los mismos usuarios.

2.2.1 Elementos de fotogrametría y estereoscopía

El objetivo principal de la fotogrametría es la obtención de imágenes de las cuales podamos extraer información cuantitativa sobre las magnitudes de los objetos capturados en la misma, tales como distancias, superficies, alturas. Para lo anterior, la fotogrametría se apoya en técnicas para la restitución de las imágenes y su proyección a un sistema de coordenadas de referencia, calculando a partir de estos las magnitudes utilizando los principios de la geometría. Una fotografía es una proyección cónica de un objeto, por lo tanto las medidas realizadas sobre la misma están deformadas, para obtener una medición real de las magnitudes es necesario obtener una vista perpendicular al plano del objeto, los métodos fotogramétricos eliminan las distorsiones originadas por la perspectiva.

El punto principal es el punto de intersección sobre la fotografía de un eje perpendicular al plano del terreno. Es el único punto ortogonal dentro de la fotografía. Este punto es un elemento muy importante, ya que, a partir de él, se empieza la proyección central en la fotografía aérea, y, consecuentemente, el desplazamiento de las imágenes fotográficas. Este desplazamiento de los objetos será mayor cuanto mayor sea la distancia al punto principal (Figura 2.9).

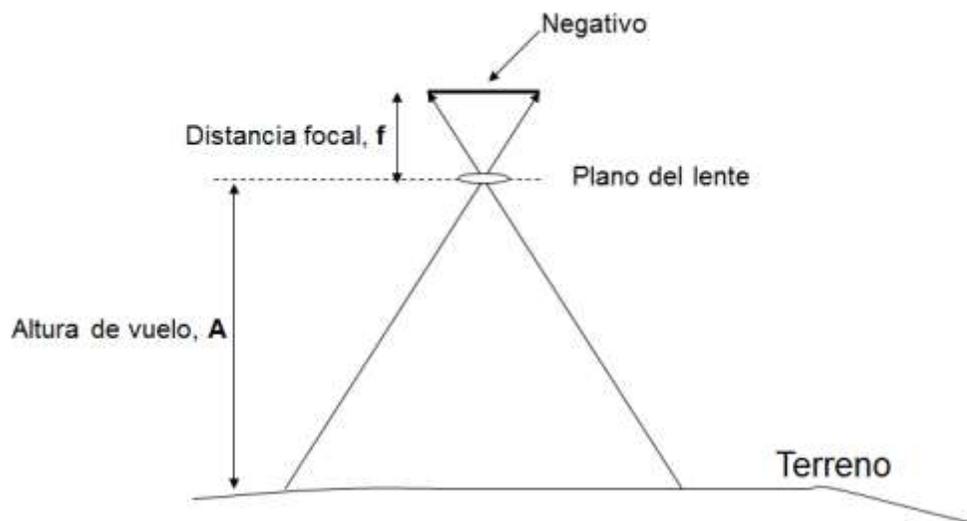


Figura 2.9 Geometría de una fotografía aérea

La distancia principal es una característica de la cámara aérea que se define como la distancia entre el objetivo y el plano del negativo de la fotografía. La distancia principal determina la magnitud de los desplazamientos en las fotografías, así como la

exageración vertical de los objetos sobre el modelo estereoscópico. La relación con la altura de vuelo condiciona la escala fotográfica, el área de cobertura y la magnitud de los desplazamientos. Estas relaciones se establecen en los puntos siguientes:

1. La distancia principal es inversamente proporcional al desplazamiento de las imágenes fotográficas.
2. A una misma altura de vuelo, la distancia principal es directamente proporcional a la escala fotográfica.
3. Para obtener una misma escala fotográfica, la distancia principal varía en forma directamente proporcional a la altura de vuelo”.

2.2.2 Restitución de fotografías

La rectificación de una imagen es un proceso para conseguir una imagen transformada similar a la que se hubiera obtenido si el plano de imagen hubiera sido paralelo al plano principal del objeto en el momento de la toma. En el caso de una imagen aérea, la imagen se transforma para llevarla a la situación ideal de la toma vertical. Con dos o más fotografías sobre una misma superficie, tomadas desde punto de vista diferente, se pueden obtener coordenadas tridimensionales de cualquier punto sobre la superficie de las imágenes. Si se define una superficie (S) y un punto (V), a partir del cual se observa la misma, se puede definir el haz perspectivo relativo a V y S como el conjunto de rayos perspectivos Vx . Con un solo haz perspectivo no se puede definir una superficie (Figura 2.10)

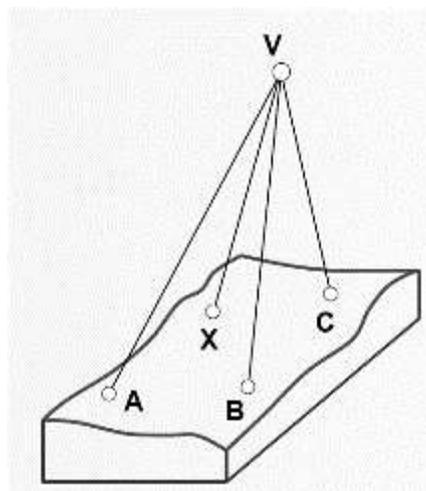


Figura 2.10 Haz perspectivo

Por otro lado, si se define una superficie (S) con dos puntos de vista V y V' , a cada punto X de la superficie le corresponden 2 rayos perspectivas, que se denominan rayos homólogos, de esta manera la superficie S se puede determinar mediante la intersección de los rayos homólogos (Figura 2.11).

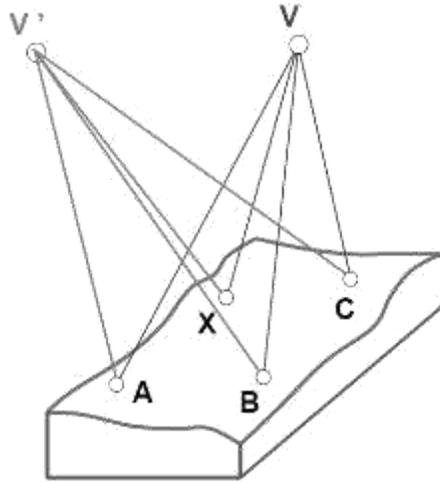


Figura 2.11 Intersección de rayos homólogos

Con lo anterior se puede deducir que la fotogrametría es la reconstrucción de un espacio tridimensional, denominado espacio-objeto, a partir de imágenes bidimensionales que constituyen el espacio-imagen. En cada una de las imágenes del espacio-imagen se definirá un sistema de referencia bidimensional, sistemas de referencia-imagen, mientras que en el espacio-objeto se definirá un sistema de referencia tridimensional, sistema de referencia-objeto o terreno. La reconstrucción de la geometría del objeto en el espacio-objeto no es sino encontrar la transformación que permita pasar de los dos sistemas de referencia imagen al sistema de referencia objeto.

Por lo tanto para reconstruir una S a partir de 2 imágenes de la misma, es necesario:

1. Reconstruir cada haz perspectivo, a partir de sistema de referencia de imagen del mismo, al conjunto de datos necesarios para esta reconstrucción se les denomina datos internos u orientación interna.
2. Conocer la exposición de los haces, respecto al sistema de referencia-objeto. A este conjunto de datos que permitan esta reconstrucción se les denomina datos externos u orientación externa.
3. Identificar los rayos homólogos, para conocer la posición de un punto en el espacio a partir de su posición en las 2 imágenes.

Lo anterior constituye el proceso general de la fotogrametría y al proceso de búsqueda de los rayos homólogos, se le denomina restitución.

2.2.2.1 Orientación interna

La orientación interna consiste en reproducir el haz perspectivo de rayos definidos por los puntos de la imagen y el centro de proyección. Para hacer esta reproducción es necesario conocer los datos de orientación de la cámara, la distancia focal y la función de distorsión. Con la orientación interior o interna se determina el centro perspectivo interior de la fotografía aérea, tal como estaba en el instante de la exposición; por tanto, cada fotograma se situará de idéntica manera que estuvo el material sensible con relación al objetivo en el momento de su impresión.

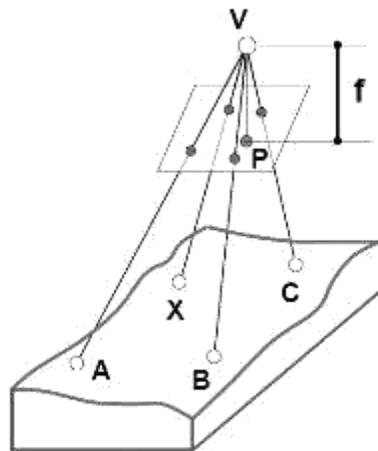


Figura 2.12 Datos internos

Para conocer la orientación interna de la imagen es necesario conocer un conjunto de datos internos que permitan la reconstrucción de un haz perspectivo a partir de una imagen del mismo. La imagen del haz queda plasmada en una fotografía y los datos internos son:

- V: vértice del haz
- P: punto principal
- f: distancia focal
- la función de distorsión del objetivo

2.2.2.2 Función de distorsión del objetivo

Como ya se mencionó, una fotografía no corresponde a un haz perspectivo ideal, por lo tanto existen distorsiones en los elementos de la superficie fotografiada. El objetivo de la cámara transforma el ángulo α en α' definiéndose la relación entre ambos mediante la función de distorsión:

Función de distorsión:

$$\alpha = f(\alpha')$$

2.2.2.3 Orientación externa

El objetivo de la orientación externa es obtener los parámetros para posicionar correctamente el haz de rayos correspondiente a la imagen respecto a un sistema de referencia vinculado al terreno. La orientación externa consiste en relacionar dos sistemas de referencia, el de la imagen y el sistema de referencia vinculado al terreno. El sistema de referencia de la imagen está definido de acuerdo con la orientación interna y el sistema de referencia en la actualidad normalmente se refiere a alguna proyección cartográfica como UTM. La relación entre el sistema de coordenadas imagen y terreno no es sino un cambio de sistema de referencia afin con la particularidad de que únicamente hay una traslación y un cambio de base (o tres rotaciones) al ser las bases de los dos sistemas ortonormales y considerar la misma escala en ambos sistemas.

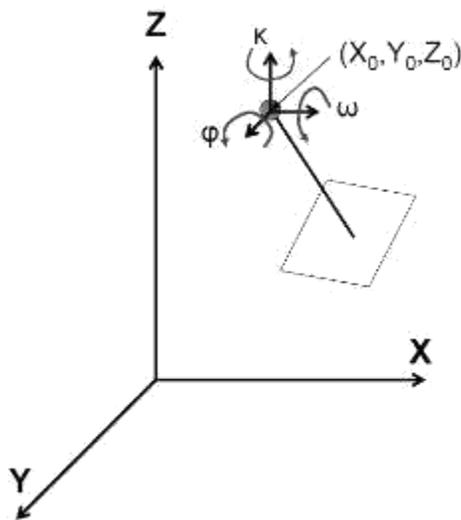


Figura 2.13 Datos para orientación externa

En el problema intervienen seis parámetros a determinar (ver Figura 2.13):

- Las coordenadas del centro de proyección de la imagen en el sistema de coordenadas del terreno, $(X_0; Y_0; Z_0)$.
- Las rotaciones en torno a los ejes del sistema de coordenadas imagen, para referirlos al sistema de coordenadas terreno $(\omega, \varphi, \kappa)$

2.2.2.4 Puntos de control de apoyo en tierra

La formación del modelo estereoscópico ejecutado durante la fase de orientación, necesita apoyarse en puntos de control con las coordenadas de referencia de los objetos en la tierra, para poder escalar y nivelar el modelo. Normalmente estos puntos de apoyo se levantan mediante procedimientos topográficos y son generados en alguna proyección cartográfica referida al globo terrestre. El procedimiento para el levantamiento de puntos de apoyo consiste en lo siguiente:

- Ubicación de puntos de referencia
- Ubicación de puntos de apoyo
- Señalización del terreno

2.2.2.5 Ubicación de puntos de referencia

Previo al levantamiento se deberán localizar o construir los puntos o vértices ligados a una red geodésica o topográfica existente, los cuales servirán como referencia para la determinación de los puntos de apoyo fotogramétrico. Los puntos de apoyo pueden ser bancos levantados y nivelados, en la zona de estudio o vértices geodésicos como los de la red geodésica de INEGI (ver Figura 2.14). Cuando no existe una red disponible, se puede generar empleando métodos de triangulación o poligonales de precisión, incorporando algún vértice geodésico, se deberán trasladar estos al sitio de los estudios a través de la nivelación y levantamiento con instrumentos topográficos, como niveles, estaciones totales o con equipo GPS con corrección diferencial.



Figura 2.14 Banco de la red geodésica de INEGI

2.2.2.6 Ubicación de puntos de apoyo

Los puntos de apoyo son puntos del terreno que pueden ser identificados claramente en la fotografía, de estos puntos de apoyo se deben conocer sus coordenadas y estas deben estar referidas a una proyección cartográfica de referencia (Figura 2.15). Los puntos de apoyo servirán para dar la orientación del modelo estereoscópico por lo que se requiere que tengan una buena precisión en la medición de los mismos, para obtener una restitución fotogramétrica rigurosa. Por lo anterior, es importante su elección, distribución y correcta determinación de sus coordenadas.

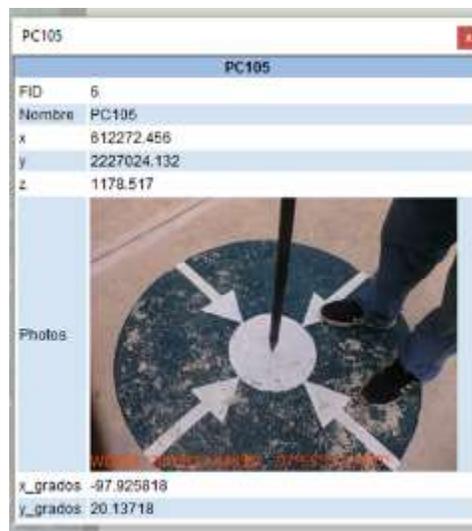


Figura 2.15 Punto de apoyo sobre el terreno

El proceso de orientación requiere de puntos de control con coordenadas planimétricas conocidas para escalar el modelo, mientras que para nivelar el modelo, se requiere de coordenadas de control altimétrico. Como ya se mencionó, las coordenadas de los puntos de apoyo deberán estar referidas a un sistema de proyección cartográfica como el UTM. En el proceso de restitución fotogramétrica tradicional, son requeridos por lo menos cuatro puntos de apoyo para el control planimétrico y altimétrico para cada par estereoscópico, dependiendo de la escala del modelo y de la topografía de la superficie se pueden requerir más puntos de apoyo.

La distribución de los puntos de apoyo debe ser de tal manera que cada punto de apoyo sirva a los pares estereoscópicos adyacentes, a manera de minimizar el esfuerzo y el costo del levantamiento de los punto de apoyo. Una recomendación para la distribución es que el polígono de mayor superficie, definido por ellos, cubra más del 70 % del área útil del modelo. La elección de los puntos de apoyo debe hacerse sobre la cartografía de la zona y se debe considerar la accesibilidad a los mismos.

Una vez seleccionados los puntos de apoyo se deben establecer sus coordenadas a partir de los bancos de referencia, a través de métodos topográficos o triangulación con equipo GPS con corrección diferencial, las coordenadas de los puntos de apoyo deben estar referidos a una proyección cartográfica como UTM. Otra manera de obtener las coordenadas de los puntos de apoyo es a través de proceso de aerotriangulación, el cual requiere la realización del vuelo con pasadas mayores al 65 % de traslape, en este proceso se realiza la selección de puntos visibles en tantas imágenes como fuera posible, para ser utilizados como puntos de apoyo. Una vez identificados en las imágenes comienza el proceso de medición de los mismos.

2.2.2.7 Señalización en el terreno de los puntos de apoyo

Los puntos de apoyo deben identificarse claramente en la fotografía y en el terreno, para poder relacionarlos en el proceso de restitución. Los puntos de apoyo se seleccionan ubicando rasgos visibles del terreno, como intersecciones de calles en ángulo recto, vías de comunicación, infraestructura de canales, cercas, límites de parcelas o construcciones. En todos los casos, las imágenes de los puntos de apoyo han de tener una buena nitidez y una tonalidad justa y uniforme. Deben, por tanto, excluirse aquellos puntos en zonas blancas o de tonalidad similar, ya que el contacto estereoscópico por la altura puede ser defectuoso por presentarse un falso efecto de relieve. También es conveniente que estén libres de sombras, y de elementos adosados, que confundan o alteren su aspecto real, y puedan hacer incierta su interpretación.

Cuando no se consigan elementos que sirvan de puntos de apoyo de forma natural, se tendrá que realizar la señalización en el terreno de cada punto de apoyo, colocándolos

en campo antes de la ejecución del vuelo, se distribuyen de manera uniforme en la zona de estudio y en un formato visible desde la altura de toma de la imagen.

Para la señalización de los puntos de apoyo sobre el terreno, se utiliza una figura geométrica, comúnmente una cruz con centro en el hito, cada uno de cuyos cuatro haces tendrá la longitud y anchura que permita su visibilidad en las imágenes, establecida por la resolución o escala final de las mismas. Las señales deberán ser visibles desde la altura de vuelo, por lo que se buscará el máximo contraste. Lo más claramente visible en las imágenes son señales blancas sobre fondo negro. Es aconsejable por tanto, la utilización de cruces de formato adecuado de material plástico, de color blanco sobre superficies oscuras como rocas, tierras oscuras, césped, etc.

2.2.2.8 Proceso de restitución

Una vez formado el modelo estereoscópico a partir de las orientaciones internas y externas, este se constituye en la base para la extracción y dibujo del mapa, a partir de la restitución fotogramétrica. La restitución se puede llevar a cabo a través de equipos restituidores, que pueden ser analógicos, analíticos o digitales. Los equipos analógicos utilizan componentes mecánicos y ópticos para reconstruir el modelo, en los aparatos de restitución analítica, la reconstrucción es de forma matemática, la correspondencia entre los puntos homólogos de las fotos se establecen de forma analítica aplicando una transformación de coordenadas mediante un calculador, algunos modelos de estos equipos se adaptan a una computadora mejorando el proceso de restitución y precisión de los cálculos.

Con el avance en los equipos de cómputo, se ha incrementado la rapidez y la confiabilidad en el proceso de restitución. Los restituidores digitales realizan el proceso de transformación de la fotografía en una imagen digital, que estará representada por una matriz de filas y columnas, constituidas por celdas o píxeles, además los procesos de orientación interna, relativa y absoluta son automáticos. La porción de terreno que representan estos píxeles está en función de su tamaño. La calidad fotogramétrica de la imagen obtenida viene condicionada por la resolución y la radiometría. La resolución depende el tamaño del pixel, de modo que cuanto mayor sea este, menor será la resolución. Sin embargo, no se obtiene la misma resolución que en una fotografía convencional, por lo que se pierde precisión con respecto a los métodos clásicos de la fotogrametría convencional. De todas formas, esta pérdida se compensa gracias a las grandes ventajas que aporta la informatización de todo el proceso de restitución.

Otro aporte importante al proceso de restitución digital consiste en la realización de la aerotriangulación automatizada, minimizando la necesidad de puntos de apoyo terrestre levantados en campo, en los sistemas digitales la transferencia de los puntos para la aerotriangulación, se realiza de forma automática mediante procesos de

correlación de imágenes (multiple image matching). Esta automatización permite aumentar considerablemente el número de puntos utilizados en la Aerotriangulación, de unos cuantos puntos a más de 100, por lo que se incrementa considerablemente la robustez de los resultados.

2.2.3 Productos a obtener con imágenes adquiridas desde VANT

Las imágenes obtenidas de la superficie terrestre con los VANT ofrecen una perspectiva de la tierra que permite la evaluación de sus recursos y el impacto que ejerce el ser humano sobre ellas. Por las características mismas de los equipos y la altura de vuelo, las imágenes ofrecen una visión global y detalle de la superficie terrestre que no se observa con claridad a ras de suelo. Por lo anterior, el objetivo principal de las imágenes obtenidas a través de los VANT es realizar diferentes tipos de análisis cualitativos y cuantitativos. El análisis cualitativo puede consistir en la estimación de los elementos físicos de la superficie como diferenciar la cobertura terrestre, estimar características físicas o químicas de la vegetación, entre otros. Por otra parte las imágenes rectificadas permiten la evaluación cuantitativa de los elementos de la superficie terrestre, por lo que es posible derivar a partir de una imagen mediciones de distancias, áreas y volúmenes de los objetos.

Las ventajas de la adquisición y procesamiento de imágenes obtenidas con VANT se enumeran a continuación:

- Se tiene una cobertura completa de los objetos sobre la tierra
- Se realizan registros instantáneos y la facilidad de dar seguimiento en el tiempo
- Los equipos y materiales son de bajo costo comparados con los métodos tradicionales como la topografía o fotogrametría con aviones
- Se obtienen imágenes con mayor resolución espacial y temporal y precisión

2.2.3.1 Mosaico

Dependiendo de la altura de vuelo y la cobertura del terreno fotografiado, se puede requerir un compuesto de imágenes para tener una visión global de la zona levantada. Las imágenes tomadas desde un VANT son de proyección central, donde los objetos pueden no aparecer en su verdadera posición horizontal, acentuándose este desplazamiento conforme los objetos se encuentran más lejos del centro de la fotografía, por lo que antes de realizar una unión es necesario algún tratamiento geométrico y ubicar las imágenes en un plano de referencia (ver Figura 2.16). La creación de los mosaicos involucra procedimientos que hagan coincidir de manera exacta los bordes de las imágenes y equilibren los colores para crear una imagen

compuesta uniforme. De acuerdo con el control geométrico de las imágenes se pueden elaborar dos tipos de mosaicos:

i. Sin control

Las imágenes se ordenan y se unen siguiendo los rasgos comunes de las imágenes adyacentes, preferentemente seleccionando las partes centrales de las mismas donde la distorsión es menor, pueden tener alguna señal para referenciar la imagen al plano. Los mosaicos generados tienen poca o nula precisión para la medición de distancias, áreas o volúmenes.

ii. Controlado

Las imágenes son georreferenciadas utilizando un control topográfico o de campo. Además se usan fotografías rectificadas. Por medio de la rectificación, los puntos previamente localizados en la foto original son proyectados a una red de puntos cuyas coordenadas ya fueron establecidas. Por lo tanto, las fotos rectificadas tendrán una escala uniforme. Una vez rectificadas las fotos, son unidas y sobre ella se pueden derivar características planimétricas y altimétricas y generar un producto cartográfico con precisión en la medición de sus características.



Figura 2.16 Imágenes aéreas donde se observa el desplazamiento de los objetos a partir del centro

En la actualidad la creación de mosaicos a partir de imágenes, aunque se apoya en los métodos de la fotogrametría tradicional, se realiza con software que permite armar mosaicos a partir de imágenes digitales, sobre todo cuando no existe control

geométrico. De esta manera el mosaico de imágenes puede armarse buscando la correspondencia de pares, para lo cual es necesario identificar una transformación afin entre ellas que ponga en correspondencia directa los puntos de una dentro del sistema de referencia de la otra. Esto puede hacerse buscando características comunes donde se localicen puntos característicos que se repitan en el área traslapada de las imágenes. El procesamiento de las imágenes puede demandar gran capacidad de cómputo dependiendo de la complejidad y el número de imágenes a procesar. El proceso de generación del mosaico puede reducirse si las imágenes están georreferenciadas lo que ayudará en el proceso de ordenar y organizar las imágenes adyacentes.

2.2.3.2 Ortomosaico

Cuando las imágenes han sido corregidas en su geometría y posicionadas en un sistema de referencia, a través de un proceso de restitución, es posible generar un mosaico rectificado u ortomosaico de la zona levantada con imágenes. A diferencia de los mosaicos generados en un proceso de correspondencia de pares, en los ortomosaicos han sido corregidos los errores por desplazamiento y por elevación, y se encuentran ligados a un sistema de referencia, por lo que el proceso de unión entre imágenes es más rápido y el mosaico resultante corresponde a una proyección horizontal del terreno (ver Figura 2.17).

Durante el proceso de restitución se debe realizar el control de calidad con una inspección de las imágenes generadas y detectar deficiencias en las mismas como pueden ser: imágenes incompletas, barrido de imágenes (por ajustar algún objeto a cierta posición) e imágenes dobles. Así mismo, se debe verificar la calidad métrica de los resultados mediante la comparación de las coordenadas obtenidas en el sistema de referencia contra las coordenadas de los puntos de control levantados por procedimientos topográficos.

Por otro lado, es posible que entre imágenes existan diferencias entre el contraste y la tonalidad debido a las diferencias de iluminación durante la toma o la presencia de sombras por nubes u objetos al momento de la toma. Cuando esto ocurre se debe llevar a cabo una corrección radiométrica de las imágenes con el fin de homogenizar el color y la tonalidad de las imágenes que componen el mosaico. Estos procesos se basan en tratamientos digitales de las imágenes donde se manipulan los histogramas de las mismas.



Figura 2.17 Imagen restituida

Una vez verificados los detalles señalados anteriormente se procede a elaborar el mosaico; el procedimiento normal consiste en definir las líneas de corte en las imágenes donde se unirán entre sí, para disimular la transición entre una y otra imagen. En este paso es posible que sea necesario corregir las diferencias en tonalidades y contrastes entre la zona de encaje, aplicando correcciones radiométricas de manera local e incluso algún ajuste geométrico en la posición para disimular las diferencias planimétricas. En la actualidad la generación de mosaicos de este tipo puede realizarse de manera completamente automatizada, sin embargo siempre es necesario algún retoque o corrección cuando existen imágenes muy heterogéneas.

A partir del ortomosaico se pueden identificar los detalles planimétricos y altimétricos para derivar información cartográfica del terreno, entendiendo que el objetivo principal de la cartografía es la representación lo más verídica posible de la superficie terrestre (ver Figura 2.18). A partir de esta información se pueden generar los siguientes tipos de planos:

- Planimétricos: se representa únicamente la información sobre la superficie, límites, colindancias, rasgos sobre el terreno y es posible medir áreas y distancias.
- Altimétricos: además de la planimetría se pueden obtener las distancias verticales desde un plano de comparación de los puntos (planos acotados) o bien relacionado a los puntos del espacio unos con otros (curvas de nivel).



Figura 2.18 Ortomosaico

2.2.3.3 Modelo de elevación digital y curvas de nivel

A partir de un ortomosaico que posee información tanto planimétrica como altimétrica es posible generar información cartográfica con la topografía del terreno, representada de dos formas, una a través de un modelo de elevación digital y la otra en un plano topográfico con curvas de nivel.

2.2.3.4 Modelo digital de elevación

Un modelo digital de elevación (MDE) es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Los valores del MDE consisten en puntos con tres coordenadas (X,Y,Z) almacenados en un archivo tipo raster o vectorial con estructura regular (Figura 2.19).

Los MDE poseen un grado de exactitud y una resolución horizontal, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos y de la densidad de la información con que se genera. En los MDE generados a partir de imágenes ortorectificadas producen información topográfica con resolución de centímetros en la horizontal y gran exactitud en la elevación comparados con los levantamientos topográficos convencionales.

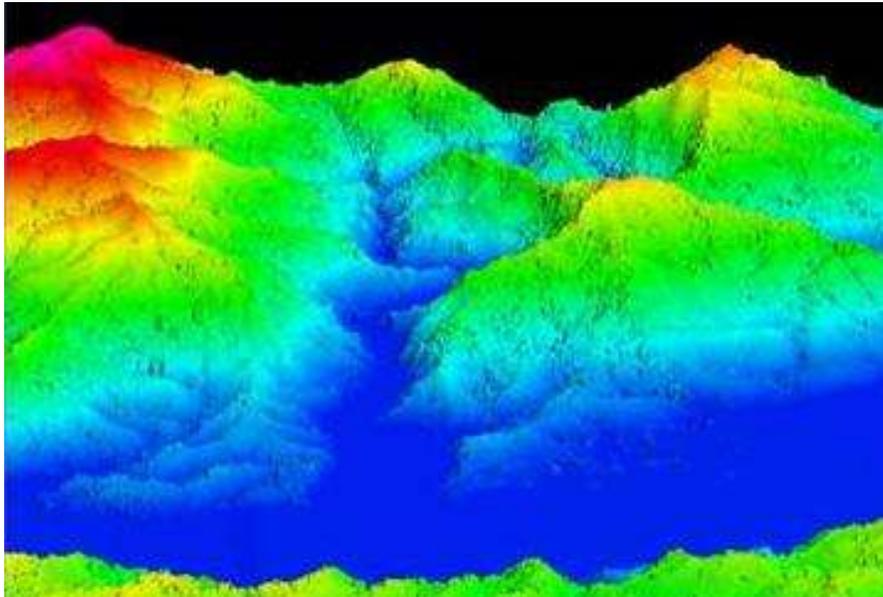


Figura 2.19 MDE con vista en perspectiva (INEGI)

Los MDE son una simplificación que se aproxima a la topografía del terreno que se pretende modelar, de manera que para representar las elevaciones sobre el terreno se recurre a un modelo discreto. Los MDE se pueden almacenar como archivos con una estructura en formato de texto o binario, en formato raster o vectorial. En formato vectorial el MDE se representa como:

- Curvas de nivel: Son líneas definidas por una sucesión de líneas con pares de coordenadas identificadas con un valor de elevación.
- Red Irregular de Triángulos: Donde se almacena un conjunto de puntos, en los que se conoce la elevación, y entre estos se traza un conjunto de triángulos, formados por tripletas de puntos cercanos no colineales, formando mosaico.

En el formato raster la información se almacena como una malla regular cuyos límites están definidos por el espacio de referencia del terreno y cada pixel almacena el valor de altitud para su posición definida en el espacio. Entre mayor sea la resolución horizontal del MDE, para representar la altitud del terreno, se requiere mayor espacio de almacenamiento. La calidad del modelo dependerá del grado de aproximación del mismo a la superficie terrestre real.

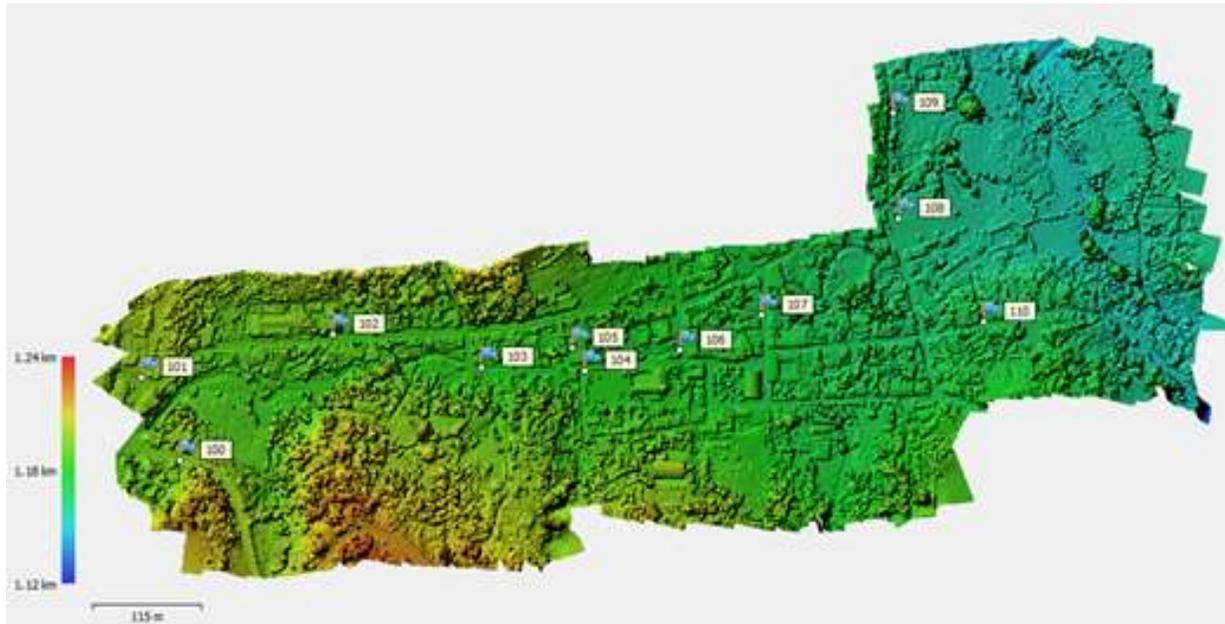


Figura 2.20 Modelo de elevación digital

2.2.3.5 Curvas de nivel

Otro producto cartográfico derivado de las imágenes orto rectificadas y unidas en un mosaico, son los planos topográficos donde las elevaciones sobre el terreno se representan con curvas de nivel. Una curva de nivel es una línea dibujada en un mapa que une puntos que representan las zonas que están a la misma altitud sobre una referencia, comúnmente la altura sobre el nivel medio del mar. Para representar las curvas de nivel en un plano se corta la superficie del terreno mediante un conjunto de planos paralelos entre sí, separados una cierta distancia unos de otros. Cada plano corta el terreno formando una figura plana que recibe el nombre de curva de nivel o isohipsa, la proyección de todas estas curvas de nivel sobre un plano común forma el plano topográfico (Figura 2.21).

Las curvas de nivel representadas en el plano van acotadas con el valor de elevación o la altitud en ese plano, y los planos o curva de nivel son equidistantes a una distancia vertical entre sí. Las curvas de nivel son cerradas y no pueden cortarse entre ellas. La equidistancia entre las curvas de nivel se elige dependiendo del detalle que se quiera representar del terreno o de la densidad de datos que se tenga para generar el mapa topográfico.

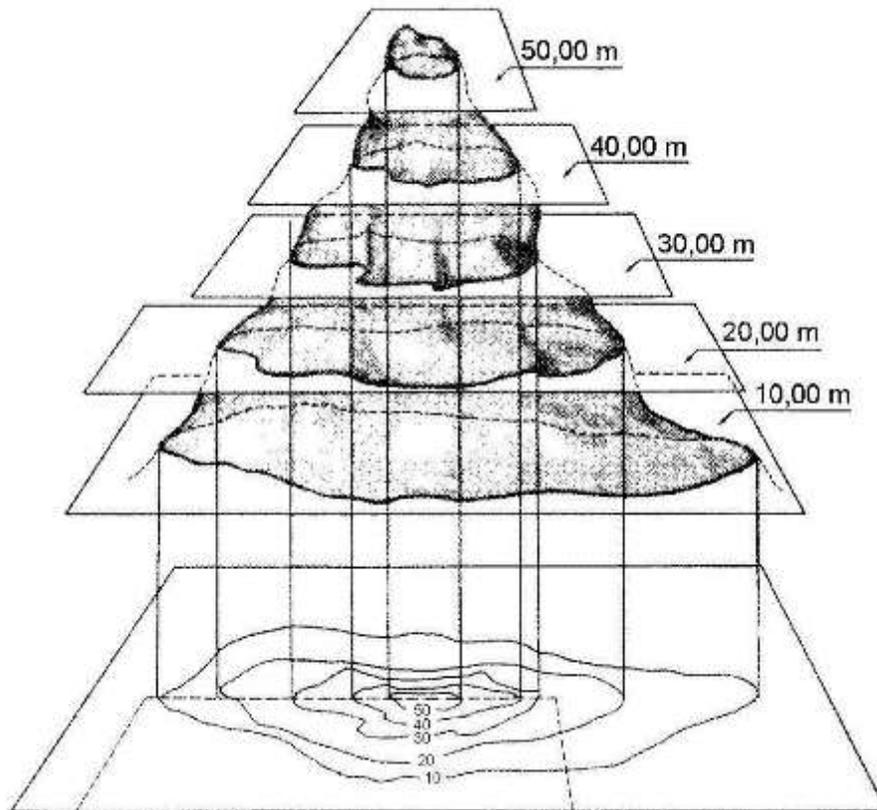


Figura 2.21 Diferencias de elevación representadas en un plano mediante curvas de nivel

2.3 Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)

2.3.1 Historia de los sistemas de posicionamiento

Desde que el hombre tuvo un comportamiento nómada se empezó a preguntar dónde estaba y a donde iba, preguntas que trato de resolver de manera simple, desde la era de piedra utilizó puntos estratégicos en el terreno para ubicarse, por ejemplo, montañas, árboles, etc., a estos se les dio el nombre de puntos de referencia, un término que actualmente se utiliza.

Con los inicios de la navegación en mar abierto las mismas preguntas fueron lanzadas nuevamente, y fue así como otros objetos visibles fueron el centro de atención para la ubicación de los navegantes, es aquí donde empieza la era de la navegación utilizando el sol, luna y las estrellas como puntos de referencia, posteriormente se pudieron establecer distancias valiéndose de aparatos que medían ángulos de inclinación con respecto a constelaciones o estrellas fijas que permitían mediante triangulación el

cálculo de distancias; sin embargo, estos cálculos dependían de las condiciones atmosféricas y eran muy imprecisos.

Hacia la mitad del siglo XX se descubrió una manera más precisa de medir distancias, a través del uso de señales de radio, este concepto se basa en que si las señales de radio viajan a la velocidad de la luz ($300,000 \text{ km / s}$) y es posible calcular el tiempo en que esa señal tarda en desplazarse de un lugar A y un lugar B, entonces la distancia se obtiene por multiplicación del tiempo y la velocidad de la luz que es constante.

El sistema entonces consiste en un transmisor (A) que envía la señal y un receptor que la recibe de tal manera que mediante el cálculo del tiempo que tarda la señal en llegar del transmisor al receptor se calcula la distancia entre ambos. El sistema era eficiente, pero presentaba otro problema, no era posible definir exactamente la ubicación del receptor ya que podía estar en una circunferencia de infinitos puntos a la misma distancia del transmisor (A) como se observa en la Figura 2.22.

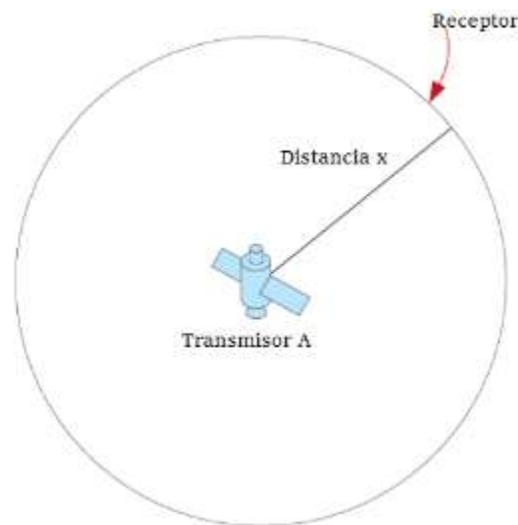


Figura 2.22 Sistema con un transmisor (A) y un receptor (NovAtel, 2016)

Si existe un segundo transmisor (B) con el cual se calcula también las distancias al receptor, hay la intersección de dos circunferencias con dos posibles puntos (P y Q), que representan a las dos posibles ubicaciones del receptor, lo cual tampoco es lo suficientemente preciso para determinar la ubicación exacta del receptor (Figura 2.23).

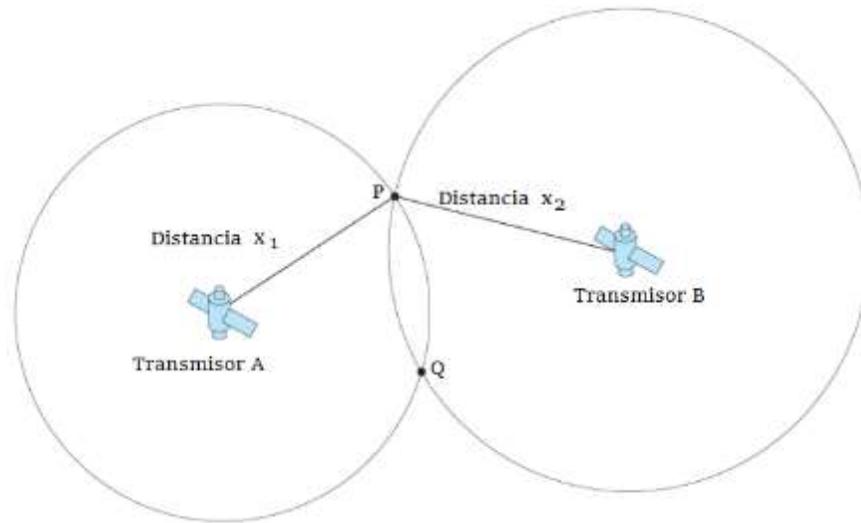


Figura 2.23 Sistema con dos transmisores (A) y (B) y un receptor (NovAtel, 2016)

Por tanto, fue necesario un tercer transmisor para poder encontrar un único punto en el que coincidían las tres distancias y que representaba la ubicación más precisa del receptor (Figura 2.24). Debe tener en cuenta que el receptor tiene registrada la ubicación precisa de los tres transmisores A, B, C.

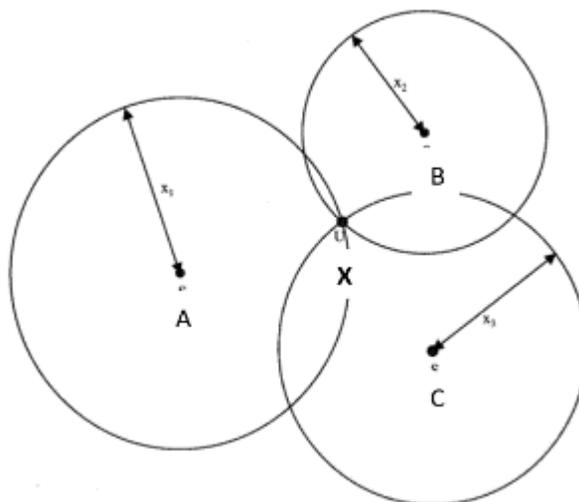


Figura 2.24 Sistema con tres transmisores (A), (B) y (C) y un receptor (Tsui, 2005)

Los radiotransmisores tienen un radio de alcance de 500 km y el sistema puede contener muchos transmisores dependiendo del grado de cobertura que se espera conseguir, estos sistemas aún se utilizan hoy en día y se denominan sistemas de navegación por radio. Otros sistemas parecidos surgieron a partir de la navegación por radio como LORAN que podía cubrir hasta 500 millas por transmisor, pero existen otras limitaciones para distancias cortas, ya que estos sistemas solo proveen información en dos dimensiones, es decir, latitud y longitud, pero a partir de los 250 m de distancia la influencia de la curvatura de la tierra es notoria.

Ante estas limitaciones se pensó en usar otros instrumentos como transmisores, satélites de radio comunicaciones y de TV que pueden cubrir un área de más de 3,000 millas y si existen varios satélites alrededor de la tierra es posible cubrir todo el planeta. El principio de funcionamiento es el mismo que para los transmisores de radio terrestres, los satélites envían la señal a la tierra y los receptores la reciben y calculan el tiempo en que tarda la señal en llegar, se pueden calcular tanto la distancia vertical y horizontal (latitud y longitud) y la altura. Por lo tanto, la superficie sobre la cual puede estar un receptor que recibe la señal de un solo satélite es una esfera y no una circunferencia, y al tener la intersección de tres esferas tendremos la ubicación exacta del receptor. Con los satélites la cobertura es global, no existen restricciones de distancia y pueden ser usados en cualquier momento. Estos sistemas de navegación son los llamados los Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS).

2.3.2 GNSS (Global Navigation Satellite Systems)

Bajo el acrónimo de GNSS (Global Navigation Satellite Systems) se engloban todas las técnicas de posicionamiento mediante satélites, la más conocida de ellas es el GPS (Global Navigation Satellite System) pero hoy en día existen tanto de forma combinada como aislada otras técnicas disponibles como GLONASS, GALILEO, BEIDOU. Los sistemas GNSS cubren todas las posibilidades de posicionamiento mediante satélites, algunos ejemplos sencillos son:

- Posicionamiento mediante código autónomo
- Posicionamiento diferencial mediante correcciones diferenciales con GPRS/UTMS (Proyecto RECORD/EUREF-IP), mediante RDS (Proyecto RECORD/RASANT),
- Redes GPS de alta precisión para estudios geodinámicos (ERGPS)

El mercado del posicionamiento por satélite va más allá del propio posicionamiento en sí, siendo sistemas imprescindibles para la medición precisa de tiempo, actualización directa de cartografía, sistemas de guiado automático de vehículos, combinación con sensores inerciales para la determinación de posición y orientación de sensores aerotransportados, entre otras aplicaciones.

2.3.2.1 El sistema de posicionamiento GLONASS

El sistema GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System) surge como sustitución del sistema doppler TSIKADA, está administrado por las Fuerzas Espaciales Rusas y consta de 24 satélites en 3 órbitas de 64.8° de inclinación a 19,100 km de altitud, los satélites están dotados con osciladores de Cesio, y vida útil de 3 años. El Sistema de Tiempo de GLONASS se denomina GLONASST y transmite con dos frecuencias utilizando el Acceso de Frecuencia de División Múltiple $L1=1602\text{MHz} + n \cdot 0.5625\text{MHz}$ donde "n" es entero y distinto para cada satélite. Aunque GPS y GLONASS son sistemas diferentes tiene posibilidad de uso combinado. Los problemas que surgen de esta combinación son:

- Diferente sistema de tiempo. Tiempo GPS y GLONASST
- Diferente sistema de referencia: WGS84 y PZ-90

Las ventajas son el mayor número de satélites, hasta 48, que redundan en:

- Zonas de poca visibilidad tienen más probabilidad de captar satélites
- Tiempo de inicio es menor (tiempo de primera posición fija)
- Mayor integridad o confianza en los datos calculados, para un mismo tiempo de observación
- Consigue mitigar el efecto de la disponibilidad selectiva cuando estaba activa, GLONASS no tiene recortes en precisión

2.3.2.2 El sistema de posicionamiento GALILEO

El sistema Galileo estará formado por una constelación mundial de 30 satélites en órbita terrestre media distribuidos en tres planos inclinados con un ángulo de 56° hacia el ecuador a 23 616 km de altitud. Se distribuirán diez satélites alrededor de cada plano y cada uno tardará 14 horas para completar la órbita de la Tierra. Cada plano tiene un satélite de reserva activo, capaz de reemplazar a cualquier satélite que falle en ese plano.

Los satélites emplean tecnologías de gran fiabilidad e innovadoras. El cuerpo rota sobre el eje que mira a la Tierra para que sus paneles solares apunten al Sol (generando un pico de energía de 1.5 kW). Después de que se establezca la constelación inicial, los demás satélites que se lancen reemplazarán a los dañados y completarán el sistema a medida que la vida útil de los satélites originales se extinga.

Dos centros de control Galileo, ubicados en Europa, controlan la constelación y la sincronización de los cronómetros atómicos del satélite, el procesamiento de señales de integridad y el manejo de datos de todos los elementos internos y externos. Una red de

comunicaciones dedicada de alcance mundial interconecta todas las estaciones y las instalaciones terrestres mediante enlaces terrestres y satelitales (VSAT).

La transferencia de datos con los satélites se realiza a través de una red mundial de estaciones Galileo de enlace ascendente, cada una de las cuales tiene estaciones de telemetría, telecomunicaciones, seguimiento de satélites y de transmisión de la información de misión. Las estaciones de monitoreo de GALILEO de todo el planeta controlan la calidad de la señal. La información obtenida de estas estaciones se transmite por la red de comunicaciones a los dos centros de control terrestres.

Los componentes regionales proveen, de forma independiente, la integridad de las señales de Galileo. Los prestadores de servicios regionales difunden los datos de integridad regionales usando los canales de enlace ascendente autorizados provistos por el sistema. Se garantiza que los usuarios siempre reciban datos de integridad a través de dos satélites con un ángulo mínimo de elevación de 25°.

Los componentes locales mejoran las prestaciones mencionadas anteriormente con distribución de datos locales por medio de radioenlaces terrestres o redes de comunicación existentes a fin de aumentar la precisión o la integridad alrededor de aeropuertos, puertos cabeza de líneas ferroviarias y en áreas urbanas. Los componentes locales también se despliegan para ampliar los servicios de radionavegación a los usuarios situados dentro de edificios.

2.3.3 Descripción general del sistema NAVSTAR-GPS

NAVSTAR-GPS (Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System - Global Positioning System) significa Navegación por satélite en tiempo y distancia - Sistema de Posicionamiento Global. Este sistema de navegación fue desarrollado por las fuerzas aéreas de EEUU, en 1963 la Fuerza Aérea de los EUA inició el "Proyecto 621B" para desarrollar un sistema de navegación tridimensional basado en satélites artificiales, poco después la Marina de los EUA emprendió otro proyecto similar conocido como "Timation", finalmente ambos proyectos convergieron finalmente en el sistema NAVSTAR-GPS, que hasta la fecha es el proyecto espacial más caro de la historia con un valor superior a 10 000 millones de dólares.

Los objetivos iniciales del sistema GPS fueron servir como referencia espacial y temporal para las tropas militares y dar cobertura en toda la superficie del planeta las 24 horas del día. El proyecto incluía 24 satélites, el primero lanzado en 1978. Su aplicabilidad práctica quedó demostrada durante la Guerra del golfo Pérsico en 1991, aún sin estar totalmente operativo, este éxito aceleró el desarrollo final del proyecto.

Actualmente, el sistema GPS está basado en las señales de 24 satélites puestos en órbita por el departamento de la defensa de los Estados Unidos a partir de la década de

los 70 (NAVSTAR), está 100 % operativo desde 1994, es de libre acceso y está disponible todo el tiempo. Permite, entre otras cosas, la determinación tridimensional de la velocidad, la estimación precisa del tiempo con un error de un microsegundo, alta fiabilidad, gran precisión en todo tipo de condiciones atmosféricas, versátil y válida para todo tipo de usuarios.

En teoría tiene un error de 3 cm, aunque en la práctica el error es de 3 metros, existen dos tipos de servicios:

- SPS (Standard Positioning Service): para usuarios civiles
- PPS (Precise Positioning Service): con fines militares

El sistema SPS introduce un error intencionado para conseguir 10 veces menor precisión que PPS (Disponibilidad Selectiva).

2.3.3.1 Segmentos del sistema GPS (espacial, control, usuario)

El sistema GPS está compuesto por tres segmentos: espacial, de control y el usuario (Figura 2.25).

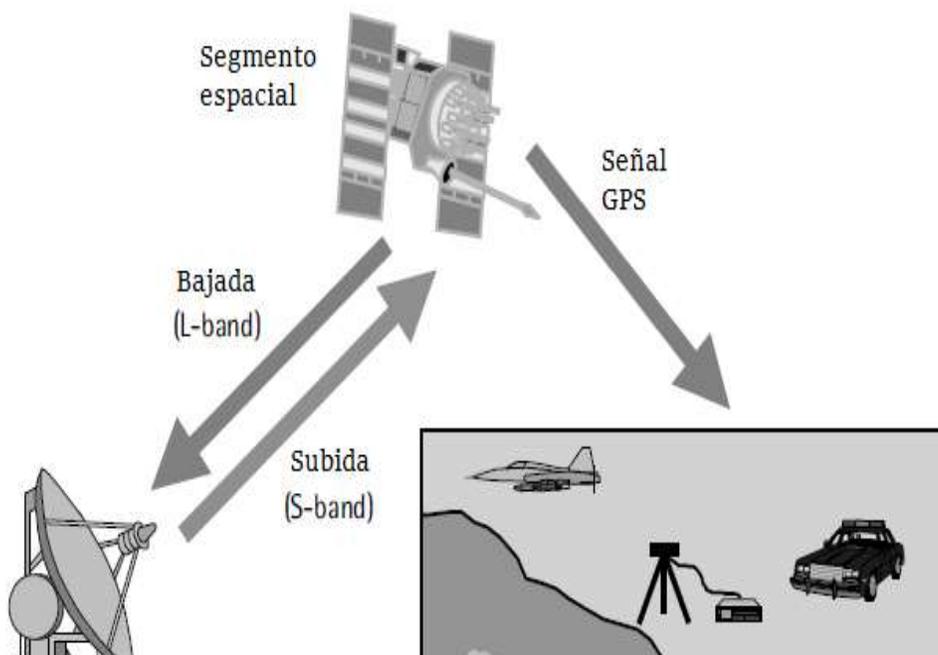


Figura 2.25 Segmentos del sistema GPS (El-Rabbany, 2002)

i. Segmento espacial

El segmento espacial comprende la constelación de los satélites, inicialmente se pensó que solo eran necesarios 18 satélites (más 3 de emergencia por si acaso alguno fallaba). Más tarde se comprobó que con este número la cobertura en algunos puntos de la superficie terrestre no era buena, entonces se pasaron a utilizar 21 satélites (más 3 de reserva como antes) repartidos en 6 órbitas, de forma que hay 4 satélites por órbita, el sistema está diseñado de tal forma que sobre cualquier punto de la superficie terrestre se existe al menos 4 satélites en órbita en todo momento (Figura 2.26). Entre las características de las órbitas están:

- Las órbitas de los satélites son casi circulares, con una excentricidad de 0.03 a 0.3
- Están situadas a una altura de 20 180 km
- Tienen una inclinación respecto al plano del ecuador de 55°
- La separación entre las órbitas es de 60°
- El periodo de los satélites es de 11 h 58m
- Hay planos orbitales que caracterizan a las órbitas

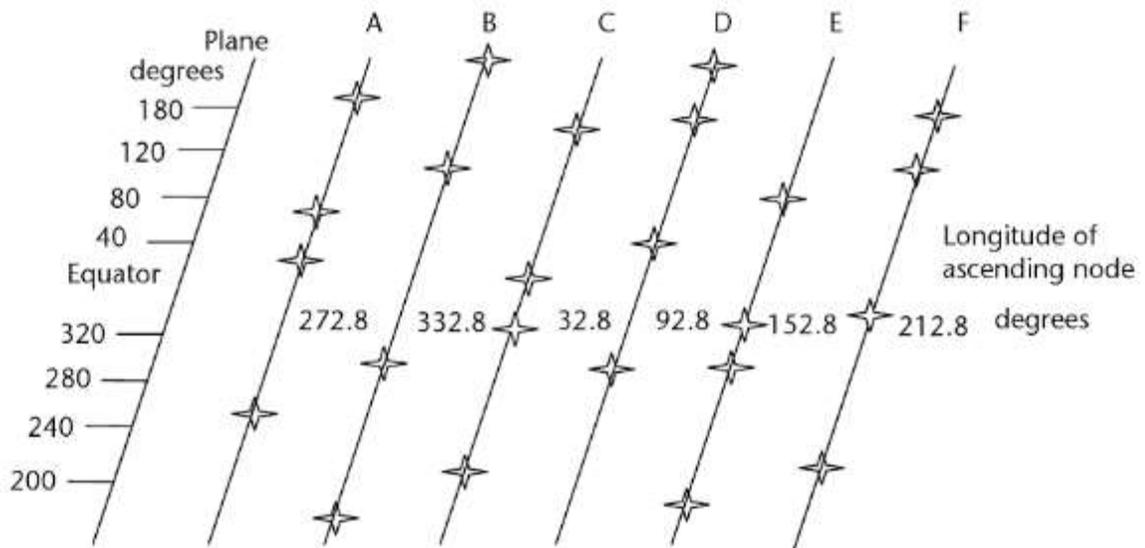


Figura 2.26 Proyección plana de la constelación GPS y sus orbitas (Kaplan y Hegarty, 2005)

Los satélites emiten con una potencia de 700W a través de una antena de arreglo helicoidal (Figura 2.27).



Figura 2.27 Ejemplo de arreglo de antena helicoidal del satélite MCA-6010 (Aerospace online, 2016)

La constelación de 24 satélites (Figura 2.28) que circundan la tierra cada 12 horas se encuentran orbitando a 12 000 millas del nivel medio del mar. Dichos satélites transmiten señales muy débiles de GPS en un rango de frecuencia de 1 575.42MHz (UHF) a 50W. Cada satélite lleva dos relojes de cesio y dos de rubidio funcionando a una frecuencia de 10.23 MHz. El reloj de cesio es más estable para periodos cortos y el de rubidio para periodos largos. La sincronización de los relojes y de las frecuencias del sistema GPS se realiza desde el segmento de control del sistema. Cada reloj tiene una vida útil de 7.5 años al cabo de los cuales debe ser sustituido. La Tabla 2.4 muestra un resumen de las características de la constelación de satélites.

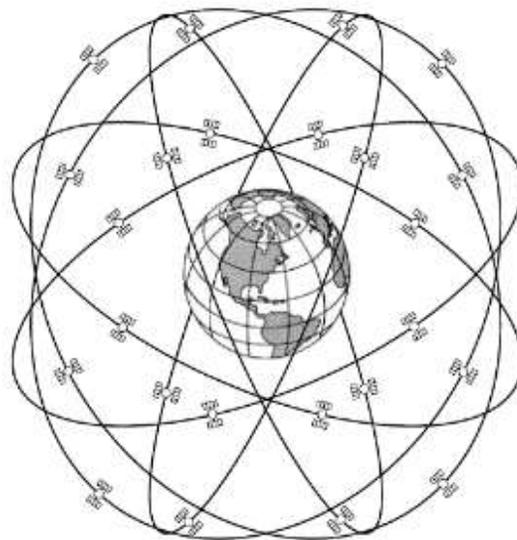


Figura 2.28 Constelación de satélites del sistema GPS (Bossler, 2010)

| | |
|---|--|
| Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico | 2. Principios de cartografía, fotogrametría y sistemas de posicionamiento por satélite |
|---|--|

Tabla 2.4 Características de la constelación de satélites

| | |
|--------------------------------|--------------------|
| Número de satélites | 24 |
| Número de planes orbitales | 6 |
| Número de satélites por órbita | 4 |
| Inclinación orbital | 55° |
| Radio orbital | 265 860 km |
| Periodo | 11 h 57 min 26 sec |

ii. Segmento de control

Está compuesto de tres partes principales (Figura 2.29):

- La estación central en Colorado Springs (EUA) reúne la información de las estaciones de monitoreo repartidas por todo el mundo. Realiza los cálculos correspondientes para que todo se desarrolle según la planificación y que los parámetros estén dentro de las tolerancias. Genera el mensaje de navegación y lo retransmite a los satélites para que éstos los difundan a los usuarios.
- Estaciones de monitoreo distribuidas por todo el mundo, disponen de precisos relojes atómicos y equipos receptores especiales que permiten detectar derivas en los relojes o modificaciones en la calidad de los datos (Figura 2.30).
- Antena terrena del enlace "up-link" que comunica con los satélites en la banda S.

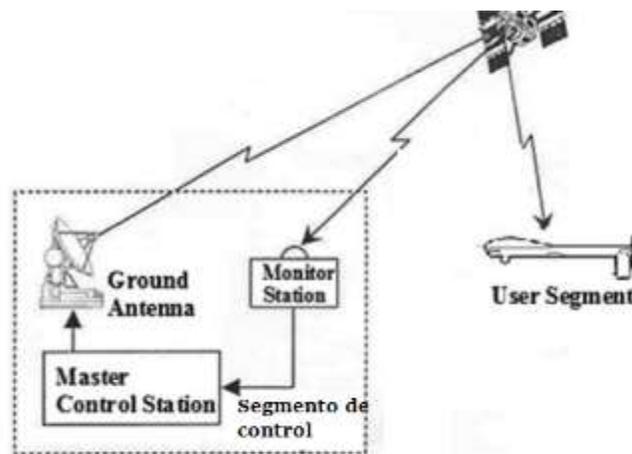


Figura 2.29 Partes del segmento de control (Hajiyev *et al.* 2015)

Las estaciones de control de la constelación GPS se ubican en puntos estratégicos en todo el planeta (Figura 2.30) son:

- Colorado Springs (U.S.A.). Central de cálculo y operaciones. (Estación maestra)
- Ascensión (Atlántico Sur)
- Hawaii (Pacífico Oriental)
- Kwajalein (Pacífico Occidental)
- Diego García (Océano Índico)



Figura 2.30 Distribución geográfica de las estaciones de control del Sistema GPS (Huang y Cheng, 2010)

iii. Segmento usuario

Está compuesto por las antenas y los receptores-procesadores (que proporcionan la colocación, velocidad y la sincronización exacta al usuario), distintos tipos de receptores que existen en el mercado y de los distintos usuarios del sistema. Para descifrar las señales del GPS, el receptor debe realizar las siguientes tareas:

- Seleccionar uno o más satélites a la vista
- Adquirir señales del GPS
- Medición y seguimiento
- Recuperación de datos de navegación
- Hay dos tipos de servicio disponibles para los usuarios del GPS - el SPS y el PPS.
- Entre las funciones principales de los receptores del sistema GPS están:
- Sintonizar las señales emitidas por los satélites
- Decodificar el mensaje de navegación

- Medir el retardo de la señal (desde el transmisor hasta el receptor) a partir de los cuales calculan la posición
- Presentar la información de la posición en la que se encuentra (en 3D o en 2D)

Si solo se tuviera un satélite enviando la señal la posición del receptor estaría en cualquiera de los infinitos puntos de una esfera, con dos satélites la posición podría estar en cualquier punto de la circunferencia formada por la intersección de las dos esferas y con tres satélites tendríamos la ubicación del punto en dos dimensiones (Figura 2.31), por esta razón se requieren cuatro satélites para computar las cuatro dimensiones de X, de Y, de Z (posición) y de tiempo, no es posible obtener la ubicación precisa de un punto con una cantidad menor de satélites.

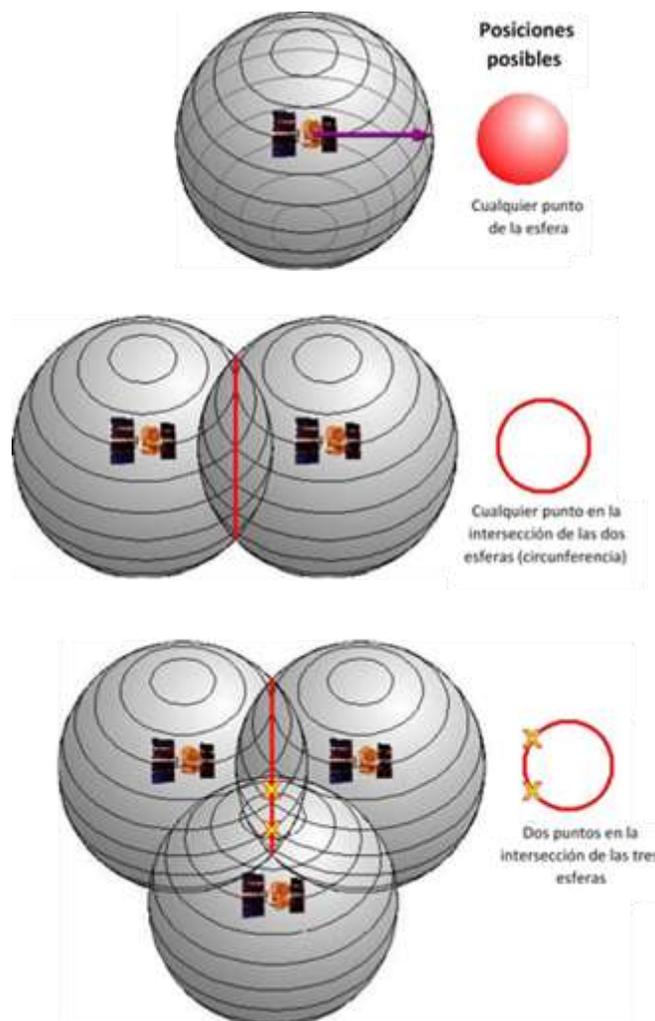


Figura 2.31 Estimación de la posición del receptor GPS respecto a la cantidad de satélites con 1, 2 y 3 satélites (DiBiase, 2016)

Otras funciones complementarias del segmento usuario son:

- Ayuda a la navegación
- Almacenamiento de datos
- Presentación más sofisticada (mapa de fondo)

2.3.4 Características de los receptores civiles (c/A)

- 1ª posición 2D en menos de 2 minutos (siempre que no partamos de la posición perdido).
- 1ª posición 3D en menos de 2.5 minutos (siempre que no partamos de la posición perdido).
- Actualizaciones de la posición de 0.5 a 1 segundos.
- Precisión en torno a 15 m.
- Medida de la velocidad del usuario, precisión de 0.1 m/s aproximadamente.
- Referencia temporal, precisión de 100 ns aproximadamente.

La Figura 2.32 muestra la estructura general del equipo usuario

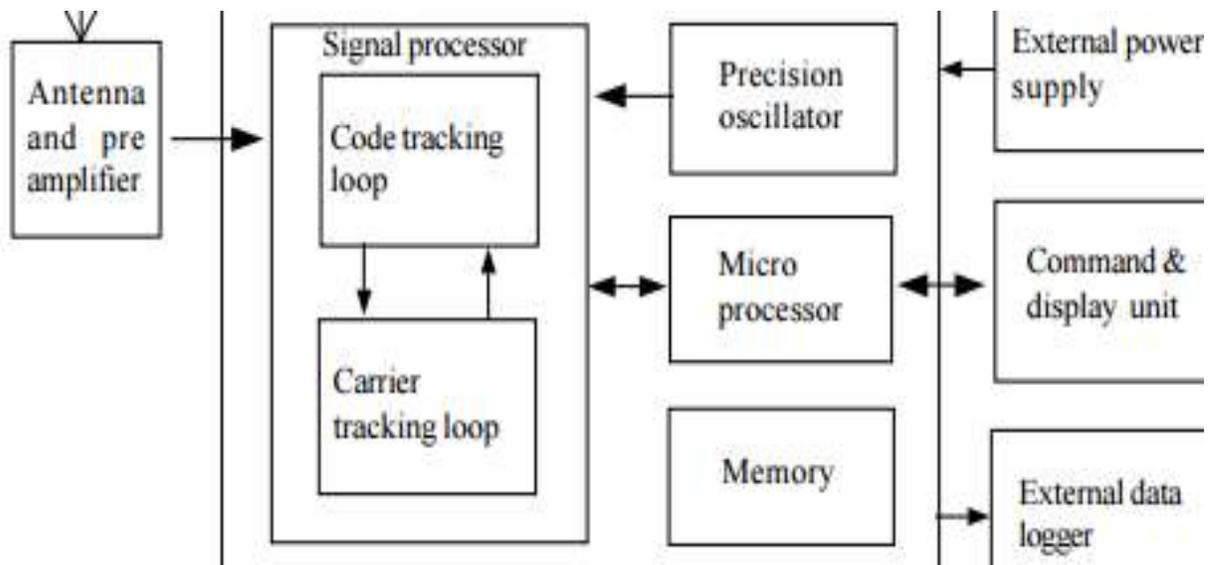


Figura 2.32 Estructura general del equipo usuario (Rajú, 2003)

2.3.5 Señal de los satélites, precisión, ángulo máscara

Cada satélite va provisto de un reloj-oscilador que provee una frecuencia fundamental de 10.23 MHz, sobre la que se estructura todo el conjunto de la señal radiodifundida por el satélite. El satélite emite información sobre dos portadoras, la primera es el resultado de multiplicar la fundamental por 154 (1,575.42 MHz) y se denomina L1. La segunda, utiliza un factor de 120 (1,227.60 MHz) y se denomina L2. El poder utilizar las 2 frecuencias permite determinar por comparación de sus retardos diferentes, el retardo ionosférico, difícilmente predecible por otros sistemas.

Existen dos tipos de códigos semialeatorios, el código C/A (Clear Acquisition) y el código P (Precise). El código P es de más alta frecuencia que el código C/A, por lo que puede dar una mayor precisión, razón por la que es de uso militar, aunque varios sistemas GPS de muy alta precisión pueden recibirlo. El código P puede ser encriptado o codificado y no ser recibido por ningún sistema GPS de uso civil. Al encriptarse el código P se le conoce como código Y, de uso exclusivo del Departamento de Defensa de Estados Unidos quienes son los únicos que conocen la forma de decodificación. Así, L1 (1,575.42 MHz) transporta al código C/A y al código P; L2 (1,227.60 MHz) solo transporta al código P. Existen equipos de doble frecuencia, cuya ventaja sobre los de una frecuencia, además de la precisión, es que toman el doble de datos en el mismo intervalo de tiempo. En la Figura 2.33 se ilustran algunas señales.

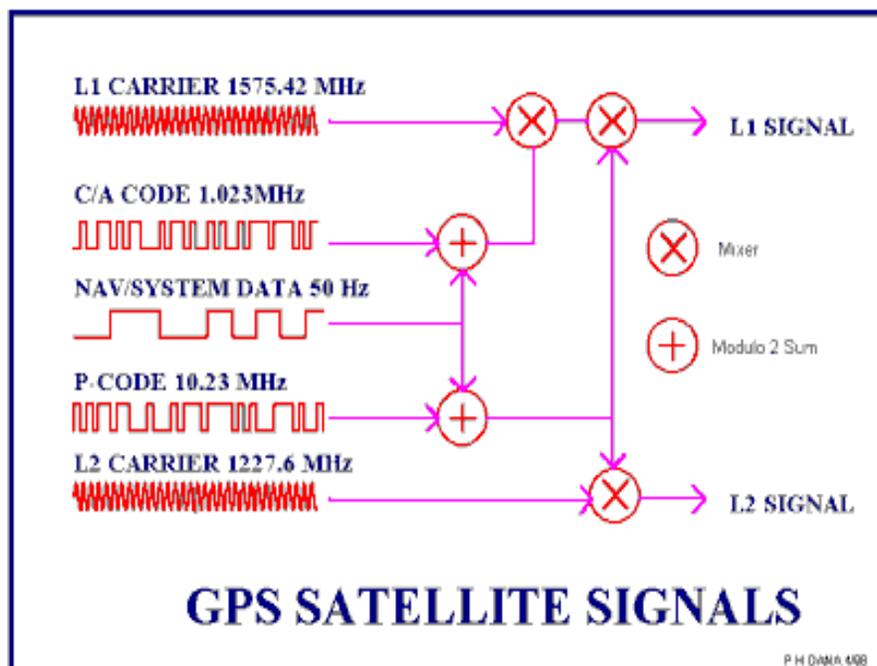


Figura 2.33 Señales de satélite GPS (University of Colorado Boulder, 2016)

2.3.5.1 Formatos de la señal de GPS

Para evitar que cada empresa que utiliza la señal de los satélites cree su propio formato con la consecuente confusión de formatos, se crearon formatos estándar para el manejo de los datos del sistema GPS, estos son NMEA 0183, RINEX, NGS-SP3 y STCM-SC104. A continuación se describen brevemente.

- Formato NMEA 0183. NMEA 0183 (o NMEA de forma abreviada) es una especificación combinada eléctrica y de datos entre aparatos electrónicos marinos y, también, más generalmente, receptores GPS.

El protocolo NMEA 0183 es un medio a través del cual los instrumentos marítimos y también la mayoría de los receptores GPS pueden comunicarse los unos con los otros. Ha sido definido, y está controlado, por la organización estadounidense National Marine Electronics Association. El formato está escrito en código ASCII y está ordenado en forma de una sentencia de caracteres tal como se observa en la Figura 2.34 donde cada variable lleva información de ciertas características de la superficie terrestre (Tabla 2.5).

```
$GPGGA,hhmmss.ss,lll.ll,a,yyyy.yy,a,x,xx,x.x,x.x,M,x.x,M,x.x,xxxx*hh<CR><LF>
$GPGGA,115417.00,4338.123456,N,07938.123456,W,1,10,01.1,095.095,M,M,999,0000
```

Figura 2.34 Estructura general de una sentencia GGA (El-Rabbany, 2002)

- Formato RINEX. RINEX son las siglas en inglés de "Receiver INdependent EXchange". Se trata de un formato de ficheros de texto orientado a almacenar, de manera estandarizada, medidas proporcionadas por receptores de sistemas de navegación por satélite, como GPS, GLONASS, EGNOS, WAAS o Galileo.

La salida final de un receptor de navegación suele ser su posición, velocidad u otras magnitudes físicas relacionadas. Sin embargo, el cálculo de todas estas magnitudes se basa en una serie de medidas a una o varias constelaciones de satélites. Aunque los receptores calculan las posiciones en tiempo real, en muchos casos resulta interesante almacenar las medidas intermedias para su uso posterior. RINEX es el formato estandarizado que permite la gestión y almacenamiento de las medidas generadas por un receptor, así como su procesado off-line por multitud de aplicaciones informáticas, independientemente de cuál sea el fabricante tanto del receptor como de la aplicación informática.

El formato RINEX ha evolucionado para adaptarse al aumento progresivo de tipos de medidas correspondientes a los nuevos sistemas de navegación por satélite. La versión más común en la actualidad es la 2.10, que permite el almacenamiento de medidas de pseudodistancias, fase de portadora y Doppler para sistemas GPS, GLONASS, EGNOS y WAAS de manera simultánea. Recientemente se ha presentado la versión RINEX 3.0, capaz de albergar de forma ordenada el ingente número de medidas previstas para los nuevos sistemas, como el GPS avanzado o Galileo.

Tabla 2.5 Significado de términos de una sentencia GGA (El-Rabbany, 2002)

| | |
|-----------|--|
| \$ | Start of sentence delimiter |
| GP | Talker identifier (GPS in this case) |
| GGA | Data identifier (GPS fix data in this case) |
| , | Data field delimiter |
| hhmmss.ss | Time of position in UTC system (hoursminutesseconds.decimal) |
| lllll.ll | Latitude (degreesminutes.decimal) |
| a | N/S (North of South) |
| yyyyy.yy | Longitude (degreesminutes.decimal) |
| a | E/W (East or West) |
| x | GPS quality indicator (1 = point positioning with C/A-code) |
| | (2 = DGPS with C/A-code) |
| | (3 = point positioning with P-code) |
| | (4 = RTK with ambiguity parameters fixed to integer values) |
| | (5 = RTK with float ambiguity parameters) |
| xx | Number of satellites used in producing the solution |
| x.x | HDOP |
| x.x | Orthometric Height |
| M | Meters (unit of Orthometric Height) |
| x.x | Age of DGPS data in seconds (time since last RTCM message type 1 or 9 was received; null field when DGPS mode is not used) |
| xxxx | Reference station ID (in case of DGPS; use the range 0000-1,023) |
| * | Checksum delimiter character |
| hh | Checksum field (last field in the sentence) |
| <CR><LF> | Sentence terminator |

La última versión de RINEX 2.11 define seis archivos que contienen entre otras cosas los siguientes datos (1) datos de observación, (2) mensaje de navegación, (3) meteorología, (4) navegación de GLONASS, (5) satélites geoestacionarios (señal GPS), y (6) datos del reloj del satélite y receptor.

- RTCM-SC104. Utilizado especialmente para sistemas DGPS

2.3.6 Tipos de errores

Los errores en las mediciones de GPS pueden ser intencionales cuando son provocados por las instituciones que crearon el sistema o debido a factores externos o internos del sistema, pero no provocados.

2.3.6.1 Degradación intencional de la señal

Existen dos formas para degradar intencionalmente la señal emitida por los satélites GPS. La primera es llamada Selective Availability (SA), y la otra llamada Anti-Spoofing (A-S). El objetivo de ambas es disminuir a los usuarios la exactitud total del sistema.

- Selective Availability. La limitación en este caso puede ser lograda de dos maneras. La primera es mediante la manipulación de los datos de las efemérides (método e) y la segunda mediante la desestabilización de los relojes del satélite (método d). Ambos métodos afectan la medición de pseudodistancias. Desde el año 2000 fueron eliminados a nivel mundial.
- Anti-Spoofing. Consiste en encriptar el código P mediante el uso del llamado código protegido Y. Solamente usuarios autorizados tienen acceso al código P cuando el A-S es activado.

2.3.6.2 Fuentes de error o errores no intencionales

Los parámetros que pueden condicionar de gran manera las precisiones que son consideradas como fuente de error son:

- i. Tiempo (2 metros)

Dado que la información llega de los satélites, estos transmiten el tiempo exacto en el que empezaron a emitir su mensaje codificado, y los receptores miden, también, el tiempo exacto en el que recibieron cada señal, así se puede calcular una medida de distancia entre el receptor y el satélite, conociendo la velocidad de propagación de la onda y el tiempo transcurrido desde que se emitió la señal hasta que fue recibida. El

problema surge cuando los relojes del satélite y el receptor no marcan el mismo tiempo, de tal manera que un microsegundo de desfase se traduce en un error de 300 metros en la medición de la distancia. La Figura 2.35 muestra el error en la posición calculada debido a la diferencia de tiempo entre los relojes del satélite y receptor (línea continua) y posición verdadera (línea punteada).

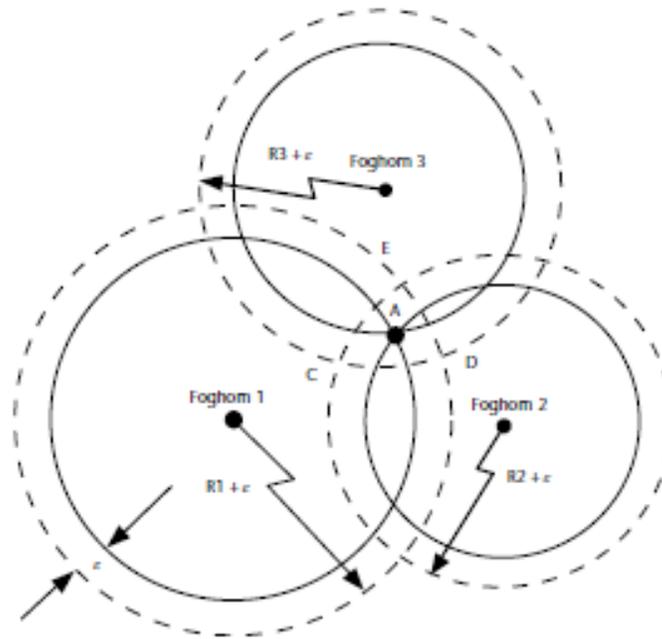


Figura 2.35 Error en la posición calculada debido a diferencia de tiempo entre reloj del satélite, receptor y posición verdadera (línea punteada) (Kaplan y Hegarty, 2005)

ii. Ionósfera (5 metros)

La ionosfera es la región de la atmósfera que se sitúa entre 50 y 1000 millas aproximadamente sobre la superficie de la tierra (Figura 2.36). Posee la particularidad de que los rayos ultravioletas procedentes del sol ionizan las moléculas de gas que allí se encuentran liberando electrones, produciendo de esta forma una dispersión no lineal en las ondas electromagnéticas enviadas por los satélites, de manera que cada onda se desacelera en un ritmo inversamente proporcional al cuadrado de su frecuencia. La manera utilizada para eliminar esta fuente de error es comparar la información que se recibe con dos receptores lo suficientemente próximos entre sí, de manera que esta perturbación afecte a los dos por igual para poderla despreciar.

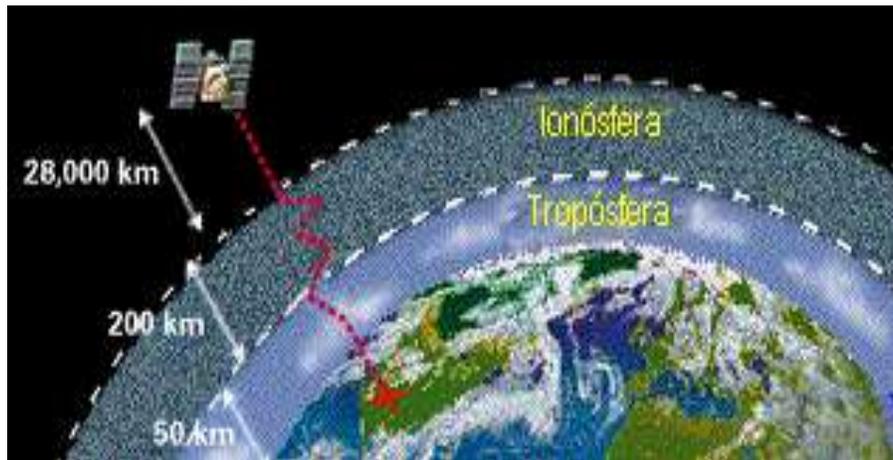


Figura 2.36 Distorsión de la señal a su paso por la ionosfera (Trimble, 2016)

iii. Tropósfera (0.5 metros)

Estos errores se cometen cuando se produce una refracción de las ondas según las distintas condiciones meteorológicas de temperatura, presión y humedad relativa del aire que encuentre a su paso. Para eliminar dichos errores se aplican diversos modelos troposféricos ya establecidos (Figura 2.37).

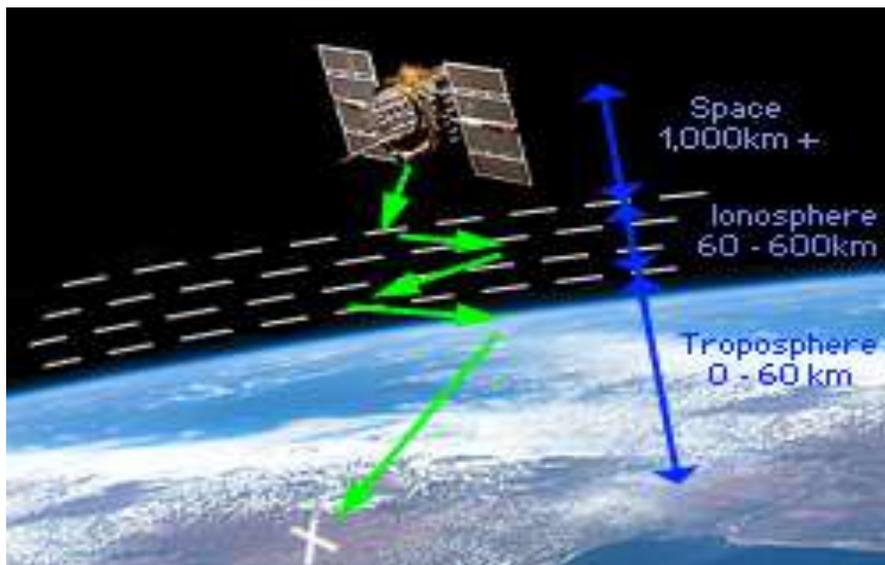


Figura 2.37 Distorsión de la señal a su paso por la troposfera (Trimble, 2016)

iv. Efemérides (2.5 metros)

Las efemérides de los satélites se pueden leer en cada uno de los mensajes de navegación de cada satélite de la constelación. Dicha lectura, se realiza en las estaciones del segmento de control. En ellas viene incluida una extensa información entre la que cabe destacar:

- Influencia que sobre el satélite tiene el campo magnético terrestre
- Parámetros sobre la presión de la radiación solar
- Posibles fallos de los relojes atómicos
- Operatividad de cada uno de los satélites
- Posición estimada para cada uno de los satélites dentro de la constelación global, etc.

Los errores generados por las efemérides tienen un efecto relativamente pequeño, fácilmente compensable (Figura 2.37).

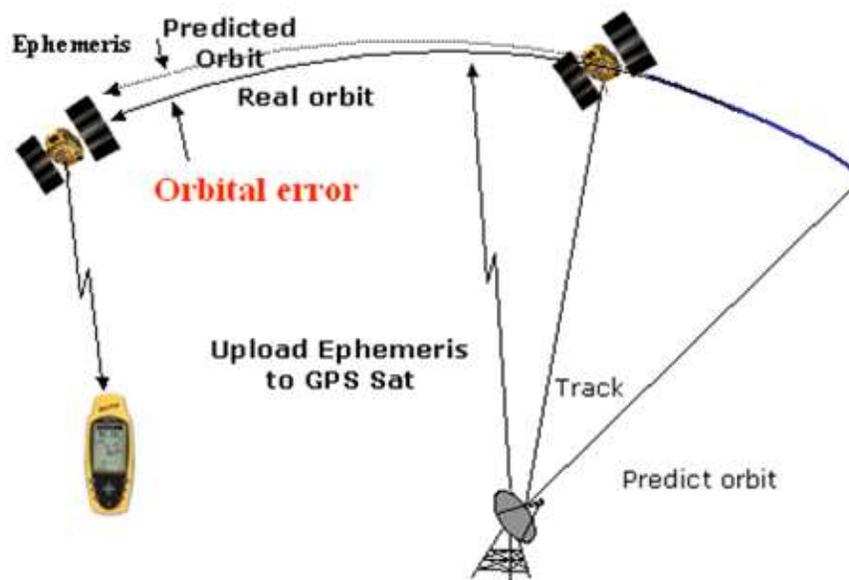


Figura 2.38 Errores debidos a las efemérides del satélite (Yasuda, 2006)

v. Efecto multicamino (1 metro)

Se produce cuando la onda sufre desviaciones, reflexiones, choques contra objetos reflectantes en su camino hacia la antena. Para reducir este efecto se requiere disponer de antenas con planos de tierra con emplazamientos cuidadosamente seleccionados (Figura 2.39).

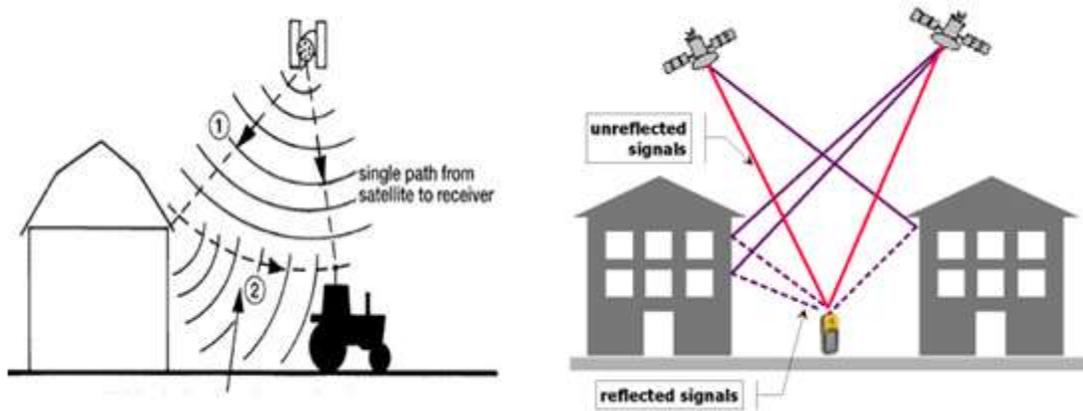


Figura 2.39 Distorsión y retraso de la señal debido al efecto multicamino (Pfof y Casady, 1998)

2.3.6.3 Medición de errores

Una manera de controlar los errores y la precisión es mediante la dilución de la precisión (DOP, Dilution Of Precision), muchas veces utilizado para medir la exactitud de la posición, es la posición de los satélites la que determina la DOP y varía en función de la geometría del mismo satélite. A continuación, se describen algunos de los tipos de DOP.

Dilución de la precisión geométrica. GDOP. (Geometrical dilution of precision)

$$GDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_b^2}$$

Dilución de la precisión de posición. PDOP. (Position dilution of precision)

$$PDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$$

Dilución de la precisión horizontal. HDOP. (Horizontal dilution of precision)

$$HDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

Dilución de la precisión vertical VDOP (Vertical dilution of precision)

$$VDOP = \frac{\sigma_z}{\sigma}$$

Dilución de la precisión por el tiempo. TDOP. (Time dilution of precision)

$$\text{TDOP} = \frac{\sigma_b}{\sigma}$$

Una buena geometría de los satélites garantiza un mejor rendimiento y una mayor precisión, tal como se observa en la Figura 2.40, los valores de DOP no deben pasar ciertos límites mínimos para evitar errores grandes, estos valores están determinados en función a los valores estándares de los satélites. Los valores límite de DOP son: GDOP=1.73, PDOP=1.63 HDOP=VDOP=1.15 y TDOP=0.58.

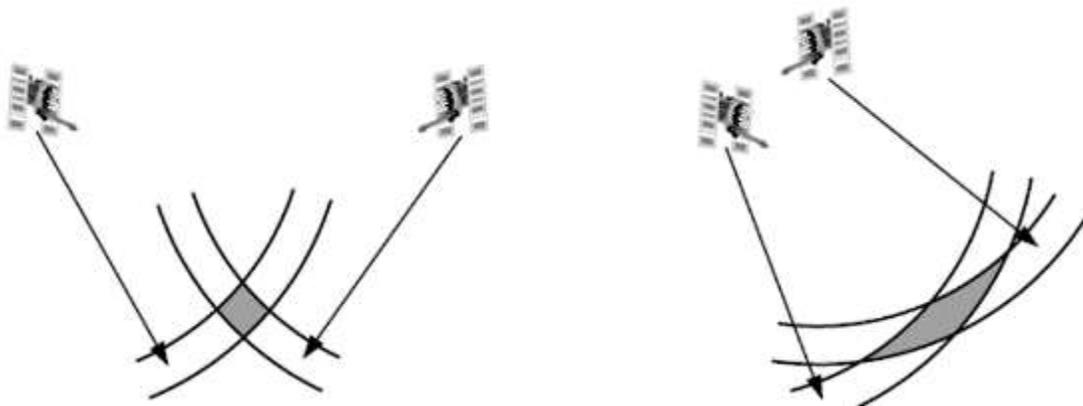


Figura 2.40 Relación de la geometría de los satélites con respecto a la precisión, (izquierda) buena geometría por tanto mayor precisión, (derecha) mala geometría por tanto menor precisión (El-Rabbany, 2002)

La combinación de los valores de HDOP y VDOP, es el valor de PDOP y los valores de PDOP y TDOP combinados representan el valor de GDOP, normalmente el PDOP es el valor más sencillo de verificar.

2.3.7 Métodos de adquisición de datos

Los métodos de operación de los GPS pueden clasificarse dependiendo si el receptor tiene una posición puntual (Figura 2.41), y cuando tiene posición relativa. En el primer caso se utiliza únicamente un receptor de la señal de los satélites y se puede lograr precisiones de hasta 100 m cuando la SA (selective availability) está encendida y de hasta 7-15 m cuando está apagada. Este tipo de adquisición es la más común en la

mayoría de los receptores de GPS para los usuarios finales, sus errores dependen principalmente de la sincronización de los relojes entre los satélites y el receptor.

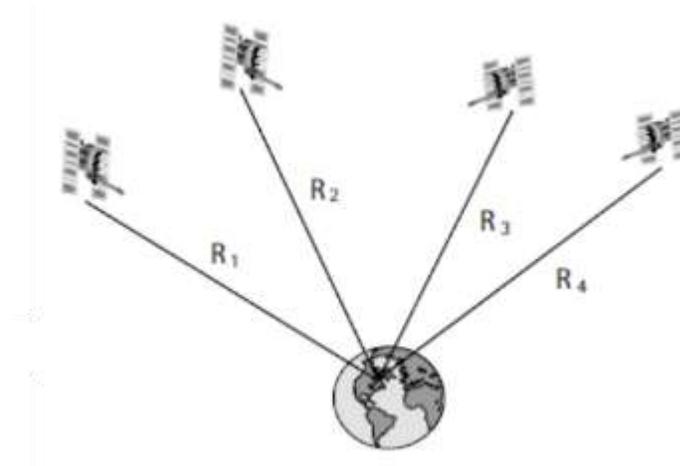


Figura 2.41 Principio de la adquisición puntual o estándar (El-Rabbany, 2002)

La adquisición de posición relativa o diferencial (Figura 2.42) utiliza dos receptores simultáneamente para recibir las señales de los mismos satélites, si ambos receptores captan la señal de 4 satélites se pueden lograr mediciones de distancias con errores de subcentímetros. El funcionamiento se basa en que uno de los receptores es designado como de referencia o llamado BASE, el cual es estacionario y está ubicado en un sitio con coordenadas conocidas.

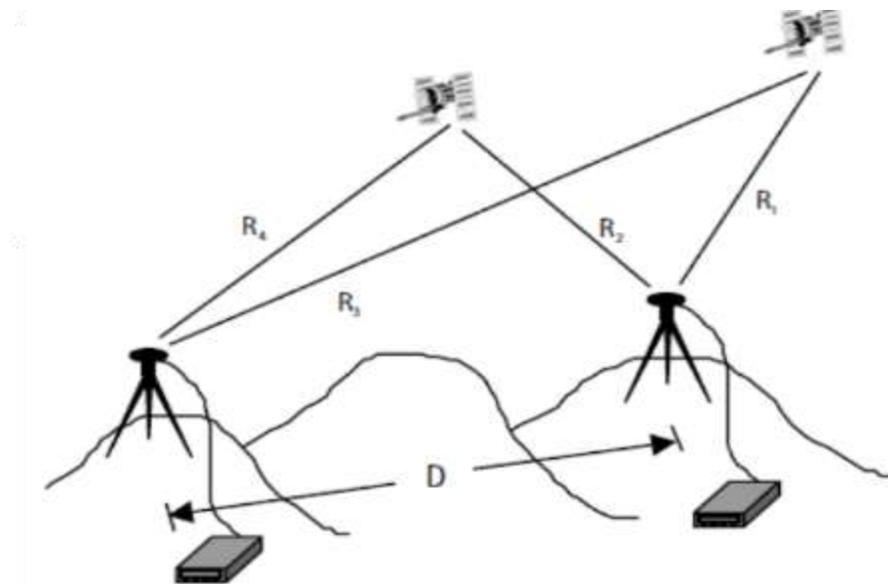


Figura 2.42 Principio de la adquisición relativa o diferencial (El-Rabbany, 2002)

El segundo receptor denominado como MOVIL, explorador o remoto es del cual se desean conocer las coordenadas y es el que se mueve por el terreno, la diferencia con el GPS de adquisición puntual es que el error se reduce debido al cálculo de la distancia entre receptores, de tal manera que se pueden obtener errores de centímetros dependiendo del tipo de postproceso que se realice.

De manera muy general existen dos tipos de obtención de los datos cuando se utiliza el método diferencial, estos son cuando los datos son recibidos en tiempo real y cuando los datos son obtenidos después de un proceso posterior a la toma de datos. A continuación, se describen brevemente los dos tipos de adquisición empezando por los de tiempo real.

2.3.7.1 Recepción RTK (Real Time Kinematic)

Este método utiliza dos o más receptores para capturar la señal de los satélites y también cuenta con una estación BASE y otro receptor EXPLORADOR o MOVIL. Este método es útil cuando se requieren un número grande de puntos en un área pequeña, también cuando se requiere la ubicación de los puntos en tiempo real (Figura 2.43). Es espacialmente útil en distancia cortas que van desde cientos metros a algunos kilómetros siempre y cuando no existan obstrucciones entre el receptor base y el receptor móvil.

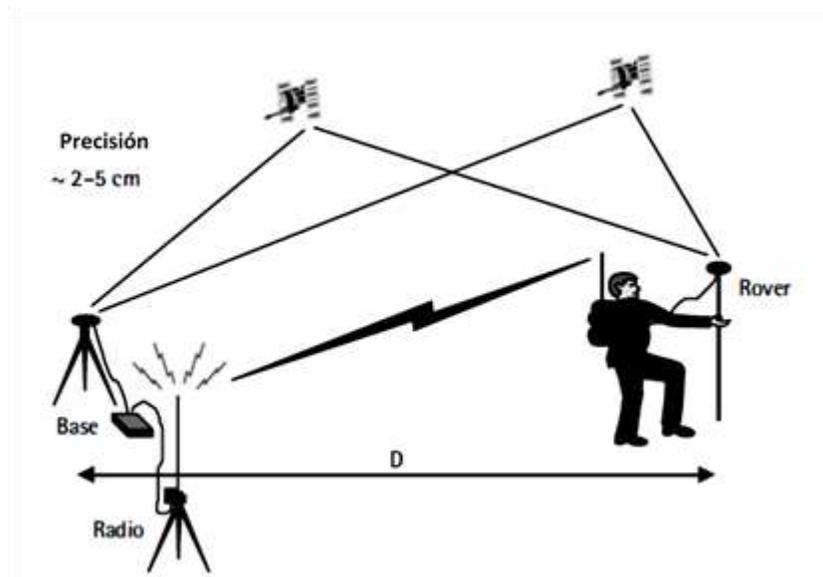


Figura 2.43 Sistema de adquisición de datos RTK (El-Rabbany, 2002)

2.3.7.2 DGPS (Differential GPS) GPS diferencial en tiempo real

Este sistema existe un receptor base inmóvil con posición conocida sobre la cual un software calcula la diferencia entre los pseudorngos calculados y medidos y obtiene los pseudoerrores, estos son enviados a el receptor móvil a través de señales de radio bajo el formato RTCM (Radio Technical Comission of Maritime Service). EL receptor móvil aplica estos errores para calcular los pseudorngos medidos por el mismo receptor, finalmente los pseudo rangos corregidos son utilizados para el cálculo de la posición final. La precisión de este sistema varía desde centímetros hasta un máximo de 5m, dependiendo de la distancia receptor BASE-MOVIL, la precisión es mayor cuando ésta distancia es corta. El formato RCTM-DGPS es proporcionado hoy en día por algunas empresas e instituciones gubernamentales a un costo relativamente bajo en comparación de otros servicios.

2.3.7.3 Comunicación por radio (repetidoras de señal)

En algunas ocasiones los sistemas RTK o DGPS puede estar influenciados por obstáculos a lo largo de la trayectoria de la señal enviada por radio, de tal manera que se hace difícil que el receptor capture la señal de radio enviada por el transmisor, en estos casos es posible utilizar un retransmisor o repetidora de señal en algún lugar donde ambos tengan suficiente visibilidad (Figura 2.44).

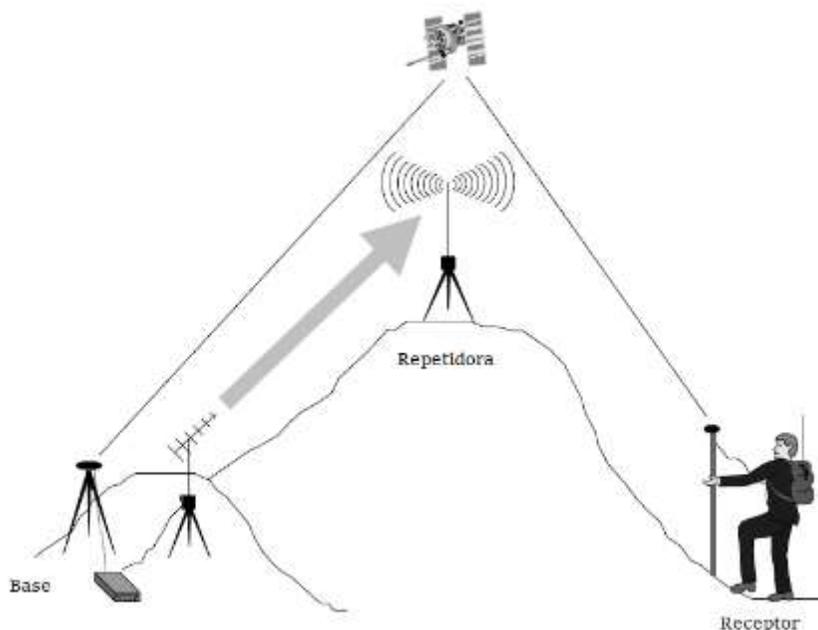


Figura 2.44 Uso de repetidora para incrementar cobertura de radio (El-Rabbany, 2002)

2.3.8 Sistemas de aumento de la señal

Otra manera de mejorar la precisión del sistema es a través de sistemas de satélites geoestacionarios que corrigen las pseudodistancias de los satélites GNSS (Figura 2.45), entre los más importantes podemos citar WAAS, EGNOS, MSAS, SBAS, que pueden brindar una precisión de hasta 1.5m en algunos casos. La cobertura de estos sistemas es localizada y depende del país o región que los construye, es así que WAAS se aplica a América mientras que EGNOS se aplica a Europa y África, y MSAS para Asia y Oceanía.

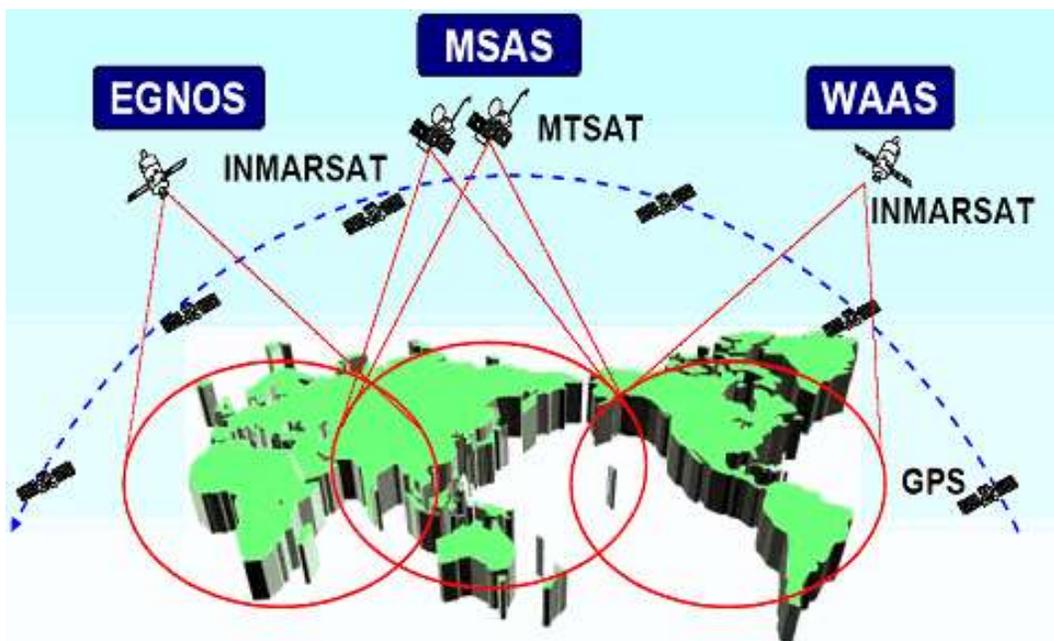


Figura 2.45 Cobertura de los sistemas de aumento de la señal GPS (Gunn, 2016)

SBAS (Satellite Based Augmentation System). Sistema de Aumento Basado en Satélites es un sistema de corrección de las señales que los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) transmiten al receptor GPS del usuario. Los sistemas SBAS mejoran el posicionamiento horizontal y vertical del receptor y dan información sobre la calidad de las señales. Aunque inicialmente fue desarrollado para dar una precisión mayor a la navegación aérea, cada vez se está generalizando más su uso en otro tipo de actividades que requieren de un uso sensible de la señal GPS. Actualmente están desarrollados o en fase de implementación los siguientes sistemas SBAS:

- WAAS (Wide Area Augmentation System), gestionado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

- EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), administrado por la Agencia Espacial Europea
- WAGE (Wide Area GPS Enhancement), que trasmite más precisión en los datos de efemérides y reloj de los satélites destinado a uso militar
- MSAS (Multi-Functional Satellite Augmentation System), operado por Japón.
- StarFire, gestionado por la empresa John Deere
- QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), propuesto por Japón
- GAGAN (GPS and GEO Augmented Navigation), planeado por la India

Los objetivos de los sistemas SBAS son:

- Incrementar la integridad del sistema para cumplir con los requisitos de un sistema de navegación único. Los estándares civiles requieren el aviso de fallo del sistema en menos de 30 segundos cuando se está en ruta, 10 segundos en una aproximación de no-precisión, y 6 segundos en una aproximación de precisión. En contraste, el sistema GPS puede tardar entre una hora y media y dos horas para notificarle al usuario que ha fallado un satélite.
- Incrementar la exactitud del sistema GPS para cumplir con los requisitos de un medio único de navegación para aproximaciones de precisión. Sin aumentación de ningún tipo, el NAVSTAR-GPS o GLONASS pueden ser utilizados únicamente para aproximaciones de no-precisión (NPA).
- Incrementar la disponibilidad del sistema para cumplir con los requisitos de un medio de navegación único. Actualmente la disponibilidad del sistema GPS varía entre el 95 % y 98 %. Como consecuencia, se requiere la confirmación de la disponibilidad de los satélites a lo largo de la ruta del GPS previa a cada vuelo en el que se desee utilizar GPS como medio de navegación primario. Esto es debido a que, previamente a la SBAS, era necesario dedicar un satélite en línea de visión para la única función de supervisión de la integridad.

2.3.8.1 Funcionamiento y virtudes del sistema

La arquitectura básica de todos los sistemas SBAS está conformada por una red de estaciones terrestres de referencia distribuidas por una amplia zona geográfica (países o continentes enteros) que supervisan las constelaciones de satélites de GNSS. Estas estaciones retransmiten los datos a una instalación de procesamiento central que evalúa la validez de las señales y calcula correcciones a los datos de efemérides y reloj radiodifundidos de cada satélite a la vista. Para cada satélite GPS o GLONASS vigilado,

el SBAS estima los errores en los parámetros, y a su vez estas correcciones son transmitidas al avión por medio de satélites geoestacionarios. Luego el receptor a bordo ajusta la información recibida directamente de los satélites GPS con las correcciones recibidas de los satélites geoestacionarios, para así navegar con más seguridad.

Los mensajes de integridad y correcciones para cada fuente telemétrica GPS o GLONASS vigilada se transmiten en la frecuencia GPS L1 de los satélites geoestacionarios SBAS, situados en puntos orbitales fijos sobre el ecuador terrestre. Los mensajes SBAS aseguran la integridad, mejoran la disponibilidad y proporcionan la actuación necesaria para aproximaciones con guiado vertical APV, y en un futuro, a CAT I. SBAS utiliza mediciones de distancia en dos frecuencias para calcular el retardo de la medición de distancia introducido por la ionósfera y radiodifunde las correcciones aplicables en puntos de la cuadrícula ionosférica (grid points) predeterminados. El receptor SBAS del usuario interpola entre los puntos de la cuadrícula para calcular la corrección ionosférica a lo largo de su línea de alcance óptico a cada satélite.

Además de correcciones de reloj, efemérides e ionosféricas, el SBAS evalúa y transmite parámetros que limitan la incertidumbre en las correcciones. Combinando estos cálculos de incertidumbre en las correcciones con cálculos de las incertidumbres en su propia exactitud de mediciones de pseudodistancia, el receptor SBAS de usuario modeliza un error para su solución de navegación propia. Es importante distinguir entre las zonas de cobertura y las zonas de servicio SBAS. La zona de cobertura se define por las huellas en tierra de las señales de los satélites geoestacionarios. Las zonas de servicio para un SBAS determinado se establecen por el estado dentro de la zona de cobertura SBAS. El estado es el responsable de designar los tipos de operaciones que pueden apoyarse dentro de una zona de servicio determinada. Entre las ventajas del SBAS se encuentran:

- Provee una guía tridimensional para aproximaciones de precisión a las aeronaves dentro del área de servicio. Mejora significativamente los instrumentos bidimensionales de navegación existentes que no pueden proveer referencias verticales precisas a los pilotos
- Provee gran precisión (hasta 5 m vertical y hasta 2 m horizontal) y disponibilidad (radiodifunde señales similares al GPS por varios satélites geoestacionarios) para aproximaciones de Categoría I, además de integridad (alto nivel de redundancia en el sistema y notificación de fallos en 6 s) para la seguridad del sistema GPS y apoyo a las operaciones de vuelo
- Reduce las posibilidades de accidentes contra tierra durante vuelos controlados y aproximaciones

- Elimina los costes asociados en el mantenimiento de los instrumentos de navegación más antiguos con base terrestre tal como los NDB, VOR, DME y los ILS para la Categoría I
- Reduce el número de piezas de equipos a bordo de la aeronave y requerirá solo un pequeño receptor montado en la cabina y una antena
- Permite reducir los estándares que gobiernan la separación entre aeronaves en vuelo, permitiendo alojar un mayor número de ellas en un espacio dado, sin aumentar los riesgos
- Ahorra combustible al permitir vuelos más directos y aproximaciones más seguras

2.3.8.2 WAAS (Wide Area Augmentation System)

Es un sistema de aumento de la señal basado en satélites desarrollado por Estados Unidos e ideado como un complemento para la red GPS para proporcionar una mayor precisión y seguridad en las señales, permitiendo una precisión en la posición menor de dos metros.

i. Elementos del sistema WAAS

El sistema consta de 59 estaciones de vigilancia, llamadas estaciones de referencia de área amplia o WRS (Wide-area Reference Stations) distribuidas a lo largo de América del Norte incluyendo Puerto Rico, 2 estaciones maestras o WMS (Wide-area Master Stations), 6 antenas para la retransmisión de datos GES (Ground Earth Stations) y 3 satélites estacionario. Las 20 estaciones de vigilancia están instaladas con aproximadamente 800 kilómetros de separación a lo largo de Estados Unidos, Alaska, Hawái y Puerto Rico (Figura 2.46).

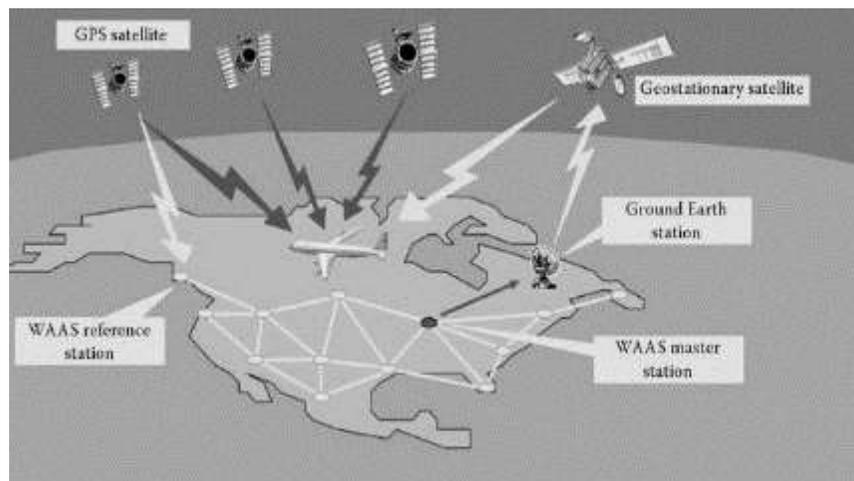


Figura 2.46 Elementos del sistema WAAS (Allred et al. 2008)

La señal de corrección generada por el sistema WAAS teóricamente tiene una cobertura regional que alcanza Norteamérica y parte de Sudamérica (Figura 2.47) aunque en la práctica los GPS solo logran detectar señales de WAAS la región de Estados Unidos y México.

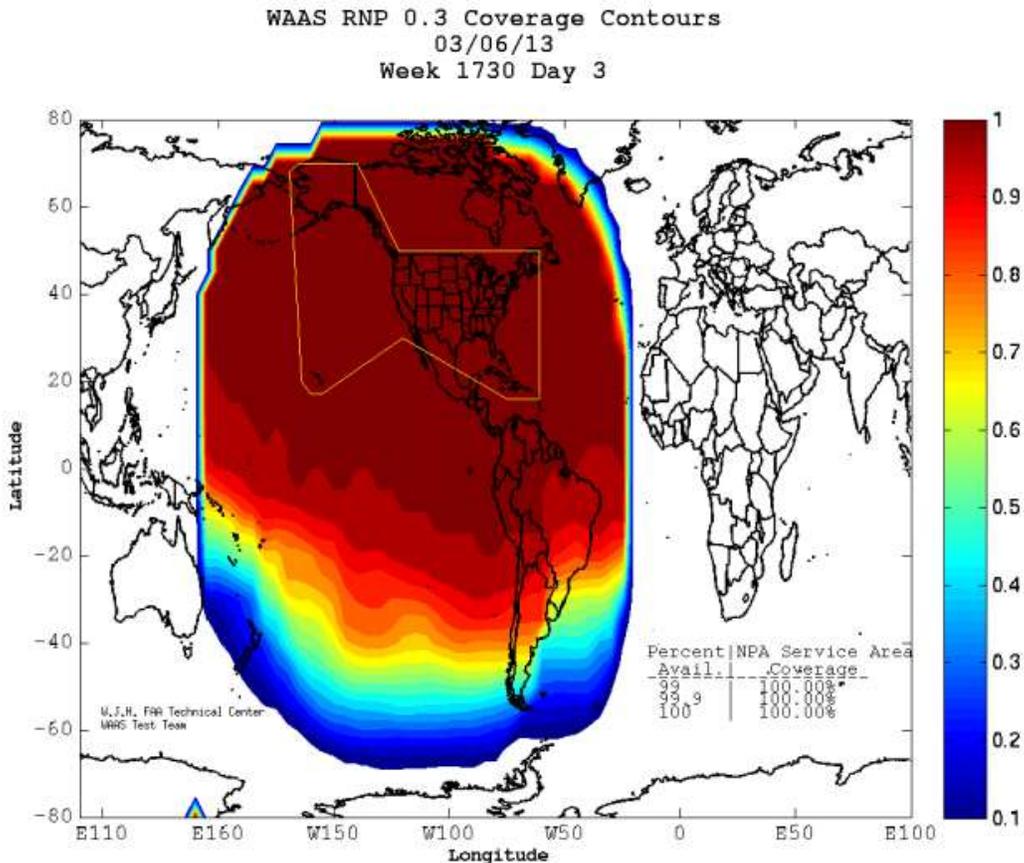


Figura 2.47 Cobertura de la señal WAAS (Burns, 2013)

ii. Estaciones de referencia de área amplia (WRS)

Este sistema usa estaciones de referencia esparcidas con aproximadamente 500 a 1,000 km de separación a lo largo de la región a cubrir. La separación de las estaciones influirá en el grado de precisión del sistema WAAS. Esto se corresponde de alguna manera con las estaciones de corrección diferenciales del sistema DGPS marino de los Guardacostas de los Estados Unidos, pero no transmiten las señales de corrección ellas mismas. Lo que hacen es observar las señales GPS, las condiciones ionosféricas y la señal de corrección WAAS y transmitir los datos a las estaciones maestras. Cada una de las estaciones bases estará compuesta por una unidad principal y dos de reserva para dar un alto grado de fiabilidad por medio de la redundancia. Todas las estaciones WRS

contienen al menos un receptor de frecuencia dual (L1 y L2) conectado a un oscilador de cesio, (reloj de gran precisión), un sensor meteorológico, un procesador y hardware de red para transmisión de datos Ethernet hacia las estaciones maestras.

iii. Estaciones maestras de área amplia (WMS)

Las estaciones maestras del sistema WAAS toman los datos de las estaciones de referencia (WRS), verifican las señales de corrección anteriores y generan una nueva señal de corrección WAAS. Esta señal de corrección es transmitida a través de las estaciones terrestres a los satélites geoestacionarios, como los de Inmarsat o satélites exclusivos, para ser enviadas a los receptores.

La WMS es responsable de filtrar todas las observaciones GPS hechas desde los receptores de referencia, estimando los estados de los modelos de error tanto ionosférico, de reloj, efemérides, etc., calculando estimaciones y generando finalmente los mensajes WAAS (trama de 250 bit) que serán enviados y aplicados a los cálculos del pseudo rango hechos en los receptores WAAS a bordo de las aeronaves. Las estaciones de referencia también mostrarán información de estatus de la constelación de satélites GPS al operador.

iv. Estaciones de comunicaciones (GES)

Son estaciones terrestres encargadas de recibir los mensajes WAAS de corrección de la WMS y retransmitirla a los satélites geoestacionarios, los que a su vez transmitirán las correcciones hacia los receptores WAAS.

v. Satélites geoestacionarios

Los satélites geoestacionarios transmiten la señal de corrección en la banda de frecuencia L1 del GPS, pero usan un código pseudo-aleatorio (PRC) diferente al de los satélites GPS. Las antenas receptoras del WAAS podrían aparentemente ser incorporadas directamente en el receptor GPS.

Debido a que el sistema debe brindar integridad, disponibilidad, continuidad y precisión se planifica usar satélites geoestacionarios de uso exclusivo para este sistema, estos satélites además de transmitir las correcciones en radiodifusión, también realizarán funciones de satélites GPS geoestacionarios, garantizando contar con el mínimo número de satélites las 24 horas del día, para esto se planea usar otra banda de frecuencia como la L5 para evitar la interferencia con la constelación de 24 satélites no estacionarios del GPS.

vi. Receptores del WAAS

Son equipos receptores GPS con la capacidad de poder recibir la información de corrección WAAS de los satélites geoestacionarios del sistema WAAS. Las correcciones

WAAS (mensajes de 250 bits) recibidas serán aplicados a los resultados de los cálculos de la pseudo-distancia para luego determinar la posición.

2.3.8.3 EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)

El sistema EGNOS es un sistema de aumento basado en satélites desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA), la Comisión Europea (institución de la Unión Europea) y Eurocontrol. Está ideado como un complemento para las redes GPS y GLONASS para proporcionar una mayor precisión y seguridad en las señales, permitiendo una precisión inferior a dos metros. Consiste en una red de tres satélites geoestacionarios y en una red de estaciones terrestres encargadas de monitorizar los errores en las señales de GPS y actualizar los mensajes de corrección enviados por EGNOS.

El sistema empezó a emitir de forma operacional en julio de 2005 con excelente precisión y disponibilidad. El inicio oficial de operaciones fue anunciado por la Comisión Europea para el 1 de octubre de 2009 y debía ser calificado para su uso en aplicaciones de seguridad en el año 2010 por la Agencia de supervisión GNSS sin embargo en la actualidad a pesar de que EGNOS no opera en su totalidad ya hay evidencias del incremento en la precisión. El sistema EGNOS es totalmente compatible con WAAS.

i. Elementos del sistema EGNOS

El sistema EGNOS está compuesto por 34 estaciones de referencia y de supervisión de integridad, RIMS (Ranging and Integrity Monitoring System) desplegadas para supervisar los satélites de las constelaciones GNSS. Cada satélite tiene que ser supervisado por múltiples RIMS antes de que se generen las correcciones y los mensajes de integridad (Figura 2.48).

Existen cuatro centros de control de misión, MCC (Mission Control Center), que procesan los datos de las RIMS para generar las correcciones WAD (Wide Area Differential) y mensajes de integridad para cada satélite. Solo uno de estos MCCs está activo y operacional, los otros MCCs permanecen como "reserva" y pueden activarse si ocurre algún problema (Figura 2.49).

Las estaciones terrestres de navegación, NLES (Navigation Land Earth Stations) transmiten los mensajes de corrección e integridad desde el MCC a los satélites geoestacionarios, encargados de emitir finalmente la señal SBAS a los usuarios finales. El sistema desplegará dos NLES (una principal y una de reserva), y una tercera NLES con fines de pruebas y validación.

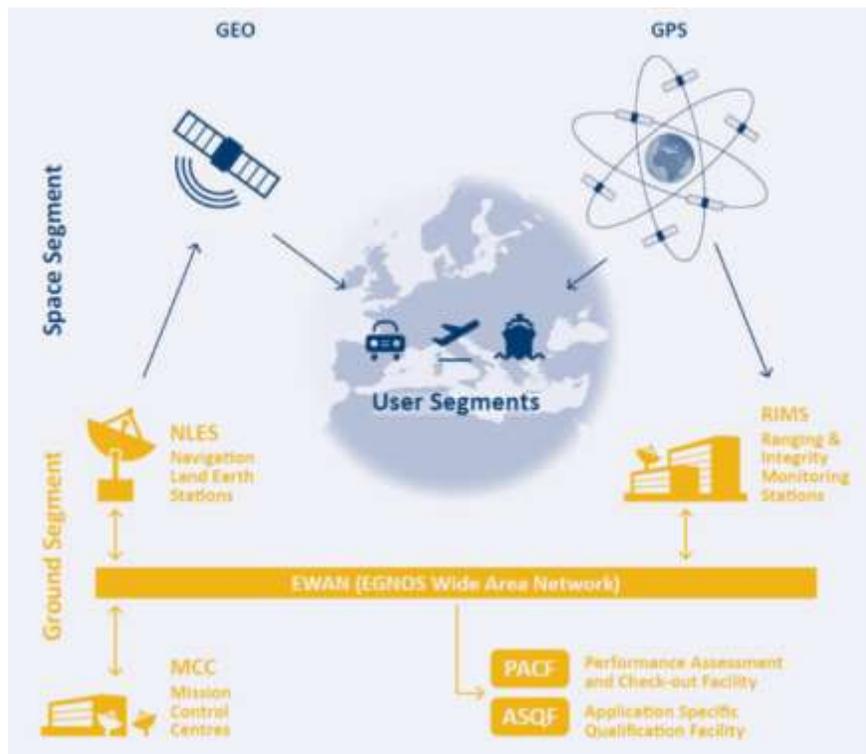


Figura 2.48 Elementos del sistema EGNOS (European GNSS Agency, 2015)



Figura 2.49 Red de estaciones terrestres del Sistema EGNOS (CNES-ESA 2011)

El sector espacial de EGNOS está compuesto por tres satélites geoestacionarios con cobertura global terrestre: dos satélites Inmarsat-3 (AOR-E e IOR), así como el satélite ESA Artemis. Los usuarios EGNOS pueden rastrear dos satélites geoestacionarios por lo menos.

2.3.8.4 MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System)

El sistema MSAS es un sistema de aumento de señal basado en el satélite multifuncional MTSAT que soporta la obtención de posiciones mediante DGPS, designado para mejorar la precisión de la señal del sistema GPS. Este sistema está operativo en Asia, principalmente en Japón donde fue desarrollado basado en un satélite geoestacionario de transporte multifuncional (MTSAT), el cual tiene también una función meteorológica (además de la aeronáutica). El MTSAT-1 fue lanzado en el año 2000, y subsecuentes lanzamientos son programados cada cinco años.

Aunque el sistema de software del MSAS está basado en el WAAS, presenta diferentes capacidades que los sistemas WAAS y del EGNOS, porque incluye dos modos de comunicación, voz y datos. Esta capacidad de comunicación será usada para brindar Vigilancia Automática Dependiente (ADS). Específicamente, MSAS está basado en el concepto FANS de la OACI, incluyendo GNSS para navegación y Servicio Satelital Móvil Aeronáutico (AMSS) para dos modos voz/datos con ADS.

La aplicación aeronáutica consistía en dos funciones: servicio móvil aeronáutico por satélite (SMAS) y sistema de aumentación basado en satélite (SBAS) del GNSS para proporcionar a las aeronaves información sobre aumentación GPS por enlace ascendente a partir de las instalaciones terrestres. La función MSAS del MTSAT cumpliría plenamente con las normas y métodos recomendados (SARPS) de la OACI. Los detalles técnicos no especificados en los SARPS se coordinaron mediante las actividades del Grupo Técnico de Trabajo sobre Interfuncionamiento (IWG) SBAS. Así, el MSAS permitía el pleno interfuncionamiento con otros servicios SBAS.

Después de haber fallado el lanzamiento del MTSAT-1 (el primer MTSAT), Japón adquirió otro satélite, MTSAT-1R, que se lanzaría a principios de 2004. El segundo MTSAT, MTSAT-2, se lanzó en 2005. Una vez finalizada la certificación, el MSAS entraría en servicio y sería operacional utilizando únicamente el MTSAT-1R a partir de este año. El doble funcionamiento del MTSAT-1R y el MSAT-2 entró en servicio en el año 2006.

i. Elementos del sistema MSAS

Dos centros de satélites aeronáuticos se encargarán del control de los MTSAT. Las estaciones de control principales (MCS) del MSAS se han instalado en dos centros de satélites aeronáuticos. Con objeto de proporcionar servicio MSAS en la Región de

Información de Vuelo del Japón, se habían instalado estaciones de vigilancia de tierra (GMS) en cuatro centros de control de tránsito en rutas aéreas. Para garantizar una referencia amplia para una determinación exacta de la órbita de los MTSAT se instalaron dos estaciones de vigilancia y cronometría (MRS) en Hawái (Estados Unidos) y Camberra (Australia). Cuenta también con una MRS en cada centro de satélites aeronáuticos.

En operaciones normales, los usuarios podrían recibir dos señales SBAS con diferentes códigos PRN. Cada señal se enviaría por enlace ascendente de una MCS diferente y por medio de un satélite diferente. Si falla uno de los satélites, la MCS que esté comunicando por enlace de datos por medio del satélite que haya fallado se conmutaría al otro satélite. Así, aún en estas condiciones anormales, la aviónica del usuario podría recibir las dos señales SBAS. Esta arquitectura garantiza un servicio SBAS sumamente redundante y fiable.

Dado que la señal MSAS sería objeto de radiodifusión por el MTSAT en la mayor parte de la Región Asia/Pacífico, el servicio MSAS podría ampliarse fácilmente si se instalaran GMS en la zona de cobertura del MTSAT y se conectaran líneas terrestres especializadas a las MCS. Japón ha ofrecido servicio MSAS gratuito a los estados de la Región Asia/Pacífico a fin de establecer en dicha región un sistema de navegación aérea fluido y más seguro y fiable.

2.3.9 Tipos de receptores GPS

El tipo de receptor a usar dependerá del tipo de observaciones y de la disponibilidad de códigos. Los receptores GPS pueden ser clasificados de acuerdo con sus características de la siguiente manera: receptores militares, civiles, navegación, geodésicos. Una clasificación basada en el tipo de señal que reciben puede ser:

- Receptores de navegación, reciben únicamente observables de código (tiempos). Sus aplicaciones más comunes son la navegación, catastro, GIS y levantamientos de escalas menores de 1/ 5000 en los más sofisticados.
- Receptores de nonofrecuencia, reciben observables de código y fase de la portadora L1. La precisión de estos instrumentos ya es significativa, y son de aplicación topográfica y geodésica en pequeñas distancias (hasta 100 millas).
- Receptores de bifrecuencia, reciben las observables de código y fase de las portadoras L1 y L2. Están indicados para trabajos de precisión y allí donde el rendimiento y los buenos resultados requeridos sean máximos.

2.3.10 Aplicaciones de los GPS

Aplicaciones a la agricultura, al contar con precisiones de sub centímetros la tecnología GPS ha revolucionado la agricultura dando lugar a varias aplicaciones como mapeo de suelos, aplicaciones controladas de plaguicidas, fertilizantes, siembra y cosechas controladas, monitoreo de cultivos con alta precisión y control. También una aplicación importante dentro de la agricultura es el catastro y los diagnósticos territoriales de los campos cultivados, con la tecnología GPS se pueden recolectar datos en tiempo real con alta precisión y realizar análisis espacial que permiten tomar decisiones posteriores.

Aplicaciones en las ciencias forestales, los GPS pueden usarse para prevenir y controlar incendios, aplicación de plaguicidas, aprovechamientos forestales medición de volúmenes de madera y monitoreo, entre otros.

Aplicaciones en elaboración de cartografía temática, a través del sistema GPS, es posible crear mapas en formato vectorial (puntos, líneas y polígonos) con las características del terreno que se recorre de tal manera que se generan rutas (track) y puntos de recorrido (waypoints).

Aplicaciones diversas (minería, ingeniería, geología), los GPS pueden usarse también para obtener mediciones de alta precisión para otras ciencias como por ejemplo la ingeniería, podemos hacer levantamientos muy precisión para la construcción de carreteras puentes y edificios, en la geología los GNSS son utilizados actualmente para medir los movimientos sísmicos de las placas geológicas y complementar sistemas de alerta antisísmica o de tsunamis, la minería utiliza los sistemas GNSS para exploración, movimiento preciso de tierras y operación de maquinaria con alta precisión reduciendo los tiempos de trabajo.

Vehículos aéreos no tripulados
(Drones/VANT)

3

Capítulo 3

VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (DRONES/VANT)

Waldo Ojeda Bustamante, Alberto González Sánchez, Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, Jorge Flores Velázquez y Abraham Rojano Aguilar

3.1 Introducción a los DRONES /VANT

En términos generales, un drone, dron, VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) o UAV (Unmanned Aerial Vehicle) es un vehículo aéreo reusable controlado de forma remota, semiautónomo, autónomo o con alguna combinación de estas capacidades (Eisenbeiss, 2009). Estas máquinas voladoras están acondicionadas para transportar dispositivos auxiliares de monitoreo o control, que pueden ser operados a distancia o pre-programados para diversas aplicaciones. Pueden ser para uso civil, militar, recreativo, o científico. Suelen estar equipados con sensores, cámaras y micrófonos, y pueden ser controlados u operados por una persona desde una estación en tierra, un ordenador o una tableta electrónica. Los VANT presentan diversas variantes dependiendo del tipo de aplicación, variando en tamaño, desde unos cuantos centímetros hasta varios metros (García, 2011). Su precio también puede variar notablemente desde cientos hasta miles de dólares dependiendo de la aplicación, alcance, capacidad de carga y equipo auxiliar que transporta.

El concepto “no tripulado” en la definición puede ser confuso, ya que, aun cuando es cierto que en el interior del vehículo no va algún tripulante, existe contacto entre el VANT y el operador(es) localizados en tierra, ya sean pilotos, controladores o cualquier otro operario relacionado con la monitorización de la aeronave o la supervisión de la misión. Gracias a esta matización no todo lo que está en el aire se considera un VANT, ya que los globos aerostáticos o los misiles no son considerados como tales. Los VANT pueden estar controlados remotamente desde una estación en tierra por un operador, o pueden ser autónomos y ejecutar una misión siguiendo una trayectoria predefinida. De esta forma, hay dos estaciones que manejan la información del VANT, la estación de tierra y la estación a bordo del dron, tal y como se indica en la Figura 3.1. Esta configuración también recibe el nombre de Sistema Aéreo No Tripulado (SANT), y se describe con más detalle en la Sección 3.1.1. Dependiendo del nivel de autonomía del VANT, la estación de tierra realizará unas varias funciones específicas (García, 2011).

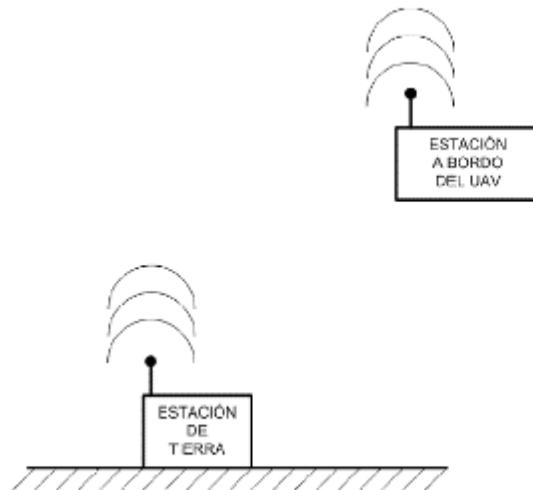


Figura 3.1 Esquema de las estaciones de un VANT (García, 2011)

Como se verá en la Sección 3.2, el origen de este tipo de vehículos aéreos tuvo propósitos militares, ya que con ellos se puede vigilar de forma remota una zona en conflicto, así como atacar sin poner en peligro vidas humanas. Esta primera aplicación delineó el futuro de los drones; sus características y capacidades actuales son producto de su evolución histórica. A fin de facilitar la comprensión de dichas capacidades, la Sección 3.2 proporciona un panorama de la evolución histórica de los VANT.

Actualmente, las aplicaciones de los VANT están ligados a los tipos de sensores que pueden incorporarse a la plataforma aérea. A fin de comprender el alcance de sus capacidades, la Sección 3.3 presenta una breve descripción de los sensores aerotransportados. El resto de esta sección se dedica a describir con mayor detalle los componentes de un SANT, así como la terminología relacionada.

3.1.1 Sistema aéreo no tripulado

En la terminología especializada también se utiliza el concepto de Sistema Aéreo No Tripulado (SANT) para incluir además del vehículo aéreo VANT, una estación de control a tierra, así como los dispositivos para despegue y aterrizaje. Un SANT consta de los siguientes elementos principales (Chao y Chen, 2012):

1. Vehículo aéreo. Corresponde al cuerpo de la aeronave, sus componentes y dispositivos periféricos. Los componentes en la aeronave son, la controladora de vuelo, el giroscopio, la brújula, acelerómetros, motores, hélices y el marco que soporta a todos estos componentes. Los dispositivos periféricos son, la montura y

las cámaras. Básicamente, es todo el equipo que se coloca en “vuelo”, más la emisora de radio en tierra. Las Secciones 3.1.1.1 a 3.1.1.10 describen con mayor detalle los componentes del vehículo aéreo.

2. Estación de control terrestre. Para monitoreo y ajuste del desarrollo de la misión en tiempo real. Tradicionalmente, incluye un enlace de telemetría, un monitor con OSD (On Screen Display) y una computadora. Las Secciones 3.1.1.11 a la 3.1.1.13 proporcionan una breve descripción de estos componentes.
3. Dispositivos de despegue y aterrizaje. Varios VANT, en particular los de ala fija, requieren de dispositivos especiales para despegue, como lanzadores o redes para aterrizaje.

3.1.1.1 Controladora de vuelo

La controladora de vuelo es también llamada tarjeta autopiloto (*autopiloto board*) (Figura 3.2), es un componente electrónico que permite volar la aeronave de manera precisa y confiable. Esta consiste de una pequeña "computadora a bordo", la cual cuenta con un microcontrolador que se encarga de recibir y procesar los datos provenientes de los sensores relacionados con el vuelo. La controladora procesa la información recibida desde la emisora y ejecuta los algoritmos necesarios para la estabilización del vuelo, ejecución de misiones, adquisición de imágenes y otros procesos de control de los componentes periféricos.

Existen distintos fabricantes para las controladoras de vuelo, como por ejemplo DJI (China), 3D-Robotics (EUA) y Cloud Cap Technology (Italia), entre otros.



Figura 3.2 Autopiloto de Cloud Cap Technology (Barton, 2012)

3.1.1.2 Acelerómetro

Los acelerómetros son sensores e instrumentos para medir, visualizar y analizar la aceleración y la vibración. Pueden utilizarse de manera autónoma, o conjuntamente con un sistema de adquisición de datos. Los acelerómetros están disponibles en muchas formas. Pueden ser elementos de detección sin procesar, transductores empaquetados o un sistema de sensor o instrumento, incorporando características tales como visualización total, local o remota y grabación de datos (Castillo, Lozano y Dzúl, 2005).

3.1.1.3 Giroscopio

Es un sensor inercial que mide las fuerzas rotacionales del VANT mientras vuela. En conjunto con el acelerómetro, este instrumento es capaz de calcular la altura actual del VANT y realizar las correcciones necesarias para mantener estable el vuelo.

3.1.1.4 Barómetro

El barómetro es un sensor utilizado para obtener la altitud mediante la medición de la presión atmosférica (Cantos, 2013), permitiendo que el DRON pueda mantener la altitud respecto al suelo de manera automática. Usualmente, este sensor también es capaz de realizar mediciones de temperatura.

3.1.1.5 Brújula

La brújula es también llamada magnetómetro, ya que es capaz de medir la fuerza magnética. Es un sensor diseñado para detectar la dirección del norte magnético (Cantos, 2013), es de vital importancia para los multirrotores, ya que el acelerómetro y el giroscopio no son suficientes para mantener el vuelo estable (Alex, 2015).

Entre otras ventajas, este instrumento notifica a la controladora de vuelo la ubicación a la que apunta el dron, lo que permite volar en modo "sin cabeza" (headless) o girar "la cabeza" del dron mientras se avanza, manteniendo el curso del aparato en forma automática.

3.1.1.6 Receptor GPS

Es el receptor del Sistema de Posicionamiento Global (Global Positional System, GPS). Este instrumento permite obtener la posición geográfica del VANT en términos absolutos. Combinado con la información del acelerómetro, barómetro, brújula y

giroscopio, permite un seguimiento preciso de la ubicación del VANT, facilitando el vuelo autónomo mediante rutas definidas por parte del usuario.

También permite registrar la posición de despegue, para que en caso de que se pierda la señal con la emisora, la controladora de vuelo pueda regresar automáticamente al punto de despegue.

3.1.1.7 Fuselaje (estructura)

Corresponde a la estructura física de la aeronave donde todos sus componentes son colocados. Comúnmente, se utiliza el término marco (*frame*) para hacer referencia a dicha estructura. El fuselaje debe ser fuerte en su estructura para soportar el peso de los dispositivos, pero suficientemente ligero para que los motores puedan levantarlo y transportarlo, como ejemplo, la Figura 3.3 muestra el fuselaje de un hexacóptero, el cual está compuesto en su mayor parte de fibra de carbono.

3.1.1.8 Motores

Los motores (o rotores) son los encargados de hacer girar las hélices del dron. Los motores empleados en los VANT son del tipo “sin escobillas” (*brushless*), que no emplean escobillas para hacer el cambio de polaridad del motor. Sus principales ventajas frente a los motores eléctricos de escobillas es que no se produce tanto desgaste en su funcionamiento, son más ligeros y requieren menor mantenimiento. El número de motores empleado depende del tipo de VANT, por ejemplo, en el caso de un hexacóptero (Figura 3.3) hay seis motores, propulsando cada uno de ellos por su correspondiente hélice.

3.1.1.9 Control de velocidad electrónico

El control de velocidad electrónico es un elemento que conecta los motores y las baterías y transmiten una señal eléctrica, que dependiendo de su nivel indica a los motores la velocidad de giro. En cualquier momento uno o más de los motores puede estar girando a distintas velocidades, esto le otorga al VANT la capacidad de desplazarse por distintas direcciones.



Figura 3.3 Fuselaje y motores de un hexacóptero

3.1.1.10 Transmisor y receptor de radio

El VANT es operado manualmente por medio de un radio control, también llamado emisora de mando remoto (Figura 3.4). La emisora incorpora un transmisor de radio que envía señales en una frecuencia específica (por ejemplo, 2.4 Ghz). El receptor montado en el VANT recibe la señal de la emisora y ejecuta las instrucciones recibidas.



Figura 3.4 Radio control o emisora de mando remoto

La emisora tiene una determinada configuración para las acciones que lleva a cabo con sus controles. Los detalles relacionados con el uso de la emisora se proporcionan en el Capítulo 4, Sección 4.6.6.

En caso de que el SANT incorpore un sistema de telemetría (ver Sección 3.1.1.11), existirá un segundo transmisor de radio incorporado en el módem conectado en la computadora personal. Este segundo enlace de radio es utilizado para enviar al VANT comandos más complejos que los empleados por la emisora, como la programación de misiones y la adquisición manual de fotografías.

Los enlaces de radio también están presentes en la transmisión del video desde el VANT al monitor de la estación en tierra, como cuando se utiliza el modo de vuelo FPV. Es un sistema transmisor/receptor independiente del enlace de la emisora, dedicado exclusivamente al video. Transmite en frecuencias de 900, 1.2, 1.3, 2.54 y 5.8 Mhz. La Figura 3.5 muestra los componentes para la transmisión de video FPV.



Figura 3.5 Componentes para la transmisión de video en FPV (transmisor y receptor de radio, cámara FPV, antenas y cables)

3.1.1.11 Baterías

Las baterías son la fuente de energía del VANT. Actualmente, las baterías más utilizadas son de polímero de litio (abreviadas como LiPo, Lithium Polymer), dada su alta densidad de energía, tasa de descarga y escasa resistencia interna. El tipo de voltaje y corriente de estos componentes depende de los requerimientos de cada tipo de VANT. Por ejemplo, VANT del tipo multirrotores requieren de mayor energía que los de ala fija, estos últimos generalmente llevan un solo motor. La Figura 3.6 muestra la ubicación de las

baterías en un hexacóptero, colocadas en paralelo en la parte superior del VANT. Dada la relevancia de este componente en un SANT, en el Capítulo 4, Sección 4.5 proporciona información específica sobre el uso y manejo de las baterías.



Figura 3.6 Baterías y hélices de un VANT tipo hexacóptero

3.1.1.12 Enlace de telemetría

El enlace de telemetría proporciona información del vuelo en tiempo real a la estación en tierra, como la velocidad, altura, distancia y orientación del VANT. Está compuesta por un pequeño componente electrónico que se conecta a la controladora de vuelo, y que a su vez mantiene un enlace de radio con el módem de la estación en tierra.

Usualmente, la estación en tierra incorpora un monitor para visualizar las imágenes de la cámara del VANT, para lo cual es deseable que la información de telemetría se incorpore a la imagen mostrada en el monitor. En este caso, se utiliza un sistema de despliegue de datos en la pantalla OSD, el cual incorpora la información de telemetría a la imagen que proviene de la cámara, usando el propio enlace de radio del transmisor de video.

3.1.1.13 Monitor de la estación

El monitor muestra la imagen proveniente de la(s) cámara(s) del VANT, y los datos del vuelo en caso de contar con telemetría y pantalla OSD. Existen pantallas de distintos tamaños, (por ej. 5", 7", 11") y resoluciones (por ej. 800x480, 800x600, 1024x600).

La resolución del monitor no debe ser confundida con la resolución de la cámara a bordo del VANT. El monitor cuenta con tornillos y soporte para fijarse a la emisora, y una batería independiente. La Figura 3.7 (izquierda) muestra un monitor de 5”.

Una alternativa al uso del monitor FPV, son las gafas FPV (Figura 3.7, derecha). De más reciente creación, tienen incorporado el enlace de radio para recibir señal de video. Las resoluciones en estos dispositivos varían de la misma forma que en los monitores. Dada la disminución de precios, su uso se ha incrementado en los últimos años.



Figura 3.7 Monitor FPV de 5” (izquierda) y Gafas FPV (derecha)

3.1.1.14 Computadora de la estación

La computadora es el componente central de la estación en tierra. No hay una lista de requerimientos mínimos para este equipo, pero debe tener la capacidad suficiente para ejecutar de manera eficiente el software de programación y seguimiento de las misiones (ver Capítulo 4, Sección 4.2.3) de un VANT, además de tener instalados los controladores para el módem del enlace de telemetría entre el VANT y la estación.

3.1.2 Clasificación de los VANT

Los vehículos aéreos no tripulados pueden tener múltiples formas y configuraciones, aunque los más comunes son del tipo avión (alas fijas) y tipo helicóptero. Algunos tienen sistema GPS que les permite volver al punto donde inició su vuelo. La mayoría de los

drones se manejan con radio control, pero también pueden manejarse y programarse mediante una tableta electrónica o un teléfono inteligente (*smartphone*).

De acuerdo con Nonami *et al.* (2010), un VANT puede ser clasificado por el tipo o forma de ala, método de control y en función de su uso. A continuación se describen de manera general por el tipo de ala.

3.1.2.1 De ala

i. Drones de ala fija

Con forma típica de aeroplano, requiere una pista para el despegue y aterrizaje, en algunos casos requiere una catapulta para lanzamiento o, simplemente, que una persona lo lance. Estos drones son más resistentes y pueden volar a altas velocidades. Como su nombre lo indica tienen alas fijas y son muy similares a un avión (Figura 3.8).



Figura 3.8 Dron de ala fija

ii. Drones multirrotores

Son drones altamente maniobrables, pueden aterrizar y despegar de forma vertical. Existen drones desde una hélice (tipo helicóptero). En el caso de tener múltiples hélices son clasificados como multicópteros o multirrotores, los cuales pueden girar sobre su eje y moverse en cualquier dirección. La Figura 3.9 es un ejemplo de este tipo de VANT. Los multicópteros se agrupan dependiendo el número de hélices: tricóptero (tres hélices), de cruz o cuadricóptero (cuatro hélices), y de más hélices, como hexacóptero u octocóptero. Sus capacidades son muy útiles para aplicaciones civiles.

Con respecto a su funcionamiento para los multirrotores, dos hélices giran en el sentido de las agujas del reloj y las otras dos en el otro sentido, creando así la fuerza de empuje necesario para llevar al dron hacia arriba. Se pueden mantener en el mismo sitio sin variar

la posición, gracias a sus giroscopios y estabilizadores, lo que es perfecto para sacar fotos y grabar videos.



Figura 3.9 Dron tipo hexacóptero

iii. Dirigibles o globos

Más ligeros que el aire, pueden tener vuelos de larga duración pero a baja velocidad. Son generalmente de forma alargada.

iv. De aleteo

Son drones inspirados en los insectos, tienen pequeñas alas flexibles o adaptables.

3.1.2.2 Por el método de control

Según el método de control:

i. Autónomo

El dron no necesita de un piloto humano que lo controle desde tierra. Se guía por sus propios sistemas y sensores integrados.

ii. Monitorizado

En este caso se necesita un técnico humano. La labor de esta persona es proporcionar información y controlar la retroalimentación del VANT. El VANT dirige su propio plan de vuelo y el técnico, a pesar de no poder controlar los mandos directamente, sí puede decidir qué acción llevará a cabo el VANT.

iii. Supervisado

Un operador pilotea el dron, aunque este puede realizar algunas tareas autónomamente.

iv. Pre-programado

El dron sigue un plan de vuelo diseñado previamente y no tiene medios de cambiarlo para adaptarse a posibles cambios.

v. Controlado remotamente (R/C)

El dron es piloteado directamente por un técnico mediante una consola.

3.1.2.3 En función de su uso

i. Drones militares

Son llamados UCAV que procede del inglés Unmanned Combat Air Vehicle, traducido al español sería vehículos no tripulados de combate aéreo. Suelen ir armados y con capacidad de bombardeos. La Figura 3.10 muestra uno de los drones militares más emblemáticos, el MQ-9 Reaper.



Figura 3.10 Dron militar MQ-9 Reaper (Fuente: BBC 2012)

ii. Drones civiles

Son aquellos drones que no tienen uso militar. A su vez pueden ser:

- De uso comercial: como cartografías, fotografías, videos, etc.
- Para aficionados: Se utilizan como entretenimiento y suelen tener precios bastantes económicos.

- Para uso del gobierno: Se utilizan para bomberos, operaciones de rescate o de investigación policiaca, con el fin de apoyar a las tareas de reconocimiento, rescate, monitoreo fronterizo e incluso fiscales.

3.1.3 Ventajas y desventajas de los VANT

Las ventajas principales con respecto a técnicas convencionales de los VANT son:

- No se arriesga la tripulación ante el mal funcionamiento del vehículo.
- Es muy útil para aquellas zonas de difícil acceso ya sea geográfico, de orden público, por volcanes, con incendios, concentración de radioactividad, zonas de desastre como deslaves o inundaciones entre otros.
- Posibilidad de obtener fotografías aéreas de alta resolución en tiempo real.
- No presenta problemas por condiciones atmosféricas (nubosidad) que impide la utilidad del uso de imágenes de satélite, ya que la altura de vuelo puede ser por debajo de las nubes.
- Bajo costo de operación para la adquisición de videos e imágenes aéreas.
- Las principales desventajas de los VANT son:
 - Dependen de una estación de seguimiento en tierra.
 - Vulnerabilidad a varios factores ambientales, aves, aviones, redes eléctricas, etc.
 - Limitaciones de peso y carga que limitan los alcances de los vuelos y del equipo que puede transportar
 - Dificultad de integración en el espacio aéreo.
 - Requiere de equipo auxiliar que tenga características de bajo peso y volumen, y alta confiabilidad.
 - Sujeto a regulación y normatividad cada vez más restrictivas de uso del espacio aéreo. En algunos países se limita su uso debido a la dificultad de obtener permisos de vuelo.

Como lo indicaron Chao y Chen (2012), una de las ventajas de los VANT sobre el uso de aviones tripulados es el vuelo a bajas altitudes (menos de 100 m sobre la superficie terrestre). Sin embargo, el uso de VANT puede ser afectado por los siguientes factores:

- Viento. Las ráfagas de viento son un problema en la estabilidad de vehículos aéreos de poca masa.
- Variaciones en la construcción. Pueden existir variaciones en la construcción de los VANT que afecten sus características.
- Limitación de recursos. Una de las limitaciones actuales de los VANT son los recursos que pueden integrarse en sus misiones de vuelo como la resolución de sus sensores,

| | |
|---|---|
| Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico | 3. Vehículos aéreos no tripulados (drones/VANT) |
|---|---|

poder computacional, el costo, limitado tamaño y peso de los sensores, y finalmente la duración de las baterías.

En la Tabla 3.1 se presenta una comparación entre las aeronaves tripuladas y no tripuladas para usos similares.

Tabla 3.1 Comparación de un VANT con respecto a un avión tripulado (Díaz *et al.*, 2014)

| Característica | VANT | Avión |
|------------------------|-------|-------|
| Permanencia/autonomía | Media | Baja |
| Velocidad | Baja | Alta |
| Alcance | Media | Baja |
| Penetración | Alta | Alta |
| Maniobrabilidad | Alta | Media |
| Precisión | Media | Baja |
| Capacidad de respuesta | Media | Alta |
| Previsibilidad | Media | Baja |
| Autonomía | Media | Baja |
| Restricción de uso | Alta | Media |
| Costo de adquisición | Alta | Media |
| Factor humano | Media | Alta |
| Multiusos | Alta | Alta |

3.1.4 Principales aplicaciones en la ingeniería

Un dispositivo autónomo como el VANT, con capacidad de comunicarse, transportar una cámara, tomar imágenes y videos, y almacenarlas o enviarlas a un servidor, constituye una alternativa para numerosas aplicaciones. Por lo tanto, la tecnología de drones en agricultura viene a cubrir o complementar un vacío que existe entre las limitaciones de la supervisión humana, y la tecnología satelital por su enorme costo y baja resolución.

La captura de imágenes ha generado una necesidad computacional impresionante, no solo en el almacenamiento, sino también en la velocidad de los motores de búsqueda,

identificación, rectificación e interpretación de ellas por medio de cálculos y algoritmos sofisticados.

El uso principal de los VANTS está enfocado a aquellas tareas que son difícilmente accesibles o entrañan un riesgo para una persona, o que requieren un nivel de exactitud y precisión que solo se puede lograr gracias al uso de esta moderna tecnología, las principales aplicaciones generales se describen a continuación.

3.1.4.1 Aplicaciones generales de los VANT

Los VANT se han empleado con éxito en múltiples ámbitos de los cuales los más destacados son:

i. Seguimiento de meteoros.

Los drones tienen la capacidad de acercarse a tormentas y huracanes, sin arriesgar vidas humanas, para reunir información muy valiosa. Después del paso de huracanes y desastres ambientales, los drones pueden reunir información fotográfica de la magnitud del desastre y por consiguiente cuantificar las afectaciones.

ii. Inspección de obras civiles

Supervisión de líneas eléctricas de alta tensión, así como de ductos o canales hidráulicos. Inspección de puentes y estructuras en zonas de difícil acceso, por ejemplo después de un terremoto se puede verificar la infraestructura y buscar fallas en los mismos.

iii. Tráfico urbano:

Por medio de imágenes se estima el tráfico en las diferentes avenidas principales de las ciudades, así como su evolución en tiempo real.

iv. Inspección de parques fotovoltaicos, termo-solares y eólicos

v. Control de instalaciones industriales

vi. Monitoreo de centrales hidráulicas, eléctricas, etc.

vii. Monitoreo de flora y fauna en peligro de extinción

Se puede localizar e identificar la flora y fauna rápidamente en tiempo real para evitar posibles amenazas. En el caso de personas, se han llevado a cabo labores de rescate encontrando rápidamente a gente extraviada y facilitando las coordenadas para que sean socorridas, o en su caso indicar las posibles rutas de salida con el menor riesgo.

viii. Control y monitorización de explotaciones mineras y de su impacto ambiental.

3.1.4.2 Aplicaciones topográficas

Los drones se encuentran en plena evolución al igual que sus aplicaciones en la topografía. Con una visión a futuro, su capacidad de tiempo de vuelo aumentará, así como sus prestaciones. Sin embargo, actualmente ya son capaces de llegar a lugares donde los humanos por medios convencionales no pueden, además de proporcionar una vista privilegiada en tiempo real, adquirir fotografías y videos de las zonas de interés.

Una de las características mayormente explotada de los VANT en la topografía es su utilidad para la construcción de modelos digitales del terreno. En esta tarea, los VANT son utilizados para tomar múltiples fotografías cubriendo el área de una zona de interés. Las fotografías obtenidas del terreno “escaneado” se procesan en tierra para obtener modelos digitales de elevación (MDEs) con resolución centimétrica y una precisión de 2 a 10 cm, dependiendo de la calidad de los puntos de control. Para los terrenos pequeños (de 1 a 100 has) las ventajas de los drones son más evidentes, los cuales se reflejan en:

- Seguridad. No es necesario que el técnico entre personalmente a lugares accidentados y que, por ende, evita el riesgo a su integridad física.
- Mayor cobertura. Algunos puntos son sencillamente inaccesibles para las personas, como un río caudaloso y en constante cambio, zonas de deslave, acantilados o un claro rodeado de árboles, los cuales fácilmente un dron puede cubrir.
- Más información. Un levantamiento topográfico tradicional determina de forma precisa algunas zonas del plano, sin embargo, con un dron todo el plano o el área de estudio presenta la misma precisión en la información. Además, las fotografías proporcionan gran información de lo que existe en la zona de estudio determinando el tamaño exacto de los deslaves, los niveles del agua del río, puntos de interrupción del río y afectaciones diversas por el paso de, por ejemplo, un huracán.

Las imágenes aéreas permiten crear mosaicos ortorectificados y georreferenciados además de obtener nubes de puntos y modelos en 3D que permiten el cálculo de curvas de nivel, medición de áreas y volúmenes, estereoscopia y restitución 2D o 3D.

Por lo tanto, los drones permiten elaborar los siguientes productos cartográficos:

- Fotografía aérea y cartográfica mediante la generación de mapas de forma más económica, obteniendo imágenes y coordenadas con gran exactitud y una alta resolución.
- Creación de Modelos de Elevación Digital (DEMs) mediante fotogrametría y Sistemas de Información Geográfica (SIGs).

3.1.4.3 Monitoreo del estado de obras hidráulicas

Las obras de distribución y almacenamiento de agua requieren de una supervisión frecuente a fin de garantizar su correcto estado y funcionamiento. Este monitoreo también es necesario por cuestiones impredecibles, como desastres naturales o accidentes. Normalmente, es una tarea que requiere del uso de recursos humanos especializados que deben trasladarse a la localización de las obras y que en ocasiones arriesgan su integridad física para realizar la inspección.

Actualmente, los VANT equipados con equipo fotográfico y de video de alta resolución facilitan este proceso, ya que dichos equipos pueden volar cerca de la obra de interés para realizar una supervisión más certera, permitiendo la localización de grietas, problemas de erosión, corrosión y defectos de construcción. El VANT puede ser equipado con cámaras térmicas y termo-gráficas de alta resolución, las cuales son utilizadas para automatizar la detección de corrosión, fugas y sobrecalentamiento de motores. Los VANT son más seguros, ya que el recorrido se programa de forma remota y se asiste por medio de una aplicación informática. Al final, la labor de análisis e inspección se hace sobre las imágenes y videos capturados, en una etapa posterior al vuelo y en una zona segura.

En obras específicamente diseñadas para uso hidroagrícola, los VANT pueden realizar la supervisión del estado de funcionamiento de las redes de canales y puntos de entrega a los usuarios, con sobrevuelos programados periódicamente, a lo largo de los canales. También pueden detectar fugas o zonas en mal estado que demande una reparación inmediata, o detectar riegos no autorizados.

3.1.4.4 Seguimiento de cultivos

Se han reportado múltiples aplicaciones de los VANT en la agricultura, entre las principales se encuentran:

- a. Detección oportuna de problemas que puedan limitar el rendimiento potencial de los cultivos, con imágenes de índices de verdor como el índice NDVI se detectan diferencias en el verdor de las plantas, localizando de forma puntual las zonas con problemas en desarrollo.
- b. Seguimiento a la aplicación de riegos, detectando la variabilidad espacial del humedecimiento del suelo y estrés hídrico en las parcelas agrícolas (usando imágenes NDVI), posiblemente relacionadas a la falta de nivelación adecuada o diferencias en tipos de suelo y a malas prácticas de riego.
- c. Monitoreo temporal y espacial del grado de desarrollo de los cultivos, para detectar el momento adecuado para la cosecha y tiempos de actuación para aplicación de

insumos o ejecución de tareas, así como la necesidad de aplicar de fertilizantes en partes específicas de las parcelas, donde se detecta un desarrollo deficiente o anormal. Se puede realizar un ahorro de tiempo importante, ya que permite cubrir superficies mucho más grandes de lo posible si se tuviera que recorrer las parcelas en forma manual.

- d. Detección del estado fitosanitario de las plantas, ya que un mapa de colores contrastantes puede mostrar la variación espacial de la luz solar absorbida por el follaje de las plantas. Lo anterior se utiliza para la detección y monitoreo de plagas y enfermedades de los cultivos a nivel regional, así como el monitoreo temporal y de la extensión espacial de malezas (plantas invasoras) en las parcelas. Esta información servirá para la planeación de prácticas de campo como aplicaciones de herbicidas o tratamientos orgánicos, y para eliminar manualmente dichas malezas.

Los anteriores elementos constituyen la agricultura de precisión, que es una de las áreas de mayor aplicación de los VANT y que se detalla en la siguiente sección.

3.1.4.5 Aplicaciones para la agricultura de precisión

La agricultura de precisión consiste en efectuar la aplicación precisa y oportuna de los insumos agrícolas a los cultivos (Gil, 1997). Mediante la automatización (Leyva, Alves de Souza y Orlando, 2001) se monitorea y aplican dichos insumos en función de la variabilidad espacial y temporal de los factores que limitan el desarrollo y productividad de los cultivos.

La agricultura, como sistema productivo, somete a un conjunto de plantas a un proceso interactivo entre agua, suelo, planta y atmósfera, incorporando un reto para la aplicación de los sensores remotos desde varios puntos de vista. Un aspecto importante en la agricultura de precisión es la detección de zonas diferenciadas en función de parámetros o valores específicos, tales como vigor, madurez, o estrés. El uso de VANT para estas tareas es crucial para definir zonas de intervención diferencial o con problemas de desarrollo. Entre los factores a determinar, en aplicaciones agrícolas, además de las características del vehículo aéreo, sin duda será el tipo de sensor que pueda ser montada.

Existe una amplia gama de opciones de cámaras a usar dependiendo de lo que se pretenda captar. Esa diversidad contempla el peso del equipo, el tamaño, resolución, versatilidad, etc. En la agricultura de precisión, los drones se usan para construir mapas que muestran la variabilidad espacial y temporal, enfocándose principalmente en las siguientes variables:

- a. Seguimiento del desarrollo y crecimiento del cultivo

- b. Estimación de parámetros del cultivo, como biomasa, altura, diámetro y densidad de plantación
- c. Detección y seguimiento de deficiencias nutricionales
- d. Detección de patrones anormales del cultivo
- e. Detección y seguimiento de la presencia de malas hierbas, enfermedades y plagas
- f. Detección de las necesidades hídricas y seguimiento del riego
- g. Estimación del rendimiento del cultivo

3.2 Evolución de los VANT

Estrictamente hablando, los drones modernos son resultado de una combinación de tecnologías, cada una con su propia línea evolutiva. Robótica, aeronáutica, informática, sensores remotos y fotografía digital son algunas de las ciencias y técnicas que convergen para dar forma a los VANT de hoy en día. No obstante, se suelen citar los esfuerzos en la creación de las aeronaves piloteadas de manera remota (Remote Piloted Aircrafts, RPAs) como hitos significativos en la evolución de los VANT. Siguiendo esta línea, la presente sección proporciona un panorama histórico general de los VANT, desde la aparición de los globos aerostáticos con cargas explosivas, hasta los drones en su forma actual.

3.2.1 De los globos de Austria a la Primera Guerra Mundial

El ejemplo citado con mayor frecuencia como la aparición más temprana de RPAs son los llamados globos de Austria. Estos globos aerostáticos fueron lanzados desde el barco austriaco Volcano y dirigidos por medio del viento hacia Venecia en agosto de 1849, en medio de un conflicto bélico que enfrentó a ambas ciudades (Jia, 2011). Los globos eran cargados con explosivos, y se hacían caer de manera vertical cuando un mecanismo compuesto por una batería galvánica desinflaba el globo. Este procedimiento era muy inseguro, ya que un cambio en la dirección del viento podría hacer regresar los globos al punto de partida, con el riesgo de explotarlos sobre la propia armada Austriaca. No obstante, este ejemplo incentivó el uso de naves no tripuladas para aplicaciones militares, lo que sin duda marcó el rumbo de desarrollo de los VANT.

En 1911, apenas 8 años después del primer vuelo tripulado de la historia, el inventor del giroscopio direccional moderno Elmer Sperry comenzó un proyecto con la Marina de Estados Unidos para utilizar su invento en vuelos operados por radio control. Este proyecto permitió realizar dos años después 58 vuelos de prueba estabilizados con giroscopio (Keane & Carr, 2013). Una de las conclusiones de estas pruebas fue que la

tecnología de radio era aún demasiado inmadura para delegar el control, y los siguientes esfuerzos se enfocaron en mantener la dirección y estimar lo mejor posible la distancia al blanco.

En 1917, poco después de que Estados Unidos se involucrara en la Primera Guerra Mundial, el pionero en aviación Glenn Curtiss se unió al equipo formado por Sperry para producir el llamado “torpedo aéreo”, una estructura de avión diseñada para cargar artillería pesada y con un alcance de hasta 80 km de distancia. Este esfuerzo llevó a la prueba del 6 de marzo de 1918, donde el torpedo aéreo Curtiss-Sperry realizó su vuelo y aterrizaje exitoso más largo, cubriendo una distancia de casi un kilómetro. En octubre de ese mismo año, una prueba del torpedo aéreo N-9 tuvo un vuelo con despegue exitoso y un vuelo correcto por 13 km, distancia a la que se desvió y se estrelló en el mar. Más de 100 pruebas se realizarían antes de la firma de la paz el 11 de noviembre de 1918, aunque el torpedo aéreo (Figura 3.11, izquierda) nunca tuvo un servicio activo en la guerra.

El ejército estadounidense hizo sus propios esfuerzos en paralelo con la Marina durante la Primera Guerra Mundial. A finales de 1917, la junta de aviación de la Armada estadounidense solicitó a Charles Kettering, inventor estadounidense, un artefacto similar al torpedo aéreo. El bicho de Kettering (*Kettering bug*) (Figura 3.11, derecha), fue un pequeño biplano diseñado para alcanzar blancos terrestres situados hasta 120 km de distancia. Esta aeronave era impulsada por un motor de cuatro cilindros y estaba equipada con un pequeño giroscopio, barómetro, altímetro y una computadora mecánica primitiva.

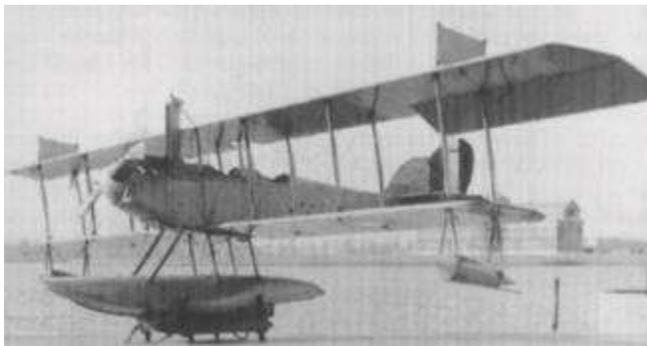


Figura 3.11 El torpedo aéreo (izquierda) y el “bicho” de Kattering (derecha) (Keane & Carr, 2013)

Antes del despegue, los técnicos trazaban la trayectoria y se revisaba la dirección de los vientos pronosticados en la ruta, usando esta información para estimar el número de revoluciones necesarias por el motor para llegar a su destino. A medida que el avión se

acercaba al final de su vuelo (alcanzando el número estimado de revoluciones), el motor se apagaba mecánicamente, las alas eran expulsadas y se comenzaba una trayectoria balística hacia su objetivo. El recorrido terminaba detonando la carga explosiva con el impacto. Los primeros vuelos de prueba comenzaron en septiembre de 1918, teniendo el primer vuelo exitoso el 22 de octubre del mismo año. Al alcance de la firma de armisticio, la tasa de vuelos exitosos del bicho en pruebas era de solo el 22 %, por lo que siempre permaneció en su etapa experimental.

Esfuerzos similares al torpedo aéreo y al bicho de Kettering se hicieron en otros países. En Alemania, un proyecto similar iniciado por el Dr. Wilhelm von Siemens tuvo efecto entre 1915 y 1918. El torpedo planeador de Siemens era un misil que podría lanzarse desde un Zeppelin y posteriormente guiarse hacia su objetivo por radio. Al igual que el torpedo aéreo y el bicho de Kattering, el torpedo planeador tampoco tuvo participación activa en la guerra (Shaw, 2014).

3.2.2 El periodo entre guerras

Posterior a la Primera Guerra Mundial, varias de las aeronaves construidas para la batalla fueron adaptadas para entrenamiento. Entre estas, destaca el caso del modelo Standard E-1 de la armada estadounidense, por su relación cercana con los RPAs (Figura 3.12). Este biplano de tamaño compacto era impulsado por un motor de 100 hp. Dada su poca potencia y armamento (solo contaba con una metralleta), se desestimó su uso para el frente de batalla. De esta forma, al cese de la primera guerra, varios E-1 fueron enviados a las escuelas de vuelo, y otros permanecieron en la armada para fines de aprendizaje. En 1919, la compañía de Sperry adaptó tres de estos biplanos para utilizarlos de forma remota por radio control, aún como parte de la experimentación y mejora del torpedo aéreo (Johnson, E. & Jones, 2015).



Figura 3.12 El Standard E-1 de la armada estadounidense (Johnson, E. & Jones, 2015)

Durante el periodo entre-guerras -y con el cese de hostilidades-, el interés del vuelo no tripulado disminuyó. Sin embargo, se hicieron importantes avances en el vuelo vertical y la operación por radio control. A principios de la década de los 20, el ingeniero francés, diseñador de helicópteros Étienne Oehmichen, experimentó con aeronaves de despegue vertical, teniendo su éxito más significativo con el multirroto denominado “helicóptero no. 2” (Figura 3.13).

Esta aeronave tenía cuatro rotores y ocho hélices, todos impulsados por un solo motor. Cinco de las hélices se hacían girar en el plano horizontal, estabilizando la máquina lateralmente. Otra hélice se montó en la nariz para la dirección. El par restante de las hélices era para la propulsión hacia adelante. La aeronave presentaba un grado considerable de estabilidad y alta capacidad de control para su tiempo, realizando más de un millar de vuelos de prueba.

El 14 de abril de 1924 estableció el récord de distancia por primera vez para los helicópteros, al volar 360 metros (390 yardas). En estas pruebas se demostró la capacidad de efectuar una trayectoria circular y, más tarde, se completó el primer kilómetro (0.62 millas) de vuelo en circuito cerrado por un helicóptero (McGowen, 2005). A pesar de exhibir suficiente capacidad de control, la aeronave no superó los 8 km/h, razón por la cual Oehmichen reorientó a su trabajo hacia los helicópteros de un solo rotor.

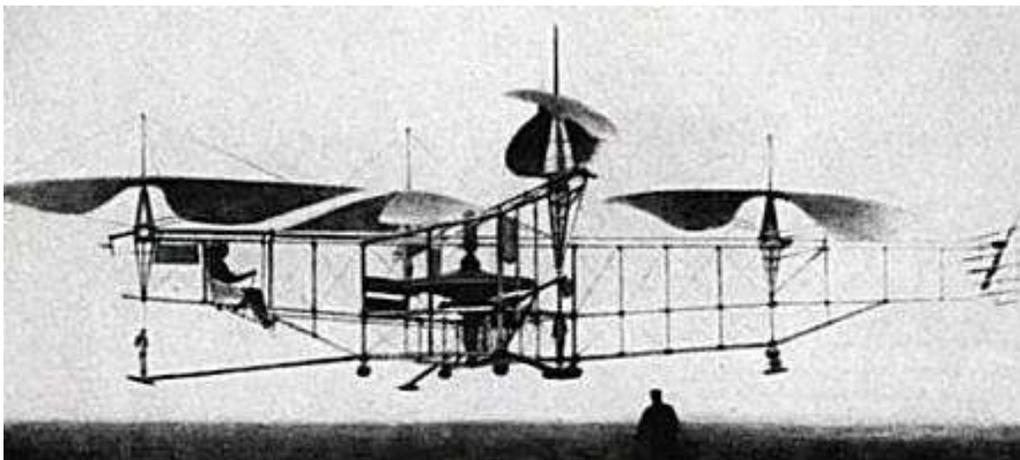


Figura 3.13 Helicóptero no. 2 de Oehmichen (dos Santos, 2011)

Otros entusiastas de la época se enfocaron en robustecer el control por radio en las aeronaves construidas durante la Primera Guerra Mundial. El 25 de septiembre de 1924, el laboratorio de investigación naval de Estados Unidos anunció la realización del primer vuelo controlado de forma remota por radio que cumplía de forma exitosa todas las

etapas de un vuelo: despegue, seguimiento de trayectoria y aterrizaje. Se trató de la aeronave Curtiss F-5L (Figura 3.14), con un alcance de control de radio de 16 km (10 millas) (McGowen, 2005).



Figura 3.14 El Curtiss F-5L (Keane y Carr, 2013)

El Reino Unido comenzó a figurar fuertemente en la carrera de los RPAs a principios de la década de los 30. Durante las dos décadas previas, la Real Fuerza Aérea inglesa (Royal Air Force) impulsó varios proyectos para construir aeronaves operadas por radio control con dos propósitos principales: a) servir como objetivos aéreos en entrenamientos de artillería; y b) utilizarlos para la entrega de armamento. En el primer caso, se pretendía que dichas aeronaves pudieran despegar, volar de ida y vuelta frente a los artilleros, recuperarse y reutilizarse.

De estos esfuerzos surgió el Fairey Queen, aeronave radio-controlada adaptada del hidroavión de reconocimiento Fairey III F (Keane y Carr, 2013). Aprovechando una tecnología de radio ya madura, esta RPA fue utilizada como blanco por la marina real en entrenamientos de artillería entre 1932 y 1933. Lamentablemente, se trataba de una RPA costosa, por lo que solamente se construyeron tres equipos. No obstante, la experiencia con el Fairey Queen, aunque limitada, reveló la necesidad producir en masa un RPA específico para el entrenamiento de artillería antiaérea. Esta fue la idea que inspiró al llamado “DH.82B Queen Bee”, un biplano construido por la *Havilland Aircraft Company* para la Real Fuerza Aérea inglesa.

El *Queen Bee* fue construido con muchas de las partes del *Tiger Moth* (un popular pequeño avión de la misma compañía), como el motor, las alas y la cola (Popular mechanics, 1935). Sin embargo, gran parte del fuselaje y de la estructura metálica

fueron reemplazados con madera, lo que disminuyó su costo y peso, a la vez que ofrecía mayor flotación en caso de un amaraje forzoso (O'Malley, 2016). Este fue el primer biplano de entrenamiento considerado como un blanco retornable y reusable. El *Queen bee* (Figura 3.15) fue construido de abeto y madera contrachapada, y estaba equipado con ruedas o flotadores por si este era lanzado desde la tierra (como en un campo de aviación) o desde el agua (como en el mar). Podía volar a una altitud de 5,182m a velocidades superiores a 160 km/h, con un alcance de 482 km.



Figura 3.15 El RPA DH.82B Queen Bee y su estación en tierra (Newcome, 2004)

Impulsados por los avances del Reino Unido, la Marina de Estados Unidos retoma en 1936 su programa de objetivos aéreos controlados por radio bajo el nombre “Proyecto de Aeronaves Radio-Controladas” (Radio-Controlled Aircraft Project) (Keane y Carr, 2013). El proyecto queda a cargo del Teniente-Comandante D. S. Fahrney, quien acuña el término ‘drone’ en su reporte anual de 1936 para referirse los objetivos aéreos no tripulados (Ronconi *et al.*, 2014). Como lo indica el propio Fahrney, la palabra *dron* (zángano en inglés) fue seleccionada como forma de respeto al RPA que lo inspirara, el *Queen bee* (abeja reina) (Ehrhard, 2010).

Fahrney comenzó con el desarrollo de una estructura de avión en la fábrica de la base naval de Filadelfia, encargando el equipo de radio a la división de radio del laboratorio de investigación naval (Naval Research Laboratory, NRL). Los drones fueron utilizados por primera vez como objetivos aéreos de artillería en los Estados Unidos el 24 de agosto de 1938, en una prueba con los equipos de armamento del buque USS Ranger (CV-4) (Keane & Carr, 2013). Fahrney también incursionó en el uso de las señales de televisión

para proporcionar a un operador de una aeronave en vuelo la información relacionada con la instrumentación del RPA (telemetría), así como transmitir al controlador la vista delantera del dron. Estos ensayos proporcionaron a la Marina de información útil para mejorar el desarrollo de sus RPA, tanto como de aeronaves de asalto o como misiles teledirigidos.



Figura 3.16 Reginald Denny de RadioPlane y su RP-1 ("Remote Piloted Aerial Vehicles - The Radioplane Target Drone", 2006)

El trabajo de Fahrney, entre otras aportaciones, hizo patente la necesidad de reevaluar la eficacia de las defensas contra las amenazas aéreas. Tomando esto en cuenta, la Armada estadounidense fortaleció su proyecto de armamento y objetivos teledirigidos, para lo cual contrató a la compañía RadioPlane. RadioPlane era dirigida por Reginald Denny, actor británico interesado en el radio-control y el aeromodelismo. Denny pensaba que los aviones RC pequeños y de bajo costo serían muy útiles para la formación de los artilleros antiaéreos, y en 1938 mostró la aeronave RP-1 (Figura 3.16) al ejército de Estados Unidos, la cual presentó algunas dificultades con el manejo del radio-control. En 1939, Denny compró el diseño de Walter Righter y lo comenzó a comercializar como el "Dennymite", mostrándolo al Ejército como el RP-2, siendo este más exitoso que el primero. Le siguieron las actualizaciones RP-3 y RP-4. En 1941, su empresa comenzó a suministrar el Cuerpo Aéreo del Ejército EUA, con objetivos aéreos de bajo costo y en el transcurso de la Segunda Guerra Mundial vendió más de 3,800 drones para ser usados como blancos de artillería (Wagner, 1982).

3.2.3 De la Segunda Guerra Mundial a la Guerra del Golfo

Los Estados Unidos y la Gran Bretaña no fueron las únicas potencias en buscar el dominio de los objetivos teledirigidos en el período entre-guerras. Al inicio de la Segunda Guerra

Mundial, Alemania demostró un gran avance en el desarrollo del control de radio para bombas teledirigidas. Las armas más significativas de este tipo fueron la bomba-planeador Henschel Hs-293 y la Ruhrstahl AG SD-1400X, a la que los aliados llamaron “Fritz X” (Axelrod, 2015). Desarrollada en 1939, la Hs-293 fue la primera bomba guiada por radio usada en combate en la Segunda Guerra Mundial.

Originalmente, la bomba solo planeaba, no contaba con una máquina impulsora, por lo que fue necesario adaptarle posteriormente un motor de cohete. Los sistemas de dirección de esta RPA incluían giroscopio, un decodificador de señal de radio-control y un receptor de comandos de radio que controlaba los solenoides-actuadores que estaban fijos a los alerones y elevadores de la nave. Se incluía también a bordo una batería para energizar el sistema. La Fritz X (Figura 3.17), incluía el mismo sistema de dirección por radio que tenía la Hs-293, sin embargo, empleaba un giroscopio más avanzado para estabilizar el balanceo y un diseño más aerodinámico.



Figura 3.17 La bomba-planeador alemana teledirigida Fritz X (“Fritz-X”, s.f.)

La Fieseler Fi-103 (V-1 Buzz Bomb) fue otro popular RPA alemán que se utilizó de forma masiva en la Segunda Guerra. La V-1 era impulsada por un motor de propulsión a chorro (*pulsejet*) que al desplazarse producía un zumbido característico, lo que dio pie a su sobrenombre. Esta bomba teledirigida llevaba una ojiva de un poco más de 900 kg (2000 libras) por aproximadamente 240 km (150 millas). La V-1 tenía un sofisticado sistema de orientación integrado por giroscopios, barómetros, y un anemómetro, que era utilizado para calcular la distancia recorrida. Una vez encima del objetivo, el sistema de guía ponía al V-1 en picada. Los alemanes lanzaron aproximadamente 20 000 V-1 a blancos aliados entre junio de 1944 y marzo de 1945, principalmente en Londres y Bélgica (Darack, 2016).

En Estados Unidos, la Segunda Guerra impulsó los contratos de Radioplane, que tuvo su crecimiento más grande durante este periodo. En 1941, la armada hizo un gran pedido del modelo RP-5, y lo renombró como OQ-2, el cual alcanzó los 137 km/h. La Marina

de los Estados Unidos también ordenó varios de éstos, renombrándolos como “Target Dron Denny 1” (TDD-1). El TDD-1 era accionado por un motor de 6 HP de 2 cilindros de 2 tiempos y condujo posteriormente a otros RPAs designados por el Ejército de Estados Unidos y la Marina como OQ-3/TDD-2 y OQ-14/TDD-3 respectivamente (“UAV universo (a)”, s.f.). Miles de estos RPAs fueron fabricados en la planta de Radioplane en el aeropuerto de Van Nuys, en Los Ángeles, California. Anecdóticamente, fue en esta fábrica donde se descubrió como modelo a una joven trabajadora de nombre Norma Jean Dougherty (conocida posteriormente como Marilyn Monroe), cuando esta posó para una revista de la armada mostrando el proceso de ensamblaje de un dron, en 1944 (Figura 3.18).



Figura 3.18 Norma Jean Dougherty en el ensamblado del OQ-3 (“History of unmanned aerial vehicles”, 2016)

El ataque a Pearl Harbor en 1941 reavivó el interés en los drones como bombas de asalto. La Marina de E.U.A. creó el programa OPTION, con el fin de desarrollar lo más pronto posible un RPA de asalto diseñado específicamente para combate (Perry, 2011). Dos drones producto de este proyecto fueron los TDN y TDR. El TDN-1 (Figura 3.19), construido por la Fábrica Naval estadounidense estaba hecho principalmente de madera. Las siglas TD se utilizaron para denotar a un torpedo-RPA (Torpedo-Drone), y la N designa a la Fábrica Naval como su fabricante. La TDN-1 presentaba un ala alta, dos motores gemelos de pistones, y tren de aterrizaje fijo en triciclo. Tenía una capacidad de carga de un torpedo o 900 kg de bombas y podía alcanzar velocidades de 280 km/h.

Las pruebas de vuelo del TDN-1 iniciaron a finales de 1942 y sus capacidades fueron rápidamente cuestionadas. Se consideró caro y no adecuado para la producción en masa, por lo que solo se construyeron 114. Ninguno de éstos se utilizó en combate, solo para prácticas de tiro. El TDR-1, por otro lado, fue construido por la Interestatal Aircraft Company, con sede en Los Ángeles (la R en el nombre designa a esta empresa). Tenía un diseño externo similar al TDN-1, pero por dentro lo soportaba un bastidor hecho con tubos de acero. El TDR-1 tenía una envergadura de casi 15 m y pesaba casi 2700 kg, sin contar su carga útil de hasta 900 kg de artefactos explosivos (Keane y Carr, 2013).

Después de ser puesto en servicio, su diseño de tren de aterrizaje de triciclo fue modificado para ser desechado de forma remota después del despegue, dando al dron la capacidad de alcanzar un objetivo hasta los 680 km (Perry, 2011). Entre el 26 de septiembre y el 26 octubre de 1944, se desplegaron 46 TDR-1, de los cuales 37 se enviaron a combate y de éstos al menos 21 dieron en el blanco. A pesar de estos resultados, el programa fue cancelado, ya que el TDR-1 presentaba varios defectos: su sistema de televisión era pobre y con bajo contraste y resolución, los sistemas electrónicos eran voluminosos y complejos y la señal de televisión podía ser bloqueada fácilmente.



Figura 3.19 Dron de asalto TDN-1

La Fuerza Aérea de los Estados Unidos (USAF) también participó en la búsqueda de la llamada “bomba aérea”. En 1941 -casi 20 años después del Bicho de Kettering-, la USAF otorgó un contrato a Kettering y General Motors para una nueva bomba aérea, la cual fue nombrada GM 'A-1'. La A-1 consistía en un monoplano controlado por radio, capaz de transportar una bomba de entre 225 kg por una distancia de 640 km, a una velocidad máxima de 320 km/h. Al igual que el original *Bicho de Kettering*, este era lanzado desde los carriles en un carro con ruedas. A pesar de que varios de ellos fueron construidos, el

| | |
|---|---|
| Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico | 3. Vehículos aéreos no tripulados (drones/VANT) |
|---|---|

programa sufrió de mala organización, y fue cancelado en 1943 ("UAV universo (a)", s.f.).

Otros drones de asalto además del TDN-1 y de la A-1 se construyeron durante la Segunda Guerra. En 1941, la fábrica de aeronaves de la marina de Estados Unidos desarrolló un RPA de asalto en el marco del denominado "Proyecto Fox", instalando una cámara de televisión en un dron y una pantalla receptora en una aeronave de tipo TG-2 ("History of unmanned aerial vehicles", s.f.). En abril de 1942, el dron de asalto logró un ataque exitoso de torpedo contra un destructor a una distancia de 32 km (20 millas) del avión de control TG-2. Otro RPA de asalto se estrelló con éxito en un objetivo moviéndose a una velocidad de 15 km/h (ocho nudos).

La oficina de Aeronáutica de la Armada propuso entonces un programa de asalto guiado por televisión con 162 aviones de control y 1,000 drones de asalto. Los desacuerdos surgieron dentro de la Marina en relación con las ventajas relativas del programa propuesto para la implementación de combate a alta escala en comparación con un combate a pequeña escala para evitar revelar el concepto al enemigo y reducir el desarrollo de medidas de contrataque antes de su plena producción. Los drones de asalto seguían siendo un concepto no probado en las mentes de los planificadores militares en 1944, por lo que su uso se limitó a un ataque de 4 drones contra un buque mercante japonés varado en las islas Russell a finales de julio, seguido de un envío de 46 drones en las Islas Salomón Septentrionales ("History of unmanned aerial vehicles", s.f.). En el primero, dos impactos y dos fallos fueron anotados en la nave enemiga; del segundo varios de los aviones no alcanzaron sus objetivos, pero la mayoría fueron efectivos.

De forma similar a los alemanes, los estadounidenses también usaron motores con propulsión a chorro para impulsar sus RPAs. La compañía McDonnell comenzó el desarrollo en 1942 del llamado TD2D-1 Katydid (renombrado posteriormente como KDD-1 y finalmente como KDH-1). Esta era una máquina de forma alargada con un ala recta montada al centro y una cola en forma de "v" que soportaba el motor de pulsos de 8 pulgadas de diámetro. El dron podría ser lanzado por una catapulta desde el suelo o desde bastidores debajo de los hidroaviones. Tenía un giro-estabilizado, radiocontrolado y podría ser recuperado con un paracaídas. El Katydid se desarrolló en la mitad de la guerra y un pequeño número se puso en servicio para la Marina de los EUA (Keane y Carr, 2013).

La línea que separaba a los drones de asalto, cuya misión era volar hacia un objetivo y auto-destruirse, y los drones que pretendían realizar alguna acción -como entregar una carga útil- y regresar, se hizo más amplia al finalizar la Segunda Guerra Mundial. Los impulsores de este último tipo de VANT, llamado dron de reconocimiento, se enfocaron en mejorar los aspectos de sustentabilidad, como el tiempo de vuelo y el ciclo de vida útil; así como aspectos de desempeño, como la maniobrabilidad, la altitud y la

instrumentación. Dichas características fueron particularmente útiles para las necesidades de las naciones en el período histórico inmediato posterior a la Segunda Guerra, denominado Guerra Fría.

Los drones de reconocimiento o vigilancia de finales de los años 1950 y principios de los sesenta fueron equipados con cámaras de película de 125 mm o 70 mm, bengalas para fotografía nocturna y sensor de infrarrojos ("History of unmanned aerial vehicles", s.f.). Algunos incluso poseían un radar de aire lateral (Side Looking Airborne Radar, SLAR) que era capaz de transmitir imágenes en tiempo real por medio de un sensor en tierra (Newcome, 2004). Durante esta época, los esfuerzos en la navegación autónoma se enfocaron en permitir que una nave no tripulada corrigiera automáticamente su curso, asegurando una navegación más precisa. Varios esquemas fueron probados al respecto, algunos incluso adelantados a su tiempo. Los avances más relevantes se obtuvieron en el mejoramiento de los sistemas de navegación inercial (Inertial Navigation System, INS) de los años 40, el sistema "rastreador de estrellas" (Star Tracker) de los años 50 y el sistema de tránsito de los años 60, que fue el primer sistema de radio señales por satélite y predecesor del sistema de posicionamiento global (*Global Positioning System, GPS*) (Newcome, 2004).



Figura 3.20 Dron SM-62A Snark ("SM-62 Snark", s.f.)

Respecto a las aeronaves, durante la Guerra Fría, la Marina y la Fuerza Aérea de Estados Unidos iniciaron programas para convertir drones de asalto en drones de reconocimiento (Keane y Carr, 2013). RPA como la serie Ryan Firebee con propulsión a chorro, que aparecieron por primera vez en la década de 1950, se convirtieron poco después en una de las primeras plataformas de vigilancia. Aviones de reconocimiento derivados de la

Firebee, como el Ryan Modelo 147, fueron utilizados por los Estados Unidos para espiar a Vietnam del Norte, China comunista, y Corea del Norte en la década de 1960 y principios de 1970. Otro RPA emblemático de esta época fue el Northrop SM-62 Snark, misil de crucero impulsado por energía nuclear que entró en funcionamiento en 1960 (Figura 3.20). Pese a los avances logrados, la mayor parte de los vehículos aéreos no tripulados de esta época sufrieron de problemas de fiabilidad en torno a sus sistemas de navegación y orientación.

A finales de la década de los 60, se dio un cambio en el paradigma de construcción de los drones, cambiando los modelos adaptados tipo avión de control remoto por modelos construidos de forma específica, con muchas diferencias físico-estéticas de los modelos previos. Los nuevos drones presentaban fuselajes con forma de dardos o cigarros, alas pequeñas y propulsores de cohete. Estas aeronaves eran mucho más rápidas que sus predecesores, alcanzando incluso velocidades de Mach 2 (History of unmanned aerial vehicles, s.f.).

La Guerra de Vietnam, de 1955 a 1975, es considerada como el primer conflicto bélico donde los VANT se usaron de forma exhaustiva (Keane y Carr, 2013; Ronconi *et al.*, 2014). Se estima que un total de 3,435 misiones de reconocimiento fueron desplegadas sobre Vietnam por el Departamento de la Fuerza Aérea denominado 100 SRW (100th Strategic Reconnaissance Wing) entre 1964 y 1975. Este escuadrón desplegó los drones Ryan Firebees lanzándolos desde un avión de transporte tipo Hércules DC-130A modificado. Con dos drones bajo cada ala, cada avión llevaba un total de 4 drones.

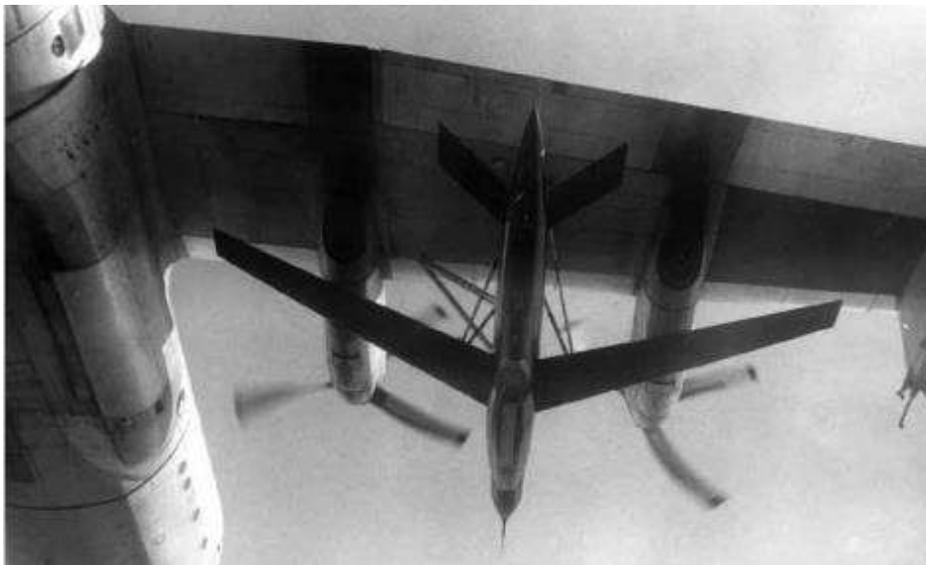


Figura 3.21 Dron AQM-34, listo para su lanzamiento desde su portador, un DC-130 (Ehrhard, 2010)

Los VANT desplegaron sus paracaídas al completar sus misiones, y generalmente eran recuperados por helicóptero, en un procedimiento denominado “Sistema de Recuperación a Mitad del Aire” (Mid-Air Retrieval System, MARS) (Gleason y Fahlstrom, 2016). Desde inicios de abril de 1966, y hasta el final de la guerra en 1975, la Fuerza Aérea Estadounidense llevó con éxito 2,655 misiones de captura MARS de 2,745 intentos, usando principalmente el avión Ryan 147J. Una variante de este modelo, Ryan 147SC (de nombre militar AQM-34L), (Figura 3.21) es considerado el VANT con la mayor cantidad de misiones de reconocimiento y combate ejecutadas durante esta época (James, 1988). Las actividades de reconocimiento incluían vigilancia diurna y nocturna, distribución de folletos y detección radar de misiles lanzados desde tierra.

A finales de los setenta, Estados Unidos perdió interés en el desarrollo de VANT con fines de recopilación de información y vigilancia, y se centró más en la construcción de satélites de alta resolución (Cole, 2014). Israel tomó entonces la delantera en el desarrollo de drones. En 1978, Israel Aircraft Industries (IAI) desarrolló un pequeño UAV impulsado por motor de pistón llamado 'Scout' (Figura 3.22). El *Scout* fue presentado por primera vez en el Salón Aéreo de París en 1979. Estaba hecho de fibra de vidrio y otros materiales compuestos, con una envergadura apenas debajo de 4 m y una firma de radar muy pequeña (UAV universo (b), s.f.).



Figura 3.22 El Scout de Israel Aircraft Industries (Dalamagkidis *et al.*, 2012)

Debido a su tamaño, era barato de producir y difícil de derribar. El Scout tomó y transmitió datos de vigilancia de 360 grados en tiempo real, a través de un conjunto receptor de TV en su torreta central, y tenía numerosos sistemas de infrarrojos. Los Scouts fueron utilizados por primera vez en combate por la Fuerza de Defensa de

Sudáfrica en una operación denominada Protea, en la guerra de Israel contra Angola de 1981 (Zaloga, 2011). Sin embargo, fue su desempeño en la guerra de Israel contra Siria en 1982 lo que llamó la atención de varios países sobre la madurez de los VANT, cuando los drones israelíes derribaron de manera certera a docenas de aeronaves Sirias con una mínima cantidad de pérdidas humanas.

En 1984, las empresas israelíes IAI y Tadiran Ltd formaron una filial conjunta, Mazlat Ltd, para construir un nuevo y mejorado drone: el Pioneer (Figura 3.23). El fuselaje del Pioneer presentaba una doble cola, dos estabilizadores verticales, y una configuración de ala convencional. Su tren de aterrizaje tipo triciclo fijo contenía pequeños neumáticos inflables en las 2 ruedas principales y una de plástico sólido bajo el engranaje de la nariz. El Pioneer estaba construido de materiales ligeros, como fibra de carbono, fibra de vidrio, Kevlar, aluminio y madera de Balsa (UAV universo (b), s.f.).



Figura 3.23 Elementos de la Fuerza Aérea Estadounidense alistan un dron Pioneer durante la Guerra del Golfo en 1991 (Cole, 2014)

Tenía un motor de pistón de 2 tiempos que desarrollaba 26 HP, capacidad de 47 litros de gasolina de 100 octanos y autonomía de 5.5 horas. El Pioneer podía volar en piloto automático, seguir una trayectoria de vuelo preprogramada, o ser controlado desde una estación de control de tierra (Ground Control Station, GCS). Se requería una Unidad de control de seguimiento para mantener un enlace de comunicación y monitorear la posición del dron. El transmisor tenía un alcance de 185 km y era resistente a los bloqueos (jamming). El Pioneer podía cargar hasta 41.4 kg de peso útil en cámaras e instrumentos (UAV universe (b), s.f.).

La tecnología israelí llamó la atención del Departamento de Defensa Estados Unidos, el cual compró varios de los VANT Pioneer, y los utilizó durante la Primera Guerra del Golfo (1990-1991). Más de 300 misiones se llevaron a cabo con este dron en la llamada operación “Tormenta del Desierto”, un plan de ataque de dos fases emprendido por las Naciones Unidas para liberar a Kuwait de la invasión de Irak (Hastings, 2012).

3.2.4 Época actual

Varios autores coinciden en señalar a un dron en particular como iniciador de la era moderna de los VANT, el RQ-1 Predator (renombrado posteriormente como MQ-1), es un dron de larga duración y de altitud media para misiones de vigilancia y reconocimiento. Este VANT fue creado a partir de un diseño del ingeniero Iraquí Abraham Karem, quien emigró a Estados Unidos en los años 70. El diseño base fue el GNAT 750, adquirido por el Pentágono para apoyar a las Fuerzas de la ONU en la ex-Yugoslavia (Cole, 2014).

El Predator tuvo su primer vuelo en junio de 1994 y se desplegó operativamente un año después en apoyo de la campaña aérea de la OTAN contra las fuerzas serbias en Bosnia (DeeGarmo, 2004; Ehrhard, 2010). En 1999, los Predators fueron nuevamente desplegados sobre Kosovo como parte de la 'Operación Fuerza Aliada'. El equipo de reconocimiento a bordo del Predator incluye telemetría, radar de apertura sintética, cámaras de video y una cámara de infrarrojo de barrido frontal (Forward Looking Infra-Red, FLIR), la cual es utilizada para dirigir al dron en la obscuridad y para detectar objetivos por su huella calórica (Ehrhard, 2010).

Además del equipamiento, el dron Predator tenía un enlace avanzado de comunicaciones. La versión anterior, el GNAT 750 tenía un alcance de comunicación por radio de 278 km, lo que requería del uso de un operador en una aeronave intermedia que replicara los datos enviados por el dron a una estación en tierra, que a su vez enviaba la información a un satélite. Sin embargo, el Predator, incorporó un enlace directo satelital tipo Ku-band SATCOM, lo que implica que los operadores del dron no tienen que estar en la misma región (ni siquiera en el mismo continente) (Shaw, 2014).

Dadas sus capacidades, el Predator (Figura 3.24) fue equipado con artillería, como misiles tipo Hellfire, con un alcance de entre 1 y 8 km. El dron participó activamente en los ataques a Afganistán por parte de Estados Unidos realizados como respuesta a los atentados terroristas del 11 de septiembre de 2001 (Cole, 2014). En noviembre de 2002 se llevó a cabo el primer ataque letal con drones Predator en Yemen. Dada la continuación de los conflictos, el uso de drones se hizo intensivo en dicha región. En el año 2007, el Reaper -dron derivado del Predator, pero más grande y letal-, fue puesto en servicio, primero en Afganistán, y luego en Irak (Vanden, 2008).



Figura 3.24 El MQ-1 Predator (Dalamagkidis et al., 2012)

A la par del desarrollo del Predator, la empresa estadounidense Northrop Grumman desarrolló el RQ-4 Global Hawk, VANT de gran resistencia y capacidad de sensores. Creado a petición de la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) en 1995, el Global Hawk puede volar más de 32 horas en altitudes de hasta de 20 km. El VANT está equipado con sensores que pueden ver a través de nubes, niebla densa, neblina y tormentas de polvo (Ehrhard, 2010). Gracias a una velocidad de transmisión de datos decenas de veces más rápida que una línea T1, los operadores pueden obtener imágenes de muy alta resolución. Mientras que Predator es operado remotamente vía satélites a más de 12,000 km, el Global Hawk funciona de manera virtualmente autónoma. Una vez iniciado el despegue, la única interacción entre tierra y el VANT son las instrucciones direccionales vía GPS (Cole, 2014).

Desde el año 2000, varias tecnologías computacionales, sistemas micro-electromecánicos (MEMS) y sensores inerciales se han hecho accesibles debido al uso generalizado en automóviles, teléfonos inteligentes y computadoras. Esto ha favorecido al crecimiento de sistemas híbridos complejos, que combinan componentes eléctricos, digitales, mecánicos y aerodinámicos, como VANT con un alto nivel de autonomía. Esto también ha contribuido a un cambio en la forma estructural de los VANT. Hasta los últimos 10 años, todos los VANT eran de configuración de ala fija. Sin embargo, uno de los últimos objetivos en la investigación del VANT era crear drones con alas rotatorias

que no necesitaran las habilidades especiales de un piloto de helicóptero para volar (Tetrault, 2009).

Con esa intención se crearon VANT como el RQ-8 Fire Scout (Figura 3.25, izquierda) y el Draganflyer X6 (Figura 3.25, derecha). El RQ-8 Fire Scout de Northrop Grumman es un helicóptero diseñado para tareas de reconocimiento, monitoreo, apoyo de artillería aéreo y apoyo para precisión de tiro de las fuerzas terrestres, aéreas y marítimas. El helicóptero miniatura Draganflyer X6 incorpora control por GPS, es capaz de vuelo autónomo, portátil y desplegable en menos de medio minuto, con capacidad de cargar una gran variedad de cámaras HD en un entorno urbano. Es un dron casi silencioso, ya que vuela en la energía eléctrica.



Figura 3.25 VANT de ala rotatoria. A la izquierda el RQ-8 Fire Scout de Northrop Grumman. A la derecha el Draganflyer X6 (b) (Tetrault, 2009).

La reducción de tamaño ha sido un factor importante en la evolución de los VANT hasta sus versiones comerciales de hoy en día. La miniaturización de cámaras, sensores, microcircuitos y fuentes de energía han permitido que diversas empresas construyan versiones más reducidas de VANT, pero para aplicaciones alejadas de lo militar. La reducción no solo ha sido de tamaño, sino también en precio, lo que ha permitido poner al alcance del público en general a los VANT, con todo su potencial. Un ejemplo es el VANT Phantom de la empresa china DJI, puesto a la venta en el año 2013 (Figura 3.26). Este dron puede cargar una cámara deportiva de alta resolución con una autonomía de vuelo de 10 minutos. El VANT incorpora control por GPS, lo que facilita la programación y ejecución de misiones. Otras empresas con propuestas similares son la estadounidense 3DRobotics (www.3dr.com) y la francesa Parrot (www.parrot.com).



Figura 3.26 El Phantom 1 de DJI (“Phantom (UAV)”, s.f.)

Los VANT de hoy en día son pequeños, ligeros y maniobrables, capaces de realizar trabajos arriesgados que pueden ser peligrosos para los pilotos en aviones tripulados, o los operadores. Algunos están diseñados para operar en interiores o en áreas confinadas, túneles, canales y alcantarillas. A medida que la tecnología ha mejorado y se ha vuelto más accesible, los VANT se utilizan ahora en un número cada vez mayor para operaciones civiles.

3.3 Sensores aerotransportados

Los sensores montados en plataformas aéreas como los satélites, aviones o vehículos aéreos no tripulados capturan información de la superficie gracias a la interacción de la radiación (solar o de otra fuente) con los objetos terrestres. En los sistemas electro-ópticos la radiación incide en un detector que genera una señal eléctrica cuyas características dependen de la intensidad de la radiación que recibe. A lo largo de los años se han desarrollado diversos dispositivos enfocados a medir la radiación, a continuación, se describen algunas características de estos dispositivos.

3.3.1 Evolución de los sensores aerotransportados

El tubo fotomultiplicador fue uno de los primeros tipos de sensores utilizados en plataformas aéreas que se utilizaba detectores en la región visible-infrarrojo cercano (VIRC) (Figura 3.27), el mismo consiste en un tubo de vidrio al vacío con un fotocátodo, un ánodo y varios díodos.

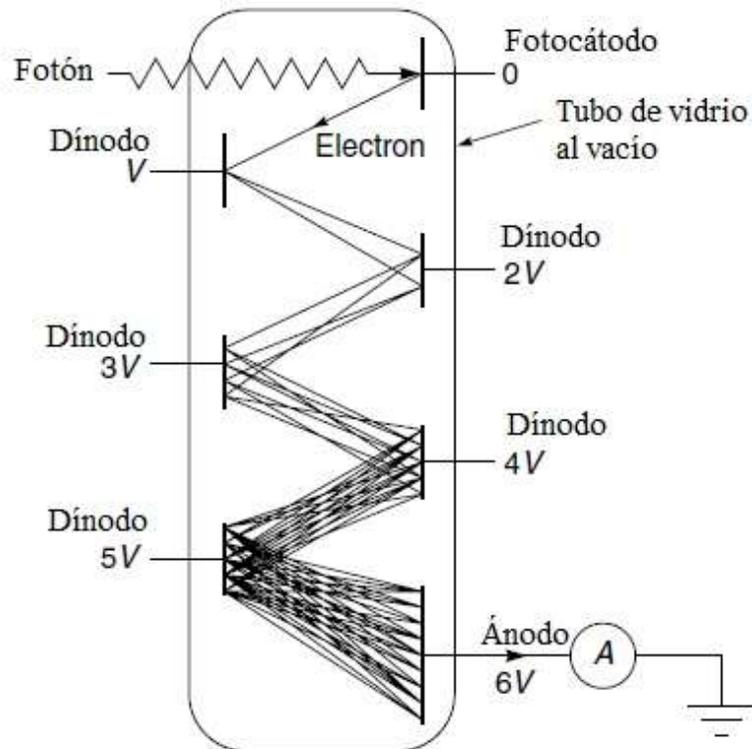


Figura 3.27 Esquema de funcionamiento de un tubo fotomultiplicador (Rees, 2013)

Su funcionamiento se basa en que un fotón incide sobre el fotocátodo, lo cual causa la expulsión de un electrón, que es acelerado hacia un electrodo intermedio (dínodo) con un potencial positivo, generando un incremento de energía cinética que causa la expulsión de electrones del dínodo. Este proceso se repite aumentando el número de electrones en cada dínodo, hasta que el flujo de electrones llega al ánodo, este flujo de energía medible que llega al ánodo depende de la intensidad de la radiación incidente. El fotomultiplicador es un dispositivo muy sensible con un tiempo de respuesta aproximado de 1 ns. Sus desventajas radican en su fragilidad, gran tamaño y en la necesidad de un alto potencial de operación de aproximadamente 1Kv; la máxima longitud de onda que puede detectar está cerca de 0.6 mm.

La creación de una imagen a partir de fotomultiplicadores requiere de grandes matrices de detectores o escáneres, razón por la cual estos sistemas pronto quedaron en desuso. Para resolver este problema, se desarrollaron arreglos o matrices de sensores más eficientes al momento de capturar la energía. Este tipo de sensores son llamados dispositivos de carga acoplada (CCD por sus siglas en inglés: charge-coupled device) que consisten en una matriz lineal de varios cientos de dispositivos idénticos,

generalmente de silicio, sensibles a la luz. Estos sensores están presentes en las cámaras de video, ya que responden muy bien incluso a la luz de la zona roja del espectro, lo que no ocurre con los fotocátodos.

Los CCD son sensibles a longitudes de onda de hasta $1,1 \mu\text{m}$, y se caracterizan porque al manipular los voltajes aplicados las cargas, se mueven de un elemento al siguiente, hasta completar todos los detectores. En cada paso se registra este desplazamiento, de manera que la matriz no necesita ser escaneada para formar una imagen y cada elemento puede recoger información del objetivo por más tiempo, lo cual permite un aumento de la sensibilidad potencial con respecto a otros sistemas (como el escáner). Los CCD pueden convertirse en bidimensionales cuando se forman matrices de 1000×1000 detectores o más, en espacios reducidos (p. e. 1 cm de ancho).

3.3.2 Métodos de adquisición de imágenes

Los detectores CCD de matriz plana pueden generar una imagen de dos dimensiones, para ello es necesario que el detector vea la imagen durante el tiempo suficiente para adquirir y procesar suficientes fotones al mismo tiempo antes de moverse. Si el detector está en movimiento con respecto al objetivo, puede ser necesario compensar este movimiento para evitar un “movimiento borroso” de la imagen. Este modo de operación conocido como obtención de imágenes “paso a paso” (Figura 3.28), significa que el detector enfoca una escena la captura y luego pasa a la siguiente, en cada ciclo se genera una imagen instantánea compuesta de pixeles.

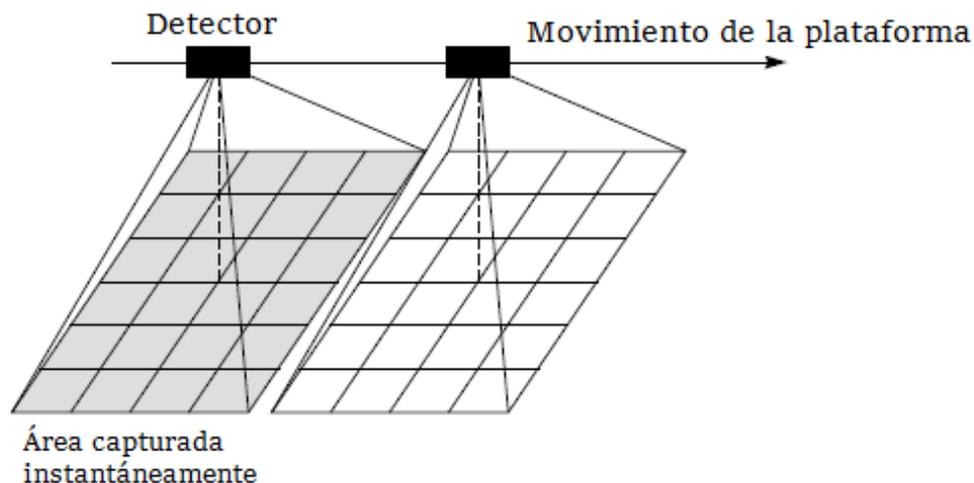


Figura 3.28 Obtención de imagen del tipo “paso a paso” utilizando un detector bidimensional. Los elementos dentro del área de imagen se conocen como pixeles (Rees, 2013)

Por otra parte, si el detector es de una o cero dimensiones como sucede con una matriz lineal o un solo detector, la adquisición de imágenes requiere de un sistema mecánico que mueva la plataforma y por el ende el objetivo para realizar el escaneo. En este caso existen dos tipos de mecanismos que operan en los sensores, el primero donde una hilera de píxeles orientados perpendicularmente a la dirección del movimiento es capturado instantáneamente, y la tira de píxeles adyacentes es adquirida cuando la plataforma se mueve en una distancia igual al tamaño del píxel, este tipo de adquisición de imágenes se denomina de empuje (Figura 3.29) y se usa en los sensores de alta resolución en el visible (HRV) que están montados en algunos satélites como SPOT.

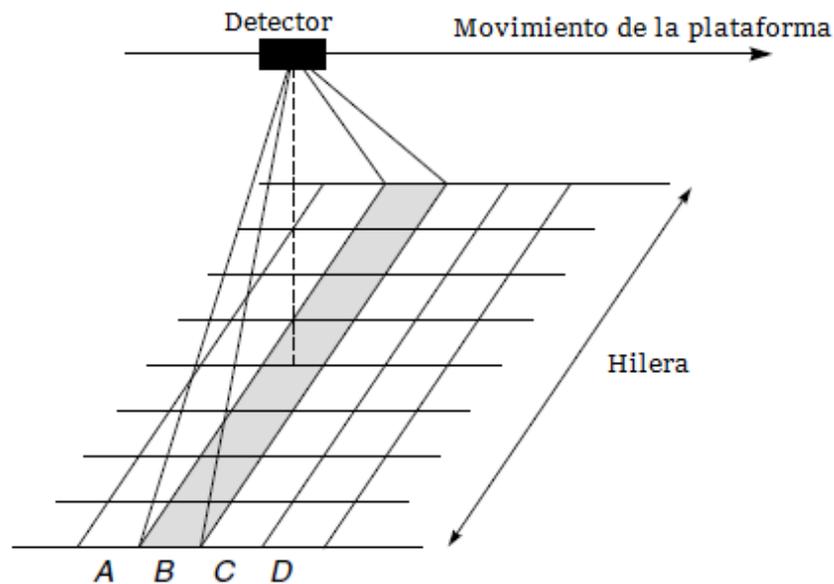


Figura 3.29 Obtención de imagen del tipo “por empuje” con un detector unidimensional, el detector captura la imagen de una hilera de píxeles a la vez, las hilas siguientes se capturan después de que la plataforma se ha movido lo suficiente (Rees, 2013)

El segundo mecanismo se utiliza en el caso de un único detector (cero dimensiones), para subsanar el escaneo en una sola dirección se usa un espejo giratorio u oscilante, que escanea el campo instantáneo de visión (IFOV por sus siglas en inglés: ángulo sólido que se proyecta desde el detector al área terrestre que está midiendo en cada instante) de lado a lado, en una dirección aproximadamente perpendicular al movimiento hacia adelante. Un instrumento que funciona según este principio se denomina habitualmente escáner lineal y opera en modo escáner de barrido (Figura 3.30), es ampliamente usado en dispositivos espaciales y aerotransportados, como por ejemplo los sensores montados en los satélites de la serie Landsat.

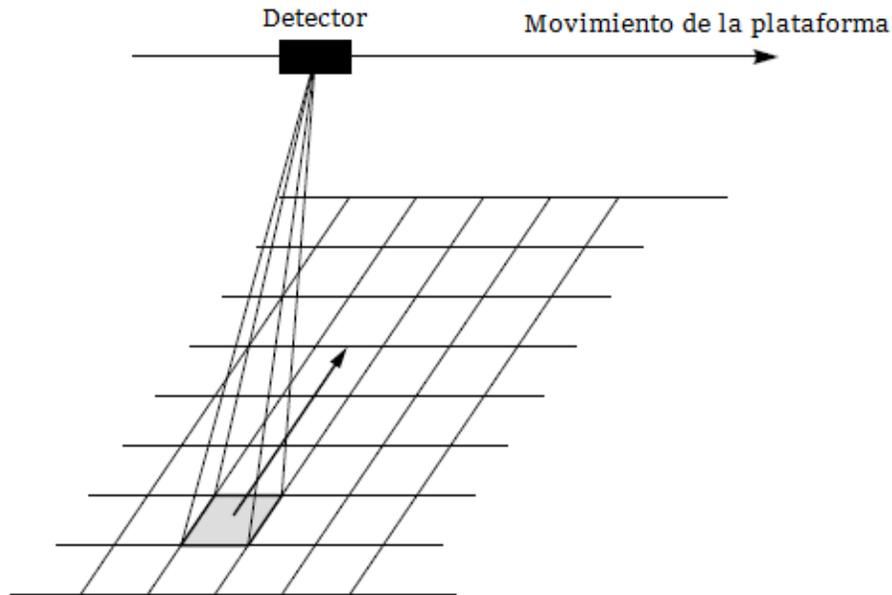


Figura 3.30 Obtención de imagen del tipo “barrido” por un escáner lineal. La imagen se forma por la captura instantánea de cada pixel mediante el movimiento de un espejo oscilador en el sensor hasta completar cada hilera; la siguiente hilera se captura cuando la plataforma se ha movido cierta distancia (Rees, 2013)

Es necesario cuidar que la velocidad del escaneado coincida de lado a lado con la velocidad de la plataforma. Si la primera velocidad es muy lenta o la segunda muy grande, algunas hileras de superficie no serán adquiridas. La relación ideal entre estas velocidades está regida por el ancho Δx del IFOV medido en la dirección del movimiento de la plataforma, esto quiere decir que no debe avanzar a una distancia mayor de Δx durante el tiempo ΔT que toma escanear una línea, en otras palabras, debe cumplirse que $\Delta T \leq \Delta x / v$, donde, v es la velocidad de la plataforma.

Por ejemplo, el sensor Landsat ETM+ tiene una anchura de IFOV efectiva $\Delta x = 30$ m, y una velocidad en tierra equivalente a $v = 6.46 \times 10^3$ m s⁻¹. Al aplicar esta ecuación, el tiempo de exploración debe ser como máximo 4.6 ms, por tanto, el sensor escanea 16 líneas simultáneamente en un tiempo de 71,4 ms, dando un tiempo de exploración efectivo para cada línea de 4,5 ms. Si la plataforma que lleva el sensor no está en movimiento con respecto a la superficie de la Tierra, entonces es necesario realizar escaneo mecánico utilizando un solo detector en dos direcciones, tal como sucede con las imágenes geoestacionarias.

3.3.3 Características de los sensores

En términos de resolución, una imagen capturada por sensores remotos montados en vehículos aéreos tiene las siguientes características:

- Resolución espacial
- Resolución espectral
- Resolución radiométrica
- Resolución temporal.

3.3.3.1 Resolución espacial

La resolución espacial se relaciona con el objeto más pequeño que se puede distinguir en una imagen, que depende de la altura del sensor con respecto a la superficie terrestre, el ángulo de visión, la velocidad de la plataforma móvil y las características ópticas del sensor. El pixel representa el tamaño del objeto más pequeño distinguible, usualmente en metros o centímetros, medido sobre el terreno.

Es importante distinguir que los términos, tamaño de pixel y resolución espacial no son sinónimos, por ejemplo, un sensor puede tener una resolución espacial de 20 metros y una imagen de ese sensor que se muestra en resolución completa tendrá un tamaño de pixel de 20m x 20m en la superficie. En este caso, el tamaño del pixel y la resolución son los mismos, sin embargo, es posible mostrar una imagen con un tamaño de pixel diferente de la resolución.

La resolución angular de un sistema de imagen, está en general limitada por efectos de la difracción que aproximadamente equivale a λ / D , donde λ es la longitud de onda de la radiación detectada y D es el diámetro del objetivo del lente o espejo, en otras palabras, está en función de la primera obstrucción encontrada por la radiación entrante en su paso hacia el sensor.

Suponiendo que la resolución angular es pequeña, la resolución lineal a la superficie de la tierra correspondiente se puede representar por $H\lambda / D$, donde H es la distancia del sensor a la superficie. En otras palabras, al tener el detector un tamaño pequeño y, dado que la señal derivada es una media de la intensidad de la radiación sobre el detector, la resolución espacial no puede ser mayor que la proyección del sensor en la superficie terrestre y por lo tanto está directamente relacionada con el concepto de pixel. Para un sistema óptico simple caracterizado por una distancia focal f y un detector de tamaño a, el tamaño de resolución espacial será Ha/f .

En virtud que la altura, la velocidad de plataforma móvil y tiempo de exploración no pueden modificarse de forma independiente y representa limitaciones operacionales en

los sensores aerotransportados y más aún para las aplicaciones en el espacio exterior donde la relación de v y H es fija. Es importante entonces indicar que, aunque los conceptos de resolución espacial, tamaño de pixel e IFOV son diferentes, en la práctica son de magnitud similar y están relacionados.

3.3.3.2 Resolución espectral

La mayoría de los sensores diseñados para observar la superficie terrestre son capaces de discriminar entre diferentes longitudes de onda de la radiación incidente, de esta manera se pueden distinguir características y detalles de la superficie comparando sus respuestas sobre rangos de longitud de onda distintos. Algunas características pueden reconocerse usando rangos de longitudes de onda amplios debido a la respuesta similar que presentan en el espectro (p. ej. cuerpos de agua), otras en cambio solo podrán reconocerse si el rango de longitud de onda es lo suficientemente estrecho como para no confundirse con otras clases, en estos casos se requieren sensores con mayor resolución espectral.

En este sentido, la resolución espectral describe la capacidad de un sensor para definir intervalos finos de longitud de onda, cuanto más fina sea la resolución espectral, más estrecha será el rango de longitudes de onda que puede detectar. Como ejemplo, considerar la Figura 3.31, la cual muestra dos sensores de diferente resolución espectral, la de arriba de una sola banda que abarca toda la región del visible ($0.4\text{-}0.7\ \mu\text{m}$) y la de abajo, que tiene tres sensores una para cada color (azul, verde, rojo) con un ancho de banda de $0.1\ \mu\text{m}$.

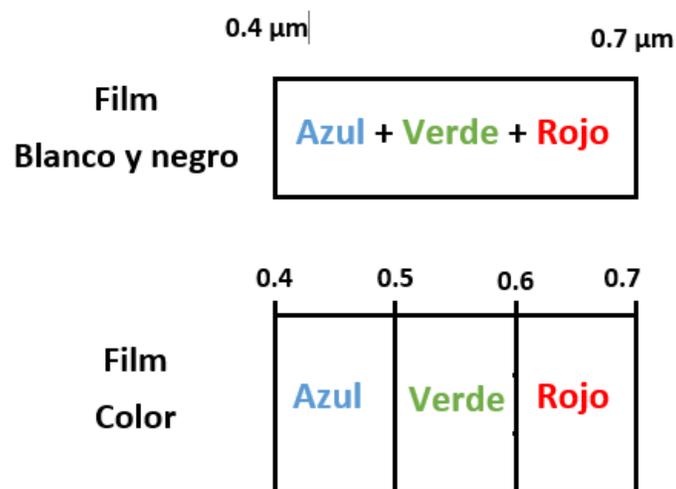


Figura 3.31 Dos sensores de diferente resolución espectral en la región del visible, arriba una banda espectral, abajo tres bandas espectrales una para cada color (CCRS, 2016)

La resolución espectral consiste en el número de bandas que un sensor es capaz de captar y se mide por el número de bandas espectrales o regiones del espectro sobre las cuales se adquieren los datos y varía de unos cuantos hasta cientos; cuando estos instrumentos tienen pocas bandas el ancho del rango espectral es comparativamente grande y oscilan entre 10 a 100 nm, mientras que las resoluciones espectrales más altas (es decir, aquellas con anchos de banda más pequeños), hasta aproximadamente 0.1 nm, se obtienen generalmente usando prismas o lentes de difracción para dispersar el espectro de la radiación entrante sobre una matriz de detectores.

Los sensores con pocas bandas (generalmente de 3 a 10) son llamados multispectrales mientras que aquellos con cientos de bandas se denominan sensores hiperespectrales. Por ejemplo, el satélite LANSAT tiene una resolución espectral de 7, sin embargo los sensores hiperespectrales o también los espectrómetros pueden tener hasta 256 canales con un ancho de banda muy angosto. La Figura 3.32 representa en forma gráfica la diferencia entre la resolución espacial y espectral de un sensor aerotransportado.

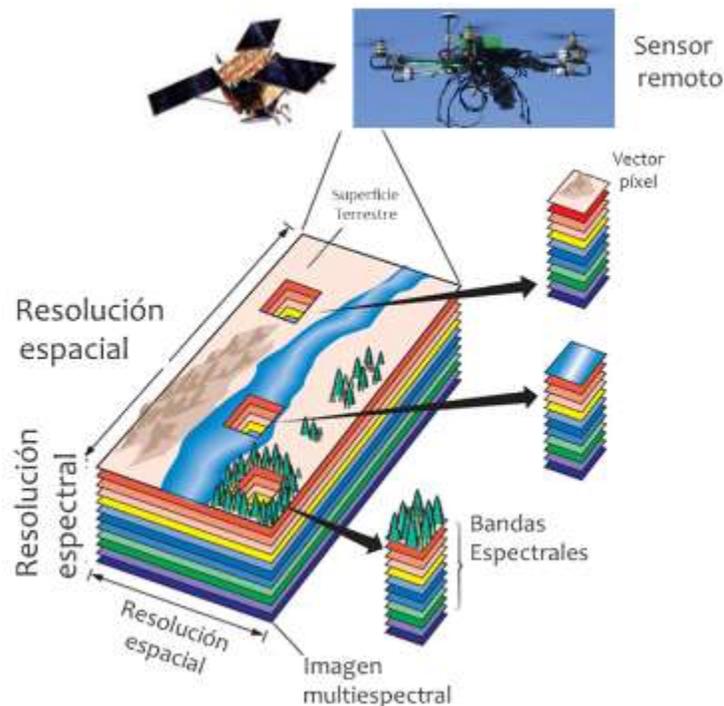


Figura 3.32 Representación gráfica de la resolución espacial y temporal de un sensor aerotransportado (adaptado de Ciznicki *et al.*, 2012)

Existe una diversidad de cámaras multispectrales ligeras para montarse en VANTS. Por ejemplo, la cámara MicaSense RedEdge 3 permite capturar cinco bandas espectrales (Figura 3.33) de interés para estimar el vigor y sanidad de cultivos.

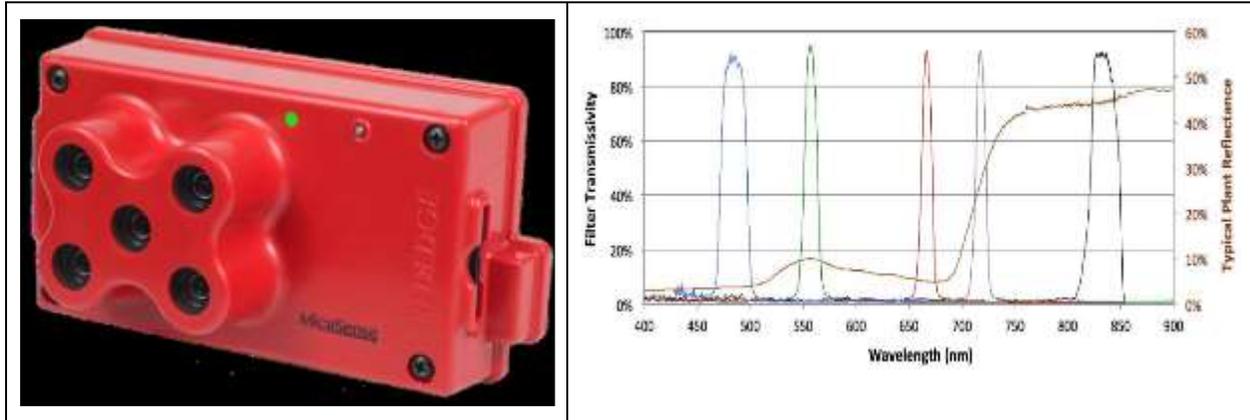


Figura 3.33 cámara MicaSense RedEdge 3 (izq) con cinco filtros de banda y el ancho de banda en función de la longitud de onda (der) (MicaSense, 2015).

3.3.3.3 Resolución radiométrica

Las características radiométricas describen el contenido de la información digital real en una imagen, el término “resolución radiométrica” de una imagen es una medida digital de la sensibilidad del sensor a la magnitud de la energía electromagnética y describe la capacidad de este para discriminar diferencias muy pequeñas de energía recibida. La resolución radiométrica algunas veces se le llama resolución dinámica y se relaciona con la cantidad de niveles en que se puede representar numéricamente la radiación recibida para ser almacenada para su posterior proceso. Los datos capturados por los sensores están representados en las imágenes por números digitales positivos que varían de 0 a $(1-2^n)$ donde n es el número de bits utilizados para codificar números en formato binario.

El número máximo de niveles de brillo o escala de grises disponibles depende del número de bits utilizados para representar la energía registrada. Por lo tanto, si un sensor usa 8 bits para registrar los datos, hay $2^8=256$ valores digitales disponibles, que van de 0 a 255 pero si se usan solo 4 bits (2^4) entonces hay solo 16 valores para representar la variabilidad de la energía que llega al sensor, que van de 0 a 15. Los números digitales se muestran generalmente en un rango de tonos grises, donde el negro representa un 0 y el blanco representa el valor máximo (por ejemplo, 255 en datos de 8 bits). La Figura 3.34 compara dos imágenes: una de 2 bits con otra de 8 bits, se observa una gran diferencia en el nivel de detalle en función de sus resoluciones radiométricas.



Figura 3.34 Comparación de dos imágenes de diferente resolución 2 bits (izquierda) y 8 bits (derecha) (CCRS, 2016)

3.3.3.4 Resolución temporal

La resolución temporal está relacionada con el concepto de intervalo o periodo de revisita y se refiere al tiempo transcurrido entre dos vistas sucesivas del mismo punto sobre la superficie terrestre, por lo tanto es la capacidad de recopilar imágenes de la misma área de la superficie terrestre en diferentes periodos de tiempo. La resolución temporal es uno de los elementos más importantes para la aplicación de teledetección, con sensores montados en plataformas móviles, como los satélites o VANT.

Esta característica depende de una variedad de factores que incluyen la capacidad de energía, tipos de sensores, superposición de fajas de orbitales y la latitud, mientras que en los sensores que van montados en aviones o vehículos aéreos no tripulados esta característica es hasta cierto punto menos rígida y se puede programar en base a algunos criterios como la época del año, hora del día, tipo de VANT, baterías disponibles, acceso al sitio de interés, entre otros. La resolución temporal depende del tipo de vehículo aéreo. Por ejemplo, el satélite SPOT tiene una frecuencia de repetición de 3 a 36 días, mientras que para el caso de un VANT puede ser de algunos minutos, horas o días dependiendo de la aplicación y condiciones locales y tipo de VANT.

3.3.4 Clasificación de los sensores

Los sensores montados en vehículos aéreos pueden ser clasificados según la resolución espacial en cuatro categorías.

3.3.4.1 Imágenes de muy alta resolución

Las imágenes de muy alta resolución (VHR) son aquellas obtenidas por sensores que generan imágenes cuyo tamaño de pixel es de 5 m o menor, en un inicio estas imágenes estuvieron restringidas a uso militar. Sin embargo, desde el lanzamiento de satélite IKONOS en 1999 están disponibles comercialmente. Un ejemplo de este tipo de sensores es la cámara montada en el satélite GeoEye, capaz de capturar un ancho de banda de 15.2 km en dos modos simultáneamente: modo pancromático, con una sola banda en el visible y un tamaño de pixel de 0.41 m; y multiespectral, con cuatro bandas y un tamaño de pixel de 1.65 m. Los detectores son matrices lineales de CCD de silicio en modo “empuje”. El detector pancromático es un solo arreglo lineal de aproximadamente 35,000 elementos cada 8 milímetros cuadrados, mientras que el detector multiespectral consiste en cuatro arreglos lineales de alrededor 10,000 elementos cada 32 milímetros cuadrados, las anchuras de los detectores son de 0.3 m. Los drones tienen la ventaja de obtener altas resoluciones ya que se puede ajustar la altura de vuelo en los drones. Algunas cámaras multiespectrales como los modelos ADC Snap, de la empresa Tetracam tienen capacidad de ser montados en drones, el arreglo de sus detectores es similar a los satélites y son capaces de obtener imágenes de alta resolución espacial. En estas imágenes es de esperar que los volúmenes de datos sean altos lo que implica un incremento en las necesidades de hardware y software para su procesamiento. En el capítulo de ejemplos de sensores y cámaras montadas en drones se describe con mayor detalle algunos modelos de cámaras y sus características.

3.3.4.2 Imágenes de alta resolución

Las imágenes de alta resolución espacial significan tamaños de pixel entre 5 y 50 m, las imágenes ASTER son un ejemplo de este tipo, el cual cuenta con 10 bandas espectrales en la región VIRC, está montado en el satélite Terra lanzado en 1999 y operando desde febrero 2000 con un ancho de banda de 60 km.

3.3.4.3 Imágenes de resolución media

Las imágenes de media resolución (50 a 500 m) son generalmente similares a los instrumentos de alta resolución, pero con anchos de banda más grandes - típicamente

varios cientos de kilómetros-, un ejemplo de este tipo de instrumento es el MSU-50 transportado en el satélite ruso Meteor-M. El satélite fue lanzado en 2009 y tiene una altura orbital de 830 km con tres bandas espectrales.

3.3.4.4 Imágenes de baja resolución

Las cámaras de baja resolución tienen resoluciones espaciales más gruesas que 500 m, ésta desventaja es compensada por el gran ancho de la imagen y la posibilidad de obtener datos a escalas continentales u oceánicas. Un ejemplo es el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) a bordo del satélite Terra desde 1999 y el satélite Aqua desde 2002. Ambos orbitan la Tierra a una altura de 705 km; MODIS tiene 19 bandas espectrales en la región VNIR (y otras 17 en el TIR).

3.3.5 Tipos de sensores

3.3.5.1 Cámaras fotográficas aéreas

Las cámaras fotográficas y su uso para la fotografía aérea son los más antiguos sensores utilizados para la detección remota de la superficie terrestre, como se explicó en el capítulo 1 estos sistemas son sensores ópticos pasivos que utilizan una lente (o sistema de lentes denominados colectivamente óptica) para adquirir una "instantánea" de un área de la superficie y elaboran una imagen en un plano focal donde se encuentran los detectores o la película fotográfica. Las cámaras fotográficas por lo general tienen detectores que son sensibles a la luz en el rango de 0.3 μm a 0.9 μm en longitud de onda, es decir, cubren los rayos ultravioletas (UV), visible e infrarrojo cercano (IRC).

i. Películas pancromáticas

Las películas pancromáticas son sensibles a los UV y a las partes visibles del espectro por lo que producen imágenes en blanco y negro y es el tipo más común de película utilizada para la fotografía aérea. La fotografía UV también emplea una película pancromática, pero se usa un filtro con la cámara para absorber y bloquear la energía visible que llega a la película, como resultado, solo se registra la reflectancia UV de los objetivos. La fotografía UV no es muy utilizada, debido a la dispersión atmosférica y la absorción que se produce en esta región del espectro.

ii. Fotografía infrarroja

La fotografía infrarroja en blanco y negro utiliza una película sensible a toda la gama de longitudes de onda de 0.3 a 0.9 μm y es útil para detectar diferencias en la cobertura vegetal, debido a su sensibilidad a la reflectancia en la región del infrarrojo. El color y el

falso color de la fotografía implican el uso de una película de tres capas, cada una sensible a diversos rangos de luz. Para una fotografía en color normal, las capas son sensibles a la luz azul, verde y roja, de manera similar a lo que ocurre en nuestros ojos.

Las cámaras fotográficas se pueden utilizar en una variedad de plataformas, pueden ser montadas en helicópteros, aviones, naves espaciales y actualmente en drones o vehículos aéreos no tripulados. Las fotografías muy detalladas tomadas de los drones son útiles en aplicaciones en las que se requiere la identificación de partes u objetivos pequeños. La cobertura o superficie cubierta del suelo por una foto depende de varios factores, incluyendo la distancia focal de la lente, la altura de la plataforma y el formato y tamaño de la película. La distancia focal controla efectivamente el campo de visión angular de la lente y determina el área "vista" por la cámara. Las longitudes focales típicas utilizadas son 90 mm, 210 mm, y más comúnmente 152 mm. Cuanto mayor sea la longitud focal, será menor el área cubierta en el suelo, pero contará con mayor detalle (es decir, mayor escala).

El área cubierta también depende de la altitud de la plataforma. A gran altura, una cámara "capturará" un área más grande en el suelo que en altitudes más bajas, pero con detalles reducidos (es decir, escala más pequeña). Las fotografías aéreas pueden proporcionar detalles finos, con resoluciones espaciales de menos de 50 cm. La resolución espacial exacta de una foto varía con una función compleja de muchos factores que varían con cada adquisición de datos.



Figura 3.35 Fotografía vertical y oblicua tomada por un dron desde las instalaciones del IMTA

Las fotografías aéreas se clasifican como oblicuas o verticales, dependiendo de la orientación de la cámara respecto al suelo durante la adquisición (ver Figura 3.35). Las fotografías aéreas oblicuas se toman con la cámara apuntando al lado de la aeronave. Las fotografías oblicuas altas normalmente incluyen el horizonte, mientras que las fotografías oblicuas bajas no. Las fotografías oblicuas pueden ser útiles para cubrir áreas

muy grandes en una sola imagen y para representar el relieve del terreno y la escala. Sin embargo, no se usan ampliamente para la cartografía ya que las distorsiones de escala desde el primer plano al fondo impiden mediciones de distancia, área y elevación.

Las fotografías verticales, tomadas con una cámara de un solo sensor, son la aplicación más común de la fotografía aérea para la teledetección y la cartografía. Estas cámaras están específicamente diseñadas para capturar una secuencia rápida de fotografías, al tiempo que limitan la distorsión geométrica. A menudo están vinculadas con sistemas de navegación a bordo de la plataforma lo que permite obtener las coordenadas geográficas exactas instantáneamente a cada fotografía. La mayoría de los sistemas de cámaras también incluyen mecanismos que compensan el efecto del movimiento de la aeronave con respecto al suelo, con el fin de limitar la distorsión tanto como sea posible.

En las plataformas aéreas como aviones o drones normalmente vuelan en una serie de trayectorias lineales, cada una llamada línea de vuelo. Las fotos son tomadas en una rápida sucesión mirando hacia abajo en el suelo, a menudo con un 50-60 % de superposición o traslape entre las fotos sucesivas, en terrenos muy escarpados o accidentados es necesario mayor traslape y cuando el tamaño del sensor es muy pequeño se requiere por lo menos un 85 % de traslape entre fotografías, la superposición asegura una cobertura total lo largo de una línea de vuelo y también facilita la visión estereoscópica que posteriormente derivará en la obtención de ortomosaicos y los modelos digitales de terreno.

Las fotografías aéreas son más útiles cuando los detalles espaciales finos son más críticos que la información espectral, ya que su resolución espectral es generalmente gruesa en comparación con los datos capturados con dispositivos electrónicos de detección. La geometría de las fotografías verticales está bien entendida y tiene aplicaciones en geología, silvicultura, catastro, etc. (ver algunas aplicaciones en el Capítulo 2 Sección 2.2.3). Como se ha mencionado en el Capítulo 2, Sección 2.3, la ciencia de la toma de medidas de las fotografías se llama fotogrametría y se ha realizado extensamente desde los mismos orígenes de la fotografía aérea, en sus inicios estas mediciones eran interpretadas manualmente por un analista humano, hoy en día con el avance de la computación, informática, visión por computadora y algoritmos avanzados de reconocimiento de patrones es posible realizarlo de manera digital y actualmente son insumo básico para la generación de modelos digitales del entorno.

3.3.5.2 Sensores multiespectrales

La fotografía multibanda utiliza sistemas multi-lente con diferentes combinaciones de filtro de película para adquirir fotos simultáneamente en una serie de rangos espectrales diferentes (Figura 3.36). La ventaja de estos tipos de cámaras es su capacidad para registrar la energía reflejada separadamente en intervalos de longitud de onda discretos,

proporcionando así una separación potencialmente mejor e identificación de diversas características. Sin embargo, el análisis simultáneo de estas múltiples fotografías puede ser complejo. Las cámaras digitales, que registran la radiación electromagnética electrónicamente, utilizan CCD. La energía que llega a la superficie de los CCD provoca la generación de una carga electrónica que es proporcional en magnitud al "brillo" de la superficie del suelo. Un número digital para cada banda espectral se asigna a cada pixel en base a la magnitud de la carga electrónica. El formato digital de la imagen de salida es susceptible de análisis y archivo digital en un entorno informático, así como de salida como un producto impreso similar a las fotos normales.



Figura 3.36 Ortomosaico de las instalaciones del IMTA obtenido de una serie de imágenes espectrales

Las cámaras digitales también ofrecen un retorno más rápido para la adquisición y recuperación de datos y permiten un mayor control de la resolución espectral. Aunque los parámetros varían, los sistemas de imagen digital son capaces de recopilar datos con una resolución espacial de 0.3 m, y con una resolución espectral de 0.012 mm a 0.3 mm. El tamaño de las matrices de pixeles varía entre 512 x 512 a 2048 x 2048.

3.3.5.3 Sensores infrarrojo térmico (TIR)

Muchas cámaras multispectrales detectan la radiación en la región del infrarrojo térmico, estos sensores térmicos utilizan detectores fotográficos sensibles al contacto directo de los fotones en su superficie para detectar la radiación térmica emitida en esta

región. Los detectores se refrigeran a temperaturas cercanas al cero absoluto para limitar sus propias emisiones térmicas, estos detectores se pueden dividir en dos clases: detectores cuánticos y detectores térmicos, en un detector cuántico, un fotón interactúa directamente con el material detector para cambiar la energía de un electrón, lo cual se detecta como resultado de un cambio en las propiedades eléctricas del material que surge de un cambio en su temperatura.

La región TIR del espectro electromagnético ocupa el rango de longitud de onda entre aproximadamente 3 y 15 μm . Por tanto, la energía de un fotón TIR es de aproximadamente 0.1-0.4 eV, significativamente menor que la radiación VNIR, lo cual impone cierta dificultad para realizar fotodiodos adecuados (detectores cuánticos). Los fotodiodos de germanio responden a longitudes de onda de hasta 1.7 mm, los de sulfuro de plomo (PbS) hasta aproximadamente 3 mm y los de antimonio de indio (InSb) a aproximadamente 5 mm. Dos semiconductores comunes para la detección de TIR son el telururo de cadmio mercurio ($\text{Hg}_{0.2}\text{Cd}_{0.8}\text{Te}$) y germanio dopado con mercurio que responden a longitudes de onda de hasta 15 mm. Normalmente es necesario enfriar un detector cuántico de radiación TIR para lo cual se utiliza nitrógeno líquido o helio líquido. Los detectores térmicos proporcionan una gama espectral muy amplia, pero a expensas de una sensibilidad mucho menor y tiempos de respuesta más largos.

Los detectores térmicos se clasifican en tres tipos: 1) bolómetro de termistor, que consiste en un material (carbón, germanio o mezcla de óxidos de metal) cuya resistencia varía con la temperatura; 2) termopares, en el que se genera una diferencia de potencial a través de un par de uniones entre metales disímiles cuando las uniones se mantienen a diferentes temperaturas, se conectan en serie como una termopila y; 3) un sensor piroeléctrico, que es un cristal que sufre una redistribución de sus cargas internas como resultado de un cambio de temperatura; la separación de carga se produce en las superficies del cristal, dando lugar a una diferencia de potencial que puede amplificarse y detectarse.

Los sensores térmicos miden esencialmente la temperatura superficial y las propiedades térmicas de los objetivos, es así que las imágenes térmicas son típicamente escáneres que operan en modo cruzado, por lo que detectan radiación emitida solo en la parte térmica del espectro electromagnético. Los sensores térmicos emplean una o más referencias de temperatura interna para la comparación con la radiación detectada y relacionarla con la temperatura radiante absoluta. Los datos se graban generalmente sobre película o cinta magnética, y la resolución de temperatura de los sensores de corriente puede alcanzar 0.1°C.

Para el análisis, una imagen de temperaturas radiales relativas (un termograma) se representa en niveles de grises, con temperaturas más calientes mostradas en tonos claros, y temperaturas más frías en tonos oscuros. Las imágenes que representan diferencias de temperatura relativas en sus ubicaciones espaciales relativas son

suficientes para la mayoría de las aplicaciones. Las mediciones de temperatura absoluta pueden ser calculadas, pero requieren calibración y medición precisas de las referencias de temperatura y conocimiento detallado de las propiedades térmicas del objetivo, distorsiones geométricas y efectos radiométricos. Los sensores térmicos generalmente tienen IFOVs grandes para asegurar que la suficiente energía llega al detector para hacer una medición fiable. Por lo tanto, la resolución espacial de los sensores térmicos suele ser bastante gruesa, en relación con la resolución espacial posible en el infrarrojo y visible.

Las imágenes térmicas se pueden adquirir durante el día o la noche (porque la radiación se emite, no se refleja) y se utiliza para una variedad de aplicaciones como reconocimiento militar, manejo de desastres (cartografía de incendios forestales) y monitoreo de pérdidas de calor.

3.3.5.4 Otros sensores

A continuación se proporcionan algunas características de otro tipo de sensores aerotransportados:

i. Video

Aunque son más toscas en la resolución espacial que la fotografía tradicional o la imagen digital, las cámaras de video proporcionan un medio útil para adquirir datos oportunos y económicos e imágenes si se sacan instantáneas del video. Las aplicaciones con estos requisitos son: manejo de desastres naturales (incendios, inundaciones), evaluación de cultivos y enfermedades, control de riesgos ambientales, vigilancia e inspección de infraestructura civil. Las cámaras usadas para la grabación de video miden la radiación en las porciones visible, infrarrojo cercano y a veces medio. Los datos de imagen se graban en un disco y se pueden ver en tiempo real o después de descargar los archivos en una memoria para su posterior edición y visualización.

ii. RADAR

RADAR (RADio Detection And Ranging) es un sensor activo que cuenta con su propia fuente de energía electromagnética. Los sensores de radar activos, ya sean aéreos o espaciales, emiten radiación de microondas en una serie de impulsos desde una antena, mirando oblicuamente a la superficie perpendicular a la dirección del movimiento. Cuando la energía alcanza el objetivo, parte de la energía se refleja hacia el sensor. Esta radiación de microondas retro-dispersada se detecta, mide y cronometra. El tiempo requerido para que la energía viaje al objetivo y regrese de nuevo al sensor determina la distancia o alcance al objetivo. Al registrar el rango y magnitud de la energía reflejada de todos los objetivos a medida que pasa el sistema, se puede producir una imagen bidimensional de la superficie.

Debido a que un sensor RADAR tiene su propia fuente de energía, las imágenes pueden adquirirse tanto en el día como en la noche. Además, la energía de microondas es capaz de penetrar a través de las nubes y la mayoría de la lluvia, por lo que es un sensor para todo tiempo (all weather).

iii. LiDAR (Light Detection And Ranging)

El LiDAR es una tecnología de obtención de datos a partir de un sensor activo muy similar a la tecnología de RADAR. Se emiten impulsos de luz láser desde el sensor y se detecta energía reflejada desde un objetivo. El tiempo necesario para que la energía alcance el objetivo y regrese al sensor determina la distancia entre los dos objetos y por lo tanto es posible reconstruir el terreno a partir de esas distancias. El sensor LiDAR se utiliza eficazmente para medir alturas de características, como altura de la copa del bosque relativa a la superficie del suelo y profundidad del agua con respecto a la superficie del agua (perfilómetro láser). LiDAR también se usa en estudios atmosféricos para examinar el contenido de partículas de varias capas de la atmósfera terrestre y adquirir lecturas de densidad de aire y monitorear las corrientes de aire.

3.3.5.5 Aplicaciones de imágenes VIRC

Las imágenes en el rango del visible e infrarrojo cercano tienen numerosas aplicaciones, debido a la facilidad con la que puede interpretarse pues el intervalo de longitud de onda corresponde en gran medida al rango de sensibilidad del ojo humano y también a que varios procesos importantes ocurren en este intervalo de longitudes de onda.

El conjunto de aplicaciones más grande corresponde al mapeo de la superficie terrestre, por ejemplo, para cartografía, delimitación y clasificación de cuerpos de agua, zonificación de áreas costeras, agrícolas y urbanas, aplicaciones en redes de carreteras, arqueología, caracterización geológica y geomorfológica, entre otras. Las características geométricas de las imágenes terrestres pueden utilizarse para obtener datos topográficos y, en consecuencia, generar modelos de elevación digital.

Se puede monitorear el desarrollo de la biomasa de la vegetación sobre el suelo (la materia orgánica total por unidad de superficie de la superficie de la Tierra), lo cual permite observar cambios en la extensión y salud de la vegetación. Otras aplicaciones permiten estimar el rendimiento de cultivos y la silvicultura, predicción del fracaso de los cultivos y la sequía y el monitoreo de los impactos de la contaminación y el cambio climático (Cohen y Goward 2004). La escala de un mapeo de esas características dependerá de la resolución espacial de la imagen y en cierta manera de la altura de vuelo.

Otra aplicación de las imágenes VIRC es la generación de mapas de uso de suelo gracias a la capacidad de poder distinguir un tipo de cubierta terrestre de otro en función de sus características espectrales. En algunos casos, los espectros de reflectancia de la

vegetación, los cuerpos de agua y la nieve, son suficientemente característicos para realizar una delimitación con una mínima información auxiliar. Por ejemplo, un pixel que muestra baja reflectancia en la parte visible del espectro, especialmente para la luz roja, y una alta reflectancia en la región del infrarrojo cercano, es casi seguro que contiene una alta proporción de vegetación de hoja verde. De forma similar, un pixel que muestra una alta reflectancia a través de la región VIRC es probable que represente una nube ópticamente gruesa, mientras que una alta reflectancia en la región visible acoplada con una baja reflectancia alrededor de $1.5 \mu\text{m}$ es probable que represente una cubierta de nieve. En la mayoría de los casos, sin embargo, la asociación de un tipo de cubierta de superficie particular con las propiedades de un pixel es más difícil.

Los cuerpos de agua también son estudiados usando imágenes VIRC. La profundidad se estima comparando la reflectancia en dos o más bandas espectrales (Gao 2009). Este método se basa en la variación de las longitudes de onda. Las bandas espectrales más útiles son el verde y el infrarrojo cercano, ya que estas proporcionan mayor diferencia en el coeficiente de atenuación. Las mediciones del color del océano (McClain 2009) o de la reflectancia oceánica en una serie de bandas espectrales, pueden utilizarse para identificar diferentes cuerpos de agua, por ejemplo, distinguir las aguas costeras de aguas profundas. Las concentraciones de fitoplancton marino pueden estimarse por el aumento de la reflectancia, causada por la presencia de clorofila, en la banda de 0.4-0.5 mm.

3.3.5.6 Aplicaciones principales de imágenes infrarrojas térmicas

Una imagen TIR calibrada indica la temperatura de brillo de la radiación que llega al sensor y tres factores contribuyen a esta temperatura de brillo: la temperatura física de la superficie que se está percibiendo, su emisividad y los efectos de propagación atmosférica. En la mayoría de los casos, las imágenes TIR se utilizan para deducir la temperatura de la superficie y en términos generales, podemos clasificar sus aplicaciones según la fuente de calor sea artificial o cuando el calentamiento ocurre naturalmente. En el primer caso, sensores montados en drones u otros vehículos aéreos permiten determinar pérdidas de calor de edificios y otras estructuras. La técnica también se ha utilizado, por ejemplo, para monitorear columnas de vapor generado por centrales eléctricas.

En el caso de fuentes de calor producidas naturalmente, las principales aplicaciones de las imágenes TIR son la identificación de las nubes y la medición de las temperaturas superficiales y la inercia térmica. Otras aplicaciones incluyen la medición de la humedad del suelo y el estrés hídrico, etc. Las imágenes infrarrojas térmicas también pueden usarse para detectar incendios y estimar la potencia irradiada por ellos (Wooster *et al.* 2003).

Operación y pilotaje de drones

4

Capítulo 4

OPERACIÓN Y PILOTAJE DE DRONES

Alberto González Sánchez y Jorge Flores Velázquez

4.1 Introducción

El uso del VANT como una herramienta profesional de trabajo, implica tener conocimiento y práctica para ejecutar de manera correcta cada una de las siguientes etapas:

- a. Planificar la misión de vuelo. Realizar la selección del VANT acorde con las necesidades de la misión, verificar las condiciones del terreno, la movilidad dentro del área de interés y determinar las formas de traslado a la misma. También implica verificar y ajustar los equipos y componentes del VANT antes de salir a campo, lo que hace necesario el conocimiento de los requerimientos óptimos de operación del dron.
- b. Diseño de la misión. Implica el dominio del software para la programación y ejecución de las misiones de vuelo, el cual usualmente permite revisar algunas de las condiciones del terreno de forma remota (como las alturas de los objetos y la orografía en general), así como estimar la duración de los vuelos, entre otras ventajas. La programación de la misión también implica establecer los parámetros para la adquisición de fotografías u activación de otros dispositivos periféricos.
- c. Ejecución de la misión de vuelo en campo. Involucra, por ejemplo, el reconocimiento de las condiciones de la zona de estudio y de las condiciones meteorológicas adecuadas para el vuelo, seleccionar correctamente el área de despegue y las posibles áreas de aterrizaje. Enviar la misión de vuelo al VANT y ordenar su ejecución. Esta implícita en esta etapa la operación “manual” del VANT, la cual abarca el dominio del mando a distancia para la ejecución correcta y segura de las operaciones de despegue, desplazamiento aéreo y aterrizaje.

En este capítulo se busca concientizar al equipo técnico de la importancia de seguir la lista de verificación necesaria para ejecutar cada una de las etapas antes mencionadas. A continuación, se describe de manera detallada los procedimientos relacionados con la operación del VANT, empezando con la planeación de misiones de vuelo.

4.2 Planeación de la misión de vuelo

La planeación del vuelo es la parte más importante de un proyecto que involucra el uso de un VANT, ya sea para topografía o únicamente para vuelos de exploración del terreno. En este proceso se estiman los costos materiales y de tiempo requeridos para cumplir con los objetivos del vuelo.

Este proceso se realiza en las oficinas centrales. Primero, se determinan los objetivos de los vuelos, definiendo el tipo de información requerida: imágenes para topografía, videos e imágenes de exploración de la zona de estudio.

En este punto, el personal encargado de diseñar la misión de vuelo puede recurrir al software Google Earth® para realizar una inspección visual del área de interés, obteniendo una aproximación del área a cubrir y de las condiciones del terreno. La extensión del terreno y el tipo de VANT disponible son parámetros de peso en la determinación del número de vuelos requeridos.

En el caso de que la misión sea la obtención de producto de fotogrametría, como un ortomosaico o un modelo de elevación (ver Capítulo 2, Sección 2.2.3), el número de vuelos lo indica el software utilizado para la elaboración de misiones, ya que el área que se puede cubrir con cada vuelo depende de las características de los sensores (cámaras) a utilizar, la duración de la batería, el porcentaje de traslape entre fotografías y la velocidad y altura del vuelo. La Sección 4.3.4 proporciona más información acerca del uso del software para el diseño de misiones de vuelo.

Los objetivos del vuelo también influyen en la cantidad de vuelos a emprender. Por ejemplo, para imágenes de exploración del terreno se requiere una menor cantidad de vuelos, ya que las imágenes pueden ser oblicuas. En el caso de videos, los vuelos son menores ya que la vista es oblicua y no necesariamente horizontal.

El siguiente paso es obtener los datos meteorológicos de la región de estudio. Con esta información, se definen las fechas y horarios probables para realizar los vuelos, ya que las condiciones desfavorables pueden afectar la operatividad y degradar el alcance y la precisión esperada de la misión. En general, el vuelo no debe realizarse cuando exista niebla, nieve, humo, polvo, zonas inundadas o factores medio ambientales que dificulten o degraden la precisión del sensor. Mucho menos, en casos de alta probabilidad de lluvia, a menos que se cuente con el VANT adecuado para lidiar con esta condición climatológica.

Una vez estimada la cantidad y duración de los vuelos, se contabilizan los recursos necesarios para las misiones. Lo primero implica seleccionar el tipo de VANT a utilizar, lo cual se explica en la Sección 4.2.1. Si la tarea a ejecutar con el VANT implica la adquisición de imágenes o video, el operador también debe decidir qué tipo de cámara a utilizar. La Sección 4.2.4 describe el proceso de selección de la cámara. La toma de

fotografías o video también puede requerir un equipamiento adicional, como monturas (cardanes) que permitan mayor libertad angular para la adquisición de las imágenes. El equipamiento se explica en la Sección 4.2.6.

Por otro lado, existe equipo que de facto se utiliza para la ejecución de misiones en el VANT, como la computadora. Su uso se describe en la Sección 4.2.5.

4.2.1 Selección del VANT

Dependiendo del tamaño del área de estudio será el tipo de VANT a utilizar. Por ejemplo, si se trata de un área mayor a 100 ha, será más conveniente utilizar un dron de ala fija. Si el área es menor, como, por ejemplo, alrededor de 50 has, es conveniente utilizar un dron multirrotor. El objetivo del vuelo también es muy importante, ya que los drones de ala no pueden permanecer estáticos en un punto, o hacer desplazamientos verticales, como lo realizan los drones multirrotor. Estos tipos de VANT son los más comunes hoy en día (Figura 4.1).



Figura 4.1 Los tipos de VANT más comunes. Ala fija (izquierda) y multirrotor (derecha)

Cualquiera que sea la selección del tipo de VANT (multirrotor o ala fija), es necesario tomar en cuenta sus limitaciones. Es importante conocer las velocidades máximas de ascenso y descenso, junto con la velocidad horizontal, alturas mínima y máxima en la que opera el VANT de forma eficiente. Otro punto importante es tomar en cuenta las temperaturas adecuadas que el dron puede operar (Dronografía, 2015).

Después de elegir el tipo de VANT, y en base a sus características, se estima el número de vuelos necesarios para cubrir el área de estudio. Con este dato se determina el tiempo requerido para realizar todos los vuelos, lo que a su vez indica la cantidad de baterías y equipo (como tarjetas de memoria) requeridos en total. Normalmente, el operador se auxilia durante este proceso de un software para el diseño de misiones de vuelo, el cual

incluye en sus bases de datos las características de una amplia variedad de VANT, realizando los cálculos, en base a un recorrido teórico proyectado del dron, sobre un mapa digital. El uso de estos programas es comentado en la Sección 4.3.4. La siguiente sección trata el tema de las baterías para la etapa de planeación, pero el proceso de carga y balanceo de las mismas se aborda con detalle en la Sección 4.4.

4.2.2 Revisión remota de las condiciones climatológicas

Siempre que se planifiquen misiones de vuelo será necesario considerar el clima en los días que se realizarán los vuelos, ya que así se reduce el riesgo de pérdida de tiempo por condiciones adversas, en un caso extremo, también se evita la pérdida de la aeronave, pues ciertos fenómenos climatológicos pueden intervenir con las señales de radio y con la brújula, como las llamaradas solares. Se debe considerar en primer lugar la nubosidad, ya que se busca que exista claridad suficiente para obtener fotografías y videos con buena calidad.

A menos que se tenga un VANT equipado y robusto, no se debe volar en condiciones de lluvia. Por otro lado, la temperatura también es un factor importante, pues el calor extremo podría estar fuera de los rangos óptimos de temperatura de operación recomendados por el fabricante, afectando el desempeño del VANT. Muchos VANT carecen de resistencia a las malas condiciones climatológicas y su rendimiento puede verse mermado hasta tal punto de dar lugar a un incidente. Al tomar en cuenta estas variables, y estando aun en la oficina se procede a la generación de la misión de vuelo.

Existen distintos sitios en internet que ofrecen el pronóstico del clima de forma gratuita, comenzando por el sitio oficial del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que puede ser consultado en smn.cna.gob.mx. Otras alternativas son ww.weather.com/es-MX y www.meteored.mx. La capacidad de revisión de las condiciones climatológicas está sujeta a la disponibilidad de dicha información. Si la misión se está realizando con muchos días de anticipación, es posible que la estimación del clima no esté disponible. De cualquier manera, se tiene que hacer una revisión más cercana a la fecha de partida a la misión de vuelo, y también, una más en el momento de emprender el vuelo. Esto se comenta con mayor detalle en la Sección 4.5.3.

4.2.3 Las baterías

El tiempo de duración máxima del vuelo está directamente relacionado con la capacidad de las baterías. El tiempo, junto los parámetros de vuelo -como altura y velocidad-, determinan el área de cobertura, por lo que se considera a las baterías la primera limitante para establecer el área de máxima que puede cubrir el VANT. Esto lleva a

considerar que el número de baterías disponibles es de crucial importancia, así como su tiempo de recarga.

El consumo de energía de las baterías está directamente relacionado con el tipo de VANT. Un dron tipo hexacóptero (de seis hélices) consume más energía que un cuadricóptero (cuatro hélices), por la diferencia del número de motores. Por otro lado, también existen baterías de diferentes capacidades para un mismo dron. Por ejemplo, se pueden encontrar baterías tipo LIPO de 6750 mAh, 8000 mAh y 10,000 mAh para un VANT tipo hexacóptero. Aunque no hay una relación lineal entre el tiempo de duración del vuelo y la capacidad de las baterías, una batería de mayor capacidad normalmente proporcionará mayor tiempo de vuelo.

Conociendo el número de vuelos, se estima el número de baterías necesarias para todas las misiones. En caso de no contar con suficientes baterías, se suma, al tiempo requerido para cubrir el área de estudio, el tiempo que se requiere para cargar nuevamente las baterías (por ejemplo, para una batería tipo LIPO de 8000 mAh, se requiere alrededor de una hora de carga). En la mayoría de los casos la zona de estudio está alejada de las zonas con electricidad, por lo que se debe tomar en cuenta el tiempo de traslado para llegar al sitio de carga de las baterías. Paralelo a la duración de las baterías de los VANT es necesario verificar y cargar las baterías que utilizan los equipos complementarios como la controladora, la montura, las cámaras y la computadora donde se procesa el vuelo.

Antes de un vuelo, se debe comprobar que la batería del VANT y sus componentes estén completamente cargadas y listas para volar. Se debe verificar cualquier indicio de daño en las baterías para evitar su mal funcionamiento (Dronografía, 2015). Estos temas son abordados con detalle en la Sección 4.4 de este libro.

Generalmente las controladoras y el software de control de la misión de vuelo contienen un contador de energía que permite ver en todo momento el nivel de la batería del dron. Además, en las baterías se agregan unas alarmas acústicas que indican, mediante un sonido agudo, cuando la batería está próxima agotarse.

Al final, la duración plena en vuelo de la batería dependerá de diferentes aspectos, comenzando por la capacidad de la batería, y siguiendo con la altitud y velocidad de vuelo, así como las condiciones climáticas presentes, como la intensidad del viento (Dronografía, 2015).

4.2.4 Tipo de cámara

El tipo de cámaras se elegirá de acuerdo con la información que se desea obtener en los vuelos. De acuerdo con el objetivo de los vuelos se definirá el tipo de cámara y la

cantidad a utilizar en campo (Figura 4.2). También se define el modo de uso de las mismas. El tipo de cámaras se describe con mayor detalle en la Sección 1.2.

Para el análisis del crecimiento del cultivo se utiliza una cámara multispectral, el cual contiene 3 bandas, verde, rojo e infrarrojo cercano (Figura 4.3).

Para topografía se puede utilizar una cámara visible, siempre y cuando cubra una gran superficie y tenga buena resolución. Por ejemplo, la Figura 4.4 muestra una cámara Sony con 26 megapíxeles de resolución.



Figura 4.2 Cámara Canon de 26.00 mm

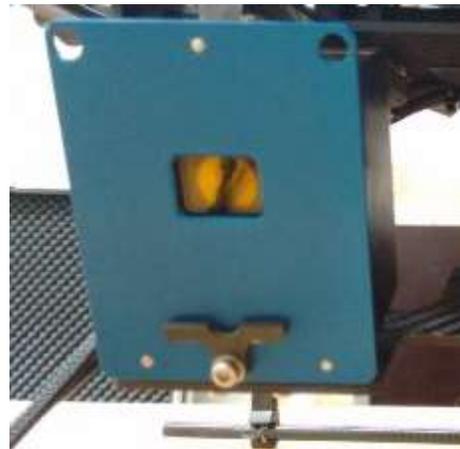


Figura 4.3 Cámara multispectral TETRACAM. Vista trasera izquierda, vista frontal derecha



Figura 4.4 Cámara visible SONY de 26 megapíxeles

4.2.5 Computadora portátil

La computadora es otro elemento esencial en los vuelos, que debe ser contemplada en la etapa de planeación. Se utiliza comúnmente para la ejecución y seguimiento de las misiones. Aunque es posible utilizar al VANT solo con la emisora, la computadora permite programar misiones (trayectorias de vuelo) y visualizar su ejecución en tiempo real. También permite enviar algunos comandos al VANT, como la adquisición espontánea de fotografías.

El equipo recomendado es una computadora portátil con bajo consumo energético, para que una carga de batería permita ejecutar y monitorear la mayor cantidad de vuelos sin interrupciones. Para esto, se debe considerar también el tiempo de descarga de la computadora con el software de planeación de vuelo en pleno uso. Generalmente el tiempo de descarga de las computadoras portátiles es más rápido cuando se está utilizando el software de seguimiento de misiones de vuelo. Además, se debe considerar el sobrecalentamiento que, algunos programas para el seguimiento del vuelo en tiempo real, provocan. Esto último puede poner en riesgo las misiones que se llevan a cabo en lugares con condiciones de temperatura extremadamente altas.

4.2.6 Equipamiento adicional

En la práctica, surgen algunas recomendaciones de equipamiento que deben contemplarse en la etapa de planeación para ejecutar con éxito las misiones de vuelo, como son:

- d. En caso de que la misión se lleve a cabo en un lugar soleado, se debe llevar sombrilla. En caso de estar en un lugar despoblado, se debe llevar una mesa desmontable.

- a. Si el terreno es pedregoso, es recomendable utilizar un material que brinde una superficie rígida o semi-rígida para los despegues y aterrizajes. Un tapete grueso o una tabla ancha que cubra un área mayor en un 30 % a un 50 % que la ocupada por el VANT puede servir.
- b. En ocasiones se requiere recargar las baterías de forma inmediata en campo. En este sentido, se recomienda utilizar vehículos equipados con tomacorriente de 127 volts, o un conversor a este tipo de corriente desde la batería.
- c. No olvidar la vestimenta adecuada. Lentes para sol y gorras o sombreros son de rigor. Botas para terrenos pedregosos, y pantalones de mezclilla para terrenos agresivos son recomendados.

4.3 Diseño de la misión de vuelo

La efectividad de un proyecto, que involucra al VANT como herramienta de trabajo, dependerá de la calidad del diseño de la misión de vuelo. Para fines de fotogrametría, el diseño consiste en determinar la resolución espacial requerida, la altura de vuelo del dron, y el porcentaje de traslape entre las imágenes. Estas tareas se describen en las Secciones 4.3.1, 4.3.2 y 4.3.3 respectivamente. La información de estos parámetros se utiliza para programar las trayectorias de vuelo, lo que a su vez permite estimar el tiempo total de vuelo requerido. Finalmente, el tiempo de vuelo deberá contrastarse contra el tiempo disponible, dada la capacidad de las baterías, lo que normalmente está indicado por el fabricante del dron. El tiempo total de vuelo permite saber si es posible llevar a cabo la misión en un solo vuelo, o si la misión se fracciona en varios vuelos. Usualmente, dada la complejidad del proceso, un software de diseño de misiones de vuelo asiste al operador para la ejecución de todas las tareas requeridas durante esta etapa. Las características de estos programas de cómputo se resumen en la Sección 4.3.4.

4.3.1 Resolución espacial

La resolución es muy importante para realizar mediciones sobre las fotografías tomadas desde los VANT. Esta resolución debe de ser constante a lo largo y ancho de la fotografía, por lo que el dron debe realizar el vuelo a la misma altitud. Sin embargo, debido a que en muchos casos es necesario volar sobre terrenos con desniveles, se tomara como base la resolución media que se quiera obtener y la altura de vuelo sobre el terreno que evite interferencias al vuelo del dron, contemplando en lo posible la inclinación del terreno.

Finalmente, la consideración más importante, es la resolución espacial que el objeto de estudio requiera. No es lo mismo realizar fotogrametría para obtener la topografía de una simple superficie, a evaluar las condiciones de un cultivo o incluso de una plantación de frutales; en este caso, la resolución cambiará necesariamente.

4.3.2 La altura de vuelo

Como se mencionó anteriormente, la resolución espacial y los obstáculos en el campo determinaran la altura de vuelo requerida. Sin embargo, existe otra limitante para una altura de vuelo mínima, a continuación, se detalla el cálculo de la altura de vuelo para un sensor X. La altura de vuelo (H) depende de la distancia focal (f) del sensor y de la escala horizontal (E) a la que se desea obtener las fotografías (Figura 4.5). Esta escala puede expresarse como la relación de la distancia medida en la fotografía respecto a la distancia real (p ej. 1/1000) o como la relación entre el tamaño de pixel en el sensor y el tamaño de pixel en el terreno (GSD). De esta manera la altura viene definida por las siguientes relaciones (Ecuación 4.1).

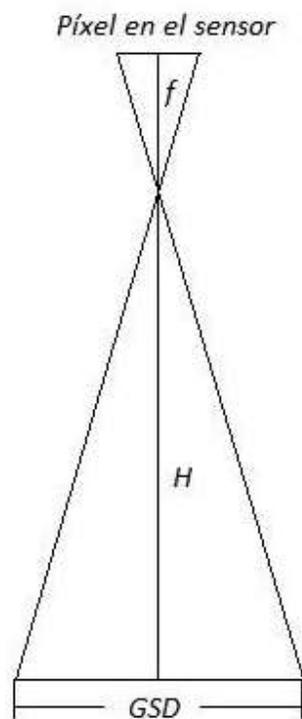


Figura 4.5 Relación entre la altura de vuelo (H), el tamaño de pixel en el sensor (TPS) y el tamaño de pixel en el terreno (GSD)

$$H = f * E \quad ; \quad H = f * \frac{GSD}{TPS} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde H es la altura de vuelo en m, f es la distancia focal en m y TPS es el tamaño de pixel en el sensor en m -estos últimos son parámetros proporcionados por el fabricante de la cámara-; GSD es el tamaño de pixel en el terreno en m y E es la escala expresada únicamente como la distancia real obtenida en el terreno (p. ej. 1000).

Cuando se realiza una misión de vuelo, es de vital importancia conocer la altura sobre el nivel del mar, pues será a partir de esta que se programa la altura de vuelo. Otro elemento a considerar en la generación de misiones es el traslape tanto entre fotografías como entre líneas de vuelo, el cual se aborda en la siguiente sección.

4.3.3 El traslape

Se refiere al grado de sobreposición entre fotografías consecutivas (Figura 4.6) y se define en función de la pendiente del terreno. El INEGI (2005) recomienda que el traslape longitudinal sea mayor al 60 % si la pendiente es mayor al 30 % y no menos de 50 % si el terreno es llano o con pendientes cercanas a 0 %, mientras que el traslape transversal debe ser del 20 % al 30 %. Sin embargo, de acuerdo con los trabajos realizados por el IMTA tanto en campo como de postproceso se determinó un traslape de 70 a 75 % para ambos ejes, longitudinal y transversal.

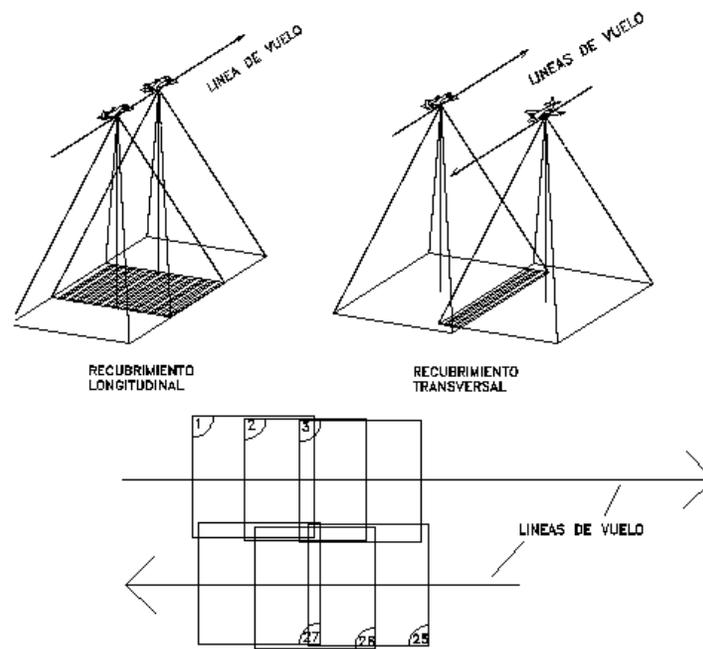


Figura 4.6 Traslape longitudinal y transversal

Es muy importante recalcar que, con un solape longitudinal exagerado, con los centros de cada foto muy juntos, se pierde visión estereoscópica a la hora de la restitución. Así, un solape del 80 % no permite observar correctamente el efecto 3D de la visión estereoscópica. Además, con un solape muy grande disminuimos el rendimiento y aumentamos el trabajo de gabinete sin mejorar la calidad.

4.3.4 Software de diseño de misiones de vuelo

Existen en el mercado varios programas disponibles para asistir al operador de VANT en el proceso de diseño de la misión de vuelo. Algunos ejemplos son Mission Planner (www.ardupilot.org/planner), UgCS (www.ugcs.com), Ground Station (www.dji.com) y mdCockpit (www.microdrones.com). Generalmente, estos programas tienen dos formas de operar:

- a. Misión preprogramada. En este modo, el usuario puede pre-programar la ruta de vuelo de un dron a través de la definición de los puntos de paso (waypoints) en un mapa de Google u otras capas de mapas disponibles (Bing, Yahoo, OpenStreetMap, Ovimap, entre otros). El dron también puede programarse para despegar y aterrizar de forma autónoma, o volar alrededor de un punto estático por cierto tiempo mientras toma fotografías o video. El usuario también puede programar otros parámetros de vuelo, tales como la velocidad y la altitud del VANT sobre cada punto de paso. Una misión preprogramada puede ser cargada en el dron antes del lanzamiento, pero también se puede enviar una nueva incluso cuando el dron ya está en el aire.
- b. Vuelo en tiempo real (modo guiado). Una forma alternativa de volar una misión de aviones no tripulados es darles instrucciones en tiempo real a través del equipo de telemetría, indicando cuál es el próximo punto de paso para volar en el mapa. Esta función es sumamente útil en combinación con una transmisión de video "en vivo", ya que permite examinar áreas o eventos de interés a medida que éstos son ubicados.

Algunos los planeadores de misiones incluyen un módulo para el cálculo de los parámetros de fotogrametría (como el nivel de traslape y la altura de vuelo). En este caso, únicamente se requiere especificar el modelo de la cámara a utilizar (usualmente, se selecciona de un catálogo ya existente), el área a cubrir y la resolución. El software determina la trayectoria, la cantidad de disparos con la cámara, el tiempo entre disparos y la altura óptima de vuelo. Un ejemplo de programas con dicha funcionalidad son UgCS y el DJI Ground Station.

Los programadores de misiones no son exclusivos de las computadoras personales. Si se tiene una tableta con sistema operativo Android o iOS, puede usarla como estación

de control en tierra en lugar de una computadora portátil. Algunos ejemplos de software de misiones para estas plataformas son Droidplanner y Andropilot para Android, y QGroundControl para iOS. Usualmente, estas aplicaciones permiten hacer la mayoría de las funciones que un planificador de misión para computadora puede hacer, incluyendo el plan de la misión, el ajuste de parámetros, el vuelo en modo guiado y la recepción de datos de telemetría en tiempo real.

En ("Choosing a Ground Station", s. f.) se puede encontrar una reseña de los programas para planificar la misión de vuelo de VANT más utilizados. Por otro lado, el Anexo D describe el uso del programa para control de misiones UcGS.

4.4 Carga y manejo de baterías

4.4.1 Introducción

La batería es uno de los componentes principales de los VANT, ya que define el tiempo de vuelo, y limita el número de misiones a realizar en un día de trabajo. Su funcionamiento debe ser pleno para evitar inconvenientes en las misiones de vuelo y para cumplir en tiempo y forma los objetivos de los vuelos.

Las baterías son un sistema que almacena energía de forma química, y constan de dos electrodos metálicos sumergidos en un electrolito, el cual tiene un proceso reversible de oxidación/reducción. Durante la descarga el electrodo positivo llamado ánodo pierde electrones y el electrodo negativo llamado cátodo gana electrones. Cuando se cargan las baterías el proceso es inverso y se transfieren electrones entre los electrodos, uno de los electrodos pierde electrones y el otro en cambio gana electrones.

La capacidad de una batería se mide en Amperios o Mili Amperios hora (Ah/mAh), indica la corriente que la batería puede suministrar durante 1 hora de uso, manteniendo la tensión de suministro en unas condiciones especificadas de temperatura estándar.

Lo más importante de las baterías son: el voltaje, el número de celdas, la constante de descarga (C), y el voltaje mínimo, máximo y de seguridad. Para conocer más sobre las baterías, se da a continuación un resumen de características de la batería de polímero de litio (LiPO), que es la más común para alimentar los motores del VANT.

4.4.2 Las baterías de polímero de litio

Mayormente conocidas como LiPO, son las baterías que más se utilizan para los vuelos de VANT. Son baterías planas, muy ligeras y son las baterías con mayor capacidad de

almacenamiento de energía que existe en el mercado (densidad energética), llegando hasta los 200W por kilo de peso.

El voltaje nominal por celda es de 3.7V llegando a un máximo de 4.2V cuando están completamente cargadas, y con un mínimo de 3V completamente descargadas. Generalmente las baterías se dejan como mínimo a 3.4V por motivos de seguridad del equipo. El voltaje total entregado será igual al número del arreglo de celdas conectadas en serie. Por ejemplo, la Figura 4.7 muestra una batería de 14.8V, con un arreglo interno de 4 celdas (4S).



Figura 4.7 Batería LIPO de 10000 mAh, 14.8V y constante de descarga 10C

4.4.3 Carga y balanceo

La forma de cargar estas baterías es con el cargador específico para baterías de LiPo, aunque también se pueden utilizar cargadores lentos. Algunas baterías no toleran en absoluto la sobrecarga, por lo que el cargador siempre tiene que tener un mecanismo para cortar la corriente cuando la batería llega a 4.2 V.

En estas baterías, es muy importante tomar en cuenta la constante de descarga C para no superar su valor nominal y con esto afectar su vida útil. Esta constante representa la velocidad de descarga de la batería, que es la intensidad máxima de corriente que puede dar la batería de forma segura. Por ejemplo, una batería de 5000 mAh y 45C puede entregar como máximo 225,000 mAh ($5000\text{mAh} \times 45$). Como la unidad de tiempo es una hora, esta corriente la puede entregar como máximo en 1.3 minutos ($60\text{ min}/45$). Esto también significa que esta batería es adecuada para un motor que consuma 225 A, pero si ponemos un motor que funcione a 450 A, el motor irá al mitad de su máxima potencia.

Los valores normales para C suelen estar entre 15 y 25, aunque pueden llegar a descargar al doble de la constante nominal C durante máximo 30 segundos sin causar daños en la batería. También, se debe tomar en cuenta que si las baterías LiPo se

descargan por debajo de 3.0V por elemento o si se cargan por encima de los 4.2V, éstos podrían sufrir daños irreversibles. Para evitar eso se deben utilizar cargadores inteligentes.

En carga rápida, las baterías LiPo normalmente se deben cargar a 1C, por lo que el tiempo de carga habitual es de 75 minutos. Lo anterior sin importar la capacidad y número de celdas de las baterías y siempre tomando en cuenta las capacidades del cargador. En cuanto al número de veces que las baterías pueden ser usadas y recargadas, estas se pueden recargar hasta 150 veces (para uso de aeromodelismo), aunque lo normal es reemplazarlas antes de que lleguen a este punto. Si se requiere almacenar las baterías por un tiempo prolongado (más de un mes), se recomienda cargar las baterías a la mitad.

Una revisión con un monitor de carga puede indicar el nivel de cada célula o celda de la batería (Figura 4.8). En caso de observar una diferencia significativa de voltaje, será necesario hacer un balanceo de carga. Balancear el paquete completo de celdas permite que cada celda iguale el voltaje de la otra, lo que evita flujos irregulares de corriente, dando un rendimiento óptimo a este dispositivo eléctrico.



Figura 4.8 Revisión de la carga de la batería

En general, el proceso de balanceo es el siguiente. Normalmente, las baterías llevan dos conectores, un conector para conectarla al dron o para la carga y otro conector llamado de “balanceo”. El conector de balanceo tiene tantos cables y pines de conexión como celdas conectadas en serie más uno. Un equipo denominado “balanceador de carga” (Figura 4.9) conecta directamente a cada una de las celdas constituyen la batería. Con este conector los cargadores de buena calidad pueden cargar cada celda de forma individual, reequilibrando el voltaje de todos los elementos de la batería. El balanceador de carga tiene una configuración interna para cada tipo de batería, determinando la cantidad de energía eléctrica que es aplicada de forma diferenciada a las celdas.



Figura 4.9 Equipo balanceador de carga de baterías

4.4.4 Traslado y resguardo

Las baterías deben estar protegidas al momento de trasladarlas de un sitio a otro, ya que los movimientos bruscos. Por ejemplo, movimientos bruscos en un vehículo, o el caer de una gran altura, puede dañar la cubierta de las celdas y provocar explosiones. Tomar las precauciones necesarias en la manipulación de las baterías y la suficiente protección se evitan estos inconvenientes.

Para traslados en largas distancias, las baterías no deben estar cargadas al máximo, y deben ser transportadas en una funda o maletín protector. Estos medios son protectores químicos que preservan las baterías de los cambios bruscos de temperatura y son resistentes al fuego (ignífugos).

Para el resguardo de las baterías se realiza en un lugar donde sea difícil que se caigan y que las temperaturas no sean extremas.

4.5 Ejecución de la misión de vuelo

4.5.1 Inspección de la zona de vuelo

En oficina, se revisa el área de estudio para asegurar que sean zonas autorizadas para vuelo, o simplemente, que no sean zonas restringidas por ley. En campo, se verifican los obstáculos que pudieran existir como zonas arbóreas, áreas urbanas, construcciones, torres de alta tensión y otros que pudieran limitar el funcionamiento del VANT.

En la zona de vuelo también se considera el ensamblado del dron, por lo que esta zona deberá estar despejada y con suficiente espacio para realizar las maniobras requeridas, como ensamblado, prueba de funcionamiento, brújula y despegue (ver Figura 4.10).



Figura 4.10 Zona de vuelo

Otro aspecto a considerar son las zonas de despegue y aterrizaje. Los drones vienen en diferentes formas y tamaños, por lo que hay que considerar el espacio que necesita nuestro dron para asegurar un despegue seguro. Se recomiendan campos amplios y despejados, pero eso no significa que no pueda despegar desde un espacio reducido, siempre tomando en cuenta que exista suficiente espacio para maniobrar. Para considerar el espacio requerido, es necesario considerar la precisión del VANT, su modo de funcionamiento (GPS o manual) y modo de elevación. Por ejemplo, la zona de la Figura 4.10 puede servir como zona de despegue, sin embargo, posiblemente se tendría que buscar otra zona para el aterrizaje, dada la cercanía existente al agua. Otro ejemplo,

es la zona de estudio mostrada en la Figura 4.11, donde únicamente hay un área pequeña para realizar las labores de ensamble del VANT, despegue y aterrizaje. Por lo que, al no encontrar un área más cercana y segura para las maniobras, se toman mayores medidas de seguridad.



Figura 4.11 Las zonas de despegue y aterrizaje

4.5.2 Tiempo de traslado

Es importante que, en las oficinas centrales, se planee la ruta de traslado de los equipos a campo, en especial en lugares remotos o de difícil acceso. Ya en campo esta ruta tendrá que actualizarse en base a las condiciones del lugar, por lo que se puede modificar el tiempo para cumplir con la misión de vuelo.

La dependencia a la energía eléctrica, para recargar las baterías, hace necesario considerar el tiempo de traslado de los equipos a la zona de trabajo, sobre todo si esta se localiza en una zona despoblada. En caso de requerir la recarga de baterías, la distancia a la zona de hospedaje puede dificultar el continuar la misión en el mismo día. Un vehículo con tomacorriente o un convertidor de corriente alterna para automóvil ayudan en este sentido, reduciendo la necesidad de regresar a una zona poblada para cargar de nuevo las baterías.

4.5.3 Condiciones meteorológicas locales

Gran parte del éxito de la misión de vuelo dependerá de la revisión de las condiciones meteorológicas estimadas a la hora de realizar la misión de vuelo. Primeramente, se

debe verificar la nubosidad, constatando que exista suficiente luz solar para obtener una alta calidad en las fotografías y videos. En casos donde el objetivo sea un modelo de elevación digital o un ortomosaico, se busca que existan pocas sombras, por lo que se definen horarios de vuelo cercanos al mediodía.

La selección de la hora de vuelo es crítica, a fin de evitar tiempos muertos y condiciones climáticas adversas, como la lluvia y los vientos superiores a los permitidos para el vuelo. La hora se decide en función de la fecha y del lugar donde se realizará el vuelo, considerando también los objetivos de la misión. Por lo general, se recomienda que, para obtener buenas imágenes la elevación solar mínima será de 35°, por lo que las horas más recomendadas para volar están entre las 10:00 am y las 4:00 pm.

También se debe verificar que las condiciones meteorológicas estén dentro del margen de temperatura y velocidad del aire que el VANT soporta, siempre tratando que funcione a pleno rendimiento. Los vientos fuertes afectan el desempeño del dron, por lo que se debe comprobar la velocidad y la intensidad de las ráfagas de viento que se presenten. Por otro lado, los drones también tienen temperaturas de funcionamiento recomendadas para que las baterías y el equipo electrónico se mantengan en buen estado, por lo que hay que evitar temperaturas extremas (tanto altas como bajas). En el manual de usuario del VANT comúnmente se presenta el rango de temperaturas de funcionamiento óptimo del equipo (Dronografía, 2015).

4.5.4 Ubicación de puntos de control

Para que las fotografías sean correctamente georreferenciadas, es preciso identificar varios puntos de control en el terreno cuya posición será conocida en sus tres posiciones X, Y, Z. Esto se realiza a partir de la toma de datos con un GPS, que de preferencia, tenga corrección diferencial. Es imprescindible elegir, como puntos de referencia, aquellos que sean claramente localizables en la fotografía, utilizando para ello cruces de caminos, puentes u otros elementos de fácil identificación. En caso de no existir estos puntos, se colocarán dianas o cuadros con patrones o colores que faciliten su localización, por ejemplo, la Figura 4.12 muestra un patrón en forma de tablero utilizado con frecuencia en trabajos de fotogrametría. En esta operación es importante tomar en cuenta una serie de precauciones:

- Las dianas tendrán un patrón claramente identificable y un centro que permita una alta precisión en la toma de sus coordenadas. Tomar en cuenta que el centro será donde se ubique el GPS
- Es importante que sean visibles de acuerdo con la resolución de las fotografías y que estén ubicados en sitios abiertos

- Los puntos deberán estar distribuidos de preferencia hacia los extremos del área de interés
- Como recomendación general cada punto debe estar presente en por lo menos 5 imágenes



Figura 4.12 Dianas para la ubicación de puntos de control en el terreno (izquierda) y GPS diferencial (derecha)

4.5.5 Despegue y aterrizaje

Las zonas de despegue y aterrizaje son las más importantes. Por lo que llegando a la zona de estudio, es necesario identificar la zona de despegue y varias zonas de aterrizaje que sirvan en caso de aterrizaje de emergencia.



Figura 4.13 Zona de estudio y búsqueda del área de aterrizaje.

El espacio requerido para las zonas de despegue para drones con multirrotores son mucho menores al requerido por los VANT tipo ala fija; sin embargo, para ambos aplican las mismas reglas. Las zonas de despegue y aterrizaje deben estar lo suficientemente despejadas para maniobrar con el dron. Se debe considerar que algunos drones son muy sensibles al viento, por lo que, de presentarse una ráfaga o viento de alta intensidad se corre el riesgo de chocar con algún obstáculo. Por ejemplo, en la Figura 4.15 se muestra una zona bastante despejada, que fue seleccionada como zona de despegue de un VANT multirroto.

Además de la ausencia de obstáculos de gran altura, también se debe considerar la inclinación y la pedregosidad del terreno, así como excremento de animales y encharcamientos. Por lo anterior, se debe verificar con exactitud las zonas de despegue y aterrizaje antes de despegar. En la Figura 4.14 la caja del dron funciona como zona de despegue. Sin embargo, es muy complicado aterrizar sobre la misma caja, por lo que será necesario buscar otras zonas de aterrizaje.



Figura 4.14 Zona de despegue de un dron tipo hexacóptero

4.5.6 Estimación del tiempo de vuelo

El tiempo de vuelo está limitado por las baterías y a su vez por el tipo de dron. Un VANT multirroto siempre tendrá un tiempo de vuelo menor que uno de ala fija, ya que multirroto debe estar en constante funcionamiento para mantenerse en el aire, y el de ala fija puede ayudarse del viento para planear y mantenerse en el aire por más tiempo. Por lo tanto, las misiones de vuelo deben planearse de acuerdo con el tiempo de vuelo y a las condiciones propias de la zona de estudio. Por ejemplo, en la Figura 4.15 se

observa una zona de estudio la cual está completamente inundada, por lo que las misiones tendrán que iniciarse desde una zona más alejada, aumentando la duración del tiempo de vuelo para cubrir la misma zona.



Figura 4.15 Área de estudio inundada

Las condiciones de viento también afectan la duración del vuelo. El viento hará que sea más difícil mantenerse estable, por lo que la batería se agotará en menos tiempo que lo habitual. Por lo tanto, es bueno medir la dirección del viento, con el fin de aprovecharlo y así mejorar la duración de la batería. El estado de las baterías también limitará la duración del tiempo de vuelo. Si la batería ya se encuentra al final de su vida útil, tendrá mucha menor duración que al inicio de su uso (ver Sección 4.4, manejo de baterías). El tiempo de vuelo también variará en base al peso que el VANT levante, entre mayor sea esta carga, menor será el tiempo de vuelo.

4.5.7 Preparación, configuración, y revisión de equipos y accesorios

4.5.7.1 Inspeccionar el dron

Antes de despegar es importante asegurarse de que el dron está funcionando correctamente, comprobando las cámaras, las monturas y las baterías.

Es importante observar que las piezas no estén sueltas o con áreas dañadas, se debe revisar que las hélices estén firmemente unidas y que no tenga daños físicos. También

hay que revisar que las baterías y el cardán de la cámara (montura o *gimbal*) estén bien colocados.

Después del transporte de un lugar a otro y como medida preventiva, es necesario despegar y mantener una altitud mínima (alrededor de metro y medio), para asegurarse del correcto funcionamiento del VANT, observando que pueda ascender y descender correctamente, y moviéndolo en todas las direcciones. Si se observa algún movimiento errático, como un desplazamiento hacia alguna dirección incorrecta, será necesario descender y realizar una revisión más detallada del dron.

4.5.7.2 Revisión de tarjetas de memoria

Antes de emprender el vuelo, es necesario revisar las tarjetas de memoria de las cámaras. En caso de que las memorias contengan archivos de misiones anteriores, éstos deben ser eliminados o removidos de la tarjeta de memoria, asegurando su respaldo en la computadora portátil. Cada misión debe iniciarse con las tarjetas de memoria “limpias” de información. Verificar que las tarjetas de memoria estén puestas correctamente en cada una de las cámaras. El procedimiento paso a paso es el siguiente:

- Retirar las memorias de la(s) cámara(s) montadas en el VANT. Algunas pueden estar en un adaptador, hay que tener cuidado al retirarla
- Insertar en la PC, una tarjeta a la vez. Dependiendo del tipo de tarjeta, esto puede requerir un adaptador (como por ejemplo, el adaptador de micro-SD a SD)
- Verificar que la memoria ha sido detectada por la PC
- Crear una carpeta en la PC o en algún dispositivo USB donde se guardarán los archivos de las misiones
- Abrir la carpeta de archivos de la tarjeta de memoria donde se encuentran los archivos de la misión
- Elegir y copiar los archivos de la memoria a la carpeta de misiones previamente creada en la PC

Para limpiar las memorias se sigue este procedimiento:

- Seleccionar los archivos que están dentro de la cámara
- Eliminar todos los archivos de las memorias
- Verificar que las memorias están completamente vacías y listas para ser usadas en una nueva misión

4.5.7.3 Revisar voltaje de las baterías

Para cumplir con el objetivo de los vuelos es necesario cargar las baterías al máximo (no sobrecargarlas), para conocer el tiempo posible de vuelo. Siempre es recomendado llevar un control sobre el estado de carga de las baterías, y el número de usos, para evitar cualquier accidente. Por otro lado es importante conocer el estado de las baterías de los componentes adicionales del VANT, como son: las monturas, emisoras, monitores y sensores. Aunque estos componentes utilizan muy poca energía, comparados con el VANT, siempre hay que revisar la carga antes de realizar las misiones de vuelo. En caso de detectar alguna batería descargada, ésta deberá ser recargada siguiendo el procedimiento indicado en la Sección 4.4.

Una vez revisado el voltaje de las baterías, se recargan aquellas que no tengan el voltaje de operación requerido. Esto se hace con el cargador correspondiente. Algunas baterías adicionales que deben estar cargadas son las del monitor, las de la montura de la cámara (usualmente de 3 células), la de la cámara y la batería de la computadora personal. El voltaje de una batería cargada debe estar entre 4.10 y 4.20 v por cada célula. Algunas cámaras digitales cuentan con un cargador que va conectado a una entrada de 127 VCA, y que pueden demorar bastante en cargarse, lo cual debe ser tomado en cuenta para hacerlo con suficiente tiempo de anticipación.

4.5.8 Ejecución de la misión de vuelo

La ejecución de la misión de vuelo se compone de una serie de pasos muy importantes a seguir y tomando en cuenta las consideraciones hechas en la etapa de planeación de los vuelos. Ya en campo se hacen las adecuaciones necesarias a la misión de vuelo, empezando por la calibración de la brújula del dron.

Antes de realizar el vuelo se deben realizar pruebas para verificar que los sistemas de comunicación entre el VANT, el sistema de control remoto y la computadora en tierra funcionen correctamente, para lo cual se ejecutan maniobras en tierra (mover alerones, disparar cámara). Una vez iniciado el vuelo se recomienda elevar el dron en modo manual aproximadamente hasta la altura de vuelo, en esta altura se realizará la transición al modo de piloto automático para que se ejecute el plan de vuelo diseñado en el software de control de misiones (Sección 4.3.4).

Durante la ejecución del plan de vuelo, se debe vigilar constantemente, en el software de control, el desempeño de las baterías, la velocidad y altura de vuelo, así como la ruta diseñada. En caso de algún desperfecto o movimiento erróneo como, por ejemplo, baja carga de baterías o cambio de ruta no programada, es recomendable abortar la misión y retornar el VANT al punto de despegue. Para ambos tipos de dron (multirrotores y ala fija) esta operación puede realizarse desde el software de control. Una vez que el VANT

este cerca al punto de despegue se recomienda cambiar a control manual (pero asistido por GPS) y realizar el aterrizaje en esta modalidad.

Es importante considerar que todos los procedimientos de la misión de vuelo, desde el despegue hasta el aterrizaje se puede realizar de manera automática, disminuyendo el tiempo de la misión. Sin embargo, no se recomienda despegar y aterrizar de manera automática si el VANT no cuenta con sensores de proximidad necesarios para esta operación. Cuando el despegue y aterrizaje se realiza de forma automática, el dron toma en cuenta únicamente el GPS y las características del terreno obtenidas de la aplicación de mapas utilizada (como Google Earth), por lo que puede existir un alto grado de error en las elevaciones, coordenadas geográficas y formas del terreno reales.

4.5.8.1 Aclimatamiento del VANT

En cada nueva zona de estudio, después del armado y una vez ubicado el VANT en su zona de despegue, se deberá dejar reposar el VANT por algunos minutos (de 10 a 15), con el fin de que el dron se adapte a las condiciones climatológicas propias de cada zona (Figura 4.16). Este procedimiento se hace por algunos componentes internos del VANT, que son susceptibles a la temperatura, como los acelerómetros. A esta etapa se le denomina “aclimatamiento” del dron. Posteriormente, se procede al calibrado de la brújula (siguiente sección).



Figura 4.16 VANT aclimatándose en una parcela de caña

4.5.8.2 Calibración de la brújula del DRON

Los VANT guiados por GPS están equipados con un magnetómetro. El magnetómetro es la brújula que guía al dron entre las direcciones cardinales mientras realiza su recorrido aéreo. Dado que el campo magnético de la Tierra cambia dependiendo de dónde se encuentre, si se mueve el dron a una gran distancia (como varias decenas de kilómetros), esto hace que el dron obtenga su ubicación de forma incorrecta y se desvíe algunos grados fuera de su verdadero centro. Esto disminuirá la eficiencia de vuelo, afectando incluso la velocidad y disminuyendo el área de superficie terrestre que puede ser mapeada durante el vuelo.

La forma más fácil de saber si el magnetómetro está calibrado es apuntar el frente del dron hacia un punto de referencia, encenderlo y conectarlo al software de planificación de misiones para observar si la línea que marca el rumbo del VANT también apunta en la misma dirección. Si la línea está desviada en algunos grados, es un signo de que la brújula necesita ser calibrada. Otro síntoma es que el dron permanece volando en movimientos circulares al iniciar el vuelo, mientras que intenta encontrar la posición correcta.

La calibración de la brújula es diferente para cada VANT. A continuación, a modo de ejemplo, se presentan los pasos para la calibración de un dron tipo hexacóptero de la empresa DroneTools:

- i. Asegurarse que la montura de la cámara este apagada
- ii. Despejar el area de calibración

Asegurarse de que la zona de calibración o despegue esta despejada de elementos metálicos, alejada de vehículos. No llevar materiales ferromagnéticos, ni teléfonos celulares durante el calibrado que puedan afectar al magnetómetro.

- iii. Colocar todas las palancas de la emisora en posición hacia atrás (arriba, dada la ubicación de la emisora frente al operador)
- iv. Encender la emisora (deslizar el interruptor de encendido hacia arriba)

Confirmar el encendido bajando la palanca de control de la velocidad y de inmediato regresarla al centro. La confirmación sirve para que la emisora comience a transmitir.

- v. Poner la emisora a modo GPS
- vi. Encender el dron con una batería

Se conectan las terminales de una sola batería al VANT (este dron está equipado con dos baterías conectadas en paralelo), procurando empatar primero las partes planas de las terminales de la batería y del dron, como se observa en la Figura 4.17, puede ser cualquiera de las dos baterías.



Figura 4.17 Encendido del dron con una batería

- vii. Poner en modo de calibración de la brújula

Cambiar la palanca de modo GPS a manual de la emisora alternativamente, aproximadamente 7-9 veces hasta que el led del dron permanezca de color azul fijo, que indicará que el dron está en modo de calibrado de brújula.

- viii. Poner la emisora en el suelo para trabajar con el dron

- ix. Girar el dron en su propio eje horizontal (Figura 4.18)

Esto se hace levantando el dron con las dos manos y girando alrededor del dron. Importante, no girar el dron alrededor del operador, este giro se realiza hasta que el led del dron pase a color verde fijo.

- x. Girar el dron en su propio eje, de forma vertical

Sujetar el dron de manera que quede en posición vertical, procurando que el GPS de dron este lo más alejado del cuerpo. Girar alrededor del eje vertical del dron hasta que su led se apague y regrese a su estado normal (color magenta) (ver Figura 4.19).



Figura 4.18 Calibración de la brújula: giro horizontal respecto al eje del dron



Figura 4.19 Calibrado de brújula, giro vertical respecto al eje del dron

xi. Colocar el dron para el vuelo

Colocarlo en el suelo, procurando que el dron queda en posición de despegue, es decir, la parte trasera del dron estará orientada hacia el frente del operador. La parte trasera del dron está identificada por la brújula (Figura 4.20).



Figura 4.20 Colocación del dron en el lugar de despegue

Nota: Si el led del dron termine de color rojo o parpadee de color verde: repetir la calibración a partir del paso ix. Únicamente se procederá a despegar el DRON cuando los leds marquen un color magenta. En caso contrario regresar al paso ix o en su defecto realizar una revisión exhaustiva del mismo.

4.5.8.3 Configurar la opción “vuelta a casa”

Normalmente, los VANT tiene incorporada una opción de "regreso a casa", la cual es utilizada por el dron en caso de detectarse un fallo durante la ejecución del vuelo, o que puede ser activada por el operador de forma voluntaria. Antes de iniciar el vuelo, es necesario asegurarse de que esta función está configurada de forma correcta, indicando claramente al dron cual es el punto denominado como “casa”. El modo vuelta a casa

permite que el VANT regrese al punto de despegue (o un punto alternativo, si este fue establecido mediante el software de planeación de misiones). Es muy común usar este modo para traer al equipo de regreso cuando el VANT queda alejado al punto de aterrizaje.

También es recomendable la programación del avión no tripulado para ascender a una altitud máxima antes de regresar a casa; este proceso asegura que el dron no vaya a volar a los árboles o alambres de la red telefónica en el camino de regreso.

4.5.8.4 Verificar la configuración de la emisora

La mayoría de las emisoras de radio utilizadas para controlar el dron soportan dos configuraciones para la operación de la emisora:

- Modo 1. El bastón izquierdo controla la inclinación (profundidad) y el desplazamiento horizontal (alerones). El bastón derecho controla la rotación y la potencia de los motores (elevación).
- Modo 2, El bastón izquierdo controla la rotación y la potencia. El bastón derecho la inclinación y el desplazamiento horizontal.

El modo 2 es el más extendido. Se le considera más fácil de utilizar, ya que los movimientos más complicados quedan en el bastón derecho, a continuación más detalles de este modo de operación de la emisora (ver Figura 4.21):

1. El mando izquierdo, eje vertical, es el acelerador del dron. Se presiona hacia arriba (o adelante) para que los propulsores tomen velocidad y pueda despegar, o presiona hacia abajo (o atrás) para bajar la potencia de los motores y que el dron descienda. Si el mando permanece el suficiente tiempo hacia abajo, el dron apagará los motores.
2. El mando izquierdo, horizontal, permite controlar en qué dirección apunta la “cabeza” del dron, haciendo la analogía con un helicóptero o avión de ala fija. Hacia la derecha, el VANT girará en dirección de las agujas del reloj (mirándolo desde arriba) y hacia la izquierda, en sentido contrario. En realidad, lo que hace este control es dar más potencia a los propulsores que giran en una dirección y frenar los que giran hacia el otro lado (en un multicoptero no todos los propulsores giran en la misma dirección).
3. El mando derecho: controla el movimiento en el plano horizontal del VANT. Los movimientos a la izquierda o derecha provocan que el dron se desplace en dicha dirección. Si se presiona hacia delante (o arriba), el VANT se inclinará hacia

adelante, provocando que la parte trasera del dron se levante. Hay que tener cuidado con este mando, y tomar muy en cuenta la orientación del dron, ya que la configuración por definición de este mando funciona en relación a la dirección que apunte el dron, no a la dirección en que el operador lo observa. A los nuevos operadores, se recomienda volar el VANT guardando siempre la orientación de la cabeza del VANT en la misma dirección en la que apunta la vista del operador.



Figura 4.21 Movimiento de los bastones de la emisora y respuesta del VANT (modo 2)

La parte más importante de la configuración de la controladora es el modo de vuelo. Desafortunadamente, no hay un conjunto estándar de términos para describir los diferentes modos de vuelo, por lo que cada proveedor puede usar términos distintos. Por ejemplo, al modo merodear (loiter) también se conoce como modo de bloqueo por GPS (loiter). A continuación se describen los modos de vuelo más comunes.

- Modo manual

Modo de vuelo sin asistencia del GPS. Solo recomendado para entretenimiento o acrobacias. Los motores y movimientos del VANT responden en forma directa a los movimientos de los bastones, sin mediar control de velocidad o potencia, ni asistencia GPS para suavizar desplazamientos y movimientos del VANT. En estas condiciones, el movimiento del dron es fácilmente influenciado por el viento.

- Modo preserva altitud (altitude hold o ATT)

En este modo, se mantendrá la altitud actual del dron. La rotación, la inclinación y la dirección funcionarán igual que en el modo manual, pero la altitud permanecerá constante.

- Modo merodear (loiter o GPS)

En este modo, el dron mantendrá automáticamente la posición y la altitud incluso después de haber retirado las manos de los controles. El rumbo (hacia dónde se dirige) y la altura solo son modificados cuando se manipulan los bastones. El piloto puede volar como si estuviera en modo manual, pero no tiene que preocuparse por un accidente si retira los dedos de los bastones por error.

- Modo automático

El VANT pasa a modo control autónomo, ejecutando el programa de vuelo almacenado en el autopiloto y que fue enviado por el software de planeación de misiones.

Tradicionalmente, en una misión de vuelo, para un proyecto de fotogrametría el operador solo tiene que utilizar el modo *loiter* para despegar y aterrizar, y el modo automático para la ejecución del vuelo autónomo y adquisición de fotografías. Por esta razón, antes de despegar siempre hay que verificar que se encuentre activado el modo loiter o GPS.

En la controladora se debe verificar lo siguiente antes del despegue:

- Se cuenta con una señal GPS fuerte (con una cantidad de satélites mayor o igual a 6).
- Si el avión no tripulado no presenta un bloqueo en su actual posición de despegue, mecanismo de seguridad que muchos VANT incorporan por defecto y que puede ser configurado usando la computadora portátil.
- El voltaje de las baterías del VANT. Debe mostrar la batería cargada al máximo.
- El voltaje de la emisora. Debe mostrar que la emisora tiene suficiente batería para toda la duración del vuelo.

A continuación se procede con la realización del vuelo, el cual puede presentar algunas variantes dependiendo del objetivo. Los tipos de vuelo se describen en las siguientes secciones.

4.5.8.5 Vuelo sin montura de cámara

En este modo, el VANT no lleva ninguna cámara de alta resolución para la adquisición automatizada de fotografías, ni la montura donde ésta va colocada. Pese a que no se

cuenta con la cámara para fotografías, aún se puede utilizar la cámara de video en vista FPV que normalmente los VANT incorporan en su parte frontal. El procedimiento de este tipo de vuelo es el siguiente:

- i. Asegurarse que el dron se aclimate a la temperatura ambiente

Mientras se prepara el resto del equipo, el dron se pondrá en el exterior para la aclimatación por un tiempo aproximado de 10 minutos.

- ii. Comprobar la carga de las baterías

El voltaje de una batería cargada debe estar entre 4.10 y 4.20 V por celda. Para verificar la carga se utiliza el comprobador de baterías.

- iii. Colocar y sujetar baterías.

Las baterías que se utilizan son: las del dron y la del monitor de la emisora. En el caso del dron, verificar que las baterías estén correctamente afianzadas al fuselaje (Figura 4.22).



Figura 4.22 Colocación de baterías en el dron sin conectar

- iv. Calibrar la brújula

La calibración se realizara cada que se cambie de ubicación con respecto al último vuelo. Ver Sección 4.5.8.2 para la calibración de la brújula.

v. Asegurar que el dron está calibrado, apagado y en posición de despegue. Posteriormente, encender la emisora, lo que implica en algunas emisoras “peinar” las palancas (deslizar las palancas hacia atrás/arriba), deslizar el interruptor de encendido hacia arriba, confirmar encendido de la emisora. Finalmente, hay que poner la emisora en modo GPS.

vi. Encender el dron

Para esto, conectar las baterías del VANT (Figura 4.23a), los avisadores acústicos (Figura 4.23b) y verificar la carga de las baterías.

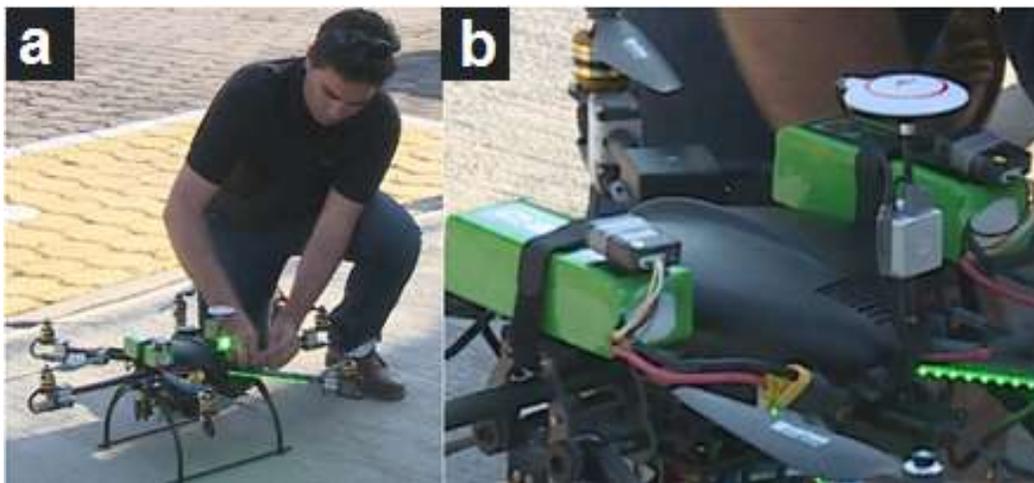


Figura 4.23 a) Conexión de las baterías del dron y b) Colocación de los avisadores acústicos

vii. Encender el pupitre del monitor

viii. Ejecutar al software para planeación de misiones

Verificar la telemetría: voltaje, velocidad, altura, número de satélites GPS, modo de control de la aeronave, indicación de modo prueba de fallos y punto de casa de la aeronave; de acuerdo con estos datos el operador determinará si es factible realizar el vuelo.

ix. Iniciar el vuelo

El procedimiento de vuelo de dron con cámaras se describe a continuación.

4.5.8.6 Vuelo con montura de cámara y misión preprogramada

Este tipo de vuelo se utiliza para obtener fotografías de alta calidad, que son utilizadas para trabajos de fotogrametría. La montura a utilizar puede ser de un eje (con un movimiento vertical) o de dos ejes (movimiento vertical y horizontal). El procedimiento de vuelo es el siguiente:

- i. Asegurarse de que el dron se aclimate a la temperatura ambiente (ver Sección 4.5.8.1)
- ii. Comprobar la carga de las baterías

Antes de hacer las conexiones hay que verificar la carga de las baterías: Para verificar la carga se utiliza el comprobador de baterías. El voltaje de una batería cargada debe estar entre 4.10 y 4.20 V por celda. También se debe colocar y sujetar las siguientes baterías (sin conectar): baterías del vuelo del dron, baterías del monitor de la emisora, baterías de la montura de cámara.

- iii. Calibrar la brújula: Ver sección 4.5.8.2 para calibración de la brújula del dron.
- iv. Encender emisora

Asegurar que el dron esté calibrado, apagado y en posición de despegue. Colocar las palancas de la emisora “peinadas” hacia atrás (esto puede variar dependiendo del dron). Deslizar el interruptor de encendido de la emisora hacia arriba. Confirmar el encendido. Poner la emisora en modo GPS. Finalmente, colocar el horizonte de la cámara en cenital (hacia abajo).

- v. Encender dron y la cámara

Para esto, encender el dron conectando las dos baterías para el vuelo. Colocar los avisadores acústicos a las baterías para estar al tanto de la carga de las baterías.

- vi. Encender los pupitres de los monitores y la cámara

Verificar que se recibe señal de video. Hacer foto de prueba con la cámara, esto se hace desde el software de planeación de misiones.

- vii. Encender la computadora personal y abrir el software para la planeación de misiones
- viii. Finalmente, conectar el módem de telemetría a la computadora personal

El módem tiene una entrada USB que se conecta a la computadora (Figura 4.24).



Figura 4.24 Conexión del módem de telemetría a la computadora

- ix. Verificar que el dron esté en modo GPS y comunicándose con la emisora
- x. Reconocimiento del punto de casa

Normalmente, se realiza accionando los motores. En algunas emisoras esto se hace trazando una L con las palancas de la emisora y manteniendo esta posición hasta que los motores se detengan.

- xi. Cargar misión al dron

Para esto, se abre el software de planeación de misiones, se abre el archivo de la misión correspondiente y ésta se envía al dron. Este procedimiento depende de la operación del software de planeación de misiones.

- xii. Despegar del dron

Se coloca la emisora en modo GPS, se activa el cronómetro (si está disponible), se arma el VANT y se despega suavemente llevando solo la palanca de aceleración por encima del punto medio.

- xiii. Colocar el dron a una altura segura que esté libre de obstáculos
- xiv. En la computadora ejecutando el software de ejecución de misiones, verificar la telemetría: voltaje, número de satélites, etc.
- xv. Iniciar la misión desde el software de planeación de misiones
- xvi. No perder de vista el dron y estar al tanto de la información telemétrica y de la toma de fotos en la pantalla de la emisora
- xvii. Al terminar la ejecución del trayecto programado, aterrizar el dron

Para esto, se aborta la misión en ejecución, normalmente efectuando un cambio de modo, como pasar la palanca de modo GPS a modo manual y colocarla nuevamente en

modo GPS. Posteriormente, traer el dron al lugar de despegue: esto se hace mediante las palancas de dirección de la emisora. Llevar la palanca hacia abajo hasta que los motores se apaguen.

- xviii. Apagar el dron: desconectar las baterías. Apagar la cámara y apagar la emisora
- xix. Retirar las memorias de las cámaras. Verificar y guardar la información del vuelo

4.5.9 Desensamble, almacenamiento y transporte del equipo

El dron debe ser desensamblado y almacenado de la forma correcta a fin de garantizar su seguro traslado y almacenamiento en las oficinas de origen. La Sección 4.5.9.1 describe un procedimiento de desensamble que se sigue con el hexacóptero de referencia. La Sección 4.5.9.2 ofrece información sobre el procedimiento de almacenamiento.

4.5.9.1 Desensamble del equipo

En la mayoría de VANT de tipo multirrotores se lleva a cabo el siguiente procedimiento de desensamble:

- i. Apagar el dron
- ii. Apagar montura
- iii. Apagar la cámara visual
- iv. Apagar el monitor
- v. Apagar la emisora
- vi. Desmontar el monitor de la emisora
- vii. Desmontar el dron

Esto implica: quitar baterías, quitar los avisadores acústicos de las baterías, desconectar los cables de la montura, quitar montura, quitar patín de entrenamiento o montura de cámara de tres ejes.

- viii. Desmontar el patín de entrenamiento

4.5.9.2 Almacenamiento del equipo

El VANT debe tener un contenedor adecuado para su almacenamiento. Lo recomendado es una caja con estructura metálica, de uso rudo, que este cubierto por dentro con goma espuma para evitar abolladuras en el dron. La Figura 4.25 presenta un ejemplo de este tipo de contenedores. La caja cuenta con cuatro soportes equipados con un cinturón de velcro para fijar el dron a la caja, donde deben ser colocados y ajustados los brazos del dron de modo que este no se mueva hacia ningún lado. El acomodo del dron en la caja debe hacerse de tal forma que ningún componente del dron resulte con algún daño. Por ejemplo, para el acomodo de las hélices, se debe procurar que estas queden acomodadas de tal forma que no obstruyan el cierre de la caja, ya que de lo contrario se podrían dañar las hélices al momento de cierre de la caja.



Figura 4.25 Acomodo del dron en la caja de transporte

Los componentes adicionales del VANT, como los periféricos y las monturas, deben tener un contenedor similar al VANT (Figura 4.26). Al igual que la caja de transporte del dron, la caja de componentes debe estar cubierta de goma espuma en su interior. Se debe considerar que en esta caja también tendrán que ir las tarjetas de memoria de las cámaras, el módem usb, avisadores acústicos, patrones para puntos de control, medidor de voltaje de las baterías, llave para fijar o quitar piezas en los equipos, nivelador, cinturones para fijar el dron a la montura, adaptadores y cables de conexión del dron con la montura.



Figura 4.26 Cajas de transporte del equipo (monturas y accesorios)

El acomodo de cada elemento en sus cajas debe hacerse procurando que todos los elementos antes mencionados entren perfectamente dentro de la caja para no cerrarla a presión y romper algún equipo.

4.6 Entrenamiento para el pilotaje de DRONES

4.6.1 Introducción

Aprender a operar un VANT no es una tarea sencilla, ya que además del equipo, se requiere de un entrenamiento adecuado, amplio espacio abierto y mucha práctica. Actualmente, se estima que un alto porcentaje de personas tienen percances en sus primeros vuelos, los cuales pueden ir de pequeños incidentes hasta la pérdida parcial o total del equipo. Sin embargo, no siempre se dispone del equipo, del espacio mínimo requerido o del tiempo para trasladarse a una zona de prácticas segura. Además, se debe considerar que los VANT profesionales tienen un alto costo y no resulta viable arriesgarlos para cuestiones de aprendizaje. En este sentido, los simuladores de vuelo surgen como una opción para que principiantes y expertos puedan mejorar sus habilidades de pilotaje, sin arriesgar la integridad del equipo, salir de la oficina o hacer una gran inversión económica. Esta sección del libro está dedicada a analizar las diferentes opciones disponibles en el mercado para simuladores de vuelo de drones, así

como ofrecer una clasificación útil en función de las distintas prestaciones que ofrecen dichas herramientas.

4.6.2 Simuladores

4.6.2.1 Definición

Un simulador de vuelo de VANT es un dispositivo que recrea artificialmente el vuelo de la aeronave y el ambiente de ejecución en el cual se desempeña el piloto. Tradicionalmente, una simulación está formada de tres partes, el modelo (una abstracción de la estructura de un objeto u proceso), un dispositivo a través del cual el modelo se implementa y un conjunto de reglas en el cual los primeros dos se combinan con una técnica de uso para satisfacer un objetivo en particular (Wikipedia, 2014). Desde este último punto de vista, la simulación implica la replicación de las ecuaciones que gobiernan el impulso de la nave, la reacción de ésta al uso del control remoto (emisora), el entorno físico y el efecto de factores externos como la densidad del aire, turbulencia, dirección del viento, presencia de nubes y precipitación, entre otros (Allerton, 2009). Comúnmente, el dispositivo en cuestión es una computadora personal (Figura 3.34), pero también se utilizan consolas de video-juegos y otros equipos electrónicos especializados.



Figura 4.27 Simulador de vuelo en computadora personal

4.6.2.2 Funcionamiento

Un simulador de vuelo consiste en un programa de computadora que en la mayoría de ocasiones puede ser operado con el mismo control remoto que se utiliza para manejar el VANT. El control remoto se conecta a la computadora por medio de un cable adaptador (comúnmente, de tipo USB), pero en lugar de enviar la señal de radio al receptor en el dron, ésta pasa a través del cable para comunicarse con el software instalado en la computadora. Muchos simuladores incluyen su propio control remoto, y los que no, pueden usar otro tipo controles, como versiones más económicas de controladores de radio (RC), controles más orientados a los video-juegos (conocidos como Joypads o Joysticks) y el teclado. No obstante, se recomienda en lo posible utilizar el mismo control remoto que se utiliza para operar el dron, lo que permitirá familiarizarse al 100 % con él, minimizando los errores que se pudieran producir en el manejo real del aparato.

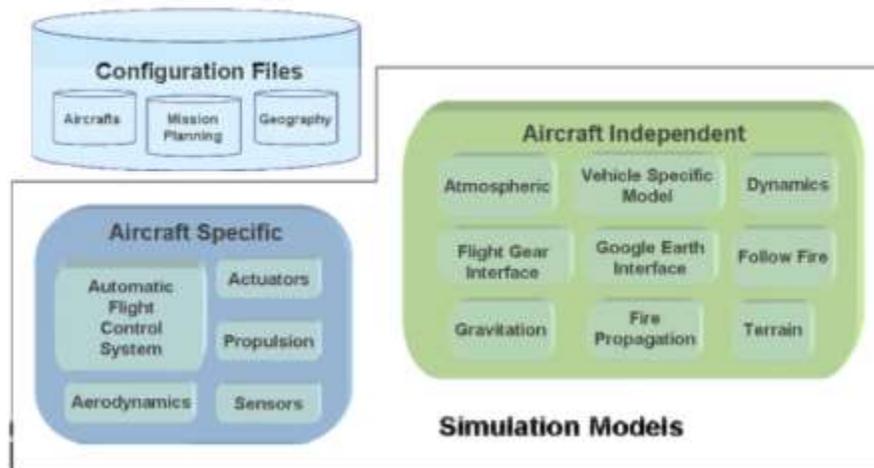


Figura 4.28 Modelos presentes en un simulador de vuelo (Pereira, 2007)

No obstante del tipo de control de entrada, se espera que en un simulador la respuesta de la aeronave sea precisa y exacta (dentro de lo razonable), mostrando gráficos y sonidos realistas del motor “emparejados” con precisión a los movimientos de la palanca de potencia. La idea es transmitir la sensación de estar de pie en la línea de vuelo operando el aparato real. Con el fin de obtener este nivel de realismo, un programa de simulación incorpora un conjunto de modelos matemáticos (Figura 4.28) que describen dos tipos principales de características en el entorno de vuelo del VANT: características específicas de la aeronave y características no dependientes de la aeronave (Pereira, 2007). Los modelos que describen características específicas del VANT incluyen al

sistema automático del control de vuelo, la aerodinámica del VANT, los actuadores, propulsores y sensores. Por otro lado, los modelos para características independientes del VANT incluyen, por ejemplo, al comportamiento atmosférico, el terreno, la gravedad, la selección del modelo y otros comportamientos dedicados a dar la visión de la simulación como un solo entorno integrado. Los programas de simulación incorporan los modelos matemáticos antes citados en un proceso de generación de gráficos (rendering). Este proceso realiza el modelado del escenario por medio de mapas de altitud texturizados y edificios modelados de forma poligonal (Figura 4.29). El escenario gráfico generado debe proporcionar puntos de referencia como ayuda para el usuario que ejecuta el vuelo simulado, así como lecturas simuladas de la posición de la aeronave y los parámetros del vuelo. El entorno del escenario visual también incluye un modelo tridimensional de la aeronave.

Usualmente, el programa permite establecer una vista de cámara (interna o externa), y en ocasiones incorpora un zoom tridimensional. En el caso de vista de cámara externa, el modelo de la aeronave es visible y el usuario puede cambiar su punto de vista mediante la rotación de la cámara alrededor del vehículo durante la sesión de simulación. Los modelos matemáticos y el motor de generación de gráficos interactúan entre sí en el entorno de simulación de vuelo por medio del intercambio de datos y se comunican con el usuario por medio de los dispositivos de salida. En conjunto, estos elementos proporcionan una visión integrada de la operación del VANT en un ambiente realista, con condiciones que pueden ser manipuladas según el objetivo perseguido por la simulación, que usualmente entra en uno de dos tipos: obtención de datos o entrenamiento.

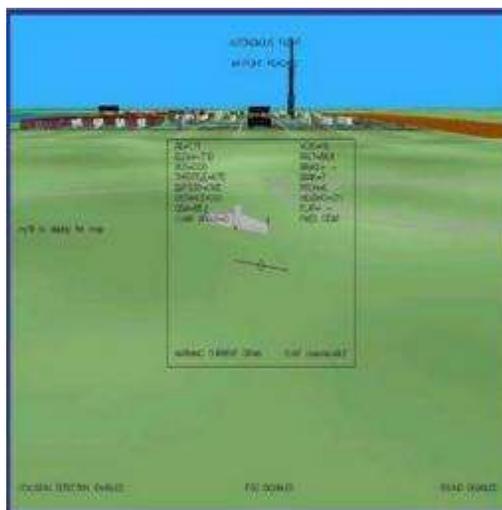


Figura 4.29 Modelos de un simulador de vuelo (vista externa) (Pereira, 2007)

Existen diferencias entre el entrenamiento de vuelo en simulador y la operación real, a las cuales es necesario acostumbrarse. Por ejemplo, el efecto del viento en algunos simuladores de vuelo no incluye ráfagas impredecibles. Además, el uso de cualquier función de acercamiento (zoom) en un simulador puede evitar que el operador se acostumbre a la relación de su plano de posición y orientación entre su persona y el suelo, ya que no se cuenta con visión periférica de la cual auxiliarse. Sin embargo, estas son cuestiones que el entrenamiento de vuelo real del dron deberá incorporar.

4.6.2.3 Clasificación

Los simuladores de vuelo se clasifican en tres tipos principales:

- a. Para entrenamiento. Construidos con fines didácticos, tienen la intención de ampliar las capacidades de manipulación de las aeronaves, sus periféricos o alguna aplicación práctica con el VANT. Se enfocan en emular la respuesta óptima del VANT a los estímulos recibidos desde la emisora o el dispositivo de entrada utilizado para darle al operador la sensación de realismo, que se complementa con ambientes gráficos de alta calidad, algunos llegando a niveles de calidad fotográfica.
- b. Para investigación. Proporcionan un ambiente para observar y registrar el desempeño de los VANT en dicho entorno. Algunos incluyen ambientes para operar múltiples vehículos de forma simultánea. Se enfocan en la recreación del ambiente y en la adquisición de datos que fluyen en la simulación como un entorno integrado, tanto del VANT como del medio ambiente simulado. Puede no recurrir una simulación gráfica de alta calidad, dejando los elementos involucrados de forma simbólica.
- c. Entretenimiento. Se enfoca en el uso del VANT en actividades de recreación, como la ejecución de carreras, juegos de competencia u operaciones de alto riesgo no factibles en el mundo real. Tampoco utiliza ambientes realistas, ni modelos que apliquen reglas de la física de manera estricta.

De los tipos anteriormente mencionados, cabe señalar que los VANT para entrenamiento se clasifican también de acuerdo con la aptitud que estén buscando mejorar, así, existen simuladores para mejorar la operación del VANT en modo de vista en primera persona (First Person View, FPV), operación de helicópteros, operación de multirrotores, operación de VANT de ala fija, operación de la montura o cardán, operación de la cámara, entre otros. Para complementar esta explicación, el Anexo C presenta una comparación de los simuladores para entrenamiento utilizados con mayor frecuencia, resaltando las características anteriormente mencionadas.

4.6.2.4 Beneficios del uso de simuladores

Cuando se tiene la responsabilidad de conducir un sistema de cualquier tipo, como por ejemplo: un banco, una ciudad, un sistema de transporte -entre otros-, se deben tomar continuamente decisiones acerca de las acciones que ejecutará sobre el sistema. Estas decisiones deben ser tales que la conducta resultante cumpla de la mejor manera posible los objetivos planteados. Decidir correctamente cómo responderá el sistema ante una determinada acción podría hacerse por experimentación con el sistema mismo. Sin embargo, factores de costos, seguridad entre otros hacen que esta opción generalmente no sea viable. A fin de superar estos inconvenientes, se reemplaza el sistema real por otro sistema que en la mayoría de los casos es una versión simplificada. Este último sistema es el modelo a utilizar para llevar a cabo las experiencias necesarias sin los inconvenientes planteados anteriormente.

El párrafo anterior describe los principales beneficios del uso de un simulador en términos generales, que son la reducción de riesgos y costos, así como el aumento de experiencia. Sin embargo, también se puede obtener una amplia formación de estos simuladores en todas las áreas de vuelo multirrotor, como:

- Refinar las habilidades de vuelo y aprender a capturar mejor las imágenes fijas
- Perfeccionar sus habilidades de tomas de video al vuelo
- Practicar maniobras aéreas sin riesgo
- Entrenar la vista en primera persona (FPV) en vuelo, acostumbrándose a obtener información en tiempo real
- Probar nuevas tácticas de control de cámara con el cardán (montura)
- Aprender sin arriesgar la pérdida o daño a sus aviones no tripulados

Aplicaciones a la ingeniería

5

Capítulo 5

APLICACIONES A LA INGENIERÍA

Waldo Ojeda Bustamante, Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, Jorge Flores Velázquez, Braulio David Robles Rubio y Sergio Iván Jiménez Jiménez

5.1 Generación de planos topográficos

La necesidad de obtener cartografía de los elementos que nos rodean ha existido siempre. En cada época se han empleado distintas metodologías y tecnologías. En la actualidad la producción cartográfica se ha beneficiado con el desarrollo de nuevas tecnologías como los VANT y técnicas de procesamiento de información como la fotogrametría. La idea de poder sobrevolar una extensión determinada para obtener imágenes aéreas y en gabinete poder recomponer el modelo en nubes de puntos, modelos digitales de elevación (MDE), (Flener *et al.*, 2013) y Ortomosaicos (Hernández López, 2006) hacen que esta tecnología y técnica sean muy potentes.

En la ingeniería la información topográfica es de utilidad en la planeación y el trazo de obras, el deslinde de terrenos, cálculo de volúmenes de tierra, análisis morfológico de zonas aluviales (Tamminga *et al.* 2014), etc. En los trabajos topográficos, el uso de los VANT se evidencia en el proceso de captura, almacenamiento y transmisión de datos de campo, además de que permite levantar todo tipo de terreno, mayor cobertura en menos tiempo, etc. (Pozuelo, Andrés, & Jordana, 2013). En esta sección se presentan los conceptos y la metodología para generar planos topográficos usando vehículos aéreos equipados con cámaras digitales de alta resolución.

5.1.1 Conceptos básicos

Un mapa tiene una extensión territorial definida, que puede abarcar un continente o una localidad específica y representa alguna característica de esa extensión, como características físicas, políticas, agrícolas o del terreno. Debido a que sobre una esfera es complejo medir distancias, áreas o ángulos, la superficie de la tierra representada en el mapa generalmente corresponde a un plano, donde se prescinde de la forma real de la tierra, sin embargo es posible realizar mediciones sobre el mismo de manera más simple.

Un plano topográfico es una representación parcial en dos dimensiones del relieve de la superficie terrestre, muestra las características de un lugar, como pueden ser: cañadas, ríos, áreas de cultivos, etc., en sus posiciones planimétricas correctas. El sistema usado

para representar el plano debe mostrar el relieve, la figura del terreno adecuada al plano y proporcionar la información necesaria para conocer la altura o elevación de cualquier punto que aparezca en el plano.

La cartografía realiza un modelo de la superficie topográfica utilizando el sistema de planos acotados, donde conociendo la cota de elevación de una serie de puntos finitos sobre una posición planimétrica, es posible representar el relieve del terreno a través de las curvas de nivel que pasan por el terreno usando técnicas de interpolación. Los VANT mediante cámara digitales pueden adquirir imágenes aéreas que pueden ser procesadas mediante la técnica fotogramétrica en nube de puntos para obtener modelos digitales de elevación (MDS) (Flener *et al.*, 2013) y Ortomosaicos (Hernández López, 2006).

La fotogrametría es una técnica que puede ser utilizada en multitud de ciencias, pero es en las aplicaciones topográficas y en la elaboración de mapas y planos donde se encuentra su principal interés, (Pozuelo, Andrés, & Jordana, 2013). El avance en esta técnica ha permitido mejorar precisión y aumentar la rapidez de procesamiento de la información de imágenes aéreas para tener estudios topográficos de mayor calidad. Aun cuando las nuevas tecnologías y técnicas han impactado en el cómo se capturan y se procesan los datos, el conjunto de actividades que contempla la producción cartográfica de planos topográficos puede discriminarse en las mismas etapas que tradicionalmente se ha considerado, entre las que se puede mencionar la selección de equipos, planificación, señalización, captura de datos y procesamiento.

5.1.2 Sistema de coordenadas

Geoméricamente la tierra es una figura amorfa cuya forma más semejante es una esfera achatada cuya longitud del eje polar es ligeramente menor que la del eje ecuatorial en aproximadamente 43 km (Figura 5.1). Los estudios han llegado a describir la figura exacta de la tierra como un elipsoide de revolución llamado geoide. Debido a que el elipsoide es una figura compleja, para el estudio y comprensión de la superficie de la tierra, esta se ha representado como una esfera a la cual se le eliminan todos los accidentes geográficos.

A partir del modelo esférico para determinar un punto sobre la superficie terrestre, se desarrolló el sistema de coordenadas geográficas. El sistema es fundamentalmente del tipo de coordenadas esféricas, no siendo los meridianos y paralelos rectos ni estando regularmente espaciados. Es útil para cartografiar grandes áreas, medir distancias y direcciones en unidades angulares de grados, minutos y segundos Figura 5.2.

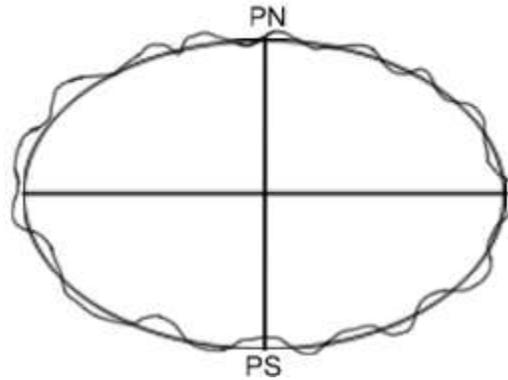
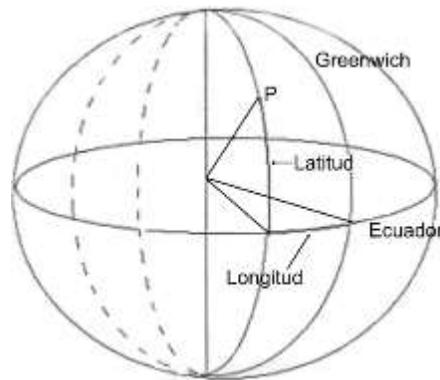
Figura 5.1 *Elipsoide terrestre*

Figura 5.2 Latitud y longitud del sistema de coordenadas geográficas

A partir del sistema de coordenadas geográficas se puede superponer un sistema rectangular de coordenadas, que es mucho más simple de construir y utilizar. Para el caso de México la proyección cartográfica utilizada es UTM, la cual está basada en una proyección desarrollada haciendo uso de un cilindro tangente al elipsoide. Se denomina transversa debido a que la tangencia no es realizada sobre un paralelo, como se solía hacer (Proyección Mercator), si no sobre uno de los meridianos. (Figura 5.3).

Su "universalidad" se logra empleando distintos cilindros correspondientes a varios meridianos, separados entre sí 6° , de manera que cada huso de 6° emplea uno distinto. Como se ha indicado, en cada proyección solo el meridiano origen de cada huso y el Ecuador aparecen como rectas (perpendiculares entre ellas), no siéndolo los demás paralelos y meridianos. Tampoco son arcos de circunferencia. Este sistema queda limitado a representar latitudes inferiores a 80° , por lo que los polos no se suelen representar.

Al desarrollar esta proyección, se obtiene un sistema de coordenadas formado por la proyección del ecuador, que forma el eje X y la proyección del meridiano tomado como tangencia, que constituirá el eje Y, formando un sistema de coordenadas cartesianas. El número del huso se tomará a partir del antemeridiano de Greenwich, en sentido oeste-este. Para las ordenadas se toma como eje una recta paralela al meridiano central, 500 km al oeste, evitando las coordenadas negativas, mientras que para las abscisas se utiliza el propio ecuador.

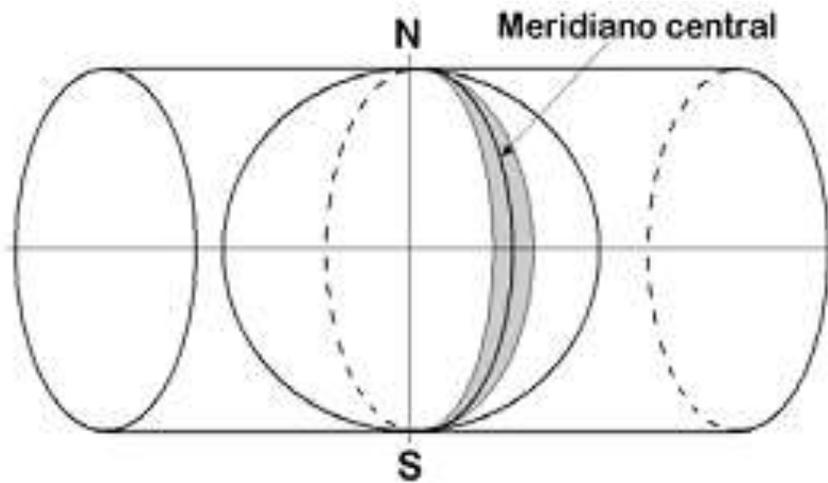


Figura 5.3 Proyección UTM

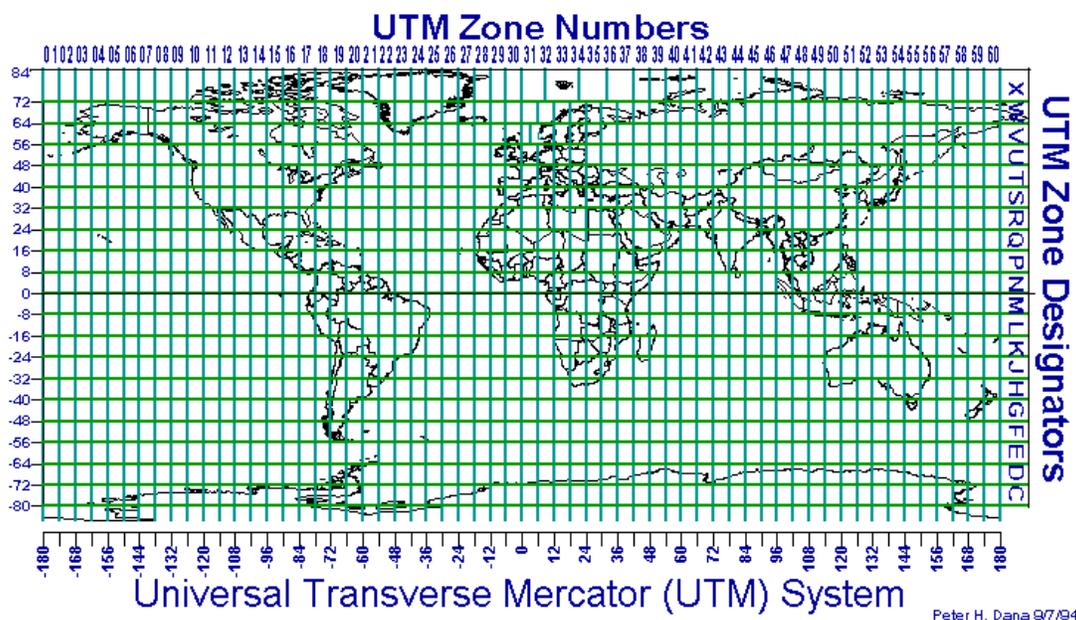


Figura 5.4 Zonas UTM del mundo (Dana, 2017).

5.1.3 Escala cartográfica

Para poder derivar las dimensiones reales del terreno a partir del plano cartográfico, este debe guardar una proporción constante entre los elementos representados en el plano respecto a las del terreno, por lo tanto los planos cartográficos siempre se presentan a una escala del terreno. La escala es la relación constante que existe entre la longitud de una recta en el plano y la de su homóloga en el terreno, ambos en una misma unidad de medida, se representa por la siguiente expresión:

$$E = \frac{\text{Plano}}{\text{Terreno}}$$

De esta manera la escala es representada en forma fraccionaria, cuyo numerador es la unidad y su denominador las unidades del plano medidas en la realidad, de esta manera un plano cuya escala indica 1:5,000, indica que una unidad medida en el plano corresponde a 5,000 unidades en la realidad.

En el plano, la escala se puede ilustrar de tres maneras:

1. Escala numérica o fracción, representa la relación entre la longitud de una línea en el mapa y la correspondiente en el terreno en forma de quebrado “Escala 1:5,000”
2. Escala textual, la que se expresa mediante una relación escrita y literal. Por ejemplo: “un centímetro representa cinco metros”
3. Escala gráfica, se representan las distancias en el terreno sobre una línea graduada. De esta manera es posible medir la distancia real directamente sobre el mapa con una regla o compás, además que en caso de ampliarse o reducirse el plano, conserva la relación entre las distancias en el plano y el terreno (Figura 5.5)

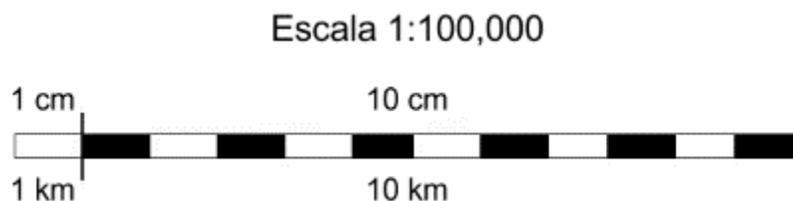


Figura 5.5 Escala gráfica

En función de la escala se puede definir una clasificación de los mapas:

1. Mapas de escala pequeña. Representan amplias zonas de la superficie terrestre y toman en cuenta la forma esférica de la tierra. Suelen representar países y

continentes. Las escalas usuales son 1/400 000, 1/500 000 hasta 1/1 000 000.

2. Mapas de escalas grandes. Representan pequeñas zonas de la tierra y los elementos cartográficos están definidos más claramente, incluso pueden representar detalles técnicos. Las escalas van desde 1/100 hasta 1/10 000 usualmente.

5.1.4 Curva de nivel

Los levantamientos topográficos consisten en una serie de actividades que se basan en medir, calcular y dibujar la superficie terrestre para determinar la posición de los puntos que conforman una extensión de tierra, (Torres & Villate, 2001). Este posicionamiento puede obtenerse directamente o mediante un proceso de cálculo, (Pachas, 2009). Valiéndose de símbolos convencionales se elaboran planos de configuración a partir de datos del levantamiento. Al representar la verdadera forma de un terreno es necesario tener en cuenta la altura o elevación de cada uno de los puntos. Esta elevación se mide con respecto a un nivel de referencia (superficies de nivel). El término cota indica que la altura de los puntos están referidas al nivel del mar, es decir, el nivel del mar representa una superficie de nivel con cota 0.0, los puntos por encima tendrán cota positiva y los puntos por debajo negativa.

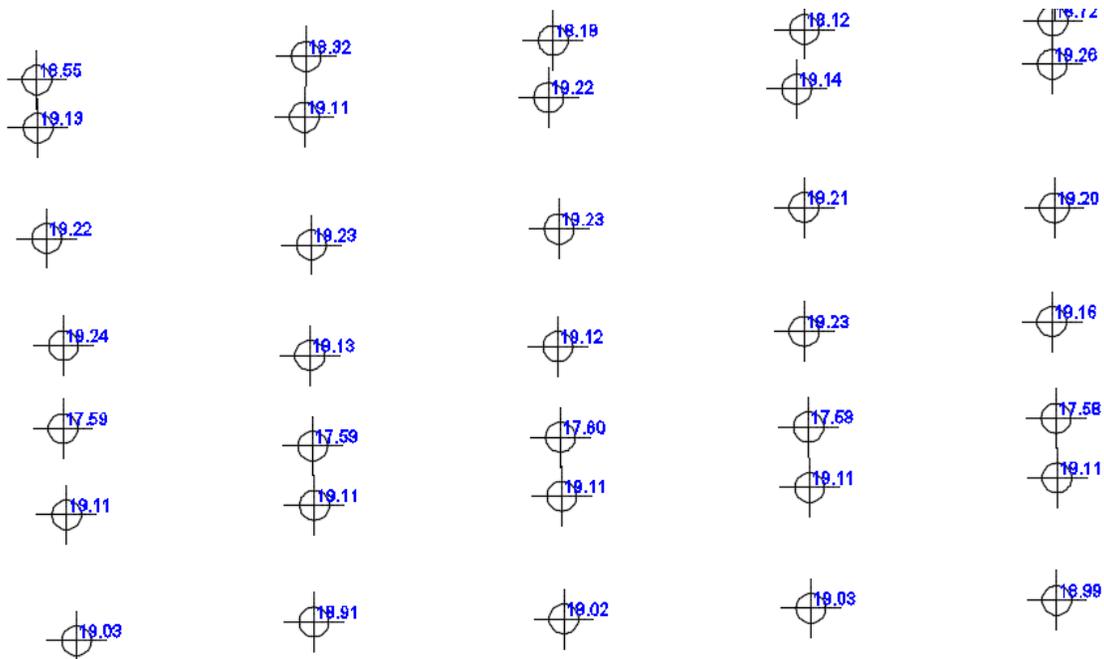


Figura 5.6 Plano acotado

La topografía del terreno comúnmente se representa en un plano mediante el sistema de “planos acotados” donde cada punto sobre la superficie es representado en posición horizontal en el cuadro del plano y por el valor de su altura o cota en esa misma posición (Figura 5.6). De esta manera en un plano la representación de la topografía comprende un conjunto de puntos cada uno acotado con su valor de elevación sobre el terreno, a partir del nivel medio del mar o de la referencia elegida para su representación.

Aunque el plano acotado nos da una idea del terreno, si existen pocos puntos tendremos una idea imprecisa del terreno mientras que con muchos puntos se tendrán dificultades para la interpretación de los mismos. Una representación gráfica más clara consiste en unir con una curva los puntos de la misma cota, con lo que el dibujo queda más claro y se reduce a unas curvas, llamadas curvas de nivel. Las curvas de nivel pueden definirse como isopletas que en un mapa representan la línea de intersección de un determinado plano horizontal con la superficie del terreno, es decir, son curvas que unen puntos del terreno con la misma altitud (Figura 5.7). También se denominan isoipsas y cuando representan el relieve submarino, curvas batimétricas.

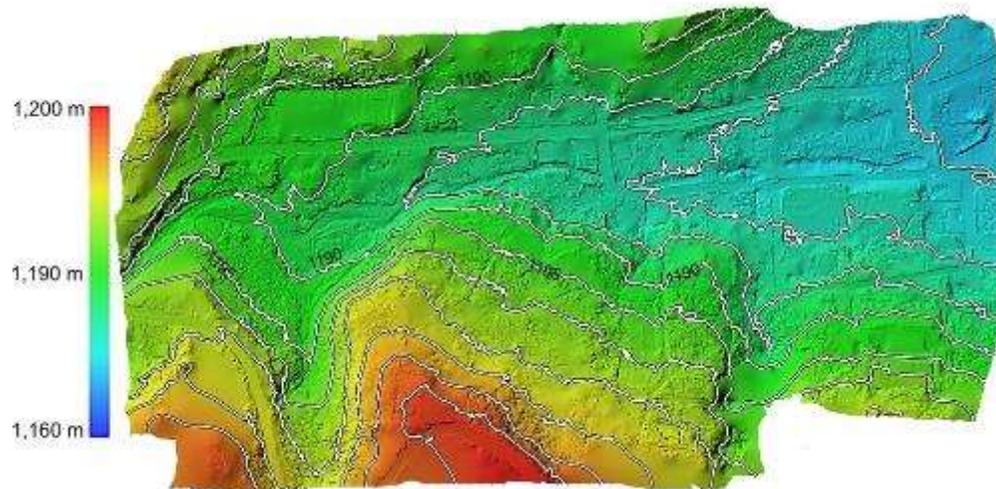


Figura 5.7 Curvas de nivel

Las distancias a la que se sitúan los planos horizontales son las que determina los intervalos entre las curvas, estos pueden ser equidistantes o fijos entre sí (cada 1 m, por ejemplo) o menos común de forma variable, la equidistancia se elige en función de la escala del plano y la naturaleza del terreno.

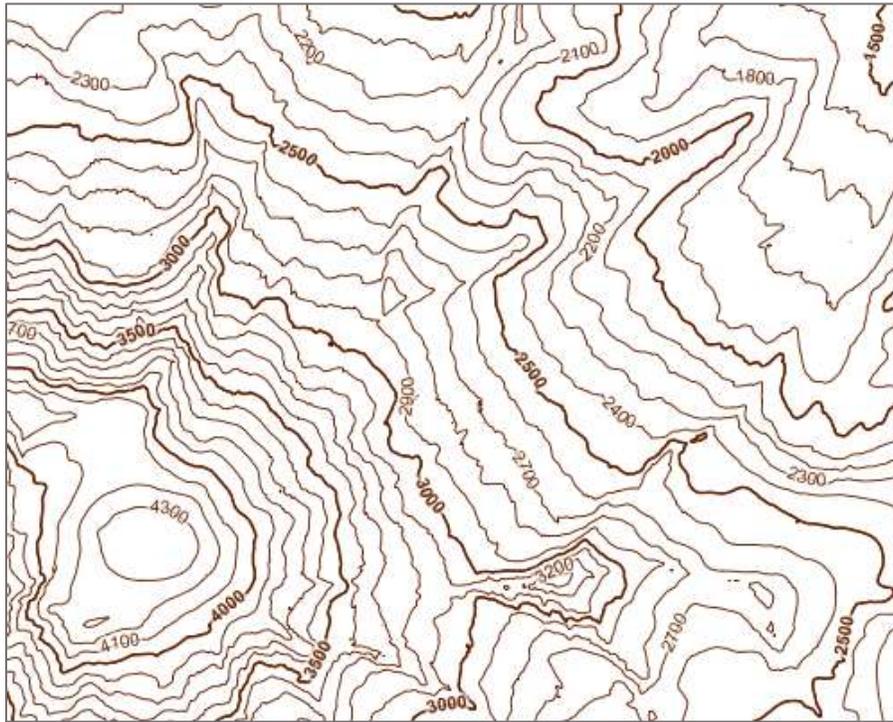


Figura 5.8 Representación de plano topográfico

Aunque las superficies topográficas son totalmente irregulares, para su representación en un plano topográfico se ajustan a un conjunto de normas o lineamientos de acuerdo con los siguientes comentarios:

- Todos los puntos sobre una curva de nivel tienen la misma elevación
- Cada curva de nivel se cierra en si misma puede ser dentro o fuera de los límites del plano
- Una curva de nivel que se cierra dentro de los límites de un mapa, indica, ya sea una elevación o una depresión. Cuando indica una depresión, esto se puede indicar con un símbolo
- Las curvas de nivel nunca pueden cortarse entre sí, excepto donde existe un saliente en voladizo, y debe haber dos intersecciones, aunque estos casos son raros
- Sobre una pendiente uniforme, las curvas de nivel están igualmente espaciadas.
- Sobre una superficie plana, son rectas y paralelas entre sí
- Donde las curvas de nivel están muy juntas, significa que el terreno es muy pendiente, si están muy separadas, indican que el terreno es plano o poco pendiente
- La curva de nivel que pasa por cualquier punto, es perpendicular a la línea de máxima pendiente en ese punto

- Dos curvas de nivel de la misma elevación no pueden unirse y continuar como una sola línea
- No se puede dibujar una curva de nivel a través de una corriente de agua
- Las curvas de nivel forman una U o V al cruzar una corriente, el vértice de la letra señala la dirección aguas arriba

Las clases de curvas de nivel en un plano son:

- Maestra: Es una curva de nivel acentuada en espesor que indica un múltiplo del intervalo de la curva de nivel
- Ordinarias: Son líneas que se muestran entre las curvas índices a intervalos indicados.
- Suplementarias: Se trazan y se muestran a la mitad o a la cuarta parte del intervalo indicado para las curvas de nivel básicas. Se usan para aumentar el relieve, al que no se le agregaron los accidentes topográficos más importantes
- Depresiones: Son líneas marcadas que delimitan las regiones de menor elevación que la del terreno circundante. En estas curvas siempre se colocan las marcas en dirección a la parte inferior del accidente

En las aplicaciones ingenieriles es común el corte de la superficie topográfica en un plano vertical llamado comúnmente perfil (Figura 5.9). El perfil es la proyección sobre un plano vertical de la superficie terrestre cortada por dicho plano.

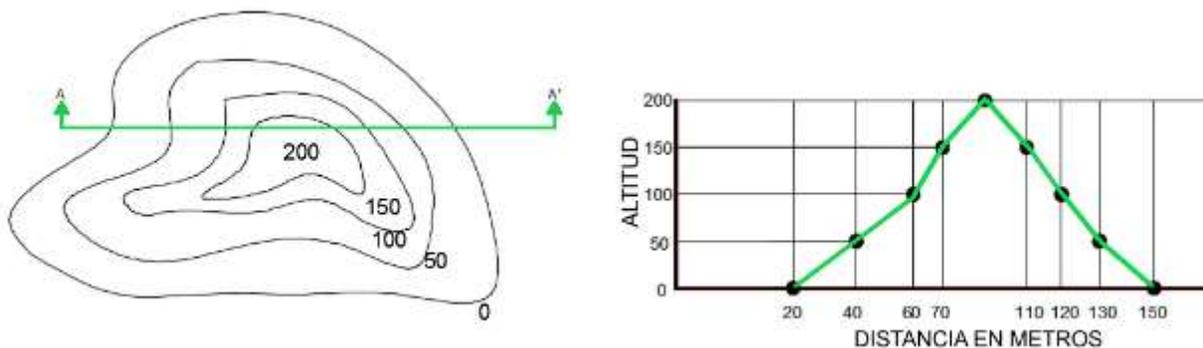


Figura 5.9 Perfil topográfico

Sobre el plano topográfico se pueden hacer cortes longitudinales y transversales para obtener información detallada del terreno. El perfil longitudinal comprende un conjunto de puntos a intervalos regulares a lo largo de un eje longitudinal, determinando las elevaciones en cada uno de los puntos (Figura 5.10), de esta manera se obtiene un trazo con las elevaciones que representan la morfología del terreno a lo largo del eje,

normalmente se muestra en dos escalas diferentes en los ejes horizontales y verticales exagerando el relieve en la vertical, usualmente en una relación 5-10, respecto a la horizontal.

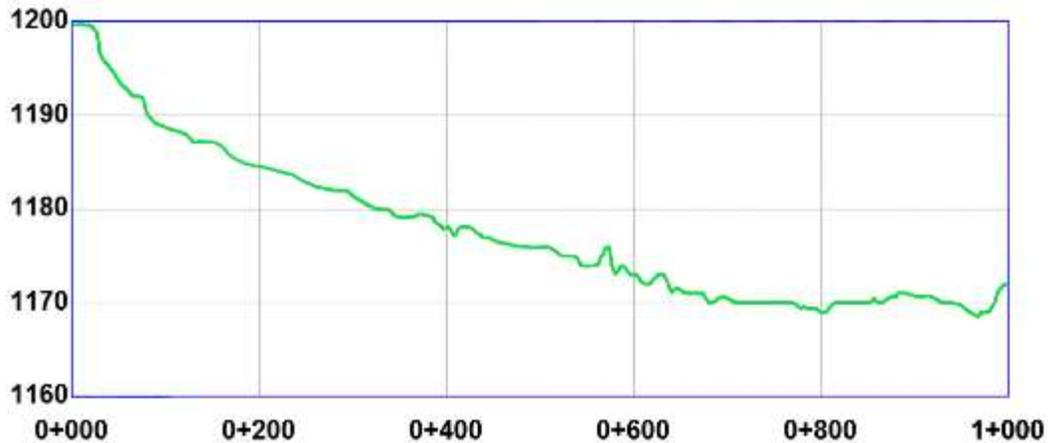


Figura 5.10 Perfil longitudinal

El perfil transversal se obtiene perpendicularmente al perfil longitudinal, mediante el trazo de un eje con puntos sobre el mismo del cual se obtienen sus valores de elevación. El perfil permite representar la morfología del terreno y normalmente se utiliza como base para las mediciones superficiales y volumétricas a lo largo del eje longitudinal, para lo cual se hace una serie de cortes transversales a lo largo del mismo, en puntos seleccionados. En ocasiones es interesante tener perfiles transversales a un cauce o canal como el mostrado en la Figura 5.11.

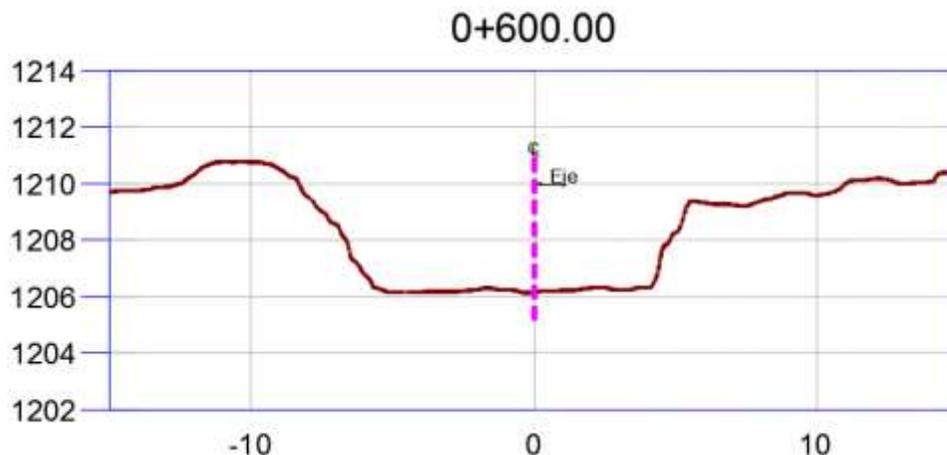


Figura 5.11 Corte transversal al eje longitudinal

5.1.5 Procedimiento para generar planos topográficos apoyados con drones

El flujo de trabajo para la obtención de planos topográficos usando la técnica fotogramétrica apoyada por VANT consiste básicamente en una misión de vuelo, apoyo topográfico, adquisición de las imágenes y procesamiento y cálculo.

5.1.5.1 Misión de vuelo

Una misión es un elemento de planificación estratégica en donde se formulan los objetivos detallados del vuelo y actividad o tarea que realizará el VANT, se constituye por las acciones que se deben ejecutar mediante la comunicación con el VANT para transmitir las órdenes y recibir la telemetría, con datos de velocidad, altura y posición. La misión la ejecuta el sistema de control de vuelo autónomo.

Una misión se realiza con software especializado (UgCS, Mission Planner, etc.) donde se programa una ruta de vuelo que se ejecutará de forma autónoma. La misión se programa para una superficie mayor de la zona de interés (Figura 5.12) para que cuando se procesen los datos se tenga información en las orillas.

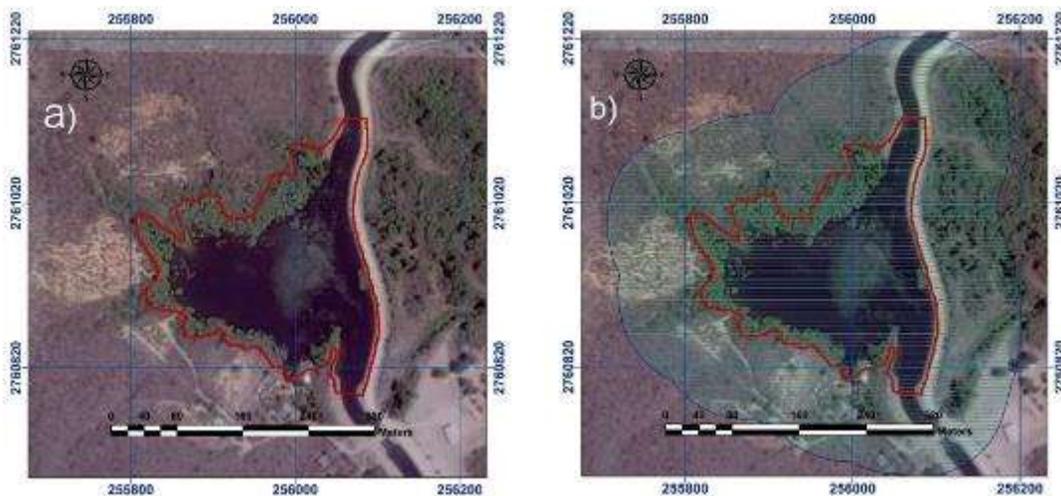


Figura 5.12 a) Área de estudio y b) área de vuelo

Una ruta de vuelo se diseña en base a la resolución espacial que se pretende obtener (o la escala) y a los traslape frontal y lateral entre las imágenes, Eisenbeiss *et al.* (2005) indican que es necesario tener por lo menos un traslape frontal y lateral del 70 %, que permita hacer coincidir los puntos clave en múltiples imágenes y con ello aumentar la exactitud y fiabilidad de los resultados. En una ruta de vuelo se programan los

desplazamientos, la velocidad del VANT, tipos de vueltas, incluso, el punto que debe estar apuntando la cámara en todo momento, o el lugar en que deberá obtener la imagen, o la inclinación de la cámara en ese punto. Los resultados de una ruta son el número de imágenes, altura media y duración del vuelo. La duración total del vuelo no debe sobrepasar la capacidad de la batería, si esto ocurre se deben programar más de una ruta.

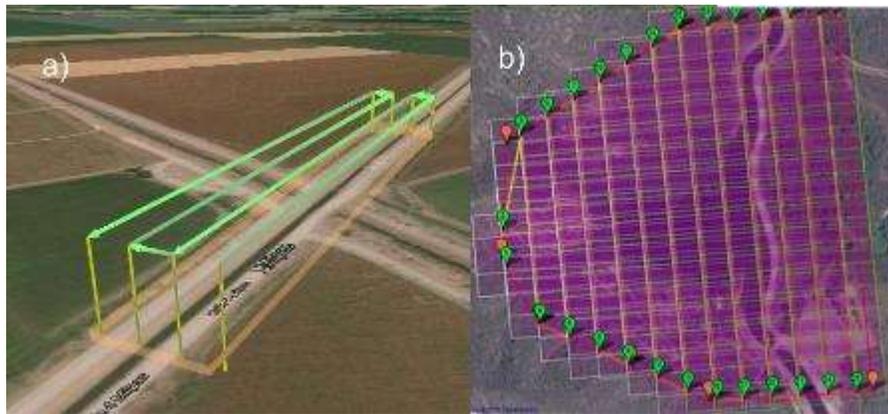


Figura 5.13 Ruta de vuelo con el software a) UgCS y b) Mission Planner

5.1.5.2 Apoyo topográfico

El apoyo topográfico que se basa en la obtención de las coordenadas de determinados puntos sobre el terreno sirve para la correcta georeferenciación de los productos cartográficos. Estos puntos sobre el terreno se conocen como puntos de control, añadido a ello existen puntos de verificación que sirven para determinar la precisión de los productos.



Figura 5.14 Levantamiento de puntos de control

Conocer la zona de estudio servirá para determinar la posición de los puntos de control, los cuales antes del vuelo se reparten estratégicamente en toda la zona, no deben ser ubicados debajo de árboles o lugares transitados por vehículos, para que sean identificados claramente en las imágenes y evitar errores de apreciación.

5.1.5.3 Adquisición de imágenes

Después de la etapa anterior, se realiza el vuelo y la capturan de las imágenes aéreas. Según la misión de vuelo se ejecutará la ruta donde se tomarán las imágenes en cada punto programado. Tras finalizar el plan de vuelo se realiza la descarga de datos de telemetría e imágenes para el posterior procesamiento de dicha información (Figura 5.15).

5.1.5.4 Procesamiento de imágenes

En esta etapa se hace uso de software especializado para el procesamiento de las imágenes obtenidas desde el VANT en modelos digitales.

Generalmente, el flujo de trabajo de los softwares fotogramétricos se basan en la alineación de las imágenes, construcción de nube de puntos densa, mallado y generación del modelo digital de superficie y ortomosaico. Antes de la construcción de la nube de puntos densa se identifican en las imágenes los puntos de control (Figura 5.16).



Figura 5.15 Imagen tomada con un VANT a 40 m de altura



Figura 5.16 Identificación de un punto de control, Sinaloa en una imagen de un canal de riego en Los Mochis, Sinaloa

Para aplicaciones topográficas, previo a la generación de la malla, se realiza una clasificación de la nube de puntos densa en tres clases: terreno, objetos y ruido; los puntos de ruido y objetos se eliminan y se realiza el mallado de los puntos de terreno para obtener un modelo digital de terreno (MDT) (Figura 5.17).

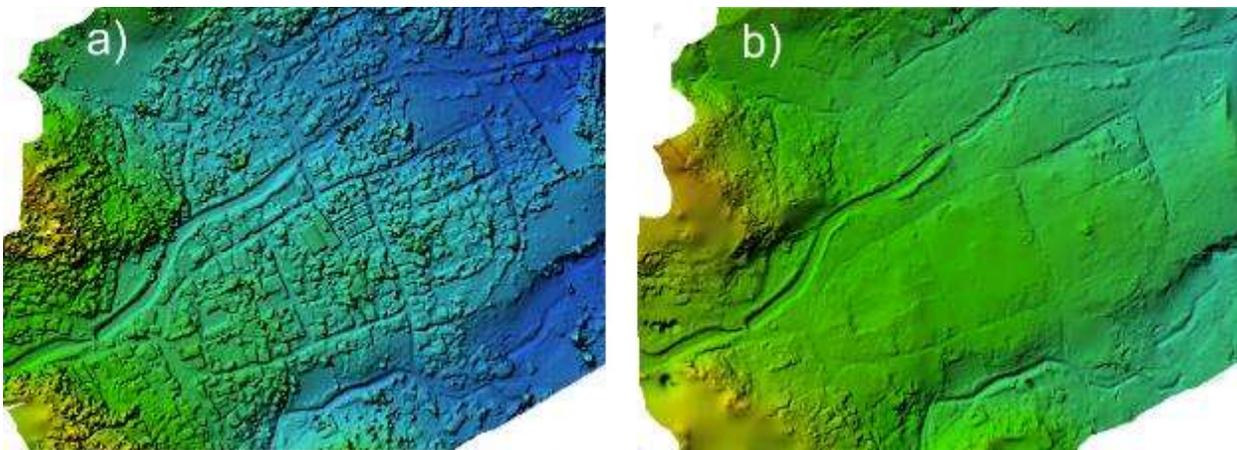


Figura 5.17 Modelos digitales: a) de superficie y b) de terreno

5.1.5.5 Estimación de la precisión

La evaluación de la calidad del MDT se hace a través de la medición de los errores entre la elevación considerada por el modelo y mediciones precisas de puntos conocidos (puntos de verificación) (Fuentes, Bolaños, & Rozo, 2012).

La precisión se calcula con el parámetro de exactitud: Cuadrado medio del error (RMSE por sus siglas en inglés *Root Mean Square Error*) el cual es una medida de dispersión de la distribución de frecuencias de los residuales que es sensible a grandes errores. La precisión dependerá de la cantidad de puntos de control y su ubicación en la zona y de los traslapes frontal y lateral.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (Z_{mod} - Z_{obs})^2}{n}}$$

donde Z_{mod} = Coordenadas Z extraídas del MDT en los puntos de verificación, Z_{obs} = Coordenadas de los puntos de verificación medidas con el GPS RTK y n = número de datos.

5.1.5.6 Curvas de nivel y planos topográficos

En esta etapa se hace uso de algún software de diseño asistido por computadora (CAD) que permita el trabajo con modelos digitales. Mediante el MDT se generan las curvas de nivel en el entorno del software, el intervalo depende del objetivo del estudio.

Si se desea la obtención de perfiles longitudinales (Figura 5.18) y transversales (Figura 5.19) es necesario seleccionar un eje y el intervalo entre los perfiles transversales.

El plano topográfico contiene información del relieve de la superficie terrestre, representado como curvas de nivel o mediante perfiles extraídas del MDT, además incluye la localización de la zona de estudio, escala cartográfica y el sistema de coordenadas.

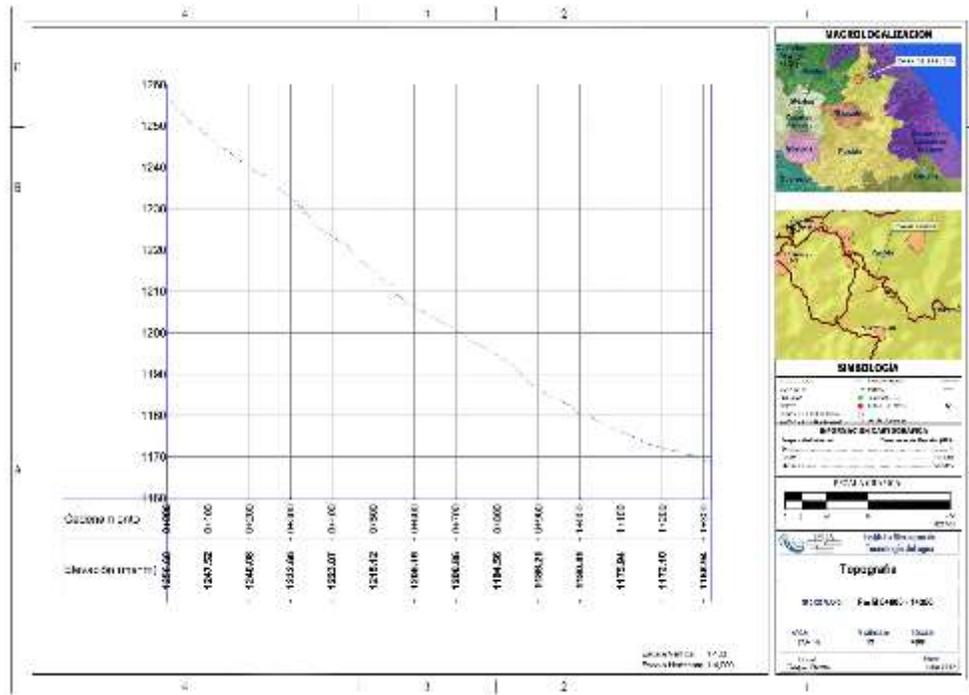


Figura 5.18 Plano de perfiles longitudinal

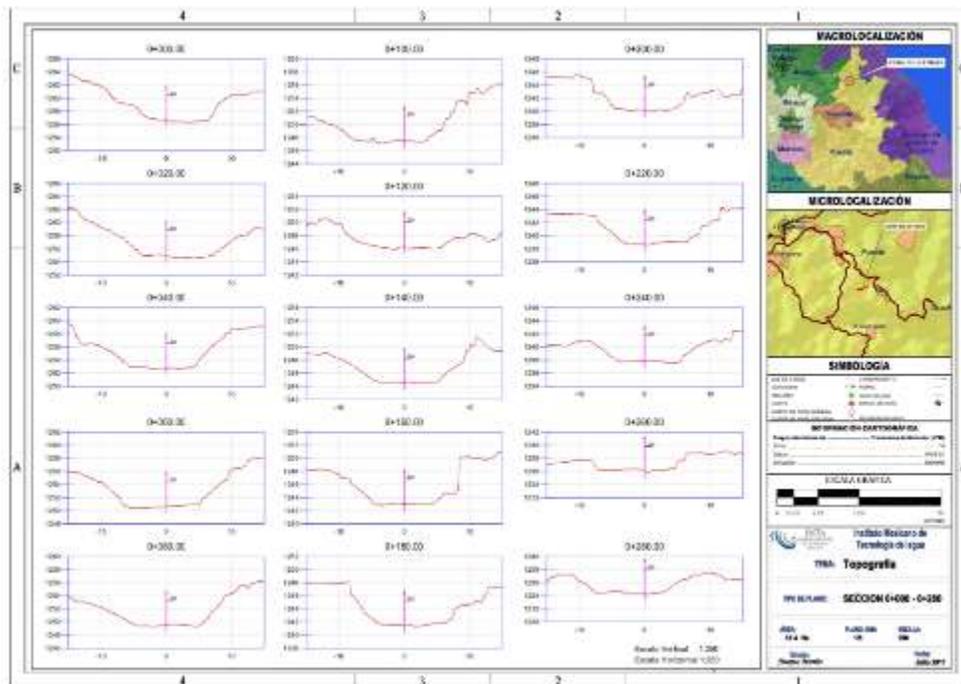


Figura 5.19 Plano de perfiles trasversales al eje longitudinal

5.2 Productos derivados de imágenes multiespectrales tomadas con VANT

5.2.1 Monitoreo y manejo de cultivos

Durante los últimos años las aplicaciones de drones han aumentado en diversos campos, por ejemplo en el manejo forestal, Berra *et al.* (2016) evaluaron el potencial de las imágenes adquiridas por un VANT para dar seguimiento a los cambios estacionales en el dosel de árboles caducifolios y coníferas, para lo cual usaron una cámara digital Panasonic DMC-LX5 a bordo de dos VANT de ala fija, los resultados mostraron que las imágenes permitieron un monitoreo de la fenología del dosel de cada árbol con gran precisión, demostrando el alto potencial de esta tecnología geoespacial para caracterizar especies que por su altura son de difícil acceso.

Otra aplicación con enorme potencial en agricultura es la adquisición de información detallada de los cultivos, en especial cuando las plantas se encuentran en etapas tempranas de crecimiento y es común la aparición de malezas, en estos casos el uso de satélites y aviones no brinda la suficiente precisión y detalle, por lo que los VANT representan una opción para identificar malezas y cuantificar la superficie afectada. Por ejemplo, en España Peña *et al.* (2013) y Pérez-Ortiz *et al.* (2016) utilizaron un VANT para discriminar y cuantificar la cantidad de maleza en cultivos de girasol y maíz (Figura 5.20), para lo cual emplearon dos cámaras (una multispectral de seis bandas y otra RGB de bajo costo) a bordo de un cuadricóptero para la captura de imágenes, y para el procesamiento se usó el análisis de imágenes por objetos (OBIA) mediante métodos de aprendizaje y patrones de entrenamiento combinado con técnicas de selección de patrones.

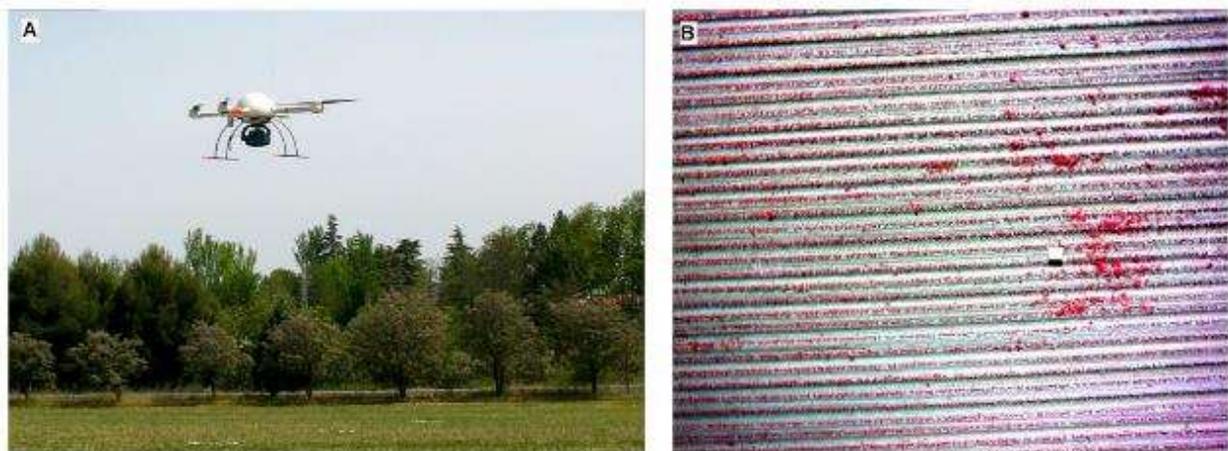


Figura 5.20 a) Cuadricóptero y cámaras visible y multiespectral utilizado para la toma de imágenes, b) imagen multiespectral de un cultivo de maíz

Los resultados obtenidos indicaron que es posible discriminar la maleza de manera automática, con mínima intervención del usuario y con alta precisión, la Figura 5.21 muestra la imagen original y la procesada donde se observa la separación de la maleza y del cultivo.

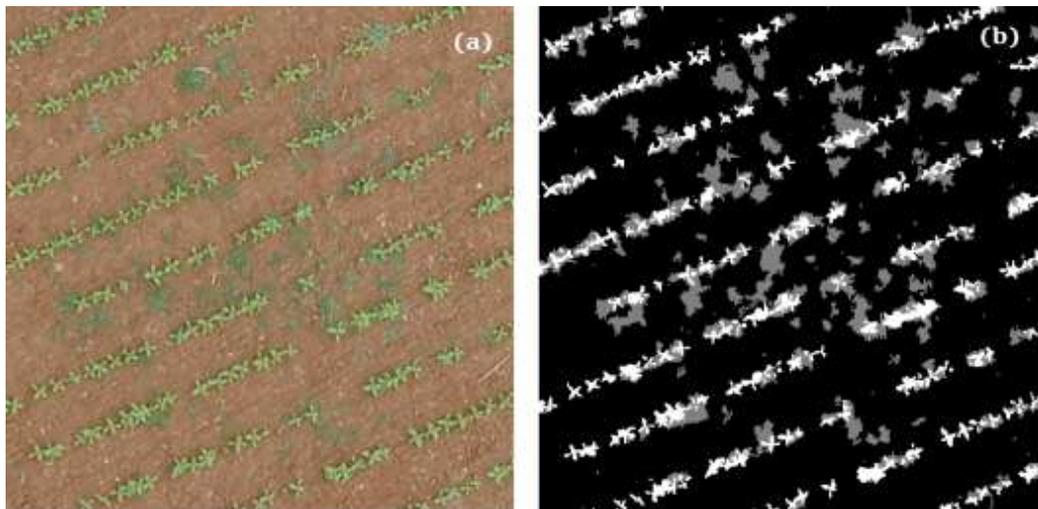


Figura 5.21 (a) Imagen original. (b) Imagen procesada donde cada color representa una clase (negro = sin vegetación, blanco = cultivo y gris = maleza)

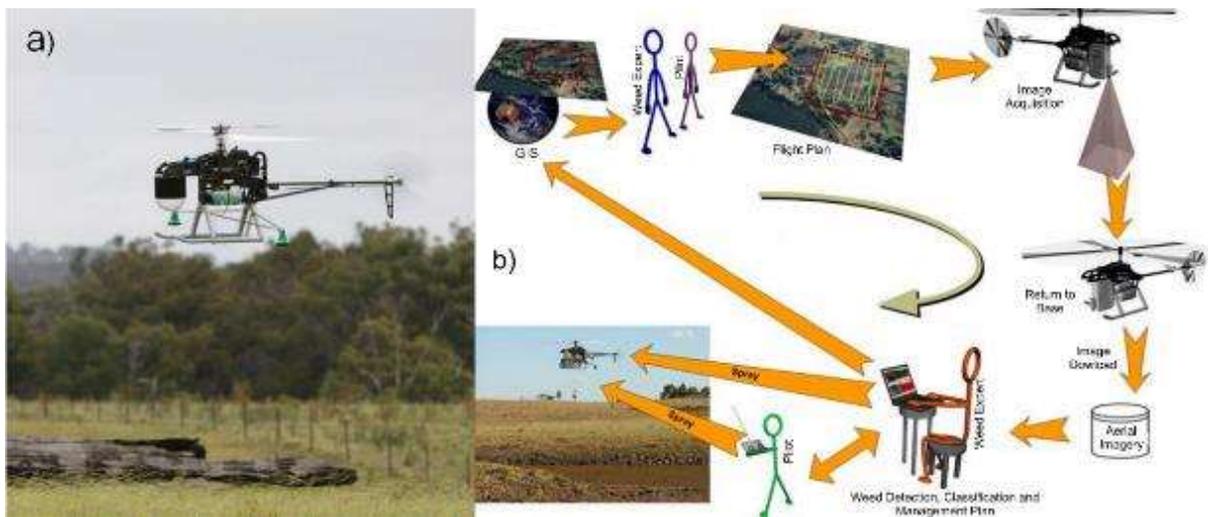


Figura 5.22 a) Prototipo de VANT equipado con cámara de video y fotográfica y sistema de pulverización para el control de malezas, b) procedimiento del sistema de control de malezas acuáticas a partir de un VANT (Göktoğan *et al.*, 2010)

Las malas hierbas son una amenaza importante en pastizales e industrias de producción primaria pues compiten con especies nativas, pueden agravar la degradación del suelo y reducen la productividad agrícola y forestal. Göktoğan *et al.* (2010) usaron un VANT tipo helicóptero como herramienta para la vigilancia y manejo de malas hierbas acuáticas en lugares inaccesibles. El VANT controlado remotamente con video en vivo y telemetría está equipado con sensores de bajo costo (Hitachi HV-F31) y un sistema de pulverización para control de malezas (tanque de líquido para pulverización, bomba, sistema de control y fuente de alimentación) (Figura 5.22a). El sistema fue diseñado para identificación y control de malezas acuáticas siguiendo los pasos mostrados en la Figura 5.22b.

5.2.2 Estudio y monitoreo de vida silvestre y conservación

Los VANT tienen aplicaciones relacionadas a la vida silvestre y conservación de fauna, por ejemplo, en Sudáfrica, Vermeulen *et al.* (2013) los usaron para el monitoreo de caza ilegal en especies grandes como rinocerontes mediante el uso de un VANT (Easy Fly St-330) equipado con una cámara digital Panasonic Lumix LX-3, video cámara GoPro Hero2 y cámara de video térmica de onda larga Thermoteknix Micro CAM. Los resultados mostraron la utilidad de la tecnología para el conteo de rinocerontes, detección de cazadores furtivos y vigilancia de vallas, además permitió un ahorro de tiempo y recursos.

En Burkina Faso, Mulero-Pázmány *et al.* (2014) utilizaron un VANT (Gatewing X100) equipado con una cámara Ricoh GR III para monitoreo de grandes mamíferos, el estudio demostró que a una altura de 100 m o más no existe reacción de los animales y es posible adquirir imágenes claras de mamíferos grandes como elefantes, que permiten estimar densidad poblacional y dar seguimiento a grupos de animales de una manera más eficiente (Figura 5.23). Ambos estudios mostraron éxito en el conteo de rinocerontes y elefantes con cámaras estándar RGB, sin embargo, el costo de investigación con VANT para el caso de elefantes (por su etología) no es competitivo respecto a aeronaves tripuladas, debido a la limitada autonomía de los VANT.

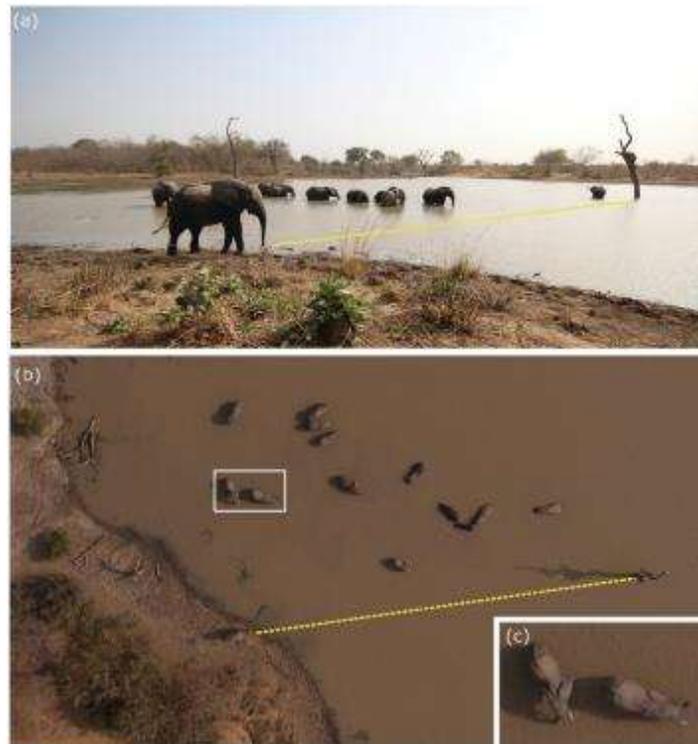


Figura 5.23 (a) Imagen en tierra y (b) Imagen aérea de un grupo de elefantes. La línea amarilla punteada en ambas imágenes enlaza dos elementos referenciados (un elefante y un árbol). La imagen (c) es una ampliación de parte de la imagen aérea (Vermeulen *et al.*, 2013)

Martin *et al.* (2012) utilizaron un VANT para estudiar la distribución espacial de especies salvajes como cocodrilos y manatíes en Florida, Estados Unidos (Figura 5.24), en este caso se usó un dron para obtener fotografías aéreas con una cámara visible RGB, en una primera fase se usaron pelotas de tenis marcadas para entrenar a los algoritmos de reconocimiento de patrones, una vez confirmada la confiabilidad del método se monitorearon grupos de animales de cocodrilos y manatíes, su ubicación y patrón de movimientos se correlacionaron con otras variables climáticas como la temperatura para encontrar un modelo que permita predecir su distribución. Los resultados obtenidos indicaron que la tecnología de VANT representa una alternativa confiable y ecológicamente viable para este tipo de trabajos además que permite estudiar especies salvajes de manera segura sin poner en riesgo la vida de personas.

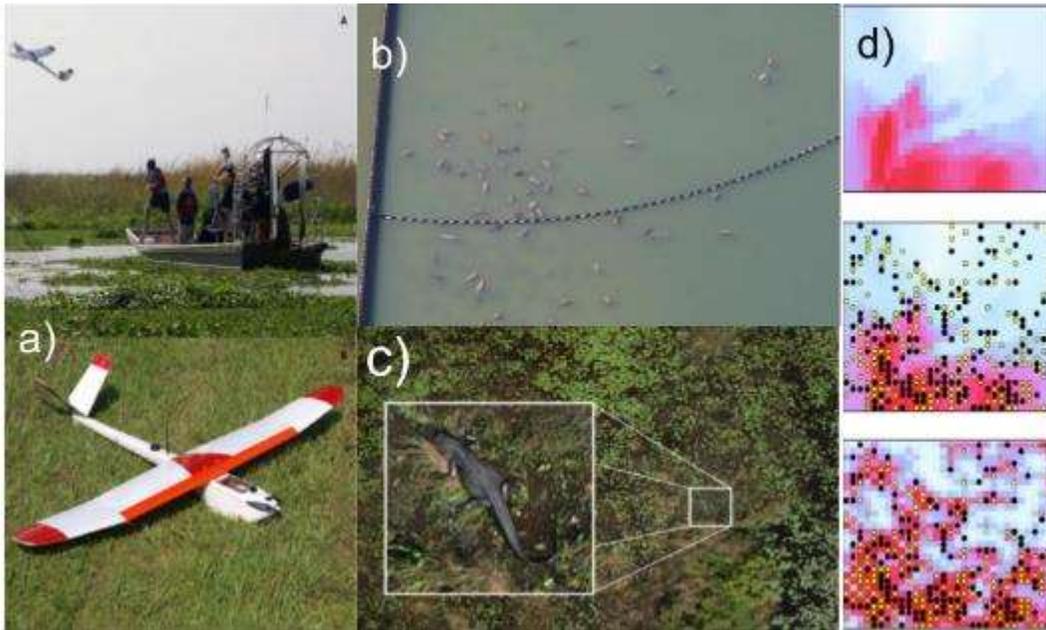


Figura 5.24 Monitoreo de vida salvaje mediante el uso de VANT a) VANT equipado con cámara RGB, b) Fotografía aérea de manatíes, c) fotografía aérea de cocodrilos, d) modelos de distribución de especies (Martin *et al.*, 2012)

5.2.3 Monitoreo de desastres naturales y zonas de alto riesgo

Los VANT han sido utilizados en los últimos años para estudiar eventos extremos como inundaciones y analizar los fenómenos hidrológicos que los ocasionan con una alta resolución espacial que permite reconocer características de la superficie con gran detalle que con otro tipo de tecnologías (satélites o aviones) no es posible.

De Cubber *et al.* (2014) monitorearon un evento de inundación ocurrido en los Balcanes en 2014 (Figura 5.25a), en una zona plagada de minas antipersonales y que representan condiciones de alto riesgo para la seguridad humana, para esto utilizaron un dron cuadrirotor ICARUS equipado con una cámara visible de alta resolución (Figura 5.25b) para sobrevolar el área afectada y capturar fotografías aéreas, el objetivo fue generar mapas y modelos de elevación de alta resolución para evaluar daños en la infraestructura civil y localizar explosivos desplazados por la inundación. Los datos obtenidos con los drones permitieron detectar fisuras en casas (Figura 5.25c), determinar la ubicación óptima para la instalación de bombas de alta presión para drenar el agua de la zona urbana (Figura 5.25d), y generar mapas con la nueva ubicación de las minas antipersonales.



Figura 5.25 a) Fotografía aérea tomada con un dron ICARUS, b) Dron cuadrirotor ICARUS c) Detección de fisuras en casas, d) Ubicación de bombas de alta presión, e) Ortomosaico elaborado a partir de fotografías aéreas (De Cubber *et al.*, 2014)

En Japón, (Watanabe & Kawahara, 2016) se estudió la efectividad y precisión del uso de drones para generar modelos de elevación digital de canales fluviales, en este trabajo se adquirieron imágenes con una cámara digital de bajo costo a bordo de un multicoptero, a una altitud de 100 m, antes y después de una inundación artificial (Figura 5.26). Mediante un proceso de restitución fotogramétrica se generaron modelos digitales de elevación y se compararon con los datos obtenidos mediante el método convencional utilizando puntos de control terrestre ubicados con un receptor

RTK-GPS y estación total, los resultados demostraron que el MED tuvo un error promedio de 4 cm (y un máximo de 7 cm) sobre el canal por donde escurrió la avenida y en las zonas donde la altura y densidad de vegetación era baja, además quedó en evidencia que el MED puede captar la espesa cubierta vegetal sobre los bancos de arena.



Figura 5.26 a) Multicóptero equipado con cámara fotográfica, b) área de estudio sobre la zona de inundación artificial, c) fotografía aérea de la zona inundada, d) sección transversal obtenida a partir del modelo de elevación digital (MDE) en el cual se aprecian con detalle las diferencias de altura de la vegetación y el canal (Watanabe & Kawahara, 2016).

Finalmente se probaron diferentes lentes en las cámaras (vidrio, plástico, polarizados y sin polarizar), los resultados indican que el lente de vidrio de 35mm provee mejor precisión y resolución que los lentes de plástico de 16 mm y que el uso de lentes polarizados no mejora la precisión sobre todo en las zonas con cubierta de agua, esto se debe probablemente a la reflexión del agua que no tiene un gran efecto en la creación de MED sobre todo en las zonas sobre la superficie del agua.

5.2.4 Monitoreo y cuantificación de la erosión de suelos

El modelado de la erosión se basa en datos de campo, y aunque son muy útiles las imágenes a grandes escalas espaciales como de satélites o aviones, rara vez están disponibles con la resolución espacial requerida, Pineux *et al.* (2017) realizaron un estudio en Bélgica, enfocado en el uso de VANT (Gatewing X100) para generar modelos digitales de elevación de alta resolución para localizar y cuantificar las tasas de erosión y deposición en una cuenca hidrográfica agrícola, derivadas de las series temporales de

alta resolución de MDE comparados con mediciones en campo. El trabajo mostró que se pueden realizar MDE de muy alta resolución (tamaño de pixel de hasta 6 cm) para ubicar los flujos de escorrentía y medir diferencias de elevación antes y después de precipitaciones fuertemente erosivas, a partir de estas diferencias es posible calcular el volumen de tierra arrastrado en cada evento para proponer planes de manejo o control de la erosión. El estudio se desarrolló en un periodo de 2 años, y aunque demostró lo promisorio de la técnica, destaca lo difícil de cuantificar la erosión en periodos tan cortos mediante comparaciones de MDE (Figura 5.27).

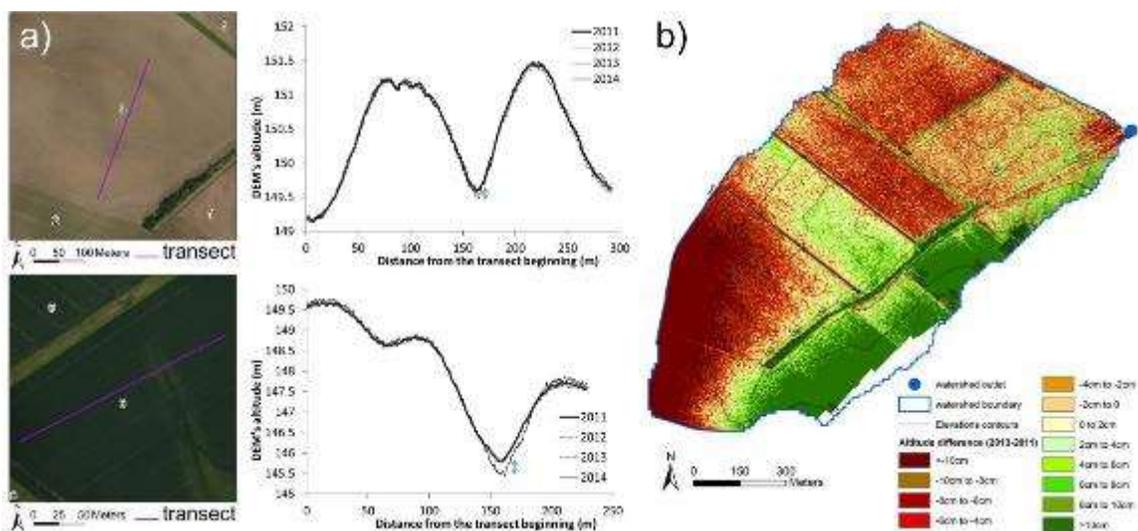


Figura 5.27 a) Transectos altitudinales a lo largo del área de estudio sobre canales de escurrimiento y b) MDE construido a partir de fotografías tomadas con un VANT y fotogrametría (Pineux *et al.*, 2017)

Otro problema que puede ser estudiado con gran precisión con el uso de VANT es el deslizamiento de tierras o derrumbes, por ejemplo, en Indonesia los deslizamientos son desastres naturales muy recurrentes que requieren monitoreo frecuente para planificar las actividades antes y después del desastre, en este país. Permata *et al.* (2016) realizaron un estudio orientado a elaborar ortomosaicos con imágenes de alta resolución adquiridas por un VANT y un modelo digital de superficie (MDS), y compararlo con el modelo de elevación digital (MED) generado a partir de un estudio en tierra utilizando estaciones totales y teodolitos. Se usó un dron DJI Phantom 3 Professional, equipado con una cámara 1/2.3" de 12.4 megapíxeles. A partir del ortomosaico generado con las fotografías (Figura 5.28a) se generó el MDS (Figura 5.28b) el cual fue comparado con el MDE obtenido con datos de la estación total (Figura 5.28c). Los resultados indican que el uso del VANT proporcionó gran detalle de las zonas inaccesibles del deslizamiento y de áreas donde no fue posible tomar medidas con la estación total, además la

obtención de datos por medio del VANT duro dos días y significó un ahorro de al menos un día de trabajo comparado con estación total.

En Marruecos, D'Oleire-Oltmanns *et al.* (2015) realizaron un mapeo de cárcavas con análisis de imágenes basado en objetos, para ello se utilizaron imágenes de alta resolución del satélite QuickBird2 y fotografías adquiridas con VANT de ala fija (SIRIUS de MAVinci) equipado con una cámara Panasonic Lumix GF1. Las imágenes satelitales detectaron áreas afectadas y su extensión, mientras que las fotografías adquiridas por el VANT permitieron la identificación y mapeo de cárcavas individuales. Las fotografías aéreas fueron procesadas para elaborar un ortomosaico (Figura 5.29a) y un MDS (Figura 5.29b) con una resolución de 2 a 5 cm.

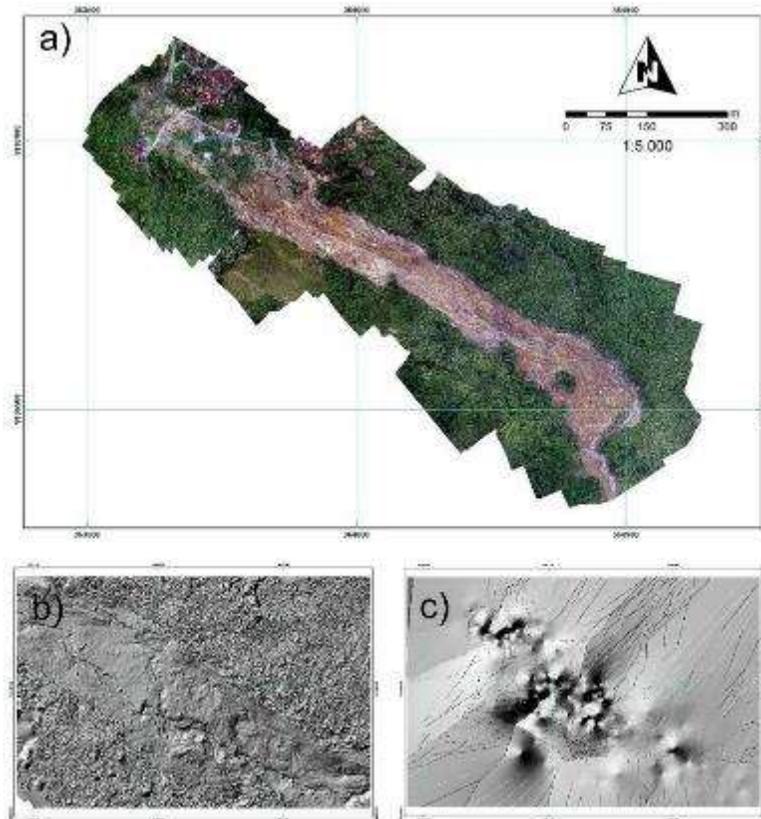


Figura 5.28 a) Ortofotomosaico obtenida a partir de imágenes tomadas con un VANT, b) MDS obtenida por fotogrametría, c) MDE obtenido a partir de datos obtenidos con estación total y teodolito (Permata *et al.*, 2016)

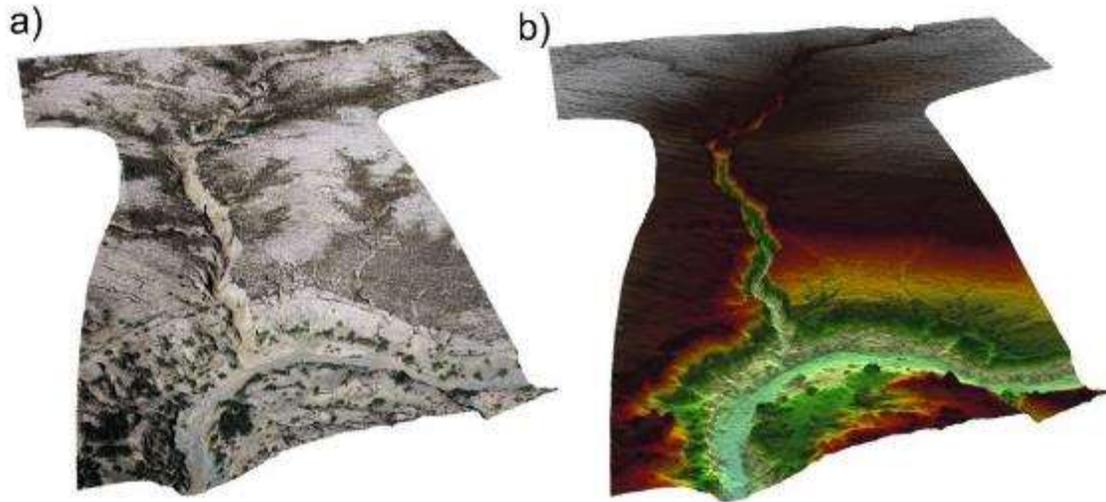


Figura 5.29 a) Ortomosaico del sitio de estudio, b) Modelo Digital de Superficie (MDS) elaborados con fotografías aéreas obtenidas con un VANT (D'Oleire-Oltmanns *et al.*, 2015)

El ortomosaico y MDS obtenidos con el VANT permitieron detectar las cárcavas individuales hasta con 67 % de precisión comparado con el recorrido de campo, además, a partir del MDS se recreó la superficie de terreno antes de las cárcavas, para calcular el volumen de suelo perdido, con esta información fue posible realizar la modelación hidrológica de las subcuencas.

5.2.5 Geomorfología de glaciares

La recesión de hielo en glaciares, deja descubierto relieve que podría ser utilizado para inferir las condiciones paleoclimáticas, sin embargo, estas características geomorfológicas son frágiles, susceptibles de sufrir cambios por viento, tiempo, agua, entre otros factores y solo distinguibles a escalas muy pequeñas, por lo tanto, su estudio requiere de información oportuna y de alta resolución, para esto Ely *et al.* (2016), utilizaron un VANT tipo hexacóptero modelo DroidWorx equipado con una cámara réflex Nikon D5300 (24 megapíxeles de un solo lente) para estudiar los cambios en un pequeño glaciar en Suecia (Figura 5.30a).

Con las imágenes adquiridas de los vuelos a una altitud de entre 100 y 120 m se creó un modelo de elevación digital con una resolución horizontal de 2 cm (Figura 5.30b), los datos geoespaciales se utilizaron para crear un mapa geomorfológico en el que se describen con gran detalle morrenas, abanicos aluviales, canales y surcos de flujo (Figura 5.30c), así mismo se obtuvo medidas morfológicas (longitud, ancho y relieve) de los surcos más pequeños que hasta entonces no había sido posible con las

metodologías convencionales, los errores encontrados fueron de 4 cm con respecto a los puntos de control terrestre obtenidos con GPS diferencial.

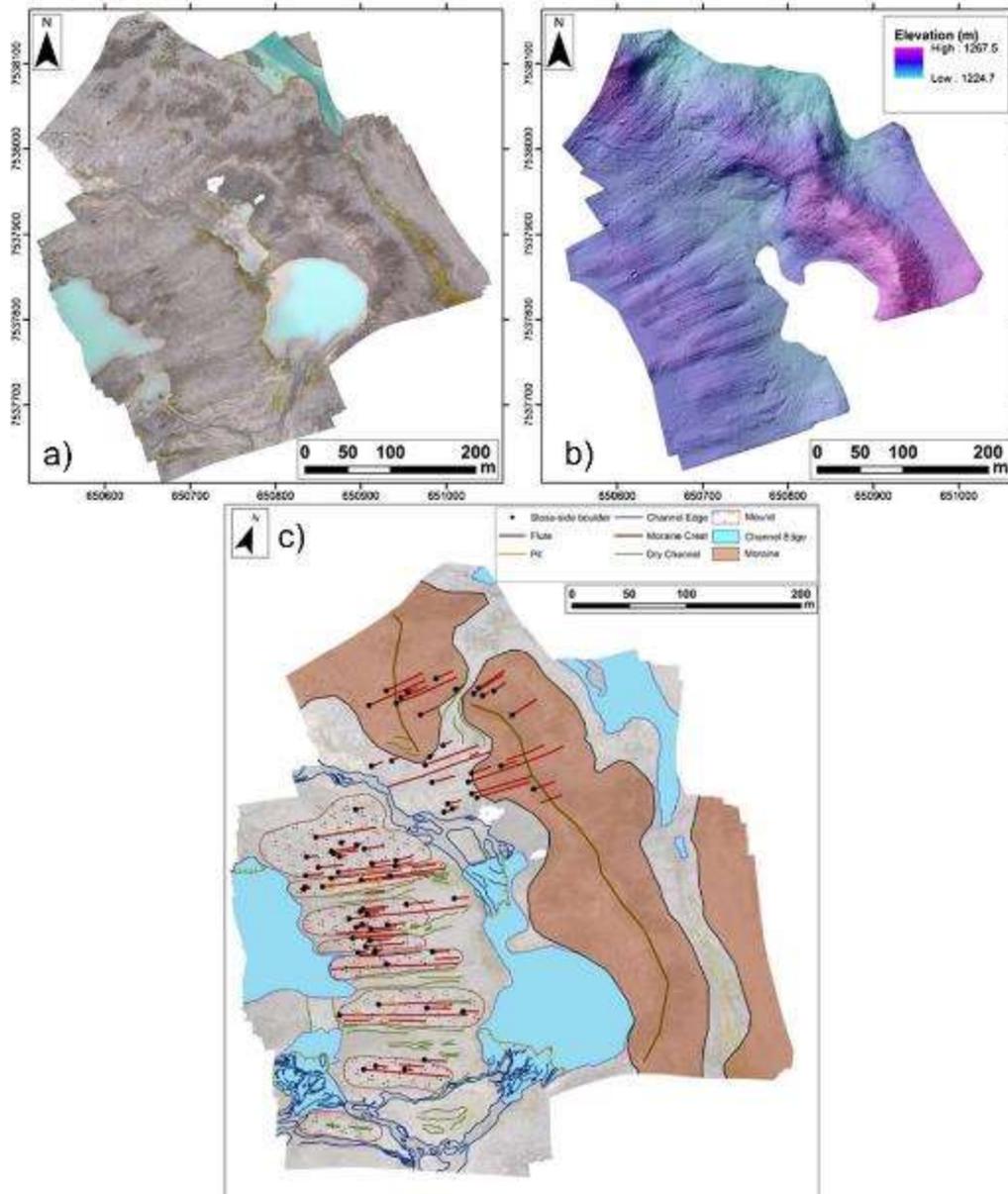


Figura 5.30 a) Ortofoto del glaciar estudiado. b) MDE de alta resolución obtenido a partir de fotogrametría con imágenes obtenidas por un VANT, c) Mapa geomorfológico detallando características morfológicas del glaciar estudiado (Ely *et al.*, 2016).

5.3 Inspección de obras hidráulicas

México es un país con gran tradición en torno a la construcción de obras hidráulicas, concretamente se estima que existen más de 4,000 presas que proporcionan una diversidad de servicios, siendo el sector agrícola mayormente beneficiado con estas estructuras como fuentes de abastecimiento de las zonas de riego. Una presa o embalse, dependiendo de las funciones para la que es construida, puede tener diferencias significativas en cuanto a su funcionamiento y operación, desde su creación con el paso del tiempo. Por consiguiente, cada una de estas obras exige un manejo específico que garantice su funcionamiento.

La vida útil de una presa se puede alargar cuando es operada de manera adecuada y recibe mantenimiento frecuente como requerido para este tipo de infraestructura. Sin embargo, esto no siempre sucede, de forma que la aparición de fallas o grietas en la estructura o alguna de sus obras auxiliares, pueden constituir un riesgo a mediano o largo plazo, primero de la estructura, pero lo más importante de las personas que la operan y en casos extremos, provocando daños colaterales en la población o infraestructura localizada aguas abajo de esta.



Figura 5.31 Supervisión de la construcción de una canal apoyada con drones en una zona de en el norte de Sinaloa, México

Para realizar la inspección de obras hidráulica se requiere elaborar un programa de trabajo que incluya en un primer nivel, realizar una o más visitas a cada una de las obras hidráulicas especificadas para realizar una inspección física del estado actual de la obras y sus componentes (por ejemplo para una presa su vertedor, obra de toma, etc.), con la finalidad de documentar los siguientes aspectos:

- a. Estado físico de la obra
- b. Determinar la calidad de la operación de la obra
- c. Identificar posibles fallas en la obra hidráulica principal o en alguna de sus obras auxiliares.

Es un reto incorporar el uso de VANT como herramienta para el seguimiento y supervisión de la construcción de obras de infraestructura hidráulica como se muestra en la Figura 5.31 para el caso del revestimiento de canales de riego.

5.3.1 Accesorios requeridos para inspecciones

Para realizar las inspecciones de obras hidráulicas se requiere de contar con varios accesorios del VANT que a continuación se indican.

Cámaras. Los detalles a captar en una supervisión son observables mediante una cámara visible con la capacidad de montarse en un dron, pero de alta resolución; entre los detalles importantes por ejemplo en una cortina son cuarteaduras o grietas, filtraciones que en ocasiones pueden ser pequeñas, pero generalmente no menores a 1 cm, que sería la precisión de la cámara a utilizar.

Para la supervisión de presas uno de los factores críticos es el talud de la cortina o el vertedor; en este caso es importante tener detalles de esta estructura por lo que un dron tipo rotor es más adecuado; así mismo es conveniente el montaje de una cámara en tres ejes de tal suerte que independientemente del movimiento del dron, la cámara siempre este dirigida hacia el objetivo.

Lentes. En este caso se prefiere una lente móvil, debido a que tiene la capacidad de hacer acercamiento (zoom) de alguna zona en específico. Actualmente con la ayuda de un sistema de visión en primera persona (FPV) es posible detectar en tiempo real imperfecciones de la zona que se supervisa, cuando esta imperfección es observada y se pretende un mayor detalle es posible realizar un acercamiento, por lo que se prefiere una lente móvil.

En cuanto a la resolución es posible colocar diferentes filtros en la lente; uno de los principales objetivos es detectar filtraciones por lo que una lente en el espectro diferente al visible podría facilitar un mosaico en falso color o simplemente la ausencia de reflexión que mostraría en color rojo la existencia de agua, la cual vista en una pared de una cortina puede significar una filtración y en función del tamaño requerir un aforo.

Monturas. Dependiendo de cuál sea el requerimiento de la inspección se puede seleccionar básicamente tres formas de atender la supervisión; modo de reconocimiento son grabar, modo de foto fija y modo de video. Para cada uno de los tres casos se

requiere de una estructura auxiliar o “montura” que será la plataforma de apoyo del VANT que transporta las cámaras.

A excepción del modo de reconocimiento donde solo se hace el vuelo con la cámara del VANT y esta no guarda la información, es decir, solo es observable en ese momento y puede hacerse en primera persona. Una segunda manera de hacer la supervisión es acoplar una montura especial al VANT que permite el manejo preciso de la cámara (Figura 5.32).



Figura 5.32 Montura especial de VANT para montar cámara de alta resolución para realizar actividades de supervisión de infraestructura hidráulica

5.3.2 Tipos de inspección

5.3.2.1 Primer orden

México tiene construidas más de 4000 presas, la mayoría de ellas con una antigüedad de más de 100 años y por lo tanto, las condiciones bajo las cuales fueron construidas han cambiado, se han establecido asentamientos humanos en su vecindad y al paso del tiempo se han deteriorado. Tiene la Comisión Nacional del Agua de México la

responsabilidad de vigilar las condiciones de las presas a través de la inspección de presas en el país a través del Programa Nacional de Seguridad de Presas.

A pesar que estas estructuras fueron diseñadas para resistir ciertas condiciones medioambientales y mecánicas, no está exenta de eventos extraordinarios que puedan ir deteriorando el funcionamiento y capacidad de la presa o algunas de sus partes y en consecuencia, la combinación de factores que incrementan su riesgo a una falla.

Es importante entonces realizar supervisiones frecuentes de las partes que componen una obra hidráulica; las Figura 5.33 y Figura 5.34 muestran en general los componentes básicos de la cortina de una presa.

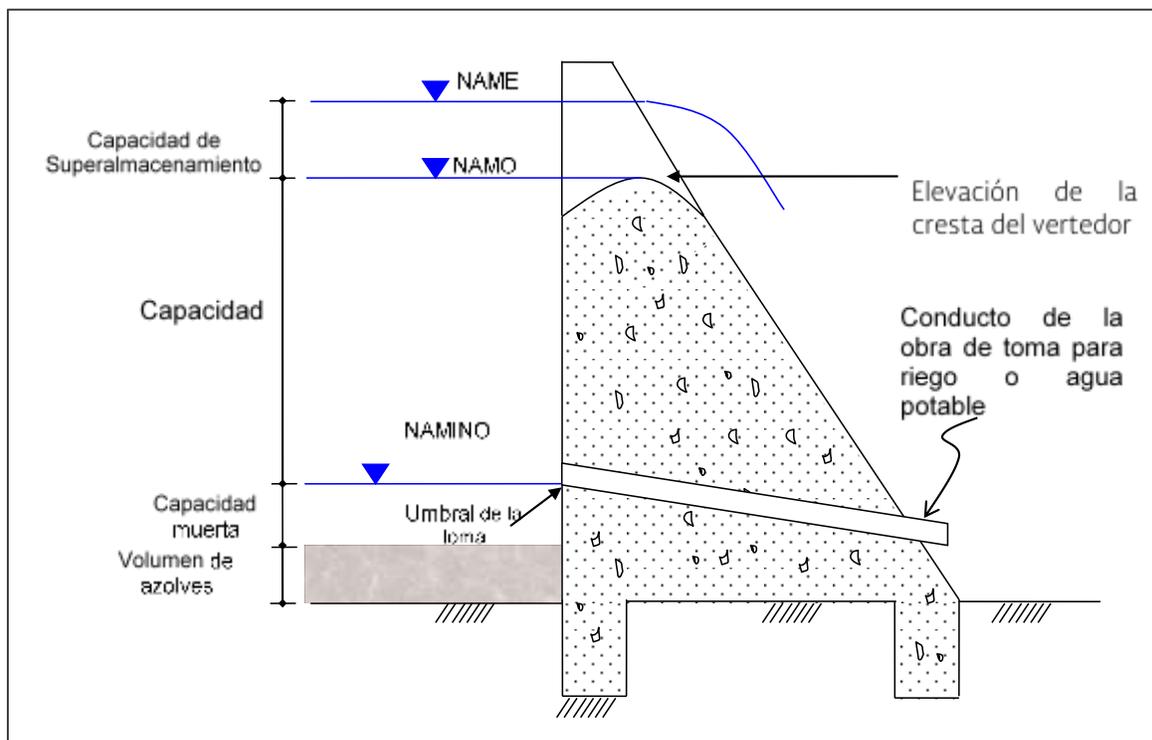


Figura 5.33 Partes básicas de la cortina de una presa (CNA)

La CONAGUA cuenta con los respectivos manuales y lineamientos para llevar a cabo la inspección de este tipo de infraestructura. A continuación, se muestran el esquema general para la supervisión de presas, dependiendo de sus características. Cabe mencionar que esta información está extraída del instructivo de la ficha de levantamiento de información básica de presas, a cargo de la gerencia del consultivo técnico y la subgerencia de seguridad de presas (CONAGUA, 2012).

En función de las características de estas partes es posible definir una clasificación y con ellos estar en posibilidades de realizar un monitoreo constante de tal manera de garantizar el funcionamiento adecuado de la presa y disminuir al máximo el riesgo de falla que pueda provocar daños parciales o totales a la obra, sino también a los asentamientos humanos aguas debajo de la presa. En este sentido la supervisión apoyada con drones es una herramienta que pueden apoyar el alcance y grado de detalle así como reducir tiempo y mano de obra de las actividades involucradas.

Las tablas de la 5.1 a la 9 (Manual CONAGUA) muestran las partes de la presa que deben ser revisadas; cortinas, obras de toma, embalse, etc., en general son estructuras fácilmente visibles desde el aire, en una inspección de tipo 1, es suficiente para realizar esta revisión con VANT, y dependiendo del tipo de cámara y dispositivos auxiliares, es factible de estimar los niveles en altura y estimación de superficies.

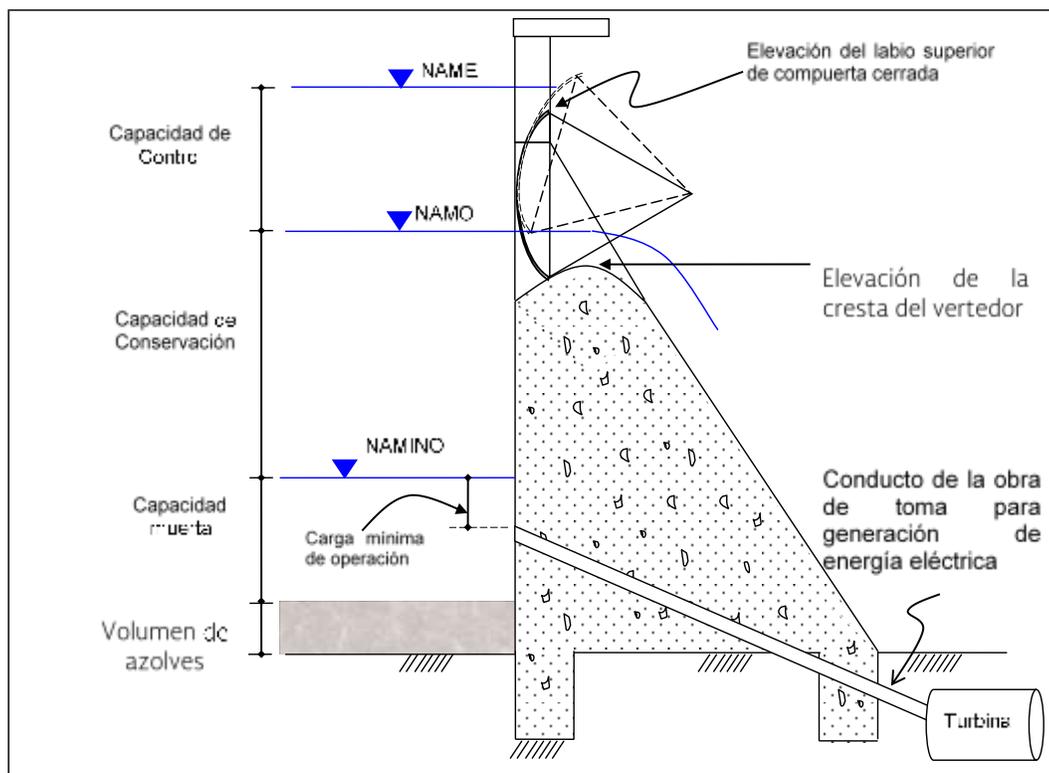


Figura 5.34 características de la presa con vertedor controlado

| | |
|---|---------------------------------|
| Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico | 5. Aplicaciones a la ingeniería |
|---|---------------------------------|

i. Cortinas

Tabla 5.1 Descripción de las características de la presa

| Núm. | Concepto | Requerimiento |
|---------------------|----------------------------------|--|
| 5.1 CARACTERÍSTICAS | | |
| 5.1.1. | Grande, mediana, pequeña o bordo | <p>Indicar de acuerdo con la siguiente clasificación si es:</p> <p>Presa grande.- Mayor o igual de 15.0 m de altura; con altura de 10 a 15 m y mayor o igual de 1.0 hm³ de capacidad de almacenamiento, más de 500 m de longitud de la cortina, capacidad de desagüe mayor de 2000 m³/s o con diseño especial.</p> <p>Presa mediana.- Mayor o igual de 5.0 m y menor de 15.0 m de altura, mayor o igual de 0.500 hm³ de capacidad de almacenamiento; mayores de 5 m con longitud mayor de 500 m o capacidad de desagüe mayor o igual de 100 m³/s</p> <p>Presa pequeña.- Menor de 5.0 m de altura y almacenamiento mayor o igual de 0.1 hm³ y menor de 0.5 hm³</p> <p>Bordo.- Menor de 5.0 m de altura y almacenamiento menor de 0.1 hm³</p> |
| 5.1.2 | Tipo | <p>Indicar el tipo de cortina:</p> <p>Rígida de sección gravedad</p> <p>Rígida de contrafuertes o machones</p> <p>Rígida de arco gravedad</p> <p>Rígida de arco</p> <p>Rígida de arcos múltiples</p> <p>Flexible de materiales térreos</p> <p>India</p> |

| Núm. | Concepto | Requerimiento |
|--------------|--------------------------------------|--|
| 5.1.3 | Material | Indicar el material de la cortina: Mampostería Concreto Muro de mampostería con respaldo de tierra Concreto compactado con rodillo (CCR) Homogénea de tierra Homogénea de tierra con cara de concreto Enrocamiento Enrocamiento con cara de concreto Materiales graduados |
| 5.1.4 | Altura máxima desde el desplante (m) | Indicar la altura máxima de la cortina en metros, desde el nivel de desplante (cimentación) de la presa |
| 5.1.5 | Altura máxima sobre el cauce (m) | Indicar la altura máxima de la cortina en metros, desde el lecho del cauce |
| 5.1.6 | Elevación de la corona (msnm) o (m) | Indicar la elevación de la cortina con relación al nivel medio del mar (msnm), o en cota arbitraria (m) |
| 5.1.7 | Longitud de la corona (m) | Indicar la longitud del cuerpo de la cortina en metros |
| 5.1.8 | Ancho de la corona (m) | Indicar el ancho de la corona en metros |
| 5.1.9 | Talud aguas arriba | Indicar la pendiente del talud o paramento de aguas arriba del cuerpo de la cortina (ejm V de vertical) |
| 5.1.10 | Talud aguas abajo | Indicar la pendiente del talud o paramento de aguas abajo del cuerpo de la cortina (ej. 2:1). |
| 5.1.11 | Altura del parapeto (m) | En caso de existir un parapeto de concreto o mampostería, indicar su altura en metros |
| 5.2 GALERÍAS | | |
| 5.2.1 | Longitud (m) | En caso de tener galerías la presa, indicar su longitud en metros |
| 5.2.2 | Tipo de sección | Indicar el tipo de sección de las galerías: Rectangular |

| | |
|---|---------------------------------|
| Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico | 5. Aplicaciones a la ingeniería |
|---|---------------------------------|

| Núm. | Concepto | Requerimiento |
|---------------|-------------------------------------|--|
| | | De herradura Circular De arco |
| 5.2.3 | Ancho de la galería (m) | Indicar el ancho o diámetro de la sección de la galería en metros |
| 5.2.4 | Altura de la galería (m) | Indicar la altura máxima de la galería en metros |
| 5.2.5 | Elevación de plantilla (msnm) o (m) | Indicar la elevación de la plantilla de la galería (msnm) o en cota arbitraria en metros |
| 5.3 DESPLANTE | | |
| | Suelo, roca, ambos o desconocido | Indicar si el desplante de la cortina está en suelo, roca, ambos o desconocido |
| 5.4 DIQUES | | |
| 5.4.1 | Número de diques | En caso de tener diques la presa, poner cuantos son |
| 5.4.2 | Altura (m) | Altura máxima desde el nivel de desplante, en metros |
| 5.4.3 | Longitud (m) | Longitud del dique medida sobre su corona, en metros |
| 5.5 | Comentarios del dique | Comentarios y observaciones con respecto al dique, si son necesarios |

ii. Vertedores

Tabla 5.2 Las características de los vertedores

| Núm. | Concepto | Requerimiento |
|------|----------------------------------|--|
| 6.1 | Libre, controlado o sin vertedor | Indicar si tiene vertedor y si es con descarga libre o controlada |
| 6.2 | Tipo | Indicar el tipo de vertedor: Cimacio Cresta recta Canal lateral Lavadero Semicircular |

| Núm. | Concepto | Requerimiento |
|------|---|--|
| | | Abanico Medio abanico Embudo Tipo U Laberinto Inflable Abatible Otro (especificar) |
| 6.3 | Elevación de la cresta (msnm) o (m) | Indicar la elevación de la cresta con relación a alguna estructura o nivel conocidos, en msnm o en metros |
| 6.4 | Longitud de la cresta (m) | Indicar la longitud de la cresta vertedora en metros |
| 6.5 | ¿Se ponen agujas? | Indicar si tiene o se ponen agujas u obturadores en el vertedor |
| 6.6 | Número de compuertas | Indicar el número de compuertas en cada vertedor |
| 6.7 | Tipo de compuertas | Indicar el tipo de compuertas: Radial Plana de ruedas De tambor |
| 6.8 | Ancho de compuerta (m) | Indicar el ancho de las compuertas en metros |
| 6.9 | Altura de compuerta (m) | Indicar la altura máxima de las compuertas en metros |
| 6.10 | Elevación labio superior de compuertas (msnm) o (m) | Indicar la elevación del labio superior de las compuertas (msnm), o cota arbitraria en metros, cuando están cerradas |
| 6.11 | Estructura disipadora | Indicar el tipo de estructura disipadora: Deflector o salto de sky Tanque amortiguador Descarga libre (no hay estructura) |
| 6.12 | Gasto máximo (m ³ /s) | Indicar el gasto máximo de diseño del vertedor |
| 6.13 | Gasto máximo combinado (m ³ /s) | Indicar el gasto máximo combinado de todos los vertedores de la presa trabajando simultáneamente |

| | |
|---|---------------------------------|
| Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico | 5. Aplicaciones a la ingeniería |
|---|---------------------------------|

| Núm. | Concepto | Requerimiento |
|------|-------------|---|
| 6.14 | Comentarios | Comentarios y observaciones que procedan con relación a los vertedores de la presas |

iii. Obra de toma

Tabla 5.3 Características de las obras de toma

| Núm. | Concepto | Requerimiento |
|------|--|---|
| 7.1 | Tipo | Indicar el tipo de obra de toma: Tubería a presión Torre galería Torre sumergida-tunel–tapón-tubería a presión Canal lateral Túnel a presión Túnel-lumbrera |
| 7.2 | Elevación del umbral (msnm) o (m) | Indicar la elevación del umbral o plantilla de la obra de toma, con relación a alguna estructura o nivel conocidos, en msnm o en metros |
| 7.3 | Número de conductos | Indicar el número de conductos que forman la obra de toma |
| 7.4 | Dimensiones de conductos (m) | Indicar las dimensiones de los conductos (ancho y alto, o diámetro) en metros |
| 7.5 | Capacidad (m ³ /s) | Indicar la capacidad de diseño de la obra de toma, en metros cúbicos por segundo |
| 7.6 | Tipo de válvulas o compuertas | Indicar el tipo de válvulas o compuertas que están instaladas en cada obra de toma |
| 7.7 | Número de válvulas o compuertas | Indicar el número de válvulas o compuertas instaladas en cada obra de toma |
| 7.8 | Dimensiones de válvulas o compuertas (m) | Indicar las dimensiones de las válvulas o compuertas en metros |

| | |
|---|---------------------------------|
| Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico | 5. Aplicaciones a la ingeniería |
|---|---------------------------------|

| Núm. | Concepto | Requerimiento |
|------|-------------------------------------|---|
| 7.9 | Gasto combinado (m ³ /s) | Indicar el gasto combinado de todas las obras de toma de la presas trabajando simultáneamente |
| 7.10 | Comentarios | Comentarios y observaciones que procedan con relación a las obras de toma de la presa |

iv. Otros desfogues

Tabla 5.4 Características de otros desfogues

| Núm. | Concepto | Requerimiento |
|------|-----------------------------------|--|
| 8.1 | Tipo | En caso de que la presa tenga otros desfogues indicar de que tipo (ejm desarenador o desagüe de fondo) |
| 8.2 | Elevación del umbral (msnm) o (m) | Indicar la elevación del umbral del desfogue (msnm) o en cota arbitraria en metros |
| 8.3 | Capacidad (m ³ /s) | Indicar la capacidad de cada desfogue en m ³ /s |
| 8.4 | Propósito | Indicar cuál es el propósito de cada desfogue |
| 8.5 | Comentarios | Comentarios y observaciones que procedan con relación a los desfogues |

Tabla 5.5 Características del cauce de aguas abajo

| Núm. | Concepto | Requerimiento |
|------|--|---|
| 9.1 | Capacidad de cauce (m ³ /s) | Indicar la capacidad de cauce aguas debajo de la presa en m ³ /s |
| 9.2 | Presas aguas abajo | Indicar cuales presas y a que distancia aguas abajo (en kilómetros) se ubican con respecto al sitio de la presa |
| 9.3 | Instrucciones especiales de operación | Indicar si existen algunas restricciones para la descarga al cauce aguas debajo de la presa |
| 9.4 | Comentarios | Comentarios y observaciones que procedan con relación a los desfogues |

5.3.2.2 Supervisión visual de presa Los Sabinos

Tal como se ha mencionado, los datos requeridos para la inspección de presas consisten en una supervisión visual. A continuación, se describe como ejemplo el resultado de la supervisión de La presa Los Sabinos, en el municipio de Chapala, Jalisco. Esta presa fue construida sobre el cauce del arroyo Los Sabinos para aprovechar sus aguas y destinarla al riego de 400 ha y para abrevadero. La conclusión de esta obra hidráulica fue en el año 1973 por parte de las instituciones antecesoras a la CONAGUA.



Figura 5.35 Inspección técnica a la presa de almacenamiento “Los Sabinos”, localizada sobre el arroyo Los Sabinos, en el municipio de Chapala, Jalisco. Fuente: Google Earth

La supervisión de una presa inicia con la ubicación geográfica, ya sea por medios electrónicos o históricos. Con la ubicación teórica de la presa, será posible la planeación de la visita en cuanto a tiempo de recorrido y principales vías de comunicación. En procedimiento de supervisión una vez que se llega al lugar físico, se procede con la revisión visual de los componentes de la presa. La presa consta de una cortina flexible homogénea con protección de enrocamiento. La altura máxima es de 13.5 m, el ancho de corona es de 4.5 m.

Con respecto a la obra de toma, esta cuenta con un puente de maniobras con un muro con compuerta tipo Miller, situada en ambas márgenes de la cortina. La capacidad de la obra está diseñada para un gasto combinado de 2 m³/s. De la mayoría de las pesas hay

un expediente técnico, el cual describe los componentes de la misma y los datos de diseño, aunque desde luego muchos de estos datos se van modificando con el tiempo.

La presa que se describe cuenta con un vertedor es de cresta recta, con descarga libre, el cual se encuentra ubicado en la margen derecha de la cortina y tiene una longitud de 37.3 m. La capacidad de desfogue es de 36.8 m³/s. Las capacidades de la obra de almacenamiento en los diferentes niveles se indican en el siguiente cuadro.

Tabla 5.6 Capacidad de almacenamiento de la presa

| | Almacenamiento Hm ³ | Elevación msnm |
|----------------------|--------------------------------|----------------|
| Azolves | 0.3 | 1524.38 NAMIN |
| Útil | 2.2 | 1528.35 NAMO |
| Súper almacenamiento | 0.5 | 1528.95 NAME |
| Total | 3.0 | |

5.3.2.3 Informe de la visita de inspección

i. Cortina

Dependiendo del tipo de material con el que se haya construido, la cortina es una parte de la presa que más directamente impacta en la seguridad de la misma. La mayoría de las veces la cortina es usada como vía de tránsito, en cuyo caso está supeditada a un continuo paso de vehículos, peatones, semovientes etc., que pueden ocasionar malformaciones en la misma, como la que se observa en la Figura 5.36.



Figura 5.36 Detalle del ancho de la corona de la presa Los Sabinos

En la corona de la presa supervisada, se observaron depresiones por el paso constante de vehículos y ganado. No se encontraron fantasmas en los hombros de la corona, algunos de los cuales se localizaron tirados y deteriorados. Se detectó también la presencia de hormigueros. Ambos hombros se percibieron erosionados debido al paso de ganado.

ii. Talud aguas arriba

Los principales rasgos para evaluar la cortina de la presa son los taludes, tanto aguas arriba como aguas abajo. Es muy común observar filtraciones, hendiduras, etc., en esta parte de la presa, lo cual puede ser un indicativo de revisión mayor con el fin de evitar problemas mayores. En el talud aguas arriba se observó vegetación herbácea y arbustiva en un 70 % de la superficie. Se detectaron partes descubiertas donde no existe enrocamiento (Figura 5.37). Se distinguieron sumideros y presencia de erosión ocasionado por el paso de ganado.



Figura 5.37 Detalle del talud aguas arriba de la presa Los Sabinos

iii. Talud aguas abajo

El talud aguas abajo se encontró con una cobertura vegetal de un 60 % de su superficie. Se detectaron sumideros y erosión debido al paso del ganado (Figura 5.38).



Figura 5.38 Aspecto del talud aguas debajo de la cortina de la presa Los Sabinos

iv. Vertedor

Existen diversos tipos de obras de excedencias que deben ser revisados; estrictamente esta estructura hidráulica es diseñada para evacuar el excedente de agua de la presa, no obstante, pueden ocurrir eventos extraordinarios que excedan el caudal máximo de diseño de la obra, y en consecuencia degrade el material o funcionamiento de la estructura. En cuyo caso es importante detectar malformaciones, grietas o problemas físicos de dicha estructura. El vertedor de la presa se localiza en la margen derecha de la cortina. Esta estructura se encontró con presencia en la entrada de lirio acuático. La cresta, tiene una amplitud de 8.5 m y es usada como vado para el paso vehicular. En la parte horizontal y el talud, fue posible apreciar desgaste en sus partes, desprendimiento de la parte superficial y baches en la parte alta del mismo (Figuras 5.39 y 5.40).



Figura 5.39 Detalle del vertedor de demasías en la presa Los Sabinos



Figura 5.40 Características de las paredes del vertedor de la presa Los Sabinos

En la rápida del vertedor se detectaron agrietamientos longitudinales del tamaño del vertedor, así como partes desconchadas y refuerzos expuestos a la intemperie. Por otro lado, en la descarga hay presencia de lirio acuático que se encuentra obstruyendo esta estructura. En el muro guía margen izquierda, se observaron refuerzo expuesto, en el hombro existe vegetación arbustiva en un 70 % y presencia de algunos árboles (Figura 5.41). Al final de esta estructura se detectó erosión en la ladera.



Figura 5.41 Detalle del paramento del vertedero

Desde el muro de encauce de la margen izquierda se detectaron partes desprendidas y grietas (Figura 5.41). Así mismo, en el muro de encauce margen derecha, se distinguieron grietas y refuerzos expuestos. En el hombro se observó vegetación en un

90 %. Al final de esta estructura se encontraron troncos y una parte de la ladera erosionada (Figura 5.42).



Figura 5.42 Muro de encauce en la margen derecha

v. Obra de toma

La obra de toma de la margen derecha cuenta con un puente de maniobras y la estructura que soporta la compuerta deslizante. Aun cuando esta estructura se encuentra operando por las necesidades de la misma, es evidente la invasión de malezas acuáticas y lirio acuático como se muestra en la Figura 5.43.



Figura 5.43 Detalles de la obra de toma

En un acercamiento con dicha estructura, fue posible observar en el marco de la compuerta sin empotrar al muro. El vástago se encuentra doblado, inconvenientemente despintado y sin engrasado del mecanismo. Se encontró otra estructura amarrada con lazos, pero debido al nivel del embalse y presencia de lirio acuático no se pudo precisar su naturaleza. En el muro de la compuerta se observaron grietas y partes de concreto desprendidas. La obra de toma del margen izquierdo cuenta con un puente de maniobras y un muro que aloja la compuerta deslizante (Figura 5.44).



Figura 5.44 Compuerta de toma



Figura 5.45 Detalle de la salida de la obra de toma

En el muro de la compuerta se observaron grietas mínimas. La estructura de salida de la obra de toma margen derecha, se observó en mal estado, parcialmente obstruido con tierra y piedra que se han deslavado de la parte superior. En los muros de mampostería se encuentran cubiertos por vegetación en un 80 %. La estructura de salida de la obra de toma margen izquierda se encuentra obstruida por tierra y piedras, y los muros de mampostería se encuentran con presencia de vegetación en un 90 % (ver Figura 5.45).

vi. Embalse

En este caso la presa es categorizada pequeña, por lo que resulta barato en tiempo el posible recorrido por el embalse; No obstante, esta situación puede cambiar en presas consideradas grandes, de acuerdo con su clasificación en cuyo caso el uso de un dron, puede aún más atenuar su viabilidad. En esta presa se observaron diversas malezas acuáticas en el embalse. Se detectaron cercas para ganado invadiendo el embalse. El agua del embalse se percibió contaminada debido a la descarga de aguas negras vertidas al arroyo “Los Sabinos”, uno de los afluentes de esta presa (Figura 5.46).



Figura 5.46 Embalse de la presa

vii. Recomendaciones

Se sugiere realizar los siguientes trabajos en las estructuras de la presa:

- Desmonte en todo el cuerpo de la cortina y eliminar hormigueros
- Restringir el paso de ganado por taludes
- Rehabilitar fantasma ubicados en ambos hombros de la corona
- Eliminar obstrucciones por lirio en vertedor y canal de descarga
- En la obra de toma margen derecha rehabilitar marco de la compuerta deslizante. Reparar vástago doblado, rehacer torre para óptima operación. Engrasado del mecanismo y aplicación de pintura anticorrosiva
- En obra de toma margen izquierda reparar vástago doblado, rehacer torre para óptima operación. Aplicación de grasa y pintura anticorrosiva el mecanismo de elevación. En ambas obras de toma colocar rejillas para evitar obstrucciones,
- Realizar trabajos de conservación en las estructuras de salida
- Eliminación de descargas de aguas negras al arroyo que sirve de afluente a esta presa

| | |
|---|---------------------------------|
| Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico | 5. Aplicaciones a la ingeniería |
|---|---------------------------------|

5.3.2.4 Seguridad

Cuando la supervisión está terminada, es posible emitir un juicio de riesgo de acuerdo con las especificaciones indicadas en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Clasificación de riesgos de acuerdo con la CONAGUA

| Nivel de riesgo | Descripción |
|-----------------|---|
| Alto | La falla de la obra es muy probable y en caso de suscitarse, las afectaciones incluyen la pérdida de vidas humanas o daños ambientales graves |
| Medio | La falla de la obra es probable y en caso de suscitarse, las afectaciones serían principalmente materiales y ambientales limitadas |
| Bajo | La falla de la obra es poco probable y en caso de suscitarse, las afectaciones materiales serían escasas y limitadas a la obra |
| Nulo | No hay riesgo de falla |

La seguridad de la presa está en función del riesgo que pueda tener y poner en riesgo vidas humanas, ya sea con el desbordamiento del cauce, con la falla de la estructura, o de algunos de sus componentes. Cuando en la supervisión de tipo uno se detecta riesgos potenciales, viene la inspección tipo dos, donde hay que revisar con instrumental y personal especializado.

5.3.3 Supervisión de presas con drones

Con el antecedente de la supervisión de las presas a nivel nacional indicado en secciones anteriores, el uso de drones en este ámbito tiene gran significancia y aplicación directa. En la supervisión se ha descrito las partes físicas a las que se somete una supervisión de tipo 1. La cortina, el embalse, estructuras de excedencias, etc., son en su totalidad estructuras que pueden ser vistas desde el aire y con ello dominar una mayor superficie.



Figura 5.47 Presa Miguel Hidalgo

El uso de drones en ingeniería, en este punto representa una herramienta que puede reducir tiempo y costo en esta actividad. Cabe destacar también que la supervisión se debe realizar de manera recurrente a las más de 4000 presas que existen en el país, por lo que la reducción de tiempos y costos es un reto de los responsables de realizar este tipo de supervisiones. La Figura 5.47 presenta imágenes obtenidas desde un dron en la presa Miguel Hidalgo que abastece al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, en Sinaloa. Un vuelo sobre vertedor con el dron equipado con una cámara produjo las imágenes que se muestran en detalles de las compuertas y vertedor.

Las imágenes obtenidas con drones proporcionan información detallada rápida del estado físico funcional de la obra. Es posible obtener detalles de la operación de las estructuras, como el mostrado en la Figura 5.48, donde se expone el desgaste de la cresta del vertedor en el punto donde convergen los flujos de la salida de las compuertas.



Figura 5.48 Detalle del desgaste del vertedor en la zona de convergencia de flujos

Lo anterior es solo una muestra del potencial uso de los vehículos aéreos no tripulados en la supervisión de obras hidráulicas, y en específico las presas independientemente de su tipo. La mayor importancia estriba en que es una actividad que se ha de llevar a cabo, de manera periódica, que involucra el uso de recursos, humanos, económicos y tiempo. Será posible en un futuro incorporar a la normativa oficial para la supervisión de este tipo de estructuras el uso de vehículos aéreos no tripulados.

5.4 Agricultura de precisión

5.4.1 Estimación de altura y área foliar

5.4.1.1 Altura de árboles

Uno de los retos actuales en la gestión de cultivos es la estimación de su altura a lo largo de su ciclo fenológico. Zarco Tejada *et al.* (2014) realizaron un estudio para estimar la altura de un follaje discontinuo (huerta) usando un VANT equipado con una cámara de bajo costo. El VANT de ala fija usado tuvo una envergadura de 2 m con una plataforma

de 5.8 kg de carga y una velocidad terrestre de 63 kmh^{-1} . El VANT usado fue capaz de obtener imágenes en una zona de estudio de 158 ha en una sola misión de vuelo. Se definió la trayectoria de vuelo para generar gran traslape entre imágenes (Figura 5.49).

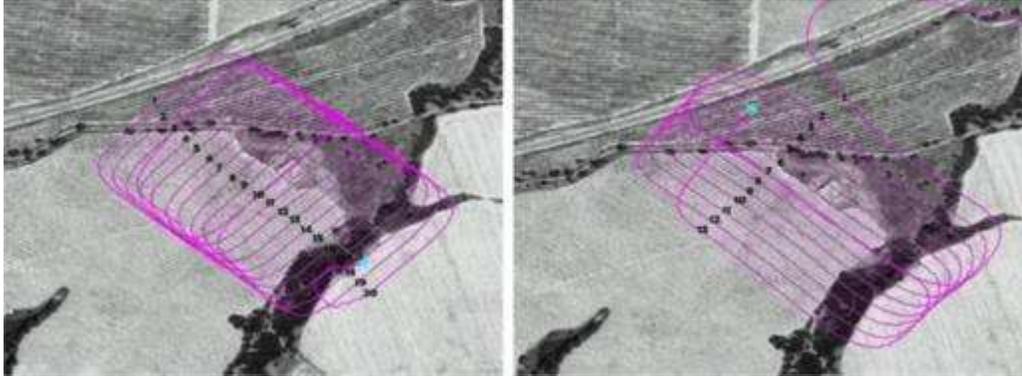


Figura 5.49 Rutas de vuelos usados (este-oeste y norte sur) para asegurar gran traslape de imágenes (Zarco-Tejada *et al.*, 2014)

Se obtuvieron imágenes de alta resolución VHR (5 m pixel^{-1}) para generar orto-mosaicos y modelos digitales de superficie usando métodos automáticos de reconstrucción 3D (Figura 5.50). Los autores indican que la metodología usada fue robusta para estimar la altura del árbol y detalle de su corona (Figura 5.51).



Figura 5.50 Escena tridimensional generada con métodos de foto-reconstrucción usando plataformas basadas en VANT (Zarco-Tejada *et al.*, 2014)

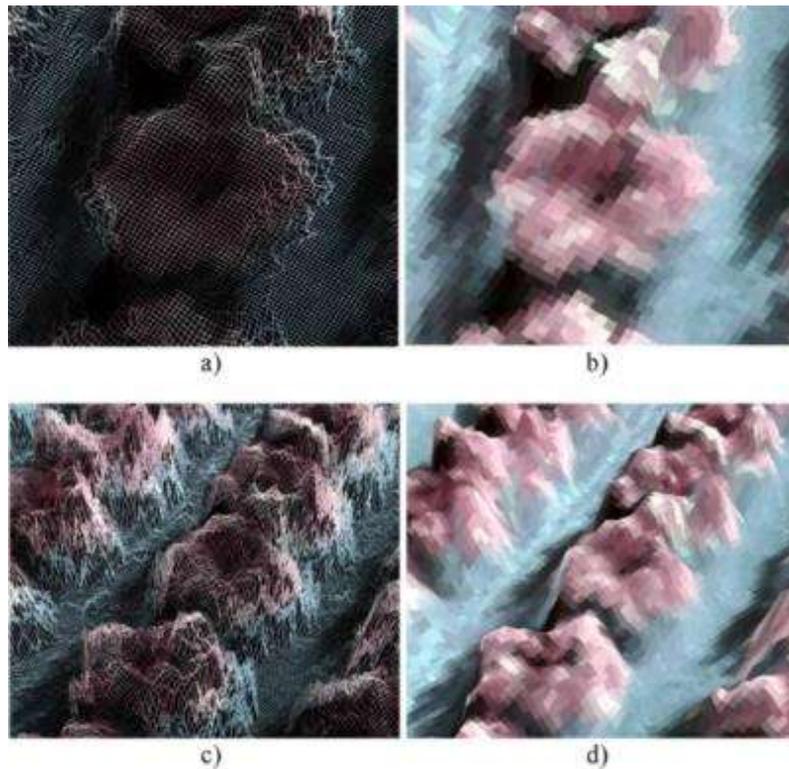


Figura 5.51 Foto-reconstrucción de un árbol obtenida de un VANT (a y c) así como obtenidas con ortomosaicos usando DSM (b y d) para detallar la corona de los árboles (Zarco-Tejada *et al.*, 2014)

5.4.2 Seguimiento de enfermedades en cultivos

5.4.2.1 Detección de enfermedades

Otra aplicación de los VANT ha sido orientada a detectar la presencia de la enfermedad Huanglongbing (HLB) o enverdecimiento de los cítricos, que es una de las enfermedades que afectan los cítricos en USA, México y varias regiones del mundo. Sin embargo, su control óptimo depende de su detección y diagnóstico oportuno. García-Ruiz *et al.* (2013) presentaron una metodología exitosa para su detección remota basada en el uso de VANT. Se usaron seis bandas espectrales (de 530 a 900 nm) y siete índices de vegetación derivados de una mezcla de bandas. Los valores de los índices NIR-R y reflectancia a 710 nm fueron estadísticamente diferentes para diferenciar entre árboles sanos e infectados. Imágenes espectrales de árboles de cítricos fueron adquiridas a dos alturas usando una plataforma basada en el uso de VANT. Se usaron imágenes aéreas adquiridas con un aeroplano y con un VANT para detectar árboles sanos (H) e infectados con HLB (D) como se muestra en la Figura 5.52.

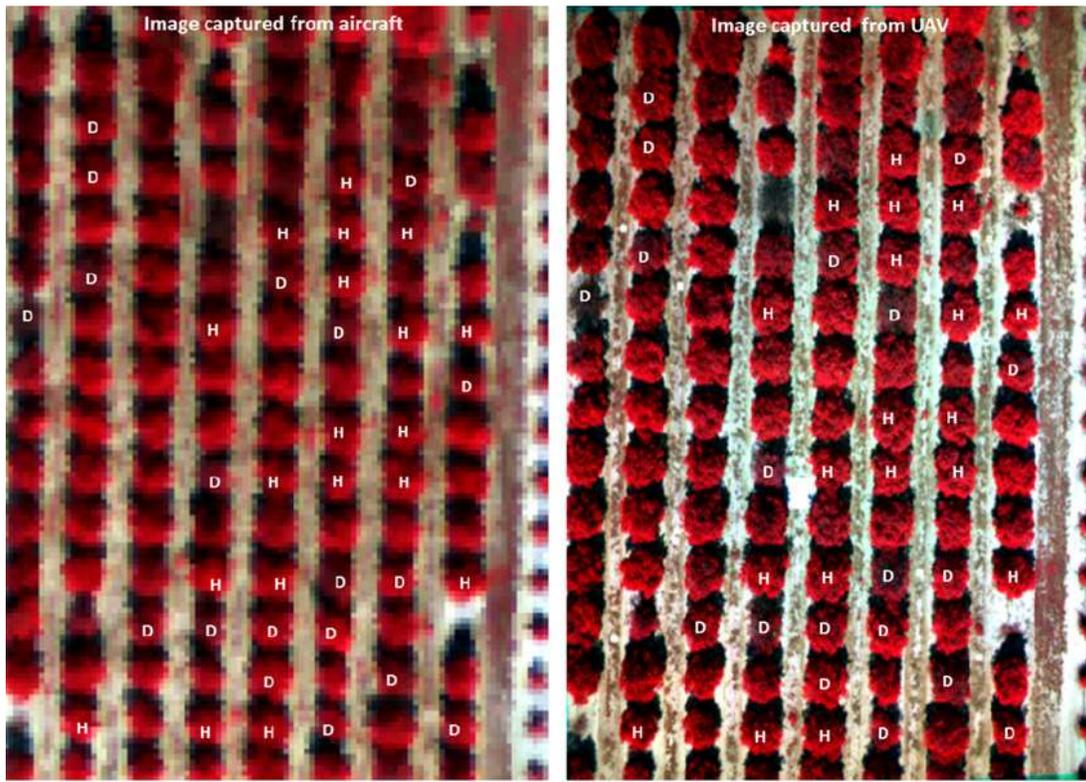


Figura 5.52 Imágenes aéreas adquiridas con un aeroplano (izquierda) y un VANT (derecha) con árboles sanos (H) e infectados con HLB (D) (García-Ruiz *et al.*, 2013)

Los resultados indican que las imágenes en falso color (R = 900 nm, G = 690 nm y B = 560 nm) provenientes del VANT generan mayor resolución y detalle de los árboles (Figura 5.53 y Figura 5.54).

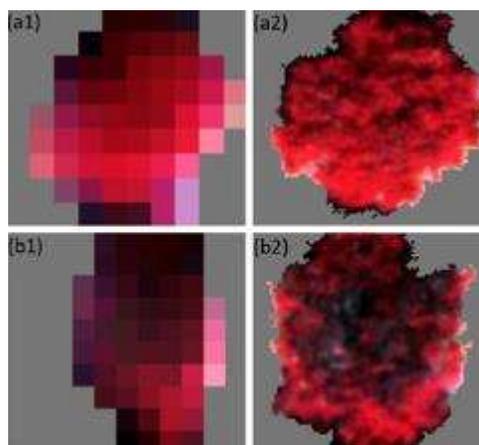


Figura 5.53 Imágenes segmentadas en falso color de un árbol sano (a) e infectado (b). Imágenes izquierda obtenidas con un aeroplano y las de la derecha con un VANT (García-Ruiz *et al.*, 2013)

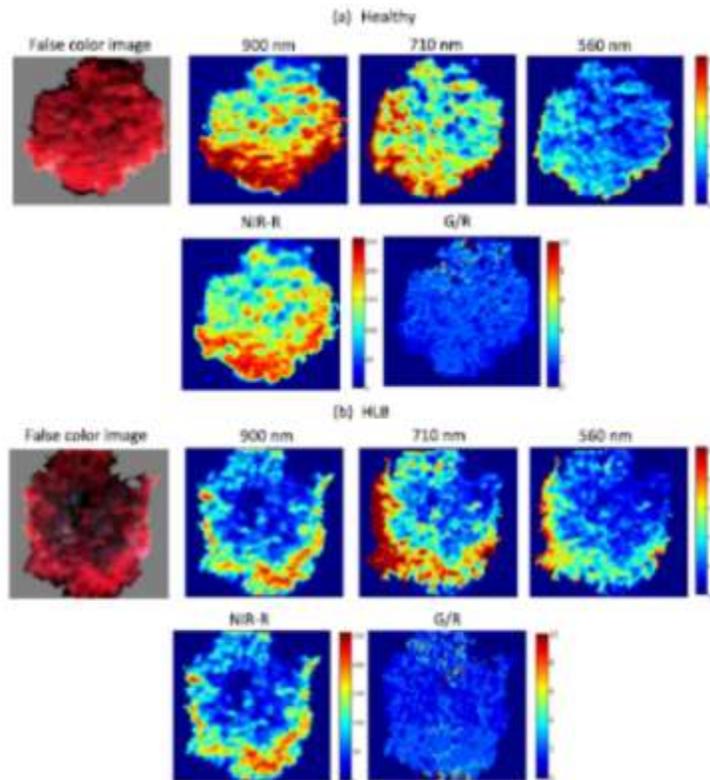


Figura 5.54 Imágenes adquiridas con VANT en falso color e imágenes con características espectrales significativas de árboles sanos e infectados (García-Ruiz *et al.*, 2013)

5.4.2.2 Control de enfermedades

El control de insectos y enfermedades de los cultivos es un factor crucial en su manejo óptimo. La aplicación de agroquímicos es frecuentemente requerida en función de condiciones específicas, tal como etapa fenológica, condición ambiental, localización y dosis. Estas aplicaciones son realizadas típicamente con el uso de aspersores portátiles, fumigadoras o equipo de aplicación aérea. Sin embargo, este tipo de aplicación es recomendable para grandes sistemas de producción, y puede ser ineficiente cuando las aplicaciones son realizadas en áreas pequeñas de una parcela. Zhu *et al.* (2010) presentaron un VANT (Figura 5.55) equipado con un controlador PWM para aspersiones de agroquímicos de alta precisión, el cual mejoró la eficiencia en la aplicación para el control de plagas agrícolas.

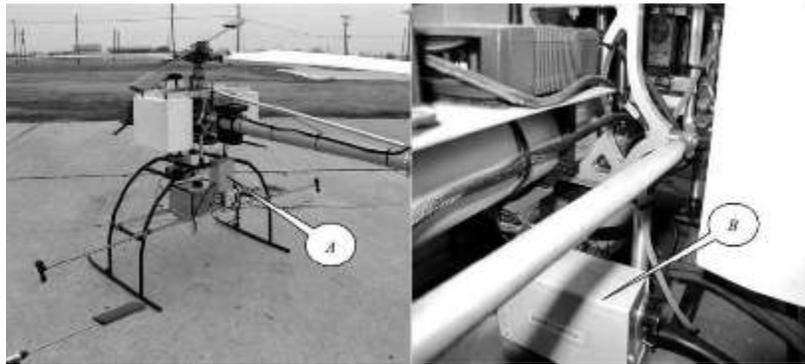


Figura 5.55 VANT usado para la aplicación precisa de agroquímicos (A) equipo de bombeo de pesticidas; (B) caja de controlador (Zhu *et al.*, 2010)

5.4.3 Seguimiento del cultivo

5.4.3.1 Estado del cultivo

Uno de los usos más recurrentes de los VANTS es el seguimiento del estado de los cultivos. Xiang y Lei (2011) mostraron una imagen en pseudocolor, para indicar la variación del índice de verdor NDVI en tres fechas que contrastan el manejo del cultivo de pasto (Figura 5.56). El color rojo representa el pasto con el mayor valor de NDVI asociado a un cultivo con gran follaje. La primera imagen fue tomada un día después de aplicar un herbicida en las dos parcelas internas. La segunda imagen muestra que el pasto de las dos parcelas ha sido prácticamente eliminado y solamente el suelo desnudo permanece. La parcela interna izquierda fue resembrada, como se muestra en la tercera imagen tomada 20 días después de siembra.

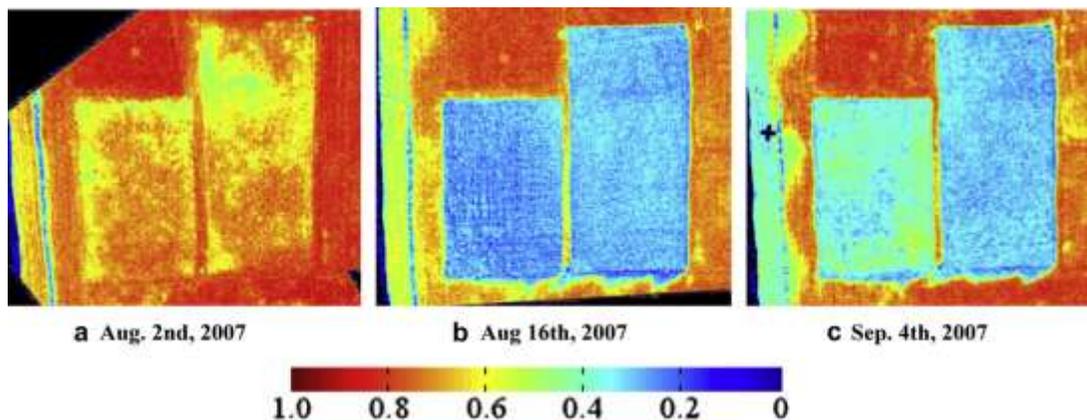


Figura 5.56 Mapa NDVI en Pseudocolor de una parcela de pasto en tres fechas para el año 2007 (Xiang y Lei, 2011)

Fernández *et al.* (2014) estimaron el coeficiente de cultivo (K_c) de la lechuga en función del porcentaje de cobertura (PGC) obtenido de fotografías digitales. La metodología utilizada se presenta en la Figura 5.57 con los diferentes pasos usados para validar el modelo propuesto. Con la ayuda de una estación tipo relación Bowen y una estación meteorológica se obtuvieron los valores de la evapotranspiración del cultivo (ET_r) y de la evapotranspiración de referencia (ET_o) para así obtener experimentalmente el coeficiente de cultivo (K_c). Se obtuvo una relación para estimar la altura (h) en función de PGC. Finalizando con la derivación de una relación para estimar K_c en función de PGC.

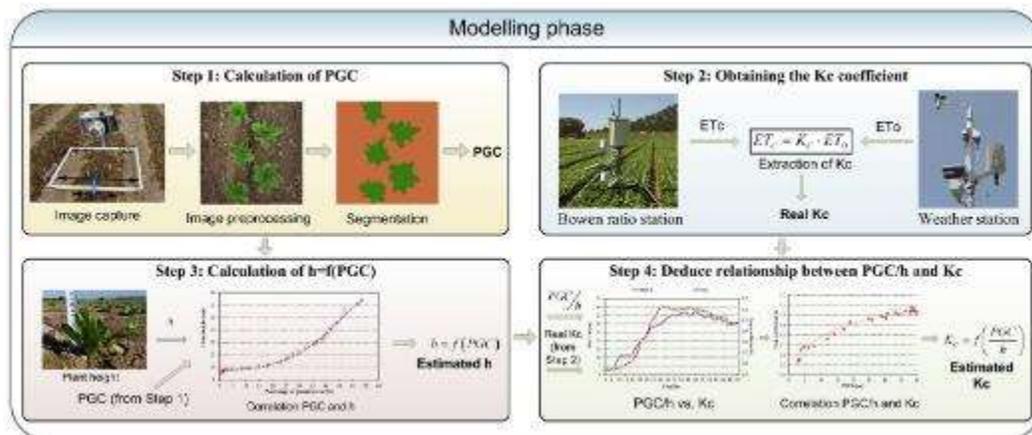


Figura 5.57 Etapas del estudio para calibrar el modelo para estimar el K_c (Fernández-Pacheco *et al.*, 2014)

La Figura 5.58 muestra una serie de imágenes sin y después de procesamiento con los valores estimados de (K_c y h) con el procesamiento. Este método tiene un gran potencial de ser aplicado usando un VANT para la obtención de imágenes digitales.



Figura 5.58 Resultados obtenidos (K_c y h) con el procesamiento de imágenes (Fernández *et al.*, 2014)

5.4.3.2 Detección de malas hierbas

Uno de los problemas de las plataformas aéreas tradicionales como aeroplanos y satélites es su baja resolución espacial y temporal. Torres-Sánchez *et al.* (2014) usaron un VANT (Figura 5.59) equipado con una cámara comercial (espectro visible) para toma de imágenes de alta resolución para detectar el grado de infestación de malas hierbas en una parcela de trigo en sus etapas fenológicas iniciales.



Figura 5.59 Microdron MD4-1000 volando sobre la zona de estudio (Torres-Sánchez *et al.*, 2014)

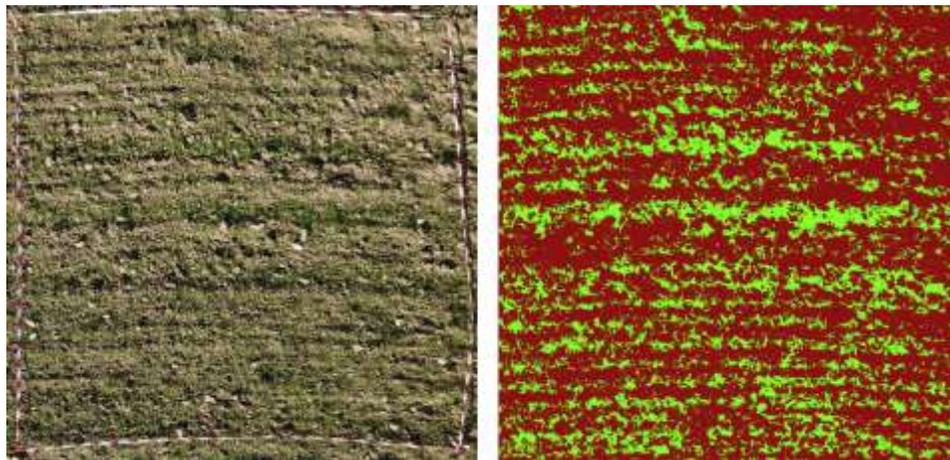


Figura 5.60 Imagen obtenida a 10 m de altura y la imagen después del proceso de clasificación de vegetación Torres-Sánchez *et al.* (2014)

Las imágenes se utilizaron para obtener seis índices de vegetación espectral (CIVE, ExG, ExGR, Woebbecke Index, NGRDI, VEG) y dos combinaciones de estos índices para

estudiar la influencia de la altura de vuelo (30 y 60 m) y días después de siembra (35 a 75 días) para estimar la fracción de cobertura vegetal. Los resultados indicaron que los índices ExG y VEG fueron los mejores para estimar la fracción de cobertura vegetal para una altura de 60 m. Lo anterior muestra que las imágenes obtenidas con VANT pueden ser útiles para control de malas hierbas que requieren de algoritmos precisos de clasificación de cultivo-malas hierbas para generación de mapas precisos de fracción vegetal (Figura 5.60).

La aplicación de VANT con fines de estimación del índice de área foliar ha sido reportado por Córcoles *et al.* (2013) para una parcela comercial de cebolla regada por pivote central. Las fotografías fueron tomadas con un cuadricóptero y procesadas con un software para estimar la cobertura de follaje. La relación lineal entre CC y LAI tuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.837.

5.4.3.3 Patrones anormales del cultivo

Un VANT se puede equipar con cámaras que pueden tomar imágenes multiespectrales en un rango específico del espectro solar. Por ejemplo el rango infrarrojo además del visual, que se pueden combinar para crear una imagen del cultivo que destaca las diferencias entre las plantas sanas y enfermas que el ojo humano no puede distinguir con facilidad. En la Figura 5.61 un Dron de la marca PrecisionHawk equipado con múltiples sensores para tomar imágenes de los campos capta la vegetación con luz casi infrarroja para mostrar los niveles de clorofila (Anderson, 2014).

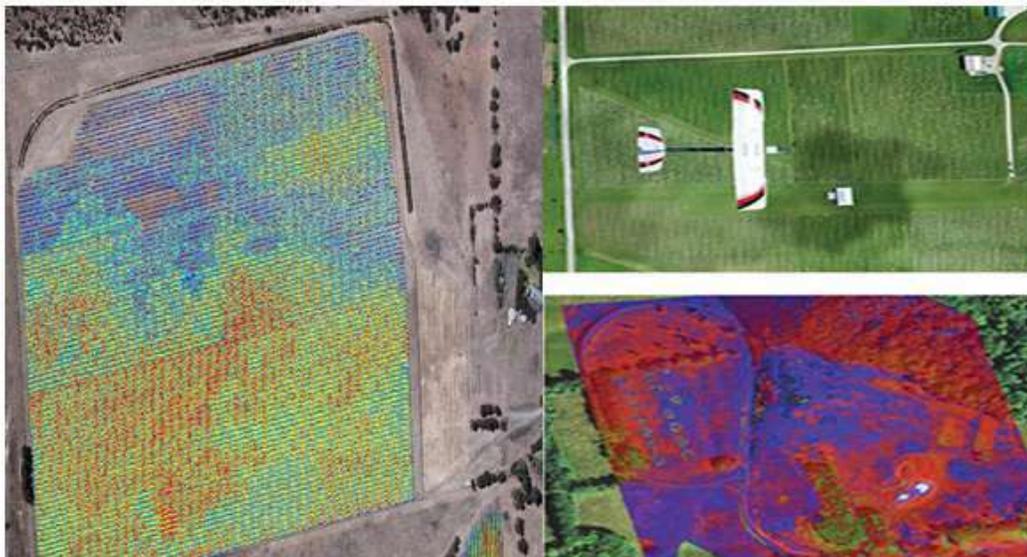


Figura 5.61 Imágenes multiespectrales captadas por un VANT (Anderson, 2014)

El monitoreo aéreo puede revelar patrones que ponen al descubierto todo tipo de incidencias o anomalías nutricionales, hídricas o sanitarias. Un VANT puede monitorear las parcelas con alta frecuencia, cada semana, cada día o incluso cada hora. La combinación de estas imágenes para crear una serie temporal, permite observar los cambios en la densidad y coloración foliar, revelando áreas problemáticas y las oportunidades que hay para gestionar, mejorar o corregir.

5.4.3.4 Índices de vegetación

A partir de la década de los 70's después de la puesta en órbita de los satélites de exploración terrestre como Landsat se ha utilizado imágenes satelitales e índices de vegetación derivados de estas para la estimación de variables agrícolas. El índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI (por sus siglas en inglés) es el índice más utilizado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de radiación en ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja, este índice viene definido por la siguiente expresión (Rouse *et al.* 1973):

$$NDVI = \frac{IR-R}{IR+R} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

donde NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizado, IR es la energía reflejada en la región del Infrarrojo cercano y R es la energía reflejada en la región del rojo, estos valores de energía son los cocientes de dividir la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral individual; por tanto, éstos toman valores entre un rango de 0,0 a 1,0 y por consiguiente el NDVI varía entre -1,0 y +1,0, los valores cercanos a -1 indican poca cantidad de clorofila y por lo tanto menor actividad fotosintética y por el contrario valores de NDVI cercanos a 1 indican alto contenido de clorofila y mayor actividad fotosintética (Figura 5.62).

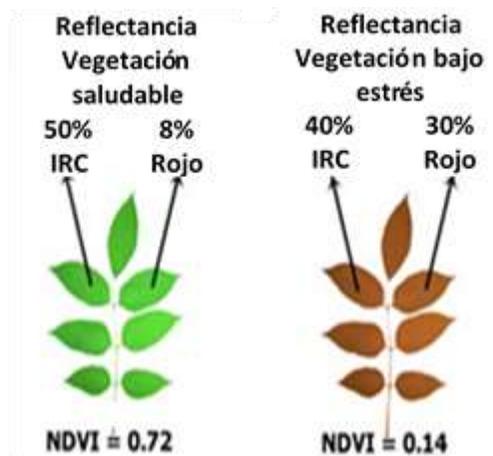


Figura 5.62 Relación del valor de NDVI y el contenido de clorofila de las hojas

Las plantas absorben radiación solar en la región espectral de radiación fotosintética activa que corresponde a varias regiones espectrales entre ellas la región del rojo, la cual es usada como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis. Las células vegetales han evolucionado para dispersar la radiación solar en la región del infrarrojo cercano, la cual lleva aproximadamente la mitad del total de la energía solar, debido a que el nivel de energía por fotón en longitudes de onda mayores a los 700 nm no es suficiente para sintetizar las moléculas orgánicas, por lo que una absorción en este punto solo causaría un sobrecalentamiento de la planta que dañaría los tejidos. Por lo tanto, la vegetación aparece absorbe gran parte de la radiación fotosintética activa y refleja gran parte del infrarrojo cercano.

En un inicio los valores de NDVI fueron calculados utilizando las bandas espectrales de las imágenes satelitales más cercanas a las regiones roja e infrarroja, de esta manera se obtenían imágenes de valores de NDVI donde se resaltaban las características de la vegetación presente en la superficie. En la actualidad existen ya sensores remotos portátiles que pueden ser usados en tierra o montados en drones y que estiman el NDVI directamente por lo que no hay recurrir regularmente a la fórmula de la Ecuación 5.1.

Un área de aplicación emergente del uso de VANT con fines de caracterización de la variabilidad en el estado de los cultivos a una alta resolución y frecuencia es la obtención de índices de verdor de parcelas cultivadas. Varios índices de verdor han sido propuestos para monitorear a través de sensores remotos, a través de variables integrales asociadas al desarrollo y estado de cultivos. Verger *et al.* (2014) describió un algoritmo físicamente basado para estimar un índice de vegetación usando un VANT (Figura 5.63a) equipado con cuatro cámaras (Figura 5.63b), una para el espectro verde (550 nm), para el rojo (660 nm), borde rojo (735 nm) e infrarrojo (790 nm).

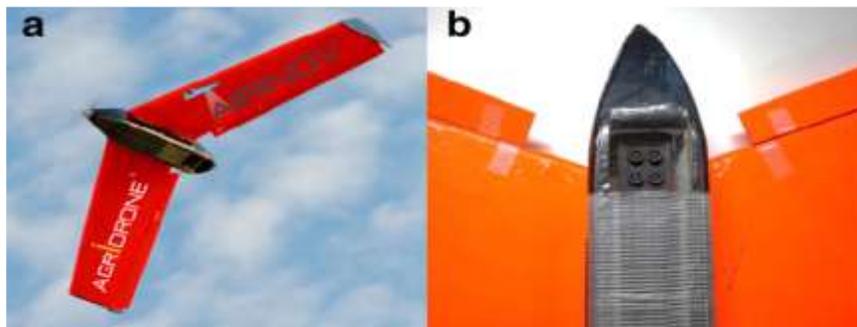


Figura 5.63 a) VANT usado y (b) vista de cuatro cámaras CMOS integradas (Verger *et al.*, 2014)

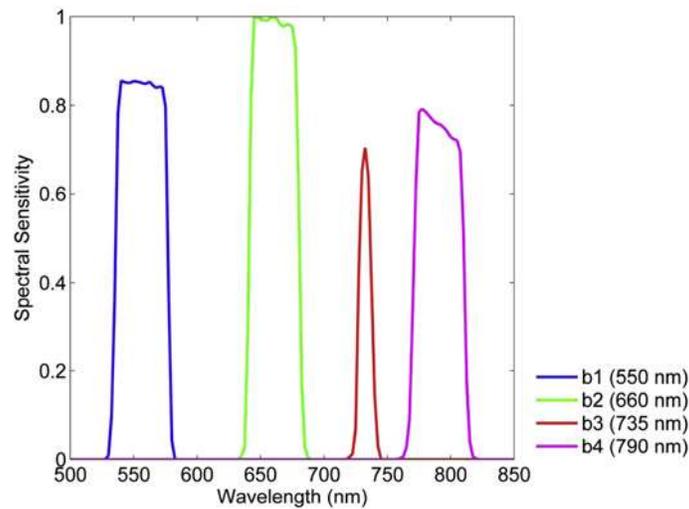


Figura 5.64 Sensitividad espectral contrastante de las cuatro bandas asociadas a las cámaras del VANT usado (Verger *et al.*, 2014)

La sensibilidad espectral de las cuatro bandas asociadas a las cámaras instaladas en el VANT se presenta en la Figura 5.64. Los resultados obtenidos del estudio indican una muy buena aproximación de los valores de vegetación obtenidos con el VANT con respecto a estimaciones terrestres.

5.4.4 Estimación de rendimiento de cultivos

Los VANT se han usado en el monitoreo remoto usando imágenes áreas espectrales. Imágenes aéreas de alta resolución Rojo-Verde-Azul (RGB por siglas en inglés) han sido procesadas para definir el periodo de cosechas en vid (Johnson *et al.*, 2003) como se muestra en la Figura 5.65. El uso de VANT también ha sido reportado para detectar la maduración del café (Johnson *et al.*, 2004).



Figura 5.65 VANT en misión de monitoreo de un viñedo (Johnson *et al.*, 2003)

El monitoreo del crecimiento de los cultivos y la estimación del rendimientos parcelario es una actividad esencial para la seguridad alimentaria y la predicción del retorno económico agrícola (Al-Gaadi *et al.*, 2016). La predicción del rendimiento se puede utilizar para planificar el mejor momento de la cosecha y acoplarlo con el transporte para el procesamiento industrial (Fortes *et al.*, 2014).

Uno de los métodos más sencillos para la estimación de rendimientos de cultivos ha sido usado por la FAO y consiste en estimar la cantidad total de biomasa neta producida por un cultivo y multiplicarla por un índice de cosecha (IC), que es la parte proporcional de la biomasa útil para el hombre. Actualmente existen métodos que pueden describir matemáticamente el crecimiento y desarrollo de cultivos para generar modelos y predecir su rendimiento, así como las tecnologías que usan sensores remotos para conocer las condiciones del cultivo.

Para la predicción de cosechas se usan tres tipos de modelos:

- Modelos de simulación que representan en forma simplificada el proceso de crecimiento y rendimiento productivo en base a los mecanismos físicos, químicos y fisiológicos que caracterizan los procesos evolutivos del cultivo.
- Modelos estadísticos-ambientales y estadísticos - biométricos, donde se relacionan funcionalmente algunos factores del ambiente (temperatura, energía solar, humedad, etc) o variables biométricas (altura de la planta, diámetro del tronco, longitud de las ramas, etc), con el rendimiento.
- Modelos estadísticos por muestreo, se basan en disponer de una muestra adecuada del cultivo con información sobre el potencial rendimiento, calcular el valor promedio por unidad, proyectar este resultado a la cosecha y expandir para toda la población. Los puntos críticos del método de muestreo son: el diseño de la muestra representativa, proceso complejo cuando la población es muy heterogénea, y la proyección del tamaño del fruto medio a la fecha de cosecha.

La predicción de los rendimientos de los cultivos suele asociarse con ciertas variables agronómicas (densidad, vigor, madurez y enfermedad), que pueden utilizarse como indicadores de rendimiento.

Los sensores remotos y los sistema de posicionamiento global (GPS) pueden utilizarse para evaluar la variación temporal en la dinámica de los cultivos, incluido el rendimiento de los cultivos y su variabilidad espacial (Taylor *et al.*, 1997). Las partes visibles del espectro electromagnético (azul, verde y rojo) y del infrarrojo cercano (NIR) han demostrado su eficacia en el acceso a información sobre el tipo y condiciones del cultivo, la humedad del suelo, el estrés nutricional por nitrógeno y el rendimiento (Hassaballa *et al.*, 2011).

Existen numerosos trabajos de predicción de cosecha con imágenes remotas adquiridas de los satélites utilizando índices de vegetación (Fortes *et al.*, 2014; Al-Gaadi *et al.*, 2016), índice de área foliar (Baez- Gonzalez *et al.*, 2005) e imágenes tomadas con VANT (Maresma *et al.*, 2016); algunos de estos trabajos se describen en seguida.

Fortes *et al.* (2014) elaboraron mapas predictivos de rendimiento del cultivo del tomate utilizando parámetros del suelo y de la planta, los cuales fueron la conductividad eléctrica aparente (CEa) y el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI), apoyados por técnicas geoestadísticas descritas por Moral *et al.* (2010). Los resultados indicaron que CEa fue un indicador razonablemente bueno para estimar la producción agrícola a nivel parcelario, pero el NDVI fue el mejor indicador, ofreciendo una mejor resolución que la CEa y una estimación adecuada de la distribución del rendimiento a lo largo de la extensa área de cultivo (Figura 5.66). Usando los resultados del rendimiento con el índice de verdor NDVI se estimó espacialmente la cosecha (Figura 5.67).

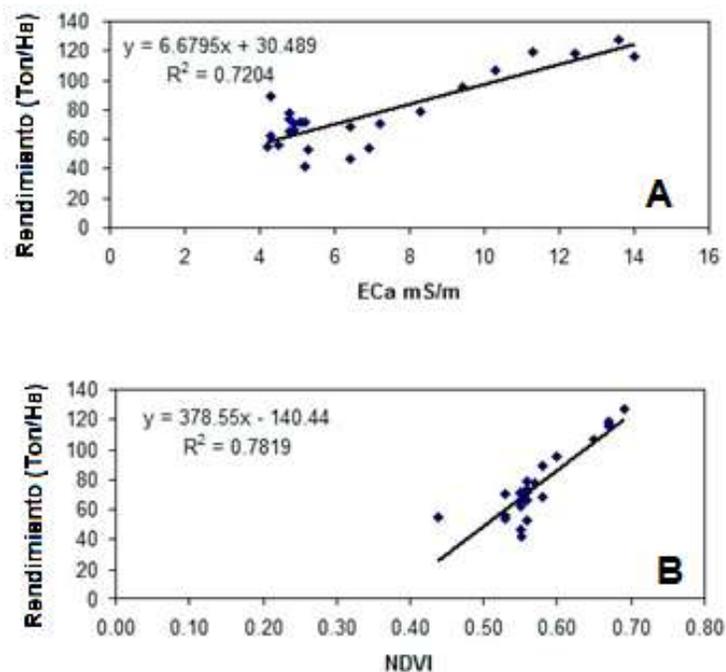


Figura 5.66 Variación de la cosecha en función de la conductividad eléctrica aparente (a) y el índice de verdor NDVI (b) (Fortes *et al.*, 2014)

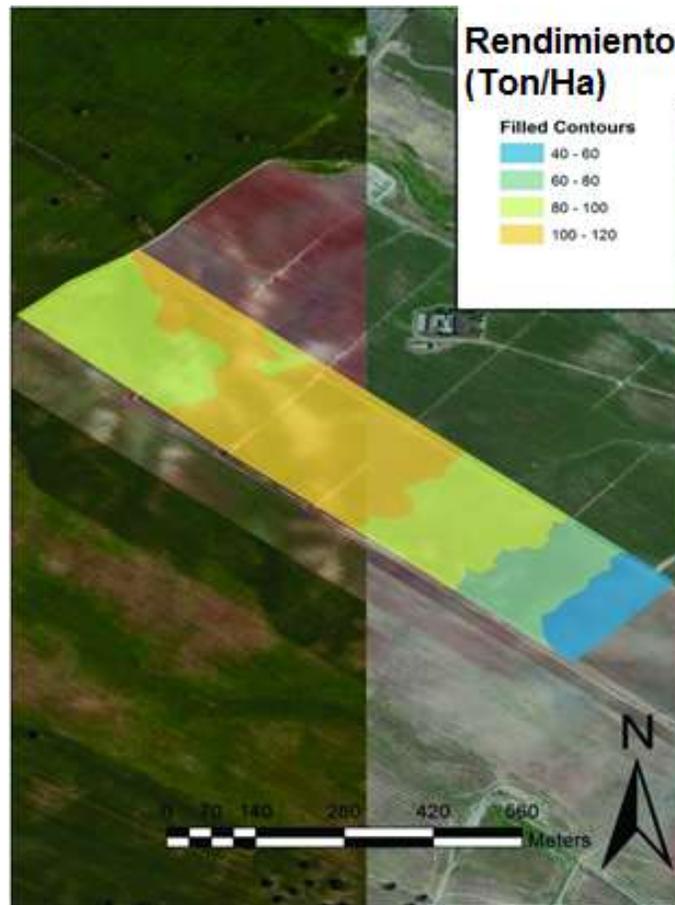


Figura 5.67 Estimación espacial de la cosecha en función del índice de verdor NDVI (Fortes *et al.*, 2014)

En un trabajo reportado recientemente por Al-Gaadi *et al.* (2016), realizaron un estudio para predecir el rendimiento del cultivo de la papa en tres campos de 30 ha regados con pivote central en la Región Oriental de Arabia Saudita; donde se usaron imágenes de satélites Landsat-8 y Sentinel-2 durante las etapas de crecimiento de la papa y se estimaron dos índices de vegetación a partir de las imágenes de satélite: el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI). El rendimiento del cultivo se estimó por muestreo, 2 a 3 días antes de la época de cosecha, y se correlacionaron con el NDVI y SAVI (Figura 5.68), de donde se generaron ecuaciones de regresión de predicción de rendimiento que fue usado para generar mapas de predicción de rendimiento. Los resultados del estudio indicaron que la diferencia entre los valores de producción pronosticados y los reales osciló entre 7,9 y 13,5 % para las imágenes Landsat-8 y entre 3,8 y 10,2 % para las imágenes Sentinel-2 (Figura 5.69).

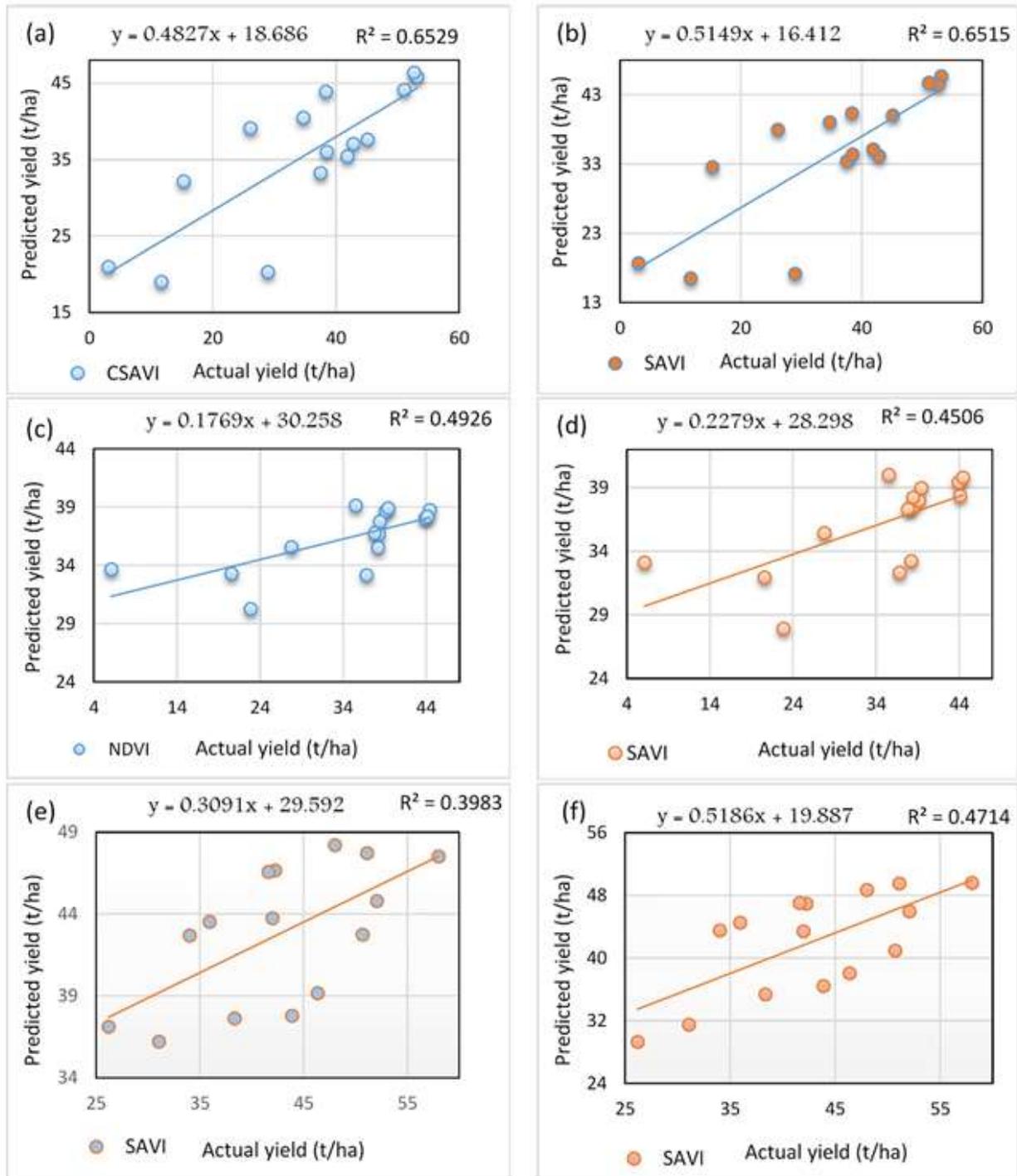


Figura 5.68 Correlación entre el rendimiento real y el rendimiento pronosticado para diferentes parcelas, indicador de verdor, y satélite (Fuente: Al-Gaadi et al., 2016)

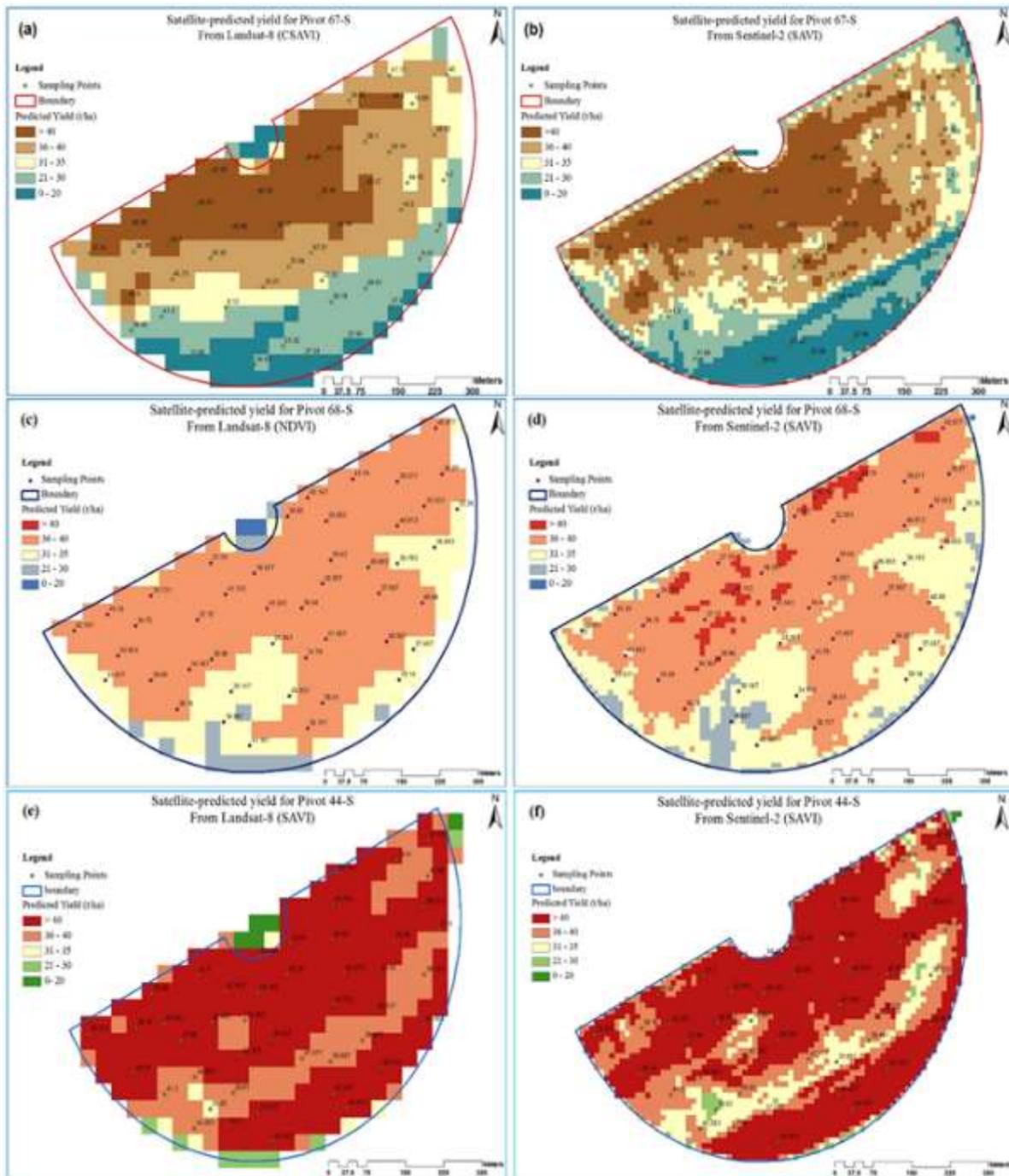


Figura 5.69 Mapas de predicción del rendimiento de la papa para parcelas, indicador de verdor, y satélite (Fuente: Al-Gaadi et al., 2016)

Referencias

6

Capítulo 6

REFERENCIAS

6.1 Referencias del Capítulo 1

- Alicea, S. (2010). Al fin entiendo el significado de los número F. *Aprende fotografía digital*, [en línea] Disponible en: <<http://www.aprendefotografiadigital.com/afd/2010/12/07/la-apertura-simple/#axzz4WETxw7tN>> [Consultado el 07 de diciembre de 2010].
- Alonso, F. (2006). *Sistemas de información geográfica*, [en línea] Disponible en: <<http://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/>>
- Aranda, R. (2015). *SlidePlayer*, [en línea] Disponible en: <<http://slideplayer.es/slide/5870425/>>
- Baumann, P.R. (2010). *Introduction to remote sensing*, [en línea] Disponible en: <<http://www.oneonta.edu/faculty/baumanpr/geosat2/RS-Introduction/RS-Introduction.html>>
- Bense, T. (2007). *Estructura de las imágenes digitales*, [en línea] Disponible en: <<http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/estructura-imagenes-digitales.htm>>
- Bustos, A. s.f. *Curso de fotografía digital*. [pdf] Disponible en: <http://www.xelu.net/pdf/materials/3/manual_curs_fotografia_digital>
- Cahuas, J. (2011). *Sensores remotos*, [en línea] Disponible en: <<http://documents.mx/documents/sensores-remotos-55993a077a4ef.html>>
- Carolyn, Said. (1990). DYCAM Model 1: The first portable Digital Still Camera. *MacWEEK*, 4(35), p.34.
- Casa de cámaras. (2016). [en línea] Disponible en: <<http://www.casadecamaras.com.ar/ctc.html#image-1>>
- FranLora, (2014). *Sensor CMOS*, [en línea] Disponible en: <<http://www.topfotografia.net/Fotografia/teoria-de-la-fotografia/sensor-cmos/sensor-cmos.html>>

- Gutiérrez, L. (2015). *Velocidad de obturación*, [en línea] Disponible en: <<http://lunagutierrezm.blogspot.mx/2015/10/velocidad-de-obturacion.html>> [Accedido el 07 de octubre de 2015].
- Herrera, J.L., (2011). *La teledetección*, [en línea] Disponible en: <<http://es.slideshare.net/jlherreraescorcia/teledeteccion-8174401>>
- Introducción a la fotografía digital*. S.f. [en línea] Disponible en: <<http://www.uv.mx/personal/lenunez/files/2013/06/INICIACION-A-LA-FOTOGRAFIA-DIGITAL-DeCamaras.pdf>>
- Manu, (2013). *El objetivo y su importancia en la cámara fotográfica*, [en línea] Disponible en: <<http://www.sololightroom.com/2013/03/15/el-objetivo-y-su-importancia-en-la-camara-fotografica/>>
- Martínez, M. (2012). *Imagen vectorial y mapa de bits*, [en línea] Disponible en: <<https://mirimartinezal.wordpress.com/2012/09/05/imagen-vectorial-y-mapa-de-bits/>>
- Martínez, J. y Díaz, A. (2005). *Fundamentos de teledetección espacial*. [en línea] Disponible en: <<http://siga.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledeteccion%20de%20espacial.PDF>> [Consultado en junio de 2015].
- Meroli, S. (2012). *CMOS active pixel sensor vs ccd. performance comparison*, [en línea] Disponible en: <http://meroli.web.cern.ch/meroli/lecture_cmos_vs_ccd_pixel_sensor.html>
- National Aeronautics and Space Administration, (2007a). *Electromagnetic spectrum diagram*. C [en línea] Disponible en: <<https://mynasadata.larc.nasa.gov/science-practices/electromagnetic-diagram/>> [Consultado el 28 de octubre de 2016].
- National Aeronautics and Space Administration, (2007b). *Explore NASA science*, [en línea] Disponible en: <<http://science.hq.nasa.gov/kids/imagers/ems/visible.html>>
- Pérez, D.J. (2007). *Introducción a los sensores remotos, aplicaciones en geología*. Buenos Aires: UBA. [pdf] Disponible en: <http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf>
- Rodríguez, J. s.f. *Curso de fotografía digital*, [en línea] Disponible en: <<http://thewebphoto.com>>

Teoría de la fotografía: principales conceptos fotográficos. S.f. [en línea] Disponible en: <<http://www.topfotografia.net/Fotografia/Analisis-teoria-de-la-fotografia/teoria-de-la-fotografia.html>>

Tutorial de fotografía. S.f. [en línea] Disponible en: <<http://www.casadecamaras.com.ar/tuts/tutorial-indice.html>> [Consultado el 18 de diciembre de 2016].

Ulaby, F.T., Moore, R.K. y Fung, A.K. (1981). *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volumen 1: Microwave Remote Sensing: Fundamentals and Radiometry*. Boston: Addison-Wesley.

Van Leeuwen, B. y Vargas, R.B. (2006). *Sensores remotos. Sistemas de Teledetección*. [pdf] Disponible en: <<https://www.itc.nl/external/unescorapca/Presentaciones%20Powerpoint/02%20Introduccion%20Sensores%20Remotos/Introduccion%20Sensores%20Remotos.pdf>>

6.2 Referencias del Capítulo 2

Allred, B.J., Daniels, J.J. y Reza, M. eds. (2008). *Handbook of Agricultural Geophysics*. USA: CRC Press.

An Introduction to GNSS. (2015). [en línea] Disponible en: <<http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/>>

Bossler, J.D. (2010). *Manual of Geospatial Science and Technology*. Boca Raton: CRC Press.

Burns, J. (2013). *Wide Area Administration Augmentation System (WAAS) – Program Status Update*, [pdf] Disponible en: <https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/library/briefings/media/waas_rtca_brief_31213.pdf>

Centre national d'études spatiales, European Space Agency, (2011). *Guide EGNOS: a l'usage des développeurs d'applications*, [pdf] Disponible en: <http://www.cnes-csg.fr/automne_modules_files/standard/public/p7853_978317af760517fa64459164b956fb5cguide_egnos_2011_VF_112_P.pdf>

Dana, P.H. s.f. *Global Positioning System Overview*, [en línea] Disponible en: <<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html>>

DiBiase, D. et al. (2016). *The nature of geographic information*, [en línea] Disponible en: <<https://www.e-education.psu.edu/natureofgeoinfo/>>

El-Rabbany, A. (2002). *Introduction to GPS: the Global Positioning System*. Norwood: Artech House.

Error correction. S.f. [en línea] Disponible en: <http://www.trimble.com/gps_tutorial/howgps-error.aspx>

European GNSS Agency, (2015). *EGNOS Safety of Life (SoL) Service Definition Document*. [pdf] Disponible en: <https://www.gsa.europa.eu/sites/default/files/Brochure-SoL_web.pdf>

Furuti, C.A. (2002). *Map projections: basic definitions and concepts*. [en línea] Disponible en: <<http://www.progonos.com/furuti/MapProj/Normal/CartDef/MapDef/mapDef.html>>

- Gunn, B. (2016). *Performance based navigation: a worldwide view*, [en línea] Disponible en
<http://www.propilotmag.com/archives/2016/May%2016/A3_satellite_p2.html>
- Hajiyev, C., Ersin-Soken, H. y Yenel-Vural, S. (2015). *State Estimation and Control for Low-cost Unmanned Aerial Vehicles*. Springer.
- Hernández, D. (2006). Introducción a la fotogrametría digital. *Curso de fotogrametría*. Universidad de Castilla de la Mancha. Sin publicar.
- Huang, C.M. y Chen, Y.S. (2010). *Telematics Communication Technologies and Vehicular Networks: Wireless Architectures and Applications*. Pennsylvania: Information Science Reference.
- Kaplan, E.D. y Hegarty, C.J. (2005). *Understanding GPS: Principles and Applications*. Norwood: Artech House.
- Otero, I. (2010). *Fotogrametría*, [en línea] Disponible en:
<http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-geodesia/contenidos/TEMA11_FOTOGAMETRIA_Y_TELEDETECCION/Fotogrametria>
- Pfost, D. y Casady, W. (1998). *Precision agriculture: Global Positioning System (GPS)*, [en línea] Disponible en:
<<http://extension.missouri.edu/publications/DisplayPrinterFriendlyPub.aspx?P=wq452>>
- Raju, P.L.N. (2003). *Fundamentals of GPS. Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*.
- Sánchez, J.A. (2006). *Introducción a la fotogrametría. Satcom Antenna*. (2016). [en línea] Disponible en:
<<http://www.aerospaceonline.com/doc/satcom-antenna-0001>>
- Tsui, J.B-Y. (2014). *Fundamentals of Global Positioning System receivers: A Software Approach*. New Jersey: Wiley.
- Yasuda, A. (2006). *Orbital error of GPS satellite*, [en línea] Disponible en:
<<http://www.soi.wide.ad.jp/class/20050026/slides/01/62.html>>

6.3 Referencias del Capítulo 3

1930s & 1940s. s.f. [en línea] Disponible en: <<https://sites.google.com/site/uavuni/1920s-1930s>> [Consultado el 11 de noviembre de 2016].

1970s & 1980s. s.f. [en línea] Disponible en: <<https://sites.google.com/site/uavuni/1960s-1970s>> [Consultado el 13 de noviembre de 2016].

Alex, (2015). *Beginners guide to drone autopilots (flight controllers) and how they work*, [en línea] Disponible en: <<http://www.dronetrest.com/t/beginners-guide-to-drone-autopilots-flight-controllers-and-how-they-work/1380>>

Anderson, C. (2014). *Relatively cheap drones with advanced sensors and imaging capabilities are giving farmers new ways to increase yields and reduce crop damage*, [en línea] Disponible en: <<http://www.technologyreview.com>>

Axelrod, A. (2015). *Lost Destiny*. New York: Macmillan.

Barton, J. (2012). Fundamentals of small unmanned aircraft flight. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 31(2), p.132.

British Broadcasting Corporation, (2012). *Drones: what are they and how do they work?*, [en línea] Disponible en: <<http://www.bbc.com/news/world-south-asia-10713898>> [Consultado el 24 de noviembre de 2016].

Cantos, M.E. (2013). *Estimation and Control of a Tilt-Quadrotor Attitude*. Maestría. Técnico Lisboa.

Castillo, P., Lozano, R. y Dzul, A. (2005). *Modelling and Control of Mini-Flying Machines*. London: Springer.

Chao, H. y Chen, Y. (2012). *Remote Sensing and Actuation Using Unmanned Vehicles*. New Jersey: Wiley.

Ciznicki, M., Kurowski, K. y Plaza, A.J. (2012). Graphics processing unit implementation of jpeg2000 for hyperspectral image compression. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1).

Clemens, M.A. (2016). *Glosario de terminología usada en drones*, [en línea] Disponible en: <<http://icodrones.blogspot.mx/2016/01/glosario-de-terminologia-usada-en-drones.html>>

- Cohen, W.B. y Goward, S.N. (2004). Landsat's role in ecological applications of remote sensing. *BioScience*, [en línea] Disponible en: <<https://academic.oup.com/bioscience/article/54/6/535/294251/Landsat-s-Role-in-Ecological-Applications-of?searchresult=1>>
- Cole, C. (2014). *Rise of the reapers: a brief history of drones*, [en línea] Disponible en : <<https://dronewars.net/2014/10/06/rise-of-the-reapers-a-brief-history-of-drones/>> [Accedido 9 de Noviembre de 2016].
- Córcoles, J.I., Ortega, J.F., Hernández, D. y Moreno, M.A. (2013). Estimation of leaf area index in onion (*allium cepa* L.) using an unmanned aerial vehicle. *Biosystems engineering*, 115, pp.31-42.
- Dalamagkidis, K., Valavanis, K. y Piegl, L. (2012). *On Integrating Unmanned Aircraft Systems Into the National Airspace System*. Netherlands: Springer.
- Darack, E. (2011). *A brief history of unmanned aircraft*, [en línea] Disponible en: <<http://www.airspacemag.com/photos/a-brief-history-of-unmanned-aircraft-174072843/>> [Consultado el 9 de Diciembre de 2016].
- DeGarmo, M. (2004). *Issues Concerning Integration of Unmanned Aerial Vehicles in Civil Airspace*. McLean: Center for Advanced Aviation System Development.
- Denny, R. y Richter, W.H. (2006). *The radioplane target drone*, [en línea] Disponible en: <http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/rpav_radioplane.html> [Consultado el 9 de diciembre de 2016].
- Díaz-Varela, R.A., Zarco-Tejada, P.J., Angileri, V. y Loudjani, P. (2014). Automatic identification of agricultural terraces through object oriented analysis of very high resolution dsms and multispectral imagery obtained from an unmanned aerial vehicle. *Journal of Environmental Management*, 134, pp.117-126.
- Dos Santos, N. (2011). *Design and Construction of a Multi-Rotor With Various Degrees of Freedom*. Maestría. Universidade Técnica de Lisboa.
- Ehrhard, P.T. (2010). *Air Force UAVs The Secret History*. Mitchell Institute Press.
- Falkner, E. y Morgan, D. (2001). *Aerial Mapping*. 2a ed. Boca Raton: CRC Press.
- Fernández-Pacheco, D.G., Escarabajal-Henarejos D., Ruiz-Canales A., Conesa, J. y Molina-Martínez, J.M. (2014). A digital image-processing-based method for

- determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. *Biosystems engineering*, 117, pp.23-34.
- Fritz X. s.f. [en línea] Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Fritz_X> [Consultado 4 de Diciembre 2016].
- Gao, J. (2009). Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography*, 33(1), pp.103–116.
- García, R. y Ramón, A. (2011). *Herramienta para la simulación integrada de subsistemas en un equipo quadrotor*. Tesis. Universidad de Sevilla.
- Gil, E. (1997). *Situación actual de la agricultura de precisión*, [en línea] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/28275751_Situacion_actual_de_la_agricultura_de_precision>
- Gleason, T. y Fahlstrom, P. (2016). *Recovery of UAVs*, [en línea] Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1002/9780470686652.eae1156>>
- Hastings, M. (2012). *The rise of the killer drones: how america goes to war in secret*, [en línea] Disponible en: <<http://www.rollingstone.com/politics/news/the-rise-of-the-killer-drones-how-america-goes-to-war-in-secret-20120416>>
- History of unmanned aerial vehicles*. S.f. [en línea] Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_unmanned_aerial_vehicles>
- James, J. (1988). *Unmanned Air Vehicles - Real Time Intelligence Without the Risk*. Tesis de maestría. Naval Postgraduate School.
- Jia, C. (2011). *UAV Mission Planning: Problem Modeling and Solution Methods*. Tesis de maestría. National University of Singapore.
- Johnson, E. y Jones, L. (2015). *American Military Training Aircraft: Fixed and Rotary-Wing Trainers Since 1916*. McFarland.
- Johnson, L.F., Herwitz, S.R, Dunagana, S.E., Lobitz, B., Sullivan, D. y Slye, R. (2003). Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV. *33th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. November, 2003.
- Johnson, L.F., Herwitz, S.R., Lobitz, B.M. y Dunagan, S.E. (2004). Feasibility of monitoring coffee field ripeness with airborne multispectral imagery. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(6), pp.845-849.

- Keane, J.F. y Stephen, S.C. (2013). A brief history of early unmanned aircraft. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 32(3), pp.558-571.
- Koneckny, G. (2014). *Geoinformation, Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems*. Boca Raton: CRC Press.
- Leyva, L.Z., Alves, C.M. y Orlando, R.C. (2001). Agricultura de precisión. *Ciencias técnicas agropecuarias*, 10(3), 7-11 pp.
- McClain, C.R. (2009). A decade of satellite ocean color observations. *Annual Review of Marine Science*, 1(1), pp.19–42.
- McGowen, S. (2005). *Helicopters: An Illustrated History of Their Impact (Weapons and Warfare Series)*. Santa Barbara: ABC-CLIO Interactive.
- MicaSense, (2015). *RedEdge 3 User Manual*. MicaSense.
- Newcome, L.R. (2004). *Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles*. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
- O'Malley, D. s.f. *The mother of all drones*, [en línea] Disponible en: <<http://www.vintagewings.ca/VintageNews/Stories/tabid/116/articleType/ArticleView/articleId/484/The-Mother-of-All-Drones.aspx>> [Consultado el 9 de diciembre 2016].
- Perry, J. (2011). Navy unmanned air systems, (1915–2011). *AIAA Centennial of Naval Aviation Forum*. Virginia Beach, VA.
- Phantom (UAV)*. S.f. [en línea] Disponible en: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Phantom_\(UAV\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Phantom_(UAV))> [Consultado el 21 de noviembre de 2016].
- Radio controls robot plane on pilotless flight. (1935). *Popular Mechanics*.
- Rees, G. (2013). *Physical Principles of Remote Sensing*. New York: Cambridge University Press.
- Ronconi, G.B.A., Batista, T.J. y Merola, V. (2014). The utilization of Unmanned aerial vehicles (UAV) for military action in foreign airspace. *UFRGSMUN: UFRGS Model United Nations Journal*, 2, pp.137-180.
- Shaw, I.G.R. (2014). *History of U.S. drones*, [en línea] Disponible en: <<https://understandingempire.wordpress.com/2014/02/02/a-brief-history-of-u-s-drones/>> [Consultado el 2 de noviembre de 2016].

- SM-62 Snark. s.f. [en línea] Disponible en <https://en.wikipedia.org/wiki/SM-62_Snark> [Consultado el 7 de diciembre de 2016].
- Tetrault, C. (2009). *A short history of Unmanned aerial vehicles (UAVs)*, [en línea] Disponible en: <<http://www.draganfly.com/blog/a-short-history-of-unmanned-aerial-vehicles-uavs/>> [Consultado el 11 de diciembre de 2016].
- Torres-Sánchez, J. Peña, J.M., de Castro, A.I. y López-Granados, F. (2014). Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, pp.104–113.
- Tutorial: fundamentals of remote sensing*. s.f. [en línea] Disponible en: <<http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9309>>
- Vanden, B.T. (2008). Drone attacks hit high in Iraq. *USA Today*.
- Verger, A., Vigneau, N., Chéron, C., Gilliot, J-M., Comar, A. y Baret, F. (2014). Green area index from an unmanned aerial system over wheat and rapeseed crops. *Remote Sensing of Environment*, 152, pp.654–664.
- Wagner, W. (1982). *Lightning Bugs, and other Reconnaissance Drones*. Aero Publishers.
- Wooster, M. (2003). Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 86(1), pp.83–107.
- Xiang, H. y Lei, T. (2011). Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems engineering*, 108, pp.174-190.
- Zaloga, S. (2011). *Unmanned Aerial Vehicles: Robotic Air Warfare 1917-2007*. Oxford: Osprey Publishing.
- Zarco-Tejada, P.J., Diaz-Varela, R.A., Angileri, V. y Loudjania, P. (2014). 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, pp.89–99.
- Zhu, H., Lan, Y., Wu, W., Clint, W.C., Huang Y., Xue, X., Liang, J. y Fritz, B. (2010). Development of a PWM precision spraying controller for unmanned aerial vehicles. *Journal of Bionic Engineering*, 7, pp.276–283.

6.4 Referencias del Capítulo 4

Allerton, D. (2009). *Principles of Flight Simulation*. Chichester: Wiley.

Choosing a ground station. S.f. [en línea] Disponible en: <<http://ardupilot.org/copter/docs/common-choosing-a-ground-station.html>> [Consultado el 12 de enero de 2017].

Dronografía, (2015). *10 cosas que debes comprobar antes de volar tu dron por primera vez*, [en línea] Disponible en: <<https://dronografia.es/tecnologia1/71-10-cosas-que-debes-comprobar-antes-de-volar-tu-dron-por-primera-vez.html>> [Consultado el 05 de noviembre de (2016)].

Miranda, A.D. (2007). *UAV Flight Simulator Based on ESA Infrastructure*. Tesis de maestría. Universidade Técnica de Lisboa.

Unmanned aircraft simulation. (2014). [en línea] Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_Aircraft_System_Simulation> [Consultado el 1 de julio de 2016].

6.5 Referencias del Capítulo 5

- Al-Gaadi, K.A., Hassaballa, A.A., Tola, E., Kayad, A.G., Madugundu, R., Alblewi, B. y Assiri, F. (2016). *Prediction of potato crop yield using precision agriculture techniques*, [en línea] Disponible en: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0162219>>
- Anderson, C. (2014). *Agricultural drones: relatively cheap drones with advanced sensors and imaging capabilities are giving farmers new ways to increase yields and reduce crop damage*, [en línea] Disponible en: <<https://www.technologyreview.com/s/526491/agricultural-drones/>>
- Baez-Gonzalez, A.D., Kiniry, J.R., Maas, S.J., Tiscareno, M.L., Macias, J., Mendoza, J.L., Richardson, C.W., Salinas, J. y Manjarrez, J.R. (2005). Large-area maize yield forecasting using leaf area index based yield model. *Agronomy Journal*, 97(2), pp.418-425.
- Berra, E.F., Gaulton, R. y Barr, S. (2016). Use of a digital camera onboard an unmanned aerial vehicle to monitor spring phenology at individual tree level. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Beijing, China, 10-15 julio 2016.
- D'Oleire-Oltmanns, S., Marzloff, I. y Blashcke, T. (2015). Gully mapping on multiple scales based on UAV and satellite data. *DGPF Tagungsband*, 24, pp.263–269.
- Dana, P. s.f. *UTM zone numbers*, [en línea] Disponible en: <<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/coordsys/gif/utmzones.gif>> [Consultado el 24 de enero de 2017]
- De Cubber, G., Balta, H., Doroftei, D. y Baudoin, Y. (2014). UAS deployment and data processing during the Balkans flooding. *2014 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*. Hokkaido, Japón, 27-30 octubre 2014.
- Eisenbeiss, H., Lambers, K., Sauerbier, M. y Li, Z. (2005). Photogrammetric documentation of an archaeological site (Palpa, Peru) using an autonomous model helicopter. *CIPA 2005 XX International Symposium*, 26 septiembre – 01 octubre 2005 Torino, Italia.
- Ely, J.C., Graham, C., Barr, I.D., Rea, B.R., Spagnolo, M. y Evans, J. (2016). *Using UAV acquired photography and structure from motion techniques for studying glacier*

landforms: application to the glacial flutes at Isfallsglaciären, [en línea] Disponible en: <<https://doi.org/10.1002/esp.4044>>

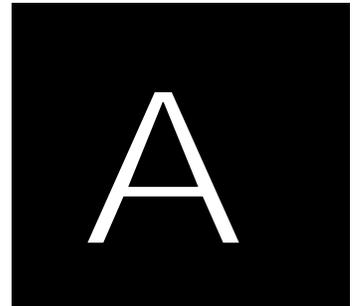
- Fernández-Pacheco, D.G., Escarabajal-Henarejos, D., Ruiz-Canales, A., Conesa, J. y Molina-Martínez, J.M. (2014). A digital image-processing-based method for determining the crop coefficient of lettuce crops in the southeast of Spain. *Biosystems Engineering*, 117, pp.23-34.
- Flener, C., Vaaja, M., Jaakkola, A., Krooks, A., Kaartinen, H., Kukko, A., Kasvi, E., Hyypä, H., Hyypä, J. y Alho, P. (2013). Seamless mapping of river channels at high resolution using mobile LiDAR and UAV-photography. *Remote Sensing*, 5(12), pp.6382-6407.
- Fortes, R., Prieto, M., Terron, J., Blanco, J., Millan, S., y Campillo, C. (2014). Using apparent electric conductivity and NDVI measurements for yield estimation of processing tomato crop. *Transactions of the ASABE*, 57(3), pp.827-835.
- Fuentes, J.E., Bolaños, J.A. y Rozo, D.M. (2012). Modelo digital de superficie a partir de imágenes de satélite ikonos para el análisis de áreas de inundación en Santa Marta, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 41(2), pp.251-266.
- García-Ruiz, F., Sankaran, S., Maja, J.M., Lee, W.S., Rasmussen, J. y Ehsani, R. (2013). Comparison of two aerial imaging platforms for identification of huanglongbing-infected citrus trees. *Computers and Electronics in Agriculture*, 91, pp.106–115.
- Gökdoğan, A.H., Sukkarieh, S., Bryson, M., Randle, J., Lupton, T. y Hung, C. (2010). A rotary-wing unmanned air vehicle for aquatic weed surveillance and management. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 57, pp.467–484.
- Hassaballa, A.A. y Matori, A.B. (2011). The estimation of air temperature from NOAA/AVHRR images and the study of NDVI-Ts impact: Case study: The application of split-window algorithms over (Perak Tengah & Manjong) area, Malaysia. *2011 IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)*, Penang, Malaysia, 12-13 julio 2011.
- Hernández, D. (2006). *Introducción a la fotogrametría digital*. Madrid: Universidad de Castilla La Mancha.
- Jiménez, G. (2007). *Topografía para ingenieros civiles*. Universidad del Quindío.

- Johnson, L.F., Herwitz, S.R., Lobitz, B.M. y Dunagan, S.E. (2004). Feasibility of monitoring coffee field ripeness with airborne multispectral imagery. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(6), pp.845-849.
- Johnson, L.F., Herwitz, S., Dunagana, S., Lobitz, B., Sullivan, D. y Slye, R. (2003). Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV. *29th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Honolulu, Hawaii, 10-14 November 2003.
- Koolhaas, M. s.f. *Topografía agrícola*. Universidad de la República de Uruguay.
- Maresma, Á., Ariza, M., Martínez, E., Lloveras, J. y Martínez-Casasnovas, J.A. (2016). Analysis of vegetation indices to determine nitrogen application and yield prediction in maize (*zea mays* L.) from a standard UAV service. *Remote Sensing*, 8(12), p.973.
- Martin, J., Edwards, H.H., Burgess, M.A., Percival, H.F., Fagan, D.E., Gardner, B.E., Ortega-Ortiz J.G., Ifju, P.G., Evers, B.S. y Rambo, T.J., (2012). *Estimating distribution of hidden objects with drones: from tennis balls to manatees*, [en línea] Disponible en: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038882>>
- Mulero-Pázmány, M., Stolper, R., van Essen, L.D., Negro, J.J. y Sassen, T. (2014). *Remotely piloted aircraft systems as a rhinoceros anti-poaching tool in Africa*, [en línea] Disponible en: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083873>>
- Pachas, R.L. (2009). El levantamiento topográfico: uso del GPS y estación total. *Academia*, VIII(16), pp.29-45.
- Peña, J.M., Torres-Sánchez, J., de Castro, A.I., Kelly, M. y López-Granados, F. (2013). *Weed mapping in early-season maize fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images*, [en línea] Disponible en: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077151>>
- Pérez-Ortiz, M., Peña, J.M., Gutiérrez, P.A., Torres-Sánchez, J., Hervás-Martínez, C. y López-Granados, F. (2016). Selecting patterns and features for between- and within- crop-row weed mapping using UAV-imagery. *Expert Systems with Applications*, 47, pp.85–94.
- Permata, A., Juniansyah, A., Nurcahyati, E., Afrizal, M.D., Untoro, M.A.S., Arifatha, N., Adiwijaya, R.R.Y., Widartono, B.S. y Purwanto, T.H. (2016). *Aerial photographs of landslide on Clapar, Madukara district of Banjarnegara as a spatial geodatabase*.

- [pdf] Disponible en: < <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/47/1/012006/pdf>>
- Pineux, N., Lisein, J., Swerts, G., Bielders, C.L., Lejeune, P., Colinet, G. y Degré, A. (2017). Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? *Geomorphology*, 280, pp.122–136.
- Pozuelo, F., Andrés, M. y Jordana, J. (2013). *Fotogrametría analítica*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. y Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En: NASA, *Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symposium*.
- Santamaría, J. (2011). *La cartografía y las proyecciones cartográficas*. Universidad de la Rioja.
- Tamminga, A., Hugenholtz, C., Eaton, B. y Lapointe, M. (2014). Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an unmanned aerial vehicle (UAV): A first assessment in the context of river research and management. *River Research and Applications*, 31(3), pp.1-29.
- Taylor, J.C., Wood, G.A. y Thomas, G. (1997). Mapping yield potential with remote sensing. En: Precision agriculture'97, *1st European Conference on Precision Agriculture*. Warwick, UK, 7-10 septiembre 1997. Herndon: BIOS Scientific Publishers
- Torres, Á. y Villate, E. (2001). *Topografía*. 4a ed. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería.
- Torres-Sánchez, J., Peña, J.M., de Castro, A.I. y López-Granados, F. (2014). Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, pp.104–113.
- Verger A., Vigneau, N., Chéron, C., Gilliot, J-M., Comar, A. y Baret, F. (2014). Green area index from an unmanned aerial system over wheat and rapeseed crops. *Remote Sensing of Environment*, 152, pp.654–664.
- Vermeulen, C., Lejeune, P., Lisein, J., Sawadogo, P. y Bouché, P. (2013). *Unmanned aerial survey of elephants*, [en línea] Disponible en: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054700>>

- Watanabe, Y. y Kawahara, Y. (2016). UAV photogrammetry for monitoring changes in river topography and vegetation. *Procedia Engineering*, 154, pp.317–325.
- Xiang, H. y Lei, T. (2011). Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems engineering*, 108, pp.174-190.
- Xiang, H. y Tian, L. (2011). An automated Stand-alone In-field Remote Sensing System (SIRSS) for in-season crop monitoring. *Computers and electronics in agriculture*, 78(1), 1–8.
- Zarco-Tejada, P.J., Diaz-Varela, R.A., Angileri, V. y Loudjania, P. (2014). 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, pp.89–99.
- Zhu, H., Lan, Y., Wu, W., Clint, W.C., Huang Y., Xue, X., Liang, J. y Fritz, B. (2010). Development of a PWM precision spraying controller for unmanned aerial vehicles. *Journal of Bionic Engineering*, 7, pp.276–283.

Anexo
Glosario de términos



Anexo A

GLOSARIO DE TÉRMINOS

*Jorge Flores Velázquez, Alberto González Sánchez y Ronald Ernesto Ontiveros
Capurata*

El mundo de los VANT requiere conocer algunos términos, en especial los relacionados con el manejo, operación, configuración y sus aplicaciones. A continuación, se incluyen los más utilizados.

Acelerómetro: sensor que mide las variaciones de velocidad que experimenta un cuerpo. En las aeronaves no tripuladas y pilotadas de forma remota (RPA) se usan para medir las aceleraciones que experimenta la plataforma en los tres ejes del espacio, permitiendo así proporcionar datos a la placa controladora sobre la posición de la aeronave en el espacio para que ésta verifique si el movimiento o posición de la plataforma es correcto o no.

Adaptador de hélices: pieza que conecta físicamente la hélice con el eje del motor, generalmente suele tratarse de una arandela de plástico para evitar que la hélice gire independientemente.

Aeronave: cualquier vehículo capaz de navegar por el aire o la atmósfera. También incluye a los globos y dirigibles y pueden ser tripulados o no tripulados.

AGL: siglas en inglés de *Above Ground Level*, significa altura sobre el terreno. Se usa para la altura que volará la aeronave, a diciembre de 2016 en México no existen limitaciones legales de altura de vuelo.

Alerón: aleta giratoria en la parte posterior de las alas de un RPA de ala fija, que tiene por objeto hacer variar la inclinación del aparato y facilitar otras maniobras.

Antena omnidireccional o SPW: siglas en inglés de *skew planar wheel*; se refiere a la clase de antena con varias direcciones de emisión de forma simultánea.

Aterrizaje de emergencia: maniobra de aterrizaje en condiciones anormales de vuelo que en algunos casos puede llegar a ser realizado de forma automática por el equipo.

AUW: siglas en inglés de *all up weight*; se refiere al peso máximo de la aeronave al despegue.

Banda SRD: siglas en inglés de *short rang device*; es la banda de trabajo de longitud de onda corta (generalmente de una frecuencia de 468 mhz) que permite enviar

información de telemetría (datos) a corto alcance con la suficiente potencia para evitar que se generen interferencias con otras frecuencias.

Barómetro: sensor que mide la presión atmosférica. A partir de la variación de dicha presión la placa controladora puede calcular la variación de altura de vuelo y de ese modo controlar automáticamente la altura a la que se encuentra el RPA.

Base Cam: sistema controlador del gimbal (software), que permite el manejo del sensor que se encuentre instalado en dicho gimbal.

BEC: siglas en inglés de *battery eliminator circuit*; es el circuito eliminador de la batería, que actúa a modo de transformador de potencia, haciendo que se reduzca el voltaje que sale de la batería hasta un voltaje aceptado por el sensor o elemento situado a la salida.

Binding: proceso de emparejamiento entre emisora y receptor.

Brazo o saliente: elemento que compone el fuselaje del multicoptero en cuyo extremo se instalan los motores del mismo.

Buje: pieza cilíndrica que reviste el interior los elementos mecánicos que giran alrededor de un eje.

BVLOS: siglas en inglés de *Beyond Visual Line of Sight*; significa más allá de la línea de visión. Sirve cuando la aeronave se encuentra más allá del alcance de la vista del operador por lo que requiere de pantallas para visualizar el comportamiento del mismo.

Cable servo: son cables de diferentes colores que suelen venir frecuentemente en grupos de dos o tres y que sirven para conectar los diferentes elementos electrónicos del multicoptero entre sí (motores, servos, variadores, gimbal, receptores, etc.) o a la placa controladora.

Calibración: se denomina así al proceso de ajuste de los valores de un determinado sensor (gimbal, brújula, IMU, etc.).

Checklist: lista de puntos de verificación necesarios para cada actividad.

Antena de imagen FPV: antena con tres hojas o cables circulares que se usa para la transmisión de imágenes de vista en primera persona, por sus siglas en inglés *First Person View* (FPV).

Coaxial: disposición de los rotores de un multicoptero en el que dos rotores comparten un mismo eje común.

Comprobador de batería (*battery checker*): dispositivo que permite determinar el estado de carga total y por celda de las baterías.

Control de posición: sistema de estabilización mediante sensores a bordo que permite al multicoptero mantenerse en un determinado punto.

Controlador de vuelo: componente del multicoptero que permite determinar la velocidad de giro de los rotores del multicoptero con el objetivo de controlar su desplazamiento en el aire. Básicamente se trata de un microprocesador con un circuito asociado que permite el control de los sensores y los mandos de la aeronave.

CSC: (*combination stick command*) secuencia o combinación de movimientos con las palanquillas de la emisora que permite el arranque, armado y desarmado de los motores del multicoptero.

CTA: área de control que se extiende a partir de los 300 m sobre aeropuertos o RTC.

Cuadricóptero: Multicoptero de cuatro rotores.

D&A: De las siglas en inglés *detect and avoid*, significa detectar y evitar. Regla básica de la navegación aérea sobre la necesidad de que el piloto pueda ver lo que hay alrededor de la aeronave para evitar colisiones.

DRON o DRONE: acrónimo de las siglas en inglés *Dynamic Remotely Operated Navigation Equipment*; se traduce como “zumbido, abejorro o zángano”.

Dual rate: función de la emisora que permite con una misma orden dada con el mando controlar más de una función a través del mismo canal.

Duocóptero: multirrotor de solo dos rotores.

Efecto suelo: fenómeno aerodinámico que se produce cuando el multicoptero se encuentra situado próximo al suelo y como consecuencia puede producir problemas con la estabilidad de la plataforma.

Empuje de flotación: fuerza ejercida por los motores, generalmente al 50 % de su potencia, que permite que el multicoptero se quede en vuelo estacionario a una misma altura.

ESC: de las siglas en inglés *electronic speed controller* que significa variador o regulador electrónico de velocidad, se refiere al elemento del multicoptero que regula la corriente eléctrica que llega a los motores desde la placa controladora y permite controlar la velocidad de rotación de éstos y, por tanto, permite maniobrar el multicoptero en el espacio.

Estación de tierra: término que se refiere al equipo de control, generalmente situado sobre el terreno, que gracias al receptor y, en su caso, a un sistema de FPV, permite mantener una comunicación con el multicoptero para su control y manejo.

Failsafe: protocolo de actuación en caso de pérdida de señal con la estación de tierra.

Fly away: es un término que se utiliza para referirse a la situación que se produce cuando el piloto pierde el control del RPA y este pasa a volar de forma autónoma sin gobierno.

FPV: siglas en inglés de *First Person View*, que se traduce como vista en primera persona y se refiere al sistema para ver en tiempo real o casi real las imágenes obtenidas por una cámara situada sobre la aeronave, brinda una perspectiva del vuelo de la aeronave como si el piloto estuviera dentro de la misma, lo que mejora el control del RPA. El piloto puede ver las imágenes mediante lentes o pantalla. Además, es todo aquello que tiene que ver con esta modalidad de vuelo, desde los elementos necesarios para realizarlo (Cámara, emisor, anti-vibraciones, receptor, pantalla o gafas, etc...) hasta las grabaciones que se hacen en esta modalidad.

FTL: siglas en inglés de *Flight Time Limitations*, se refiere a las limitaciones del tiempo de vuelo y no a las limitaciones de la batería o la autonomía, está más relacionado a otras variables.

GCS: siglas en inglés de *ground control station* que se refiere al sistema de control en tierra desde el cual se maneja o supervisa el vuelo de la aeronave (generalmente ese papel lo realiza la propia emisora).

Gimbal (soporte cardan): soporte que permite situar una carga en el multicoptero (generalmente un sensor) para compensar los movimientos que se producen en la plataforma durante el vuelo en los diferentes ejes de inclinación, con el objetivo generalmente de obtener imágenes nítidas.

Giróscopo: sensor que mide la inclinación de la plataforma respecto de una superficie considerada como horizontal.

GPS: de las siglas en inglés *global positioning system* y se refiere al sistema de posicionamiento global basado en satélites que permite determinar la posición precisa (latitud y longitud) de un receptor situado en la tierra a través de las señales emitidas por los satélites y del tiempo que tardan en llegar a dicho receptor. En el multicoptero este sistema consta de una antena conectada a la placa controladora y se considera un sensor más para determinar de forma precisa la posición del equipo. GPS hace referencia al sistema de satélites norteamericano.

HDMI/ AV: adaptador de señal de video desde la clavija de salida HDMI hasta la de AV o viceversa.

Hexacóptero: multicopteros de 6 motores y 6 hélices. Son más estables que los de 4, que son más convencionales. Se usa más para fines más técnicos que de entretenimiento.

Immersion flight: estilo de vuelo en el que el piloto vuela la aeronave en primera persona mediante un sistema FPV gracias a la ayuda de unas gafas especiales.

IMU: de las siglas en inglés *inertial measuring/ measurement unit* que significa unidad de medición/ medida inercial, es un componente que reconoce los cambios de

inclinación y aceleraciones a través de un elemento electrónico incluido en la placa controladora de vuelo que integra dentro de ella un barómetro, giróscopos y acelerómetros y que permite medir e informar acerca de la velocidad, altura, orientación y fuerzas gravitacionales que experimenta el multicoptero.

Jumper: elemento que permite interconectar de manera temporal dos terminales (pines) próximos entre sí.

LED: sistema de alumbrado de bajo consumo que puede emplearse tanto para la identificación de la posición de la aeronave, así como vía de comunicación con la misma para conocer su estado, modos de vuelo activados, nivel de carga de la batería, etc.

LiFePO, LiFePO₄: clase de baterías conformadas por materiales compuestos de hierro, litio y fosfatos.

Línea de Sitio: área hasta donde el piloto puede mantener contacto visual con el dron en vuelo.

LiPo, Lipo, Li-Poly: denominaciones que reciben las baterías de materiales compuestos realizadas a partir de polímeros de litio. Son las baterías más comunes.

Mando de control/emisora: elemento que permite tanto el envío de órdenes al multicoptero desde tierra como la recepción de información procedentes de la plataforma.

Manómetro/ manómetro de Bourdon: instrumento de medida que permite obtener la velocidad de vuelo efectiva del RPA.

AVLink: de las siglas en inglés *micro air vehicle link*; se trata de un protocolo de comunicación con vehículos aéreos no tripulados, generalmente se emplea para la comunicación entre el propio vehículo, la estación de control en tierra y los diferentes subsistemas presentes en el vehículo.

MC/ placa controladora/ controladora: (*main controller*) procesador que realiza los cálculos y ajustes con la información de la medida inercial y GPS para actuar sobre el regulador electrónico de velocidad y controlar la aeronave acorde a los mandos del receptor o la ruta programada. Se trata de un elemento central de control del multicoptero que permite integrar la información que le llega a este de los distintos sensores instalados y conectados al multicoptero.

Miniquad: es el nombre común de los VANT con dimensiones de hasta 250mm aproximadamente utilizados para el FPV.

Multicoptero o Multirotor: es cualquier aeronave con más de un rotor y más de una hélice destinados a elevar el artefacto.

OACI: es la Organización de Aviación Civil Internacional, un organismo de las Naciones Unidas responsable de promover normativas y estándares comunes en temas aeronáuticos entre los países miembros.

Operador: cualquier persona física o jurídica que explota o desea manejar una o más aeronaves.

OSD: de las siglas en inglés *on-screen-display*, se refiere a la pantalla que muestra en tiempo real o casi real los valores para las principales variables de vuelo del multicoptero.

Palanquillas/ palancas/ sticks: elementos de control presentes en la emisora (generalmente dos) que permiten ajustar y modificar la posición del multicoptero en el espacio durante su vuelo.

PDB: de las siglas en inglés *power distribution board*, se refiere a la placa de distribución energética. Se utiliza para distribuir la energía que aporta la LiPo a cada uno de los elementos del VANT.

Peso de despegue: es el peso total del VANT en conjunto con la carga útil del mismo.

PID: siglas de proporcional, integral y derivativo, es un mecanismo de control por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial, calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado. En los VANT se utiliza para cambiar entre diferentes modos de vuelo, haciendo que sean más asistidos para operadores principiantes o en condiciones adversas, y por el contrario, menos asistidos para el vuelo acrobático o de competición.

Pin: cada uno de los terminales de los receptores, placas controladoras, etc., a través de los cuales se pueden conectar con otros elementos del multicoptero.

Pinging: Proceso por el cual se obtiene información de posición o distancia a partir de la emisión y recepción de una onda.

Placa central/ center plate: pieza del fuselaje que se sitúa en el centro del multicoptero conectada con todos los brazos del mismo, ayuda a incrementar la resistencia del equipo y permite la instalación de un mayor número de elementos en la plataforma. Esta placa se suele situar encima, debajo o tanto encima como debajo (en el caso de que se instalen dos placas centrales) de la placa de distribución de alimentación.

Placa de distribución de alimentación: circuito que reparte o canaliza la alimentación del VANT desde la batería hasta los distintos componentes.

Potenciómetro: elemento de control presente en algunas emisoras a modo de rueda que permite regular de forma precisa y progresiva alguna función de manejo del RPA.

PPM: de las siglas en inglés de *pulse position modulation*, se refiere a la modulación por posición del pulso. Es el modo en el que se comunica la emisora con el VANT y envía información de diferente naturaleza por un mismo canal de emisión.

PWM: de las siglas en inglés de *pulse width modulation*, significa modulación por anchura de pulsos. Es el modo en el que se comunica la emisora con el VANT, con la diferencia que este sistema necesita de un canal independiente para cada tipo de información.

Quad o Quadricóptero: es un VANT de cuatro hélices montado en forma de X, H o +.

RAW: formato de imagen obtenido en bruto por la cámara fotográfica o sensor.

Receptor: elemento instalado en el multicoptero que permite la comunicación entre la emisora y la placa controladora.

RPA o RPAS: de las siglas en inglés de *remotely piloted aircraft system*, es como se conoce a la aeronave no tripulada y pilotada de forma remota. Se trata de un concepto que surgió con fuerza en EEUU para evitar que la gente se atemorizara por el uso de estos artefactos en medios urbanos al pensar que ninguna persona estaba a cargo en caso de avería durante el vuelo. Incluye la aeronave, la estación de tierra, el radioenlace, y otros equipos de apoyo.

RTH: de las siglas en inglés de *return to home* significa vuelta a casa. Es el sistema de autopiloto que permite a la aeronave regresar a la zona de despegue inicial desde el que previamente se ha armado de forma automática o semiautomática, muy popular en los VANT económicos que provienen de China, como el Syma X5, JJRC H20, Husban X4, etc.

RTL: de las siglas en inglés de *return to launch* significa retorno al punto de lanzamiento. Aunque es muy similar al RTH, el RTL necesita de un sistema de navegación como GPS para aterrizar exactamente donde despegó. Este sistema es más propio de los VANT de alta gama como el DJI Phantom 2, 3 o el Inspire 1, etc.

S&A: de las siglas en inglés *sense and avoid*, significa sentir y evitar. Regla básica de la navegación aérea sobre la necesidad de que el piloto pueda ver lo que hay alrededor de la aeronave para evitar colisiones.

Señal AV: señal de video analógica de 5,8 mhz.

Servomotor/ servo actuador/ servo: dispositivo actuador que presenta la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación y de mantenerse estable en dicha posición. Está formado por un motor de corriente continua, una caja reductora y un circuito de control, siendo su margen de funcionamiento generalmente de menos de una vuelta completa.

Shutter cable: cable que conecta la cámara instalada en el gimbal con la placa o con el receptor del multicoptero (en el caso de la cámara se suele conectar a través de la zapata de la misma).

Telemetría: sistema de comunicación de datos en tiempo real o casi-real entre la emisora y el multicoptero.

Throttle: control de aceleración de los rotores del multicoptero, suele situarse en el stick izquierdo de la emisora.

Thrust: empuje ejercido por la rotación de los motores del multicoptero.

Tren de aterrizaje: parte del fuselaje del multicoptero destinado a soportar el peso de este cuando se encuentra posado en el suelo.

Tricóptero: multicoptero de 3 rotores.

UAS: de las siglas en inglés de *Unmanned Aerial System*, se refiere a un sistema aéreo no tripulado. Comprende el sistema completo de vuelo, es decir, el avión, la emisora o sistema de control, el radio enlace, la estación en tierra y los equipos de apoyo.

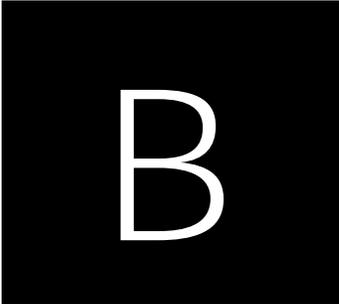
UAV: de las siglas en inglés de *Unmanned Aerial Vehicle*, se refiere a los vehículos aéreos no tripulados, hace mención únicamente al aparato que vuela.

V2V: de las siglas en inglés de *vehicle to vehicle* y se refiere a las comunicaciones que se dan de vehículo a vehículo.

VMC: de las siglas en inglés de *Visual Meteorological Conditions*, se refiere a las condiciones meteorológicas visuales.

Waypoint: punto de paso o punto de control a lo largo de una ruta planificada.

Anexo
Sistemas de propulsión, energía,
control y telecomunicación



B

Anexo B

SISTEMAS DE PROPULSIÓN, ENERGÍA, CONTROL Y TELECOMUNICACIÓN

Jorge Alberto Fuentes Pacheco, Jorge Hermsillo Valadez, Bruno Lara Guzmán y Juan Manuel Rendón Mancha

Centro de Investigación en Ciencias, Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos

B.1 Sistema de propulsión eléctrico

El sistema de propulsión consiste en el conjunto de componentes que permiten a un dron elevarse, aterrizar o desplazarse de un lugar a otro. Un sistema de propulsión eléctrico para un dron está conformado principalmente por motores sin escobillas, controladores de velocidad electrónicos, hélices y baterías. Las especificaciones técnicas de cada uno de estos elementos tendrán influencia tanto en el tiempo de vuelo como en la capacidad de carga que podrá soportar el dron. Actualmente, la mayoría de los UAV's (Unmanned Aerial Vehicles) comerciales cuentan con tecnología de propulsión eléctrica. Existen UAV's de tamaño grande con motores de combustión interna utilizados principalmente con fines militares (Economou, 2016) o prototipos de drones con sistemas de combustible de hidrógeno (Firth, 2016 y Toon, 2014) que aún se encuentran en experimentación. A continuación se describen los principales elementos de un sistema de propulsión eléctrico.

B.1.1 Motores sin escobillas

En los UAV's se utilizan motores eléctricos sin escobillas (*brushless*). Estos motores están integrados por una parte móvil llamada rotor que contiene imanes y una parte fija conocida como estator donde se encuentran las bobinas de hilo conductor, ver Figura B.1. Estos motores no producen rozamiento entre sus componentes para producir movimiento. Su funcionamiento se basa en la creación de un campo electromagnético que interactúa con el campo magnético de los imanes con el objetivo de generar una fuerza capaz de hacer girar el rotor de forma continua. A diferencia de los motores con escobillas, estos motores producen menos calor y menos ruido, son de menor peso y requieren de poco mantenimiento.

Una de las características importantes de los motores es el coeficiente KV (rpm/V), el cual consiste en el número de revoluciones por minuto a la que un motor gira cuando se

le aplica un voltio de tensión eléctrica. A mayor KV, mayor es la velocidad de giro y mayor es el consumo de energía. Motores con un KV alto son recomendados para drones de carreras.



Figura B.1 Motor sin escobillas

B.1.2 Controladores electrónicos de velocidad

A través de los Controladores Electrónicos de Velocidad (ESC's, por sus siglas en inglés *Electronic Speed Controller*) el controlador de vuelo puede regular de forma precisa la velocidad de giro de los motores. Un ESC puede ser programado con la finalidad de ajustar la dirección del motor o para cambiar algunos parámetros de funcionamiento. También es posible actualizar su software interno (*firmware*) por medio de dispositivos de programación para mejorar su funcionamiento.

La mayoría de los ESC's contienen un Circuito de Eliminación de Batería (BEC, por sus siglas en inglés *Battery Elimination Circuit*), cuyo objetivo principal es el de regular el voltaje que reciben los motores desde la batería. Es posible integrar un BEC externo a un ESC que no lo contenga.

Un ESC cuenta con diferentes cables conectores, ver Figura B.2. En el extremo derecho, existen tres cables para proveer de corriente trifásica de bajo voltaje a los motores sin escobillas. Por el lado izquierdo, un cable rojo y uno negro que se conectan a la tarjeta de distribución de corriente, la cual recibe energía de una batería. Y también hay un conector de 3 *pins* que se conecta al controlador de vuelo para ajustar la velocidad del motor.



(a) Vista frontal



(a) Vista frontal

Figura B.2 Controlador electrónico de velocidad Afro de 30 A para baterías LiPo (Litio Polímero) de 2 a 4 celdas

En la Figura B.3 se muestran 4 ESC's conectados a una tarjeta de distribución de energía. Esta tarjeta se encarga de dividir la terminal positiva y negativa de la batería en 4.

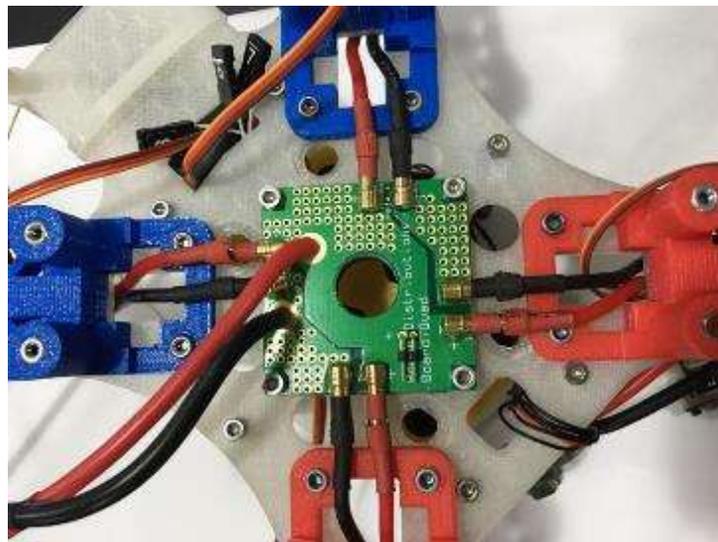


Figura B.3 Tarjeta de distribución de energía con 4 ESC's fijada en una estructura para cuadricóptero

Los ESC's soportan un máximo de voltaje y de amperaje, por lo que es importante consultar sus especificaciones técnicas con el fabricante. Si se excede de los máximos entonces los ESC's se sobrecalentarán y dejarán de funcionar. En Liang (2016) se pueden consultar todos los aspectos a considerar para hacer una buena selección de estos elementos.

B.1.3 Hélices

Otro de los elementos que definirá el empuje del drone son las hélices. La mayoría de estas son de dos palas pero también las hay de tres o cuatro. Las características más importantes de las hélices son su diámetro y el ángulo de ataque (*pitch*). El diámetro (por lo regular definido en pulgadas) indica la longitud de la hélice. Con una hélice de menor tamaño es más fácil de acelerar y frenar, pero también es posible que no genere el suficiente impulso para elevar el drone. El ángulo de ataque define la distancia que avanzaría la hélice al dar una revolución. La selección de las hélices depende del tipo de motor que se utilice. Una selección incorrecta ocasionará un sobrecalentamiento de los motores.



Figura B.4 Hélices de fibra de carbono para cuadricóptero

B.2 Sistemas de energía

Actualmente la gran mayoría de los drones medianos utilizan baterías de litio-polímero dado que pueden suministrar una gran cantidad de corriente en poco tiempo. Algunos drones grandes utilizan baterías de ion-litio para alimentar sus motores porque giran a una baja velocidad y no requieren de grandes cantidades de corriente en poco tiempo.

B.2.1 Necesidad de corriente de los motores

Los motores de los drones necesitan una gran cantidad de corriente en tiempos muy cortos, dado que los rotores manejan velocidades de 1000 a 20,000 rpm y pueden aumentar su velocidad muy rápidamente. Las baterías que son capaces de suministrar la corriente necesaria para los motores de los drones de tamaño mediano son las baterías de Litio-Polímero o LiPo.

B.2.2 Tipos y características de Baterías

Dependiendo de la potencia de los motores y del número de ellos se necesitarán diferentes tipos de baterías de lipo. Son comunes las baterías de 3 y 4 celdas para multirrotores (ver Figura B.5).



Figura B.5 Batería de litio-polímero de 3 celdas del dron Cheerson CX20

Para cargar las baterías de LiPo se utilizan cargadores especiales que regulan la corriente necesaria que debe recibir la batería en el tiempo adecuado (Valero, 2014). La batería se conecta al cargador y el cargador muestra en un display o en una combinación de indicadores LED si la batería está cargando correctamente, si ha terminado la carga de la batería o si existe algún problema con la carga.

Con las baterías de lipo hay que tener cuidados especiales: Al usar las baterías de lipo, éstas no deben bajar de un nivel mínimo de carga porque estas se dañan. El daño se puede observar como un crecimiento de la batería, se aprecian hinchadas. Cuando esto pasa hay que desechar la batería porque su uso ya no es seguro. Se corre el riesgo de que explote. La explosión puede causar quemaduras graves y otros daños en el usuario. Otra precaución que se debe de tener es que al cargarlas con su cargador especial no deben dejarse sin supervisión, si se empiezan a hinchar o a echar humo deben ser desconectadas y desechadas.

Los drones emiten una señal sonora de emergencia cuando la carga de las baterías ha llegado a un nivel tal que debe dejar de usarse. Dicha señal también puede apreciarse en un indicador luminoso en el radiocontrol. Los drones más modernos cuentan con baterías inteligentes cuya carga puede ser monitoreada en todo momento (DJI, 2016), incluso cuando detectan que la batería llegó a su límite de uso interrumpen el vuelo programado que tenían y dejan también de responder al usuario para regresar al punto de partida antes de que se dañe la batería. La Figura B.6 muestra una batería inteligente.



Figura B.6 La figura muestra la batería inteligente del dron Phantom 4 de la marca DJI

B.3 Sistema de control

B.3.1 Introducción

Un dron tiene varios modos de vuelo, entre ellos se encuentran los modos: 1) Manual, 2) Manual con estabilización automática y 3) Automático. En el modo Manual el piloto controla completamente las velocidades de los rotores del dron manipulando el radiocontrol y se encarga de que no se estrelle contra el suelo. Se necesita ser un piloto experimentado para volar un dron en modo Manual. Actualmente el modo Manual de los drones utilizados para la agricultura de precisión casi no se usa, en su lugar se usa un modo Manual con estabilización automática que permite al piloto mover el dron de forma segura sin el riesgo de que se caiga.

En este modo, el piloto utiliza el radiocontrol para elevar el dron, girarlo sobre su propio eje y moverlo hacia delante, atrás, izquierda y derecha. Cuando el piloto suelta el radiocontrol, el dron mantiene su posición gracias a un sistema de control automático que utiliza sensores que carga el dron. En el modo Automático el dron puede seguir un programa de vuelo predefinido y tomar fotografías del campo de cultivo sobre una trayectoria especificada. Dicha trayectoria se define normalmente desde una Tablet que se comunica con el radiocontrol. En los drones más recientes el inicio del vuelo automático se arranca también desde la Tablet y el dron despegga automáticamente, realiza el vuelo programado tomado fotografías y al final aterriza de forma automática (DroneDeploy, 2016).

B.3.2 Radiocontrol

El radiocontrol, o transmitter en inglés, es el dispositivo que permite enviar señales desde tierra al dron para manejarlo manual o semi-manualmente. La Figura B.7 muestra un radiocontrol de un Phantom 4 de DJI y la Figura B.8 muestra un acercamiento a las palancas de mando.



Figura B.7 Radiocontrol de un dron Phantom 4 de DJI. Se puede apreciar el soporte para Tablet o celular, que no viene incluido con el control

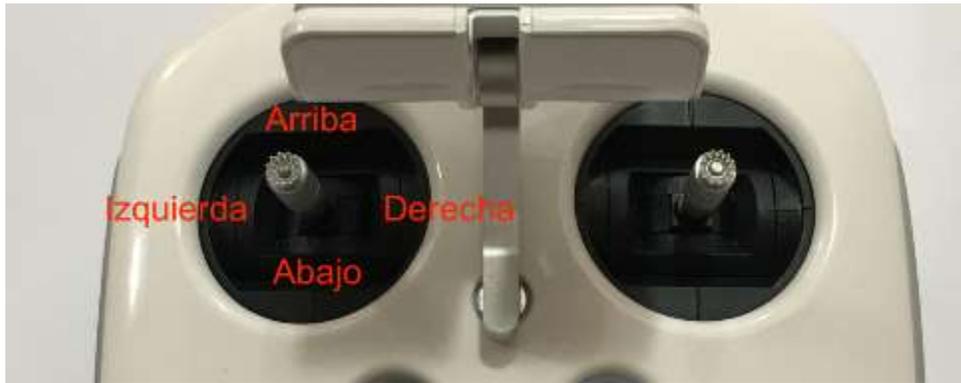


Figura B.8 Palancas de mando del radiocontrol. Las palancas de mando tienen dos grados de libertad y se pueden mover en las siguientes direcciones: arriba, abajo, izquierda y derecha

Las palancas sirven para desempeñar diferentes funciones dependiendo del modo de vuelo. En el modo de vuelo Manual y Manual con estabilización automática la palanca izquierda tiene las siguientes funciones:

Arriba y Abajo = aumentar la potencia de todos los motores para elevar o bajar el dron. Al soltar la palanca, en el modo Manual con estabilización automática el dron mantiene la altura, sin embargo en el Modo Manual, solo mantiene la velocidad de los motores y depende de la inercia del dron y del viento que el dron siga bajando o subiendo.

Izquierda y Derecha = realizar un giro sobre su propio eje para colocar el frente del dron en la dirección deseada.

Es muy importante en el modo Manual saber cuál es el frente del dron, porque todos los movimientos de la palanca derecha del radiocontrol están referenciados al frente del dron.

La palanca derecha tiene las siguientes hace que el dron se incline en una de las siguientes posiciones

Arriba = hacia el frente del dron

Abajo = hacia atrás

Derecha e Izquierda = hacia la derecha o izquierda con respecto al frente del dron.

Algunos drones tienen un modo Sin Frente (HeadLess) que permite que el piloto deje de preocuparse por donde queda el frente del dron. En este modo la palanca izquierda moverá el dron en estas cuatro direcciones:

Arriba = alejándose del piloto

Abajo = acercándose al piloto

Derecha e Izquierda = hacia la derecha o izquierda con respecto al piloto.

B.3.3 Sensores necesarios para el control

Para un control automático es necesario estimar el estado actual del dron, esto es, su posición en el espacio, inclinación y velocidad, para poder aplicar la velocidad adecuada a los motores. Los sensores que se utilizan para estimar estos datos son los siguientes:

El acelerómetro. Este sensor mide la aceleración tangencial en los 3 ejes espaciales del dron.

El giroscopio. Mide las rotaciones realizadas sobre los 3 ejes espaciales X, Y y Z.

La brújula. Estima donde se encuentra el norte magnético de la tierra.

El barómetro. Mide la presión atmosférica y se utiliza para estimar la altura del dron.

El localizador o GPS capta la información de 5 o más satélites para estimar la longitud y latitud del dron.

Normalmente se utiliza el sistema GPS (Global Position System) de Estados Unidos que tiene una precisión entre 3 a 4 metros. Aunque los drones más recientes usan también el sistema ruso GLONASS que tiene una precisión entre 6 y 7 metros, pero que combinado con el GPS brinda una precisión superior a los dos sistemas.

B.3.4 Piloto automático

El piloto automático se compone de un circuito electrónico que se encarga de controlar la velocidad de los motores para que el dron realice un vuelo estable de forma automática, esto es, sin necesidad de un piloto humano.

El piloto automático cuenta con un microprocesador que corre un programa de control automático. Las entradas del control son las señales de los sensores como el acelerómetro, el giroscopio, la brújula electrónica, el GPS y el barómetro. La referencia de control consiste en el vuelo programado, que se establece normalmente desde una estación en tierra.

El piloto automático de los drones más recientes incluye un sistema de Reconstrucción tridimensional de la escena percibida por una cámara estéreo y sonares montados en el dron para realizar evasión de obstáculos (DJI, 2016). La Figura B.9 muestra el piloto automático Ardupilot (Arduino, 2016). Otros ejemplos de pilotos automáticos son diferentes versiones del NAZA de DJI, ampliamente usados en drones comerciales.

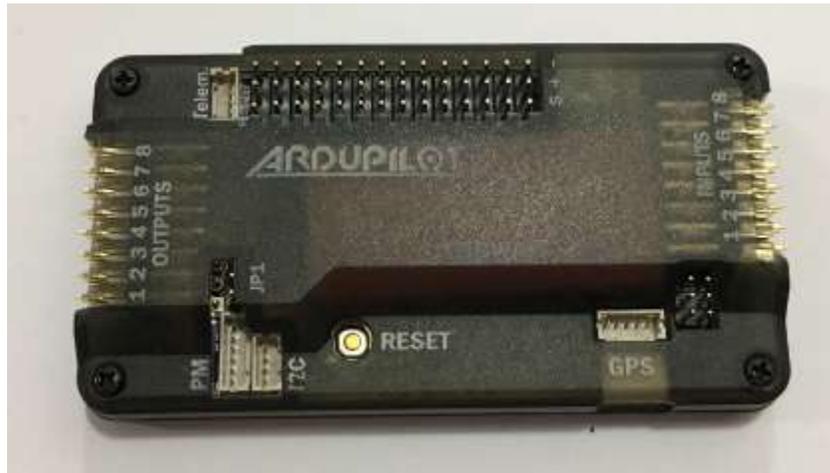


Figura B.9 Piloto automático Ardupilot

Este es un piloto automático de software y hardware libre que es capaz de controlar un dron para realizar vuelos completamente autónomos. La caja incluye acelerómetros y giroscopios. El GPS se conecta a través del puerto que se puede apreciar en la Figura B.9.

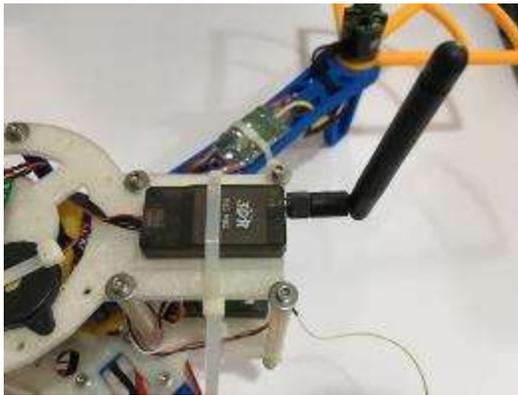
La señal de control que genera el piloto automático se conecta directamente a los controladores de velocidad electrónicos (ESCs) (ver sección B.1.2) para hacer que los rotores giren a la velocidad exacta para que las hélices generen el vuelo programado.

B.4 Sistemas de telecomunicación

Existen diferentes formas de controlar a los drones de forma remota. A continuación se presentan algunas de las herramientas más utilizados.

B.4.1 Estación de control en tierra

Durante el vuelo de un dron, este puede enviar datos (por ejemplo, parámetros de vuelo) en tiempo real a través de un sistema de radio telemetría a una computadora que permanece en tierra. Para establecer la comunicación se usa un sistema que cuenta con un “módulo aire” que se fija en el dron y un “módulo tierra” que se conecta a la computadora, ver Figura B.10.



(a) Módulo aire



(b) Módulo tierra

Figura B.10 Sistema de radio telemetría

Existen diferentes aplicaciones de software que pueden instalarse en la computadora para convertirla en una estación de control, algunas de ellas son: Mission Planner, APM Planner y DroneDeploy. Gracias a estas aplicaciones es posible planear misiones de vuelo, vigilar el nivel de la batería, obtener información de la velocidad y altitud de vuelo del vehículo, entre otras funciones.

B.4.2 Aeronave pilotada a distancia

La aeronave se puede pilotar a distancia a través del uso de un control remoto que funciona por radio frecuencia. Este consta de dos partes: el transmisor portátil que emplea el usuario y el receptor que se conecta al controlador de vuelo del drone. Existen diferentes tipos de radio transmisores, estos se diferencian principalmente por el número de canales de comunicación que cuentan. El número de canales determina el número de acciones que pueden ser controladas con la finalidad de hacer volar a un UAV.

Por ejemplo, un canal es para el acelerador, otro para rotar el UAV hacia la izquierda o hacia la derecha, o para inclinarlo hacia adelante o hacia atrás. El transmisor de radio cuenta con varios interruptores que al accionarlos son emitidas señales de radio que son captadas por el receptor y a su vez enviadas al controlador de vuelo. Para poder controlar un cuadricóptero es necesario un mínimo de 4 canales (*throttle*, *yaw*, *pitch*, y *roll*), aunque es recomendable utilizar un transmisor de 6 canales para llevar a cabo funciones extra como la de cambiar el modo de vuelo, ver Figura B.11. La frecuencia de radio más utilizada para controlar vehículos aéreos o terrestres es la de 2.4 GHz.



Figura B.11 Transmisor de radio de 6 canales

B.4.3 Vista en primera persona

La Vista en primera persona (FPV, por sus siglas en inglés *First Person View*) permite al operador controlar al UAV a partir de la información visual que captura una cámara de video durante el vuelo. La cámara es colocada en la parte delantera del UAV, lo cual le permite al operador la sensación de estar dentro del vehículo. La FPV es de gran ayuda al volar en zonas con bastantes obstáculos. Además ofrece la ventaja de volar a más altura y a mayores distancias, ya que no es necesario estar observando directamente al UAV. Un sistema de FPV consiste de una cámara, un transmisor de video, un receptor de video y un dispositivo de visualización (monitor o *googles*).

B.4.4 Sistemas de telecomunicación

Existen diferentes formas de controlar a los drones de forma remota. A continuación se presentan algunas de las herramientas más utilizados.

B.4.4.1 Estación de control en tierra

Durante el vuelo de un drone, este puede enviar datos (por ejemplo, parámetros de vuelo) en tiempo real a través de un sistema de radio telemetría a una computadora que permanece en tierra. Para establecer la comunicación se usa un sistema que cuenta con

un “módulo aire” que se fija en el drone y un “módulo tierra” que se conecta a la computadora, ver Figura B.12.

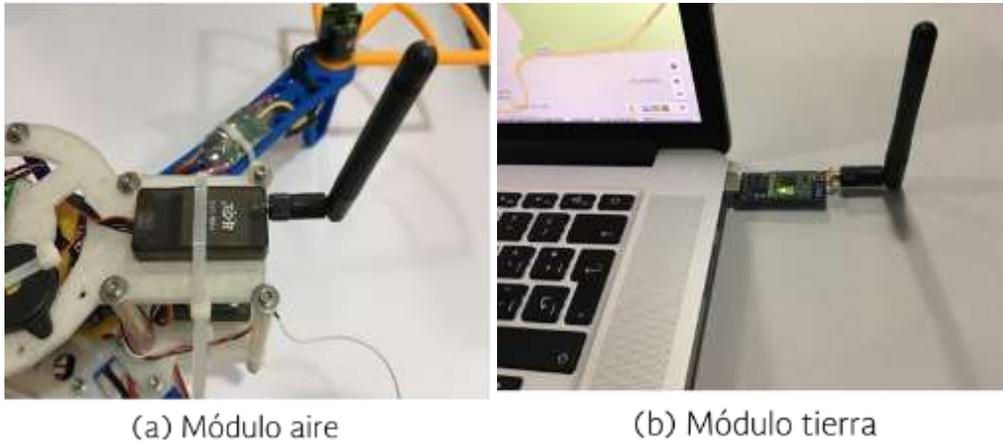


Figura B.12 Sistema de radio telemetría

Existen diferentes aplicaciones de software que pueden instalarse en la computadora para convertirla en una estación de control, algunas de ellas son: Mission Planner (jDrones, 2016a), APM Planner (jDrones, 2016b) y DroneDeploy (Drone Deploy, 2016). Gracias a estas aplicaciones es posible planear misiones de vuelo, vigilar el nivel de la batería, obtener información de la velocidad y altitud de vuelo del vehículo, entre otras funciones.

B.4.4.2 Aeronave pilotada a distancia

La aeronave se puede pilotar a distancia a través del uso de un control remoto que funciona por radio frecuencia. Este consta de dos partes: el transmisor portátil que emplea el usuario y el receptor que se conecta al controlador de vuelo del drone. Existen diferentes tipos de radio transmisores, estos se diferencian principalmente por el número de canales de comunicación que cuentan. El número de canales determina el número de acciones que pueden ser controladas con la finalidad de hacer volar a un UAV. Por ejemplo, un canal es para el acelerador, otro para rotar el UAV hacia la izquierda o hacia la derecha, o para inclinarlo hacia adelante o hacia atrás. El transmisor de radio cuenta con varios interruptores que al accionarlos son emitidas señales de radio que son captadas por el receptor y a su vez enviadas al controlador de vuelo. Para poder controlar un cuadricóptero es necesario un mínimo de 4 canales (*throttle*, *yaw*, *pitch*, y *roll*), aunque es recomendable utilizar un transmisor de 6 canales para llevar a cabo funciones extra como la de cambiar el modo de vuelo, ver Figura B.13. La frecuencia de radio más utilizada para controlar vehículos aéreos o terrestres es de 2.4 GHz. Consultar

(Liang, 2013) para obtener información detallada del funcionamiento del transmisor y del receptor.

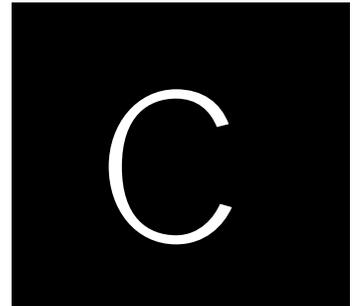


Figura B.13 Transmisor de radio de 6 canales

B.4.4.3 Vista en primera persona

La Vista en primera persona (FPV, por sus siglas en inglés *First Person View*) permite al operador controlar al UAV a partir de la información visual que captura una cámara de video durante el vuelo. La cámara es colocada en la parte delantera del UAV, lo cual le permite al operador la sensación de estar dentro del vehículo. La FPV es de gran ayuda al volar en zonas con bastantes obstáculos. Además ofrece la ventaja de volar a más altura y a mayores distancias, ya que no es necesario estar observando directamente al UAV. Un sistema de FPV consiste de una cámara, un transmisor de video, un receptor de video y un dispositivo de visualización (monitor o *goggles*).

Anexo
Simuladores de vuelo para VANT



Anexo C

SIMULADORES DE VUELO PARA VANT

Alberto González Sánchez

A continuación se presenta un resumen comparativo de los simuladores de vuelo de VANT más populares ("Drone Flight Simulator- Analysis and Comparison", s.f.). Este resumen se ha hecho considerando principalmente la plataforma multirrotor. Como sección de cierre, se presenta una comparativa entre dos de los simuladores más populares para la plataforma PC.

C.1 DroneSim Pro Flight Simulator

DroneSim Pro es un simulador de vuelo de VANT que se puede utilizar tanto en plataforma PC como en Mac. El simulador incorpora un motor de vuelo (*flight engine*) hecho a la medida que replica con mucho realismo la física del vuelo de un avión no tripulado. El programa permite colocar un avión no tripulado en cualquier parte del mundo y volar con mucha precisión a cualquier altitud.

La primera versión del simulador incluye las áreas de vuelo para el Phantom 2 y 3, dos de los drones cuadricópteros más populares. Las siguientes dos versiones incluyen una gran cantidad de adiciones importantes, incluyendo otros modelos de VANT y nuevas zonas de vuelo, así como el soporte de varios modelos de controladores remotos.



Figura C.1 Simulación de vuelo en Simpro

Las características que se incluyen en DroneSim Pro:

- Condiciones de luz realistas
- Física y modelos de vuelo muy precisos
- Escenarios realistas de para simulación y entretenimiento (ver Figura C.1).
- Modalidad de carreras de obstáculos, vuelo campo abierto

Un programa de demostración se puede descargar desde www.dronesimpro.com. El software es compatible con la mayoría de los controladores USB y ha sido probado para trabajar con controladores de Xbox y PlayStation. Este software de simulación tiene un precio razonable de 29.99 USD.

C.2 RealFlight Drone Flight Simulator

Este simulador de vuelo de VANT ofrece un gran nivel de detalle en los escenarios y en la calidad de la simulación (Figura C.2a). El programa viene con el control remoto Elite Interlink (Figura C.2b), que no requiere baterías ni complicados procedimientos de instalación y configuración. Cada función de software es operado por el control por lo que no se necesita el teclado, lo que le da al simulador una gran simplicidad de manejo.



Figura C.2 a) Escenario de muestra en el simulador. b) Contenido del paquete, incluye control remoto

Este software le permite hacer todo lo que normalmente se puede en un multirroto:

- Aprender a utilizar la cámara
- Hacer maniobras complicadas de vuelo
- Explorar el vuelo en primera persona (First Person View, FPV)
- Volar modelos multirroto del tipo Phantom y muchos otros
- Simulación del funcionamiento de la cámara maestra con el cardán (montura de cámara)

- Varias condiciones de práctica: día, noche, y diferente velocidad y dirección del viento

Además, incorpora varios juegos a modo de “retos” que hacen entretenida la simulación durante el aprendizaje.

El programa Realflight incluye una gran característica del producto, que es el botón de rebobinado. Esto permite hacer una copia de la simulación y rehacer la instancia cada vez que se tenga un accidente o se omita una foto, lo que permite corregir en tiempo real de forma instantánea lo que pudo haber sido un error de operación.

No obstante sus ventajas, existen dos limitaciones con el RealFlight. La primera es que no el simulador no es compatible con la plataforma Mac, por lo que los usuarios acostumbrados a los productos de Apple tendrán que elegir una opción diferente. La segunda es su costo, que está por encima de los 100 USD. No obstante estas desventajas, se le considera una alternativa seria para facilitar la práctica y la simulación de misiones de vuelo de aviones no tripulados.

C.3 Simulador Aerofly RC7 Quad

Se le considera al Aerofly RC7 Quad un simulador muy realista, pues la física es muy similar a la experimentada cuando se está volando un cuadricóptero. El programa viene con o sin control remoto, por lo que en caso de no tener el control, se utilizar el control de mando existente con el cable de conexión adecuado (Figura C.3).



Figura C.3 Cables adaptadores para usar el mismo control del VANT con el simulador Aerofly RC7 Quad

Características del Aerofly RC7 Quad:

- Más de 130 modelos de multirrotores a seleccionar
- Puede utilizar el mismo control remoto que el VANT, lo que facilita su adopción

- Puede seleccionar los drones Phantom de DJI, además de otros cuadricópteros y hexacópteros
- Compatible con la plataforma Mac
- Permite volar en modo de velocidad, ajustar el nivel de inclinación de la cámara FPV y simular el efecto de cámara oblicua (ojo de pez)
- Facilita la práctica de vista en primera persona para carreras (*FPV Racing*)

Este simulador de vuelo VANT permite la personalización y una mejor práctica del vuelo FPV comparado con las otras opciones presentadas.

C.4 Liftoff FPV de Immersion RC

El Liftoff no es un simulador de vuelo estándar, pues está orientado específicamente a aquellos que buscan la práctica de carreras de FPV. Los beneficios de este tipo de simulador de vuelo aviones no tripulados son:

- Prácticas para las carreras de VANT en un software construido específicamente para los corredores de aviones no tripulados
- Se integra bien con las gafas FPV
- Versiones en PC y Mac
- De buena estética y diseño
- Lamentablemente, el programa no es útil para la práctica de toma de fotos o video. Tiene una orientación muy específica a los vuelos en cuadricópteros con FPV.
- Es fácil de instalar, de configurar y de utilizar con los sistemas actuales de VANT con FPV. El costo de este programa ronda los 15 USD



Figura C.4 Simulación de vuelo en Liftoff

C.5 Heli-x UAV

El Heli-X es un gran simulador de vuelo de helicóptero que también tiene la capacidad de permitir simulaciones de vuelos con VANT. Realiza una gran simulación de la física en tiempo real usando modelos matemáticos modernos. El software está disponible para Mac, Linux y Windows, así que es un software de simulación de vuelo muy completo. Hay escenarios de formación dentro del software que hacen que sea divertido de usar para el aprendizaje o el entretenimiento.

Algunos de los beneficios de este programa incluyen:

- Escenarios de entrenamiento para situaciones de rescate
- Otros escenarios incluyen jaula, lazo, auto-rotación y entrenamiento de reacción y de liberación

El Heli-X (Figura C.5) es un simulador educativo que puede utilizar los controles USB estándar que se pueden encontrar incluso en lugares no especializados. Es posible ejecutar Heli-X sin un controlador, pero no se pueden operar los modelos dentro del software. Con un costo de alrededor de 50 USD, se le considera una de las opciones de simuladores de vuelo más económicas.



Figura C.5 Simulación de vuelo en Heli X

C.6 FPV Freerider App

El Freerider FPV (Figura C.6) es una nueva y popular aplicación de simulación que puede ayudar a practicar FPV y el vuelo a línea de vista de avión. Está limitado por su condición de aplicación gratuita, ya que no tiene un emulador de física muy potente. Asimismo, no

viene con control remoto y será necesario encontrar un control USB genérico para utilizarlo.

Beneficios del Freerider FPV:

- Muy bajo costo (10.00 USD)
- Entretenimiento en práctica de carreras en modo FPV
- Compatible con la mayoría de controles remotos USB genéricos

Los inconvenientes son que la simulación del software no es tan real y no se puede practicar el movimiento de cámara. Si se está buscando algo para ayudarse con la práctica de fotografía aérea o se está practicando seriamente para utilizar un Phantom o algún otro nuevo y costoso VANT, este simulador no es el recomendado.



Figura C.6 Simulación de vuelo de VANT en FPV Freerider App

C.7 Phoenix RC

La calidad de la simulación en el Phoenix es excepcional y el realismo de la aeronave es muy bueno (Figura 8). La mayor parte de las zonas de vuelo son realistas a nivel fotográfico, y la experiencia del vuelo global virtual sobre el Phoenix RC simulador de vuelo es excelente. Una de las características más importantes de este simulador está en la posibilidad de editar las características de las aeronaves, por lo que es posible ajustar las especificaciones y características necesarias para que el avión virtual, helicóptero, planeador o multirroto se reproduzca exactamente como el verdadero.

Otras características:

- Visualización panorámica completa de 360° con 20 escenarios y calidad fotográfica
- Detalles realistas (por ejemplo, reflejo del VANT en el agua, efectos de humo, brillos y sombras y simulación de vuelo nocturno)
- Más de 100 modelos disponibles de VANT
- Compatibilidad con cualquier emisora del mercado (requiere añadir un adaptador de acuerdo con el modelo)
- Actualizaciones constantes de todo tipo, que incluyen: físicas del juego mejoradas, gráficos o efectos del agua mejorados, reflejos, aviones nuevos o escenarios
- Entretenimiento: Modo multijugador por internet. Vuelo de hasta cuatro pilotos de forma simultánea con pantalla dividida
- Modo entrenamiento para aviones y helicópteros
- Modo competición para mejorar técnicas de vuelo
- Simulación acuática de gran realismo con hidroaviones
- Menús e instrucciones en español

Como desventajas, se puede mencionar que no todos los modelos de VANT vuelan fieles a la realidad con la configuración predeterminada. Es necesario hacer un poco de trabajo de edición en la configuración de la aeronave. El costo del Phoenix RC está alrededor de los 130 USD (versión 5).



Figura C.7 Simulación de vuelo de VANT en Phoenix RC

C.8 Comparativo: Phoenix RC versus Simpro Real Flight Simulator

A continuación se presenta una comparación entre los dos simuladores de vuelo de VANT más populares: el Phoenix RC y el Simpro Real Flight Simulator. La comparación incluye aspectos como la calidad y el realismo de los escenarios y los modelos, la variedad de modelos de aeronaves disponibles, la disponibilidad de zonas de vuelo, la edición de modelos y escenarios, el uso de control remoto, la facilidad de uso, la ejecución y las capacidades de entretenimiento y entrenamiento.

- Calidad y realismo de escenarios y modelos. Los dos simuladores ofrecen entornos muy realistas y detallados, sin embargo el Phoenix RC presenta escenarios fotorrealistas y modelos más detallados (con menos apariencia “computarizada”). Además, los gráficos “acuático” que presenta el simulador Phoenix son simplemente excepcional, particularmente las ondas creadas por la corriente descendente del VANT (véase la captura de pantalla de la Figura C.7).
- Variedad de modelos. El Real Flight gana sin esfuerzo en este aspecto. A pesar de que Phoenix tiene más de 100 modelos, la opción ‘AddOn’ del Real Flight y las páginas de intercambio de miembros de su foro en línea proporcionan una serie prácticamente interminable de aviones disponibles. También a considerar está el hecho de que las aeronaves de Phoenix parecen ser todas de poca potencia en su configuración predeterminada. Esto es más notable en las aeronaves equipadas con turbinas de gas.
- Disponibilidad de zonas de vuelo. Existe una enorme lista de zonas de vuelo a elegir en el simulador Real Flight, en comparación con Phoenix.
- Posibilidad de editar los aviones y paisajes. Los dos simuladores ofrecen capacidades completas de edición que normalmente no necesita el principiante. Sin embargo, los pilotos profesionales con experiencia agradecerán esta característica. En ambos simuladores, gran cantidad de aspectos técnicos del diseño de las aeronaves pueden ser ajustados y modificados en cualquier momento. En cuanto a los paisajes, las zonas de vuelo de Phoenix no son muy editables, simplemente porque son fotorrealistas. Los sitios del Real Flight tienen más opciones y hay una larga lista de objetos de escenario que se pueden agregar, remover o transportar de los sitios, tanto en los fotográficos como en los generados por computadora.
- Control remoto. El simulador Phoenix está disponible con su control remoto Spektrum DX5e, mientras que Real Flight soporta su control 'Interlink', el cual es bastante realista (fabricado por Futaba y modelado en uno de sus 8 canales). En este último caso, se controlan algunas opciones del simulador desde los botones del control remoto, como la selección de modelo y la zona de vuelo, lo cual no está disponible en el simulador Phoenix (lo cual es una molestia en caso de estar acostumbrado a ello). Una cualidad positiva del Phoenix en este caso, es que el

control remoto se puede calibrar, y su configuración es editable. Estas opciones permiten que la configuración exacta de su aeronave.

- Facilidad de uso. Este aspecto es similar en ambos simuladores. Con ambos es muy fácil comenzar con su uso, llevando de la mano al usuario a través de la instalación y la configuración. Las complicaciones potenciales solo surgen cuando usted se requiere ser muy técnico y empezar en serio con la edición de los modelos. Incluso entonces, el proceso de edición de ambos simuladores es bastante sencilla.
- Ejecución. Esta opción depende de la potencia y la calidad del equipo. Sin embargo, la ejecución del simulador Phoenix se percibe más fluida, por lo que aparentemente consume menos recursos (no obstante, confirmar esto requiere un análisis computacional más estricto).
- Capacidades multijugador. Bueno en ambos casos. Real Flight incorpora la interacción de jugadores por Internet, con el combate multijugador disponible en vuelo. No obstante, la opción multijugador de Phoenix es excelente y los dos simuladores ofrecen capacidades de mensajería instantánea entre los pilotos.
- Modo entrenamiento. Ambos simuladores ofrecen un excelente entrenamiento virtual, proveniente tanto de operadores de radio control profesional de la vida real como de pilotos. Todo, desde el despegue y vuelo básico para maniobras acrobáticas avanzadas y 3D están cubiertos, con demostraciones de vuelo completo y movimientos del bastón del control remoto, incluyendo una narración hablada.
- Entretenimiento. Tanto Phoenix como el Real Flight tienen algunos juegos y competencias de para diversión o para perfeccionar las habilidades de vuelo, tales como aterrizaje en un punto, vuelo en el limbo, estallido del globo y el lanzamiento de bombas. En este aspecto, Real Flight tiene más juegos para el modo multijugador en línea.
- Multiplataforma. Ambos simuladores se ejecutan en plataforma Mac o PC.

Como se puede observar, ambos simuladores de vuelo son excelentes y cada uno tiene sus ventajas y desventajas. Creo que es justo decir que el simulador Phoenix se adapta más a los requerimientos de un piloto u operador de VANT avanzado, pero un principiante no va a tener problemas. Por otro lado, el Real Flight si está orientado a un operador principiante, desde el inicio, destacando su compatibilidad con los controladores de juegos más comunes.

Anexo
Elaboración de misiones de vuelo
usando el software UgCS



Anexo D

ELABORACIÓN DE MISIONES DE VUELO USANDO EL SOFTWARE UgCS

Jorge Flores Velázquez, Sergio Iván Jiménez Jiménez y Mariana de Jesús Marcial Pablo

D.1 Configuración general

D.1.1 Crear perfil

En el perfil se especifican datos generales para el vuelo (número de satélites mínimos requeridos), tipo de dron (modelo), datos de la batería (voltajes de batería cargada, normal, baja y descargada), datos de la ruta (número máximos de puntos, tiempo de viaje máximo, etc.), modelo de cámara, entre otros. El perfil es lo primero que se debe revisar antes de iniciar a crear una ruta de vuelo. Si no cuenta con un perfil específico lo conveniente es crear uno. A continuación se describen los pasos.

A.1.1.1.1 Abrir el programa UGCS, se observara una pantalla como la Figura D.1, dar clic en Menú, y posteriormente en Perfiles, ver Figura D.2.

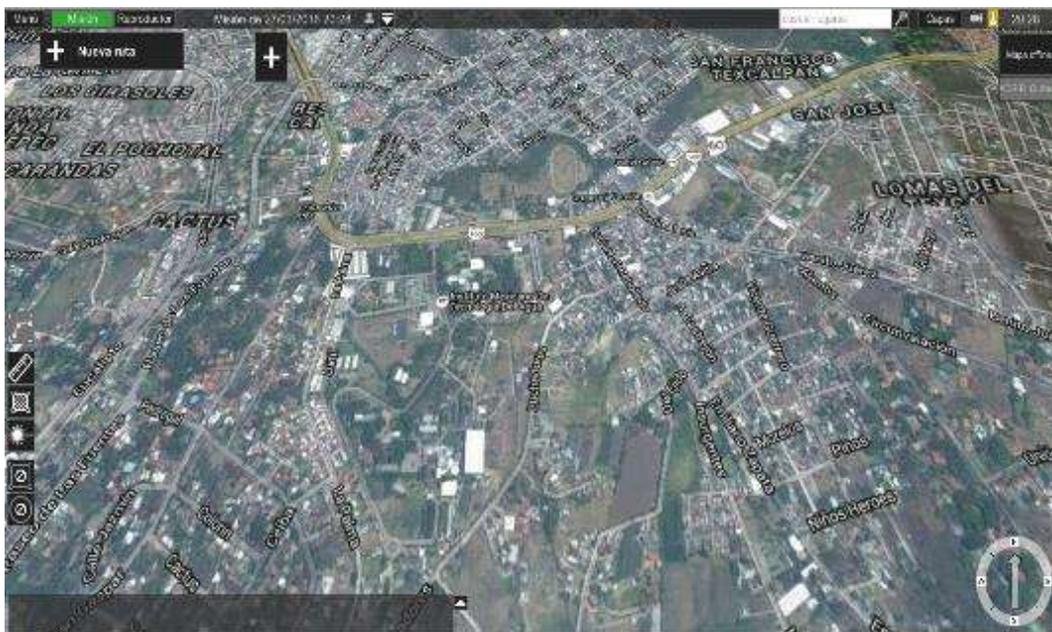


Figura D.1 Ventana principal del UgCS

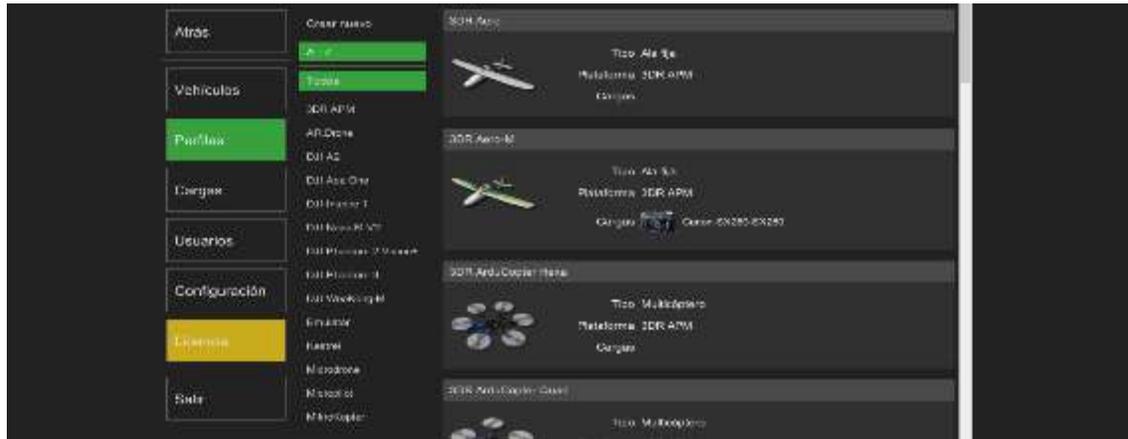


Figura D.2 Ventana perfiles

A.1.1.1.1.2 Seleccione el perfil o plataforma que más se asemeje a su dron y pulse clic sobre él, aparecerán tres opciones: *Copiar*, *Editar*, *Quitar*; de clic en copiar.

Las plataformas disponibles en el programa se muestran en el Tabla D.1.

Tabla D.1 Tipos de Plataforma disponibles en UgCS*

| Número | Plataformas |
|--------|-----------------------|
| 1 | 3DR APM |
| 2 | DJI Ace One |
| 3 | DJI Phantom 3 |
| 4 | Microdrone |
| 5 | 3DR Pixhawk |
| 6 | DJI Inspire 1 |
| 7 | DJI WooKong-M |
| 8 | Micropilot |
| 9 | AR.Drone |
| 10 | DJI Naza-M V2 |
| 11 | MikroKopter |
| 12 | DJI A2 |
| 13 | DJI Phontom 2 Vision+ |
| 14 | Kestrel |

*Debe escoger el que más se parece a su dron y ajustar sus características.

Aparecerá una ventana en donde debe especificar:

- Nombre de perfil en la casilla *Nombre*, ver Figura D.3



Figura D.3 Nombre de perfil

- Para Agregar una cámara, clic en agregar y debe seleccionar su modelo, ver Figura D.4.



Figura D.4 Agregar cámara

En la Tabla D.2 se muestran las cámaras disponibles en el software.

Tabla D.2 Modelos de cámaras disponibles en UgCS

| BMPCC | Canon | DJI | Flir Tau | GoPro | Nikon | Panasonic | Samsung | Sony | Tetracam |
|---------------|---------------------|--------------------------|--------------|-----------------------|-------|-------------|---------|-----------------|----------|
| BMPCC (12 mm) | 5D Mark II (24 mm) | Inspire 1 Camera | 160 (7.5 mm) | HD Hero | AW100 | GH2 (14 mm) | NX 1000 | ILCE 7R (24 mm) | Mini-MCA |
| | 5D Mark II (50 mm) | Phantom 2 Vision+ camera | 320 (7.5 mm) | Hero | | GH2 (20 mm) | s 860 | ILCE 7S (24 mm) | |
| | 5D Mark III (24 mm) | Phantom 3 camera | 640 (7.5 mm) | Hero2 | | GH3 (14 mm) | | Nex-5 (16 mm) | |
| | 5D Mark III (50 mm) | Zenmuse X5/X5R | | Hero3 Black Edition | | GH4 (12 mm) | | Nex-5 (25 mm) | |
| | A2300-A2400 | Zenmuse XT 336 (7.5 mm) | | Hero3 Silver Edition | | | | Nex-7 (16 mm) | |
| | ELPH 115-130 IS | Zenmuse XT 640 (7.5 mm) | | Hero3 White Edition | | | | RX100 | |
| | ELPH 330 HS | | | Hero3+ Black Edition | | | | | |
| | ELPH 520HS | | | Hero3+ Silver Edition | | | | | |
| | S110-S120 | | | Hero4 Black Edition | | | | | |
| | SX230 HS | | | Hero4 Silver Edition | | | | | |
| | SX260-SX280 | | | | | | | | |

*Debe escoger el que más se parece a su cámara y ajustar sus características.

- Información de las baterías, GPS, telemetría, etc. Para separación decimal usar coma.

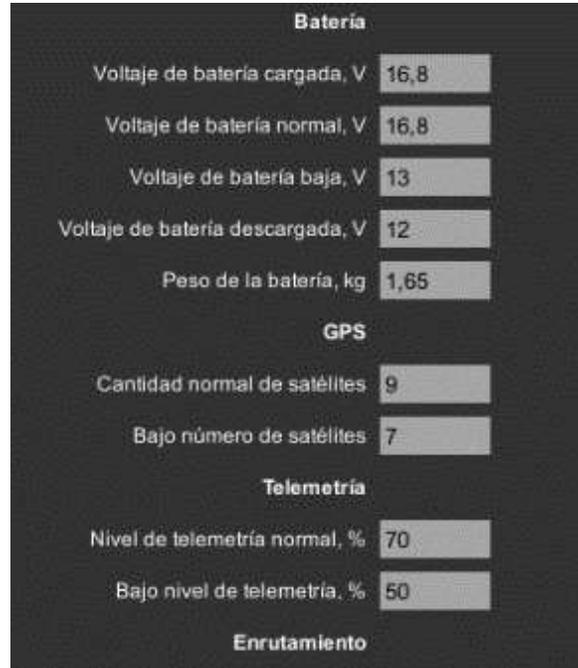


Figura D.5 Datos de batería, GPS y telemetría y otros

- Debe seleccionar una imagen de perfil para facilitar el reconocimiento de su dron.



Figura D.6 Imagen de perfil

A.1.1.1.1.3 Cuando se tenga completado los pasos anteriores, dar clic en guardar, y se mostrara el nuevo perfil dentro de los ya existentes en orden alfabético. Hemos terminado de configurar nuestro propio perfil.

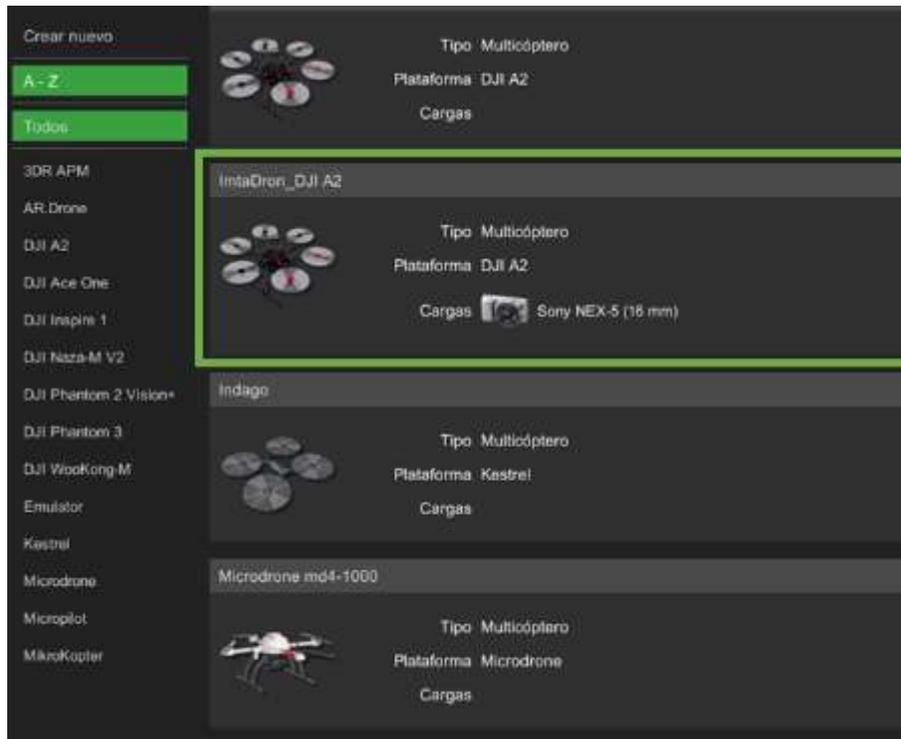


Figura D.7 Perfil creado

D.1.2 Configurar la cámara

Se debe elegir el perfil de cámara que más se asemeje a la nuestra, y configurar sus parámetros.

Para la configuración de cámara dar clic en *Cargas* y posteriormente buscar un perfil y dar clic sobre ella, parecerán dos botones en la parte superior: *Editar* y *quitar*. Pulsar editar.

En esta ventana debemos especificar los datos de nuestra cámara, como son:

- Peso
- Longitud focal
- Ancho del sensor
- Altura del sensor
- Resolución horizontal del sensor
- Resolución vertical del sensor

Estos datos son importantes, cuando se crea un polígono y se desea que el programa calcule una ruta y la altura de vuelo, dependiendo del traslape y la resolución que queramos en la imagen.

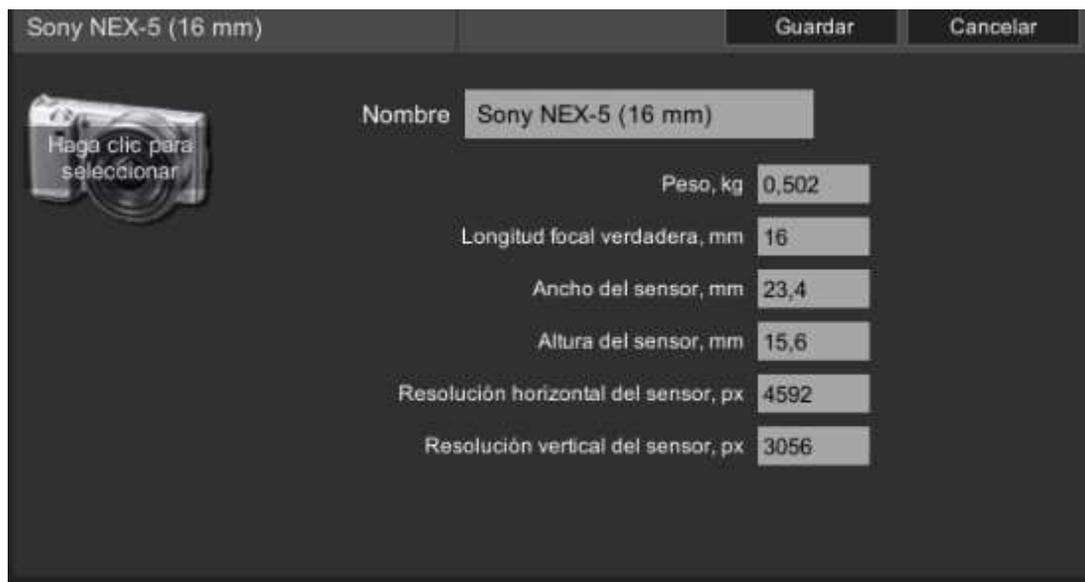


Figura D.8 Datos generales de la cámara

Clic en *guardar* para grabar los cambios. Hemos terminado de configurar la cámara

D.1.3 Configurar nuevo vehículo

- Para conectar el vehículo DJI a UgCS, necesita el enlace de datos de 2,4 GHz, ver Figura D.9. Conectar el DATA LINK a un puerto USB de la PC

Debe tener instalado el controlador del DATA LINK en su computadora para que le reconozca el vehículo (descargarlo en el link: http://download.dji-innovations.com/downloads/driver/DJI_WIN_Driver_Installer.exe)

Antes de conectar el vehículo asegurarse que este prendido el dron y este calibrado la brújula.

- Automáticamente el dron aparecerá en la lista de vehículos. Tanto las conexiones de enlace ascendente y descendente deben estar disponibles (son conexiones del dron a la computadora y viceversa). Dirigirse a la opción *Menú* y luego *vehículos* y elegir el vehículo que se acaba de conectar. Cuando seleccione el vehículo aparecerán dos opciones: *Editar* y *Quitar*

- Seleccionamos la opción editar. Podemos renombrar nuestro vehículo y debemos cargar el perfil que creamos en la sección D.1.1, ver Figura D.10
- Debemos guardar los cambios



Figura D.9 Enlace de datos DATA LINK 2.4 G

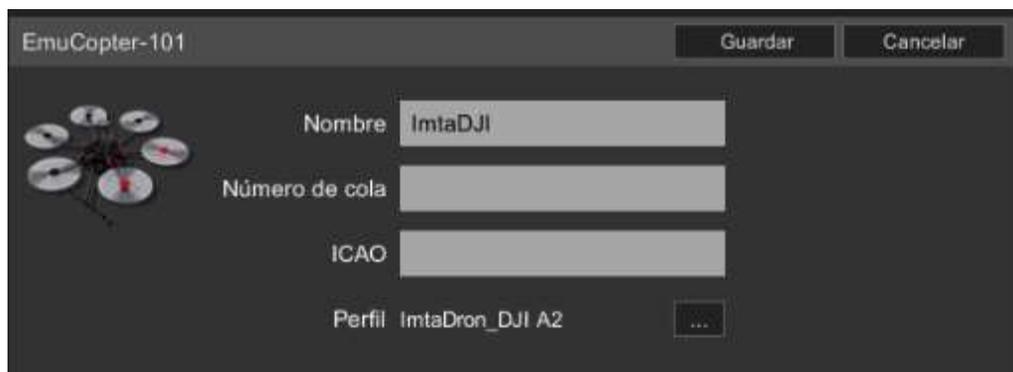


Figura D.10 Editar vehículo

D.2 Plan de vuelo o misión

D.2.1 Crear nueva ruta

En la pantalla principal (Figura D.1) clic en el símbolo (+) para iniciar la creación de una nueva ruta. En la ventana que se abre (Figura D.11) indicar si se creará la ruta desde cero o si se tiene en un archivo.

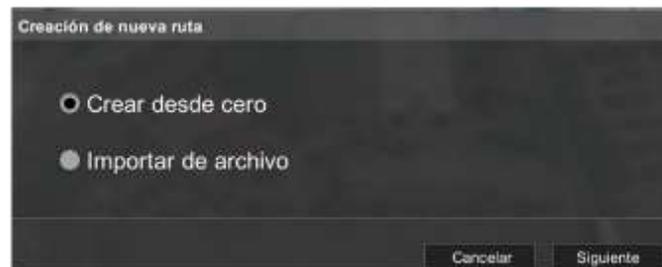


Figura D.11 Crear nueva ruta

D.2.1.1 Ruta desde cero

- Cuando se seleccione *Crear desde cero*, inmediatamente aparecerá una pantalla (Figura D.12) donde debe especificar el *nombre de la ruta* y el *perfil del vehículo* a usar (de preferencia usar el que se creó en la sección D.1.1).



Figura D.12 Nombre de la ruta y perfil del vehículo

- En la siguiente ventana se ingresan datos como: Modo de altitud, Altitud máxima de vuelo del dron, tipo de trayectoria, acción al perder el GPS, etc. Únicamente debemos cambiar tipo de trayectoria de Recta a Segura.

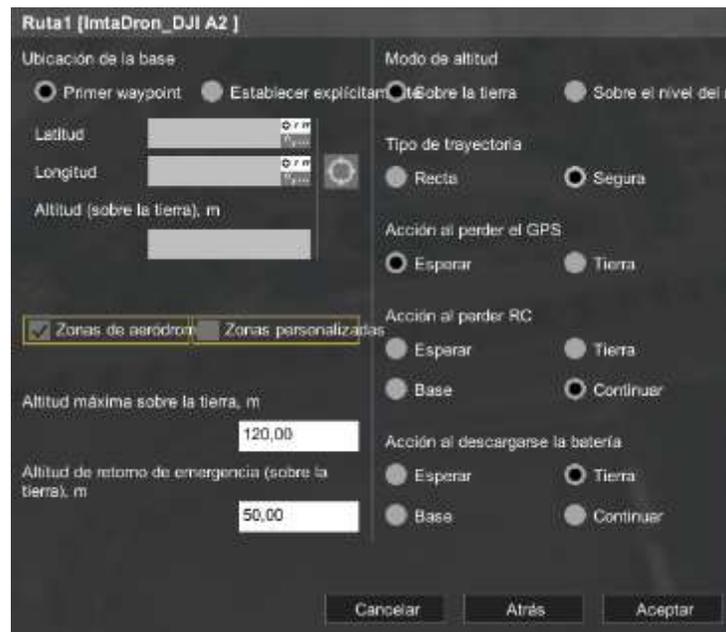


Figura D.13 Configuración de la nueva ruta

- Hasta este puntos se ha configurado nuestra nueva ruta, solo resta indicar la ruta por donde volara el dron, ver Figura D.14.

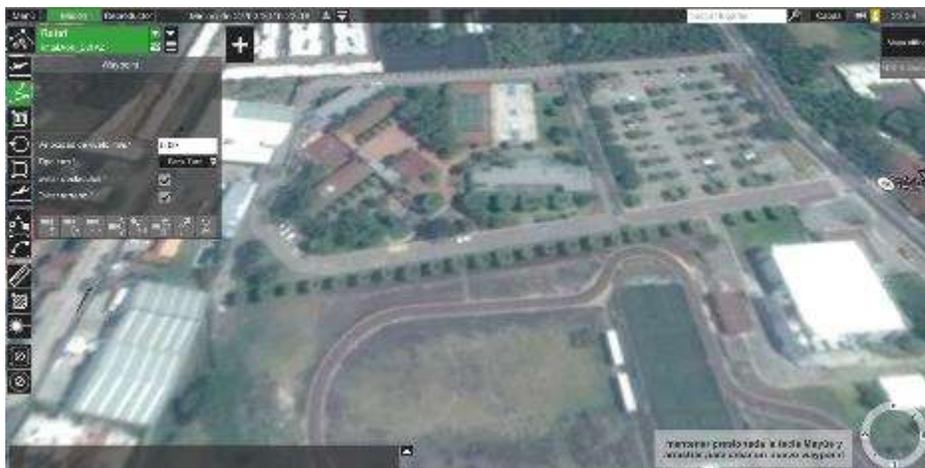


Figura D.14 Ruta creada

D.2.1.2 Ruta desde un archivo existente

- Cuando se selecciona la opción *Importar de archivo*, automáticamente el programa pedirá que indiquemos la ruta del archivo, ver Figura D.15.

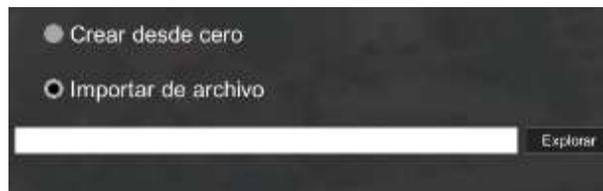


Figura D.15 Ruta desde nuevo archivo

- Se abrirá una ventana en donde se debe buscar la ubicación de nuestra ruta en formato .xml
- Seleccionar la ruta específica y pulsar *Seleccionar*
- Indicamos el perfil del vehículo a utilizar y las configuraciones de la ruta nueva y pulsa ok
- Y tendremos configurado nuestra nueva ruta

D.2.2 Ruta con Waypoint

Debe acercarse con el ratón a la zona en donde desea realizar el plan de vuelo, ver Figura D.16.



Figura D.16 Zona de plan de vuelo

D.2.2.1 Despegue

Presionar el icono , y pulsar doble clic sobre el punto de despegue en el mapa, ver Figura D.17. Inmediatamente aparecerá un cuadro (parte superior izquierda) con las coordenadas (Latitud y longitud) del punto de despegue, altura del vuelo, velocidad del vuelo, datos de la configuración de la cámara, entre otros, ver Figura D.18.



Figura D.17 Punto de despegue

En este cuadro (Figura D.18) se deben modificar los datos siguientes datos (Para el caso del IMTA):

- Altitud (sobre la tierra), m: Depende del tipo de proyecto, no debe ser mayor que 120 m
- Velocidad del vuelo, m/s: debe estar en 8 y 12



Figura D.18 Características del punto de despegue

D.2.2.2 Waypoint

Los Waypoints son los puntos por donde debe volar el dron, se generan después de indicar el punto de despegue.

Para poner los Waypoint debe pulsar un clic en el icono  y para ubicarlos en el mapa pulsar doble clic en la ubicación. Inmediatamente después de colocar el Waypoint sobre el mapa aparecerá una ventana parecida a la Figura D.19, en donde se debe indicar una velocidad de vuelo entre 8 y 12 m/s y una altura considerable para el proyecto. Se debe cuidar la separación entre los Waypoint para los traslapes.



Figura D.19 Ruta con Waypoint

D.2.2.3 Aterrizaje

Terminado de poner los Waypoints o puntos por donde pasara el dron, se debe indicar el punto de aterrizaje, pulsar con un clic el icono  y luego doble clic en el punto del mapa en donde se desea que aterrice el dron. Aparecerá un cuadro en la parte superior izquierda donde se muestran las coordenadas (Figura D.20).



Figura D.20 Punto de aterrizaje del dron

D.2.2.4 Configuración de la cámara

La configuración de la cámara se realiza por Waypoint también se puede para el despegue y aterrizaje, y se hace usando los iconos de la parte inferior del cuadro mostrado en la Figura D.18.

Para poder configurar la cámara se debe tener un perfil que tenga montado una. Si no es así debe seleccionar un perfil que tenga cámara, ya que esto puede ocasionar un problema con el despegue del equipo. Se recomienda si el perfil no tiene cámara no tocar estas configuraciones.

i. Modo de cámara

Para configurar esta opción debe presionar el icono  y seleccionar la opción de modo de cámara que desee, las opciones son: Fotografías (Disparos) o video (iniciar o detener grabación), ver Figura D.21A. El modo fotografía se puede configurar antes del vuelo, mientras que las opciones de video se debe usar cuando inicie y termine el vuelo o bien cuando el usuario lo desee aunque antes del calcular la ruta debe indicar que lo usara como video.

Esto se realiza para cada Waypoint.

ii. Cámara por tiempo

La si se tiene activado la cámara para fotografías se puede configurar para que tome las fotografías cada cierto tiempo, pulsar en el icono .

Se debe ingresar los siguientes datos: Intervalo (s), se refiere a cada cuántos segundos va a tomar fotografías la cámara; número de disparos, se refiere a cuantas fotografías tomara en ese lapso, ver Figura D.21B.



Figura D.21 Configuración cámara para el Waypoint 6. A) modo de cámara, B) cámara por tiempo, C) cámara por distancia

iii. Cámara por distancia

La si se tiene activado la cámara para fotografías se puede configurar para que tome las fotografías cada cierta distancia, pulsar en el icono .

Se debe ingresar los siguientes datos: Distancia (m), se refiere a cada cuántos metros va a tomar fotografías la cámara; número de disparos, se refiere a cuantas fotografías tomara en esa distancia, Figura D.21C.

D.2.3 Calcular ruta

D.2.3.1 Ruta con escaneo de área

Este modo se usa cuando dejamos al programa que realice la ruta en un área que se le indique, cumpliendo ciertos requisitos como porcentaje de traslape, resolución de la imagen. Se debe usar con un perfil que tenga montado una cámara.

Pulsar el icono  Escaneo de Área (pantalla principal) debe indicar datos como los de la Figura D.22 los cuales deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Velocidad del vuelo: (8-12 m/s)
- Tipo de giro del dron: De preferencias usar Adaptive Bank Turn
- Cámara
- Resolución del terreno (Pixel de la imagen): se indica en cm, este dato junto a la distancia focal de la cámara seleccionada le sirve al programa para que calcule la altura de vuelo
- Superposición frontal entre imágenes: de preferencia 60 %
- Superposición lateral entre imágenes de preferencia 30 %

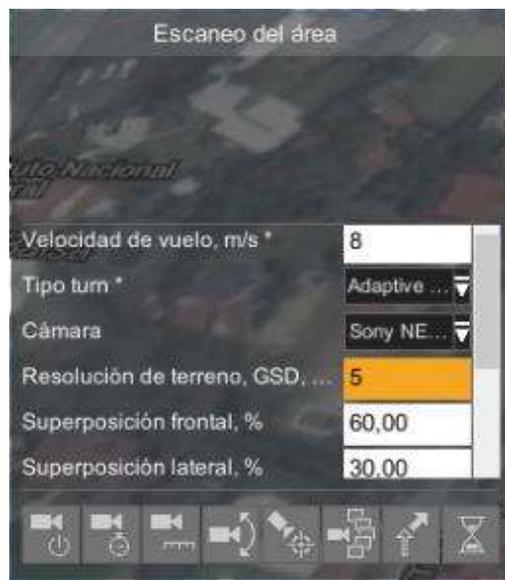


Figura D.22 Datos escaneo de área

Procedemos a indicar los puntos de la poligonal donde se va a programar la ruta, para ello pulsamos doble clic sobre el mapa por cada esquina del área (Figura D.23).



Figura D.23 Ruta escaneo de área

D.2.3.2 Configuración de la cámara

La configuración de la cámara se realiza para todo el polígono y se hace usando los iconos de la parte inferior del cuadro mostrado en la Figura D.21.

Para poder configurar la cámara se debe tener un perfil que tenga montado una. Si no es así debe seleccionar un perfil que tenga cámara, ya que esto puede ocasionar un problema con el despegue del equipo. Se recomienda si el perfil no tiene cámara no tocar estas configuraciones.

i. Modo de cámara

Para configurar esta opción debe presionar el icono  y seleccionar la opción de modo de cámara que desee, las opciones son: Fotografías (Disparos) o video (iniciar o detener grabación), ver Figura D.24A. El modo fotografía se puede configurar antes del vuelo, mientras que las opciones de video se debe usar cuando inicie y termine el vuelo o bien cuando el usuario lo desee aunque antes del calcular la ruta debe indicar que lo usara como video.



Figura D.24 Configuración cámara. A) modo de cámara, B) cámara por tiempo, C) cámara por distancia.

ii. Cámara por tiempo

La si se tiene activado la cámara para fotografías se puede configurar para que tome las fotografías cada cierto tiempo, pulsar en el icono , le pedirá que seleccione si va ser automático; es decir, cuando la cámara este estable en el vuelo va a tomar fotografías, de preferencia desmarcar la casilla automático para poder elegir cuantas fotos tomara la cámara cada cierto tiempo.

Se debe ingresar los siguientes datos: Intervalo (s), se refiere a cada cuántos segundos va a tomar fotografías la cámara; número de disparos, se refiere a cuantas fotografías tomara en ese lapso, Figura D.24B.

iii. Cámara por distancia

La si se tiene activado la cámara para fotografías se puede configurar para que tome las fotografías cada cierta distancia, pulsar en el icono , le pedirá que seleccione si va ser automático, de preferencia desmarcar la casilla automático para poder elegir cuantas fotos tomara la cámara cada cierto tiempo.

Se debe ingresar los siguientes datos: Distancia (m), se refiere a cada cuántos metros va a tomar fotografías la cámara; número de disparos, se refiere a cuantas fotografías tomara en esa distancia, Figura D.24C.

D.2.3.3 Calcular ruta

Si se ha terminado de configurar el polígono y la cámara, pulsamos el icono  para calcular la ruta, es decir, para saber si existe o no error en nuestras configuraciones.

Si hemos hecho todo bien, en la parte inferior izquierda debe aparecer una leyenda con la hora y el mensaje: *La ruta se procesó correctamente*, ver Figura D.25. Si parecer un mensaje de error en color rojo (Figura D.26) debemos revisar:

- La resolución del terreno, ya que si la resolución es muy grande arrojará una altura de vuelo que sobrepase los 120 m, ver Figura D.26.
- Que el polígono este cerrado.
- Que la cámara este configurada correctamente.

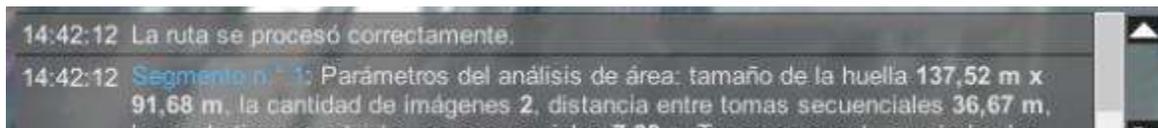


Figura D.25 Mensaje ruta procesada

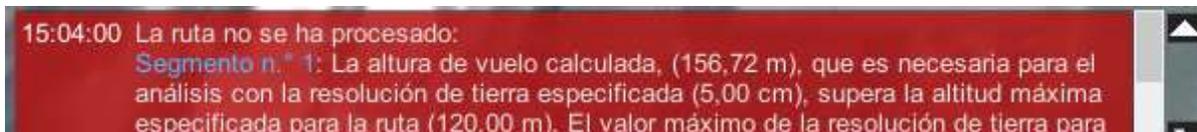


Figura D.26 Mensaje error ruta calculada

Si no existe problema en nuestra ruta nos mostrara el plan de vuelo o la ruta que seguirá el dron y la altura de vuelo, si no estamos de acuerdo con la ruta o la altura de vuelo debemos modificar la resolución del terreno o porcentajes de traslapes (ver Figura D.27).

Hasta este punto se ha programado la ruta más eficiente, sin embargo siempre se deben considerar las condiciones actuales sobre el terreno, que pudieran no reflejarse en el mapa. Otra cuestión a tomar en cuenta es la dirección de vuelo, ya que en algunos programas de procesamiento de imágenes no es posible realizar el proceso con zonas que no son rectangulares, por lo que se recomienda que todas las rutas de la misión tengan la misma longitud.



Figura D.27 Ruta o plan de vuelo con escaneo de área

Anexo
Armado de componentes



Anexo E

ARMADO DE COMPONENTES

Jorge Flores Velázquez y Alberto González Sánchez

Los componentes principales de los drones profesionales se describen a continuación.

Autopiloto: Sistema micro-electromecánico usado para guiar al Dron sin asistencia de un operador humano, consiste de un procesador central (hardware) y un software de navegación GPS, capaz de hacer el despegue y el aterrizaje de forma autónoma.

Fuselaje: Estructura donde se montan los dispositivos externos al autopiloto. También soporta el empalme de estructuras de carga complementarias, como monturas móviles para cámaras y rociadores de fertilizante (por ejemplo).

Carga útil: Es el peso que puede llevar el Dron en su operación, pueden ser cámaras espectrales u otros dispositivos de emisión como LIDAR (Light Detection and Ranging), para funciones de inteligencia, reconocimiento o supervisión.

Subsistema de comunicación: La mayoría de los drones cuentan con más de un enlace inalámbrico. Por ejemplo, enlace RC para pilotaje seguro, WiFi de enlace para compartir datos, y enlace de datos para monitoreo terrestre.

El armado del Dron se realiza de acuerdo con el objetivo del vuelo, ya sea para obtener videos o imágenes perpendiculares, horizontales o paralelas a la superficie terrestre.

A continuación se presentan tres tipos de armado de un dron hexacóptero; el primero únicamente con patín de entrenamiento utilizado para practicar el despegue, vuelo y aterrizaje del equipo; el segundo con montura de un eje para aplicaciones cartográficas y de agricultura de precisión; el tercero con montura de tres ejes para supervisión de infraestructuras o capturas de videos. Al Dron armado se conectan las baterías, se encienden sus componentes y estará listo para volar.

E.1 Armado del hexacóptero

E.1.1 Patín de entrenamiento

Esta configuración hexacóptero-patín de entrenamiento o tren de aterrizaje es utilizado para entrenamiento de operación del dron con la finalidad de adquirir práctica y sensibilidad en el uso del equipo. El patín de entrenamiento está compuesto por 2 arcos, 2 tubos de fibra de carbón y 2 hilos de acero (Figura E.1); para su armado y unión al dron se siguen los siguientes pasos.

- i. Ubicar el espacio en el dron donde debe ir el patín (Figura E.2a)
- ii. Colocar cada arco del patín en el hexacóptero (Figura E.2b)
- iii. Poner el tubo junto con el hilo en el arco; esto para evitar que el patín no se abra por el peso del hexacóptero, el hilo debe quedar sujetado con las muescas de los arcos (Figura E.2c)
- iv. Colocar el dron en una superficie plana para verificar la estabilidad del hexacóptero (Figura E.2d)



Figura E.1 Patín de entrenamiento

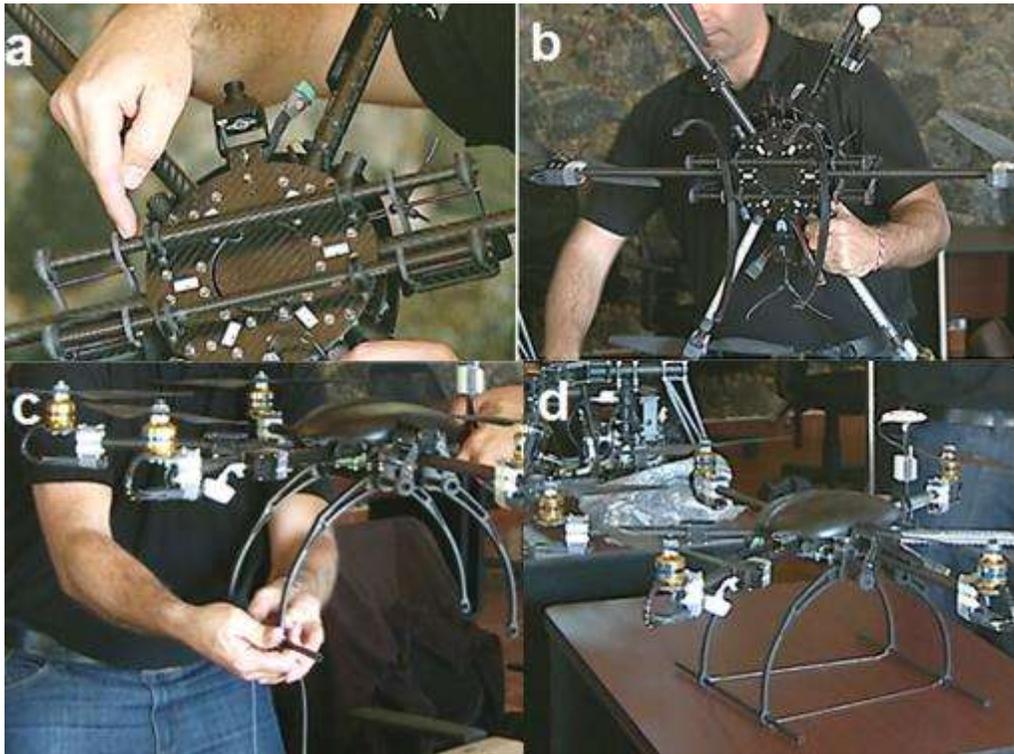


Figura E.2 a) Lugar donde va el patín, b) Colocación del arco, c) Unión del tubo al arco y d) Revisar que el hexacóptero se mantiene estable con el patín

E.1.2 Montura de un eje con patín de entrenamiento

La configuración hexacóptero-montura de un eje es útil para equipar el dron con cámaras, accesorios para riego o control de plagas y enfermedades, entre otros. Los accesorios de fotografía de esta montura son dos cámaras: una visible SONY y una Multiespectral Tetracam (Figura E.3).



Figura E.3 Cámara Visible SONY y multiespectral ADC Snap

Los pasos a seguir para el armado y ensamblado de la montura al hexacóptero son:

i. Colocar el patín de entrenamiento

Para esta montura es necesario colocar el patín de entrenamiento al dron (Figura E.4), como se mostró en la Sección E.1.1.



Figura E.4 Extensión del patín de entrenamiento

ii. Colocar la cámara multispectral

- a. Desatornillar el tornillo tipo palomilla que sujeta la cámara (Figura E.5a)
- b. Conectar el multiconector de la montura a la cámara espectral para tener la comunicación de la cámara con el disparador (Figura E.5b)
- c. Colocar y fijar la cámara: colocada la cámara en la montura apretar el tornillo para dejar fija la cámara multispectral (Figura E.5c)
- d. Inserta la memoria micro-SD de la cámara: en esta memoria se guardaran fotografías y datos GPS del vuelo (Figura E.5d)

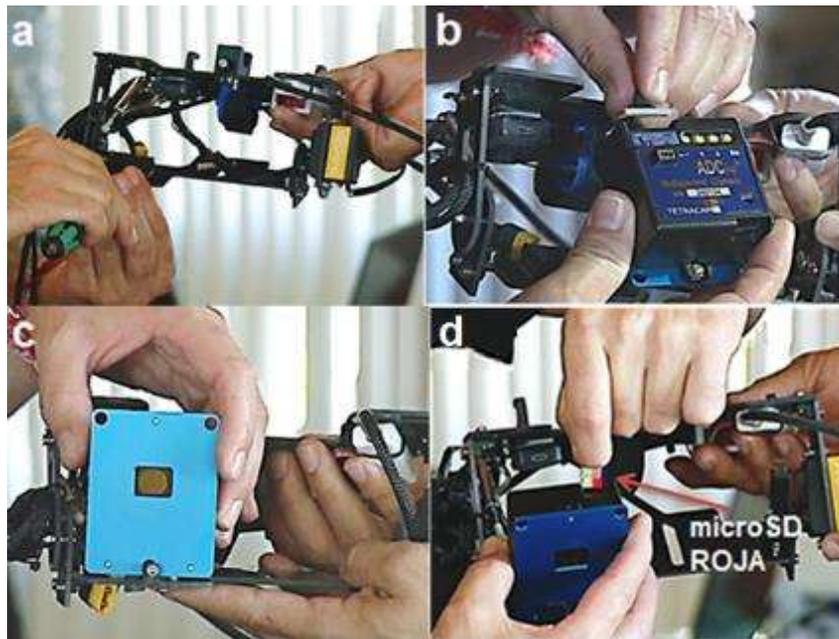


Figura E.5 a) Proceso de desatornillado del tornillo que sujeta la cámara, b) Conexión del multiconector de la montura a la cámara, c) Acomodo y atornillado de la cámara, d) Colocación de la memoria micro-SD

iii. Colocar la cámara visible

- a. Inserta la memoria SD a la cámara
- b. Conectar el cable HDMI: conectar un extremo del cable a la cámara y otro al conversor de HDMI a señal analógica que está en la montura de cámara (Figura E.6a)
- c. Conectar el cable de Control: el extremo del cable tipo USB tradicional va conectada a la montura y el extremo tipo micro-USB va a la cámara (Figura E.6b)
- d. Colocar y fijar la cámara en la montura: la cámara se asegura con un tornillo tipo palomilla (Figura E.6c)
- e. Conectar el cable HDMI al conversor HDMI (Figura E.6d)

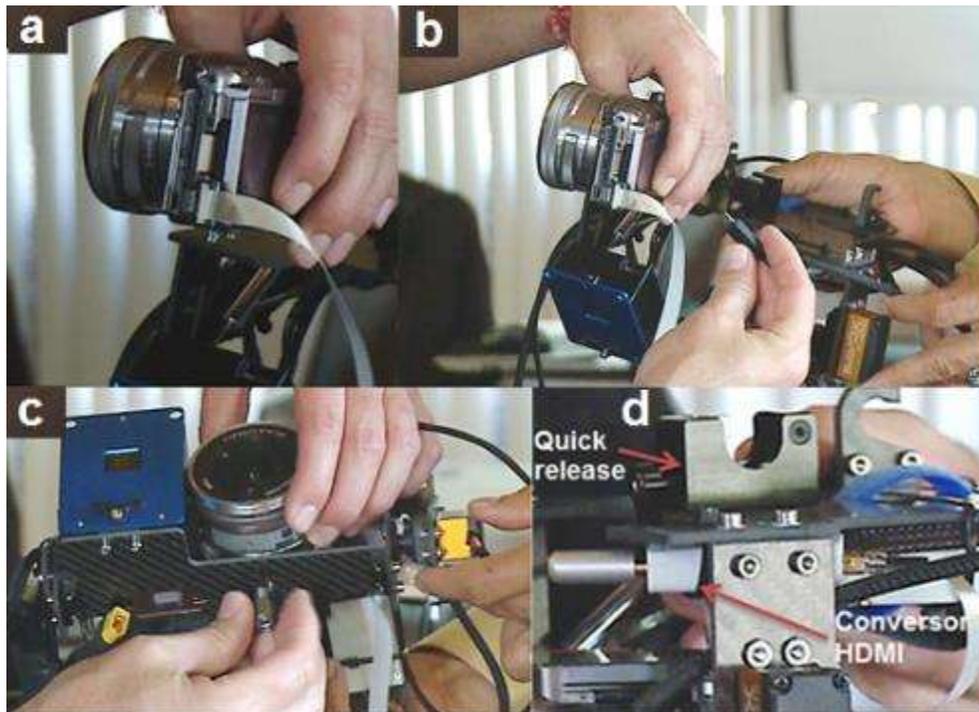


Figura E.6 a) Conexión del cable HDMI, b) conexión del cable de control, c) colocación y sujeción de la cámara, d) conexión del cable HDMI al convertor HDMI

iv. Colocar la batería en la montura

Esta batería sirve para alimentar la cámara multiespectral y al control de movimiento de la montura, Figura E.7.



Figura E.7 Acomodo de la batería a la montura de cámara

v. Sujetar la montura al hexacóptero

Colocar las garras de la montura en el hexacóptero. Las garras de la montura se colocan en el eje más delgado del hexacóptero, Figura E.8. Para asegurar la montura al hexacóptero se usa el tornillo tipo palomilla. La montura cuenta con un sistema de estabilización.

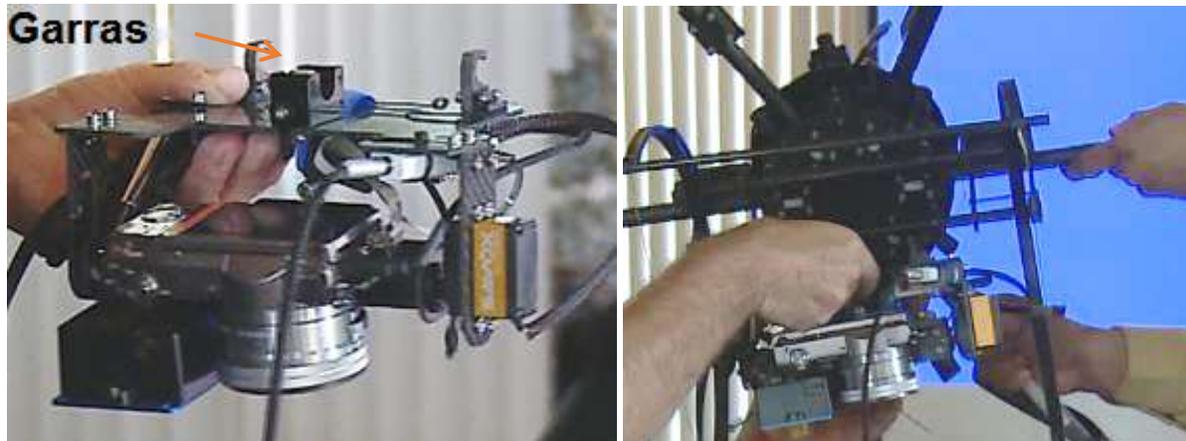


Figura E.8 Acomodo de las garras de la montura en el eje del dron



Figura E.9 Colocación de la montura de un eje al hexacóptero

vi. Conectar los cables de la montura al hexacóptero

Se conectan los cables del GPS (Figura E.10), el enlace de video para operar la cámara desde tierra y obtener fotos en tiempo real, el control de disparo de imágenes y el cabeceo de la cámara, como se muestra en la Figura E.11.

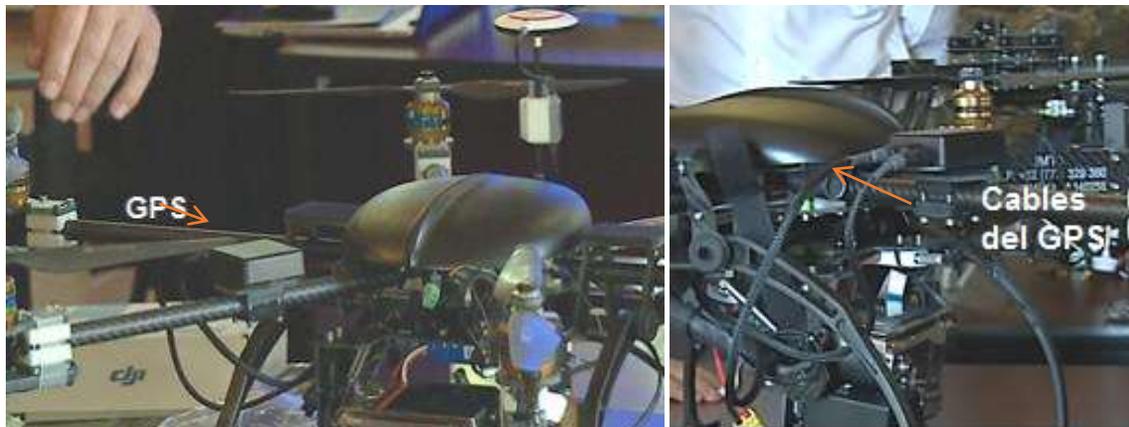


Figura E.10 Colocación del GPS en el hexacóptero (izquierda) y conexión a la montura de cámara (derecha)



Figura E.11 Conexiones de enlace de video, disparo de cámara y cabeceo

E.1.3 Montura de tres ejes

En este caso la montura de tres ejes va montada al tren de aterrizaje de tres patas sin patines. El acoplamiento hexacóptero-montura de tres ejes-tren de aterrizaje de tres patas está pensada para que un operador controle cada operación de la montura de la cámara, la montura se caracteriza por ser independiente del dron de modo que no existe conexión electrónica de la montura con el dron. Esta montura ofrece el beneficio

de estabilidad de la cámara amortiguando los movimientos inestables del dron y al igual que la de un eje funciona con una batería que alimenta todo el sistema (Figura E.12).



Figura E.12 Montura de 3 ejes

Los pasos para armar la montura de tres ejes son:

- i. Verificar que la emisora del dron y la emisora de la montura estén en canales diferentes

Una emisora debe estar en un canal par (2 por ejemplo) y la otra en un canal impar (5 por ejemplo) para evitar cualquier tipo de interferencia entre las emisoras.

- ii. Colocar y fijar la cámara en el soporte de la montura

Después del montaje hay que verificar que la cámara esta equilibrada respecto a su centro de gravedad, es decir, que esta no tienda a moverse hacia adelante o atrás y mantenga la posición en que se acomoda (Figura E.13).

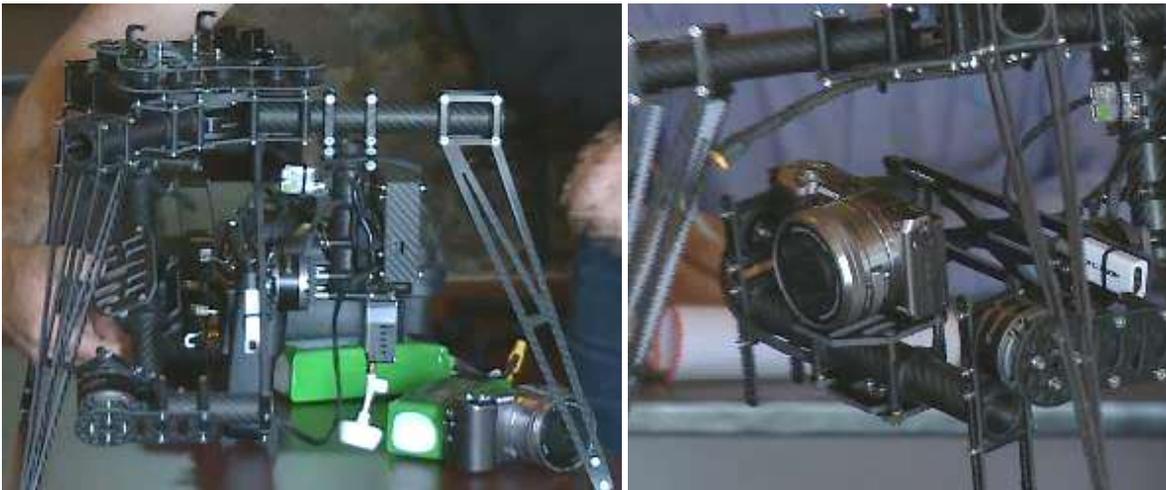


Figura E.13 Montaje de la cámara en la montura de cámara de tres ejes

iii. Conexión de cables de cámara y comunicación

- a) Conexión del cable HDMI: conectar un extremo a la cámara y el otro al convertidor de HDMI a señal analógica que esta puesto en la montura de cámara (Figura E.14).
- b) Conexión del cable de Control: Este cable tiene una salida tipo USB que se conecta a la cámara y su extremo se conecta a la montura (Figura E.14).

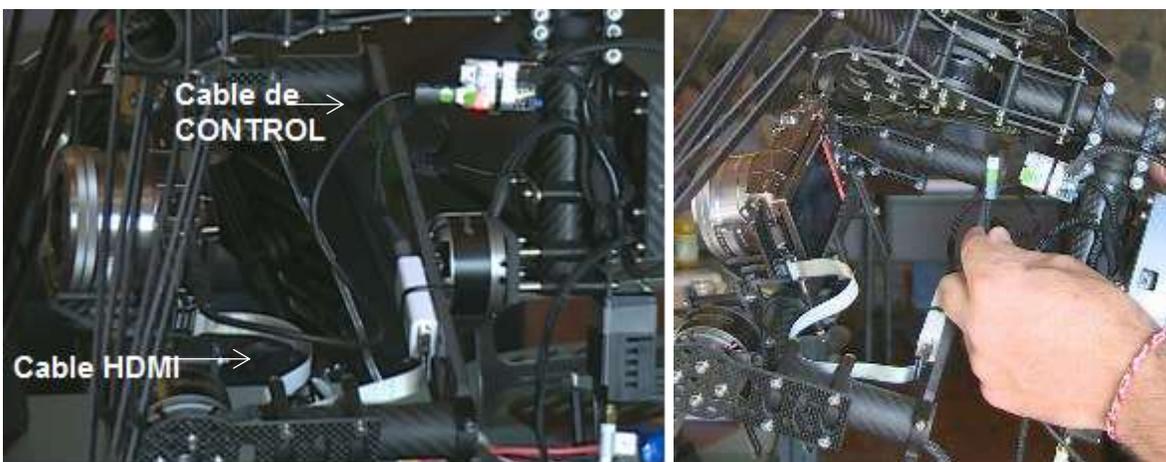


Figura E.14 Conexión de los cables HDMI y el de Control para la comunicación entre la cámara y la montura

iv. Colocar las baterías de la montura y pupitre

Tanto la montura como el pupitre cuentan con un soporte para colocar las baterías, las baterías son colocadas y aseguradas a los soportes con ayuda de una correa de velcro (Figura E.15). La batería para la montura es de 2200 mAh y para el pupitre de 1300 mAh.

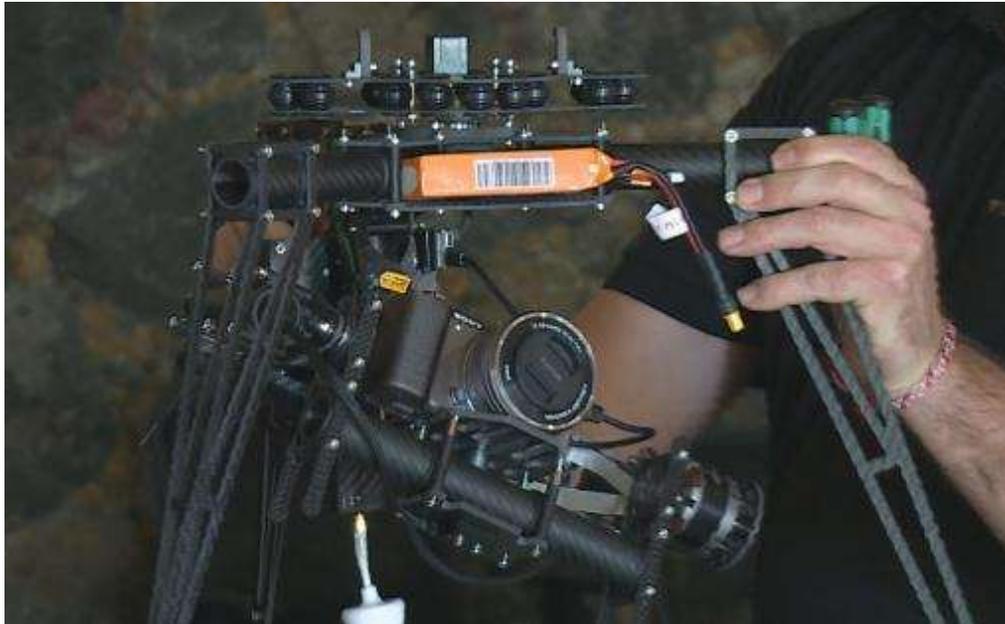


Figura E.15 Colocación de las baterías de la montura de cámara

v. Colocación de la montura tres ejes al hexacóptero

Al igual que la montura de un eje esta cuenta con dos garras y un quick-release para el acoplamiento hexacóptero-montura. Las garras de la montura se colocan en el eje más delgado del hexacóptero, en seguida el quick-release se coloca en el eje grueso del hexacóptero para posteriormente asegurar la montura de la cámara al hexacóptero con el tornillo tipo palomilla que tiene el quick-release (ver Figura E.8).

E.2 Montado de las baterías

El hexacóptero está equipado con una base para colocar cada una de las baterías, para sujetar las baterías al hexacóptero se utiliza velcro, una parte del velcro se encuentra en la batería (bucle) y la otra en la base que está en el hexacóptero (ganchos), además de utilizar una correa con velcro; la forma en que deben ir direccionadas las baterías es de manera que la parte cableada de la batería esté del mismo lado que el sensor GPS del hexacóptero. Tanto el soporte como las baterías van colocados sobre los brazos del drone como se muestra en la Figura E.16.

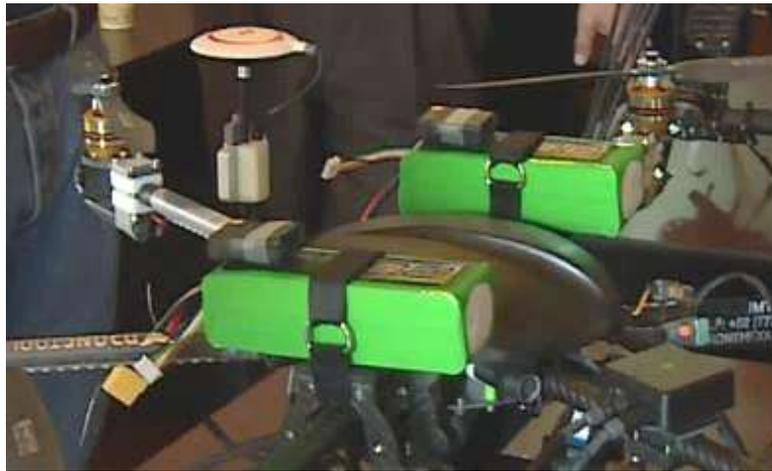


Figura E.16 Montaje de baterías en el hexacóptero

Además se cuida que las partes de fierro de la correa no estén sobre las esquinas de las baterías como se muestra en la Figura E.17.

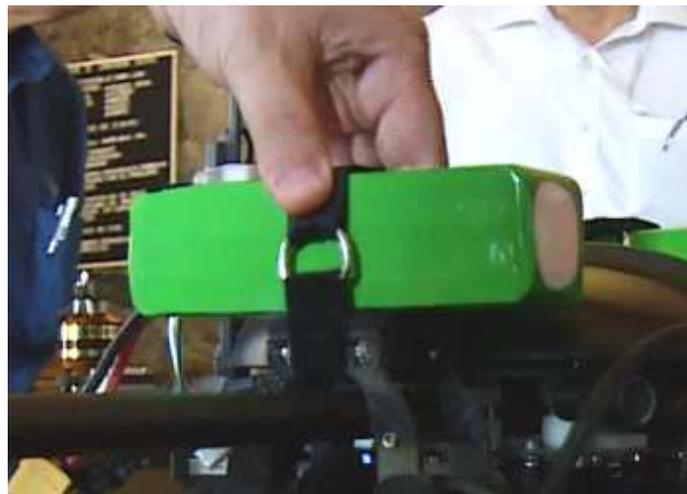


Figura E.17 Forma en que deben sujetarse las baterías

Finalmente el dron quedaría listo para ser conectado, como se muestra en la Figura E.18.



Figura E.18 Baterías colocadas en hexacóptero con a) montura de tres ejes y b) Patín de entrenamiento

E.3 Encendido de componentes

Después del armar el dron y conectar las baterías, se encienden los componentes adicionales, que ayudarán con el manejo y monitoreo del dron en el vuelo, a continuación se describe de manera general el encendido de los componentes.

i. Emisora y pupitre

Las palancas de la emisora (Figura E.19a) deben estar “peinadas” hacia abajo, posteriormente se desliza el Power switch (interruptor de alimentación) de la emisora hacia arriba, confirmar el encendido bajando la palanca de control de la velocidad y regresarla al centro.

Para el pupitre colocar y conectar una batería (Figura E.19b) que alimentará tanto al monitor (pantalla) como el receptor de la emisora.



Figura E.19 a) Emisoras y b) Conexión de batería al monitor

ii. Montura y dron

Conectar la batería de la montura (omitir si el dron es para entrenamiento) y las del dron: La montura está diseñada para mantener una posición fija, aunque el dron se mueva por condiciones atmosféricas, la montura siempre apuntará hacia el ángulo que se le haya fijado.

Después de revisar los componentes ya se puede ubicar el DRON en el punto de despegue para levantar el vuelo y realizar la misión requerida.

Anexo
Consideraciones sobre regulación y
seguridad de los drones para la
agricultura de precisión



Anexo F

CONSIDERACIONES SOBRE REGULACIÓN Y SEGURIDAD DE LOS DRONES PARA LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Helene Emmi Karin Unland Weiss y Alberto González Sánchez

F.1 Introducción

La tecnología de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) ya está suficientemente desarrollada para implementarse en la agricultura de precisión, y se encuentra en constante proceso de mejora. Sin embargo, se estima que su implementación tomará aún algunos años, ya que existe la preocupación generalizada de los gobiernos y sus agencias reguladoras, del uso desordenado de estas herramientas y los riesgos asociados al mal uso de dicha tecnología. Por lo anterior, se está implementando una regulación en su uso de forma generalizada, en los países los cuales ya están tomando la iniciativa de iniciar su utilización en aplicaciones de agricultura de precisión, así como otros usos. La presente información es un revisión de los aspectos importantes que se deben tomar en cuenta en la aplicación de reglamentos y regulaciones para uso de los VANT, incluyendo categorización por usos permitidos, restricciones por peso, altura y horarios de vuelo, cercanía a zonas restringidas, y por tipo de misión en general y en su aplicación particular en la agricultura de precisión. Se diferencia entre los reglamentos existentes por regiones, como EUA, Europa y Latinoamérica.

F.2 Categorización de usos permitidos

En la formulación de reglamentos para el uso de los VANT, se tiene que considerar su categorización por usos permitidos, lo que establece las restricciones de peso, altura y horarios de vuelo, nivel de cercanía a zonas restringidas y el tipo de aplicación. De esta forma, los usos permitidos para drones se pueden agrupar en las siguientes cuatro categorías: uso recreacional, uso para negocios, uso para entidades gubernamentales y uso educativo. Pese a que no hay un consenso global de los requerimientos y lineamientos que debe seguir cada categoría, organizaciones internacionales, como la Asociación Internacional para los Sistemas Aéreos no Tripulados (AUVSI, por las siglas de Association for Unmanned Vehicle Systems International), en conjunto con la Academia de Modelos Aeronáuticos y la Administración Federal de Aviación de Estados Unidos (FAA, Federal Aviation Administration), ha implementado un decálogo de

buenas prácticas y recomendaciones que debe seguir cada categoría, los cuales se describen a continuación ("Know Before You Fly", s. f.).

F.2.1 Uso recreacional

Los VANT pueden ser operados para fines recreativos y de pasatiempo, actividad que tiene por nombre aeromodelismo. Son aeronaves entre 2 y 20 kg de peso, que son utilizadas para fines de disfrute personal, como la toma de fotografía o video no profesional.

En ocasiones, el aeromodelismo es practicado en clubes, los cuales tienen sus propias reglas de operación, a fin de garantizar la seguridad de sus miembros. No obstante, la mayoría de las ocasiones se emprende esta actividad por cuenta propia, posiblemente sin las medidas de seguridad adecuadas. En general, se recomienda seguir las siguientes recomendaciones:

- No volar a más de 120 metros de altura y permanecer debajo de cualquier obstáculo circundante cuando sea posible
- Mantener el dron a la vista en todo momento, y usar un segundo observador como soporte en caso de ser necesario
- Manipular el VANT en espacios despejados y no interfiera con las operaciones de otros VANT
- No volar intencionalmente sobre personas desprotegidas ni vehículos en movimiento. Permanecer por lo menos a 120 metros de distancia de individuos y bienes vulnerables
- No volar a menos de 9 km de aeropuertos (ver sección F.3.3.2 sobre legislación).
- No volar en condiciones climáticas adversas, tales como en vientos fuertes o visibilidad reducida
- No volar bajo la influencia de alcohol o drogas
- Asegurarse primero de que el entorno operativo es seguro y que el operador es competente en el funcionamiento del VANT
- No volar cerca de construcciones o instalaciones sensibles, tales como centrales eléctricas, instalaciones de tratamiento de agua, instalaciones correccionales, carreteras muy transitadas, instalaciones gubernamentales, entre otros
- Verificar y seguir todas las leyes y ordenanzas locales antes de volar sobre una propiedad privada
- No llevar a cabo labores de vigilancia o fotografía de personas en áreas donde exista una expectativa de privacidad sin el permiso del individuo

Los usuarios de drones comerciales y recreativos deben ser conscientes de que en áreas remotas, rurales y agrícolas, las aeronaves tripuladas, incluyendo aviones de ala fija y helicópteros, pueden estar operando muy cerca del nivel del suelo. Los pilotos que realizan operaciones agrícolas, extinción de incendios, aplicaciones catastrales, labores policiales, emergencias médicas, vida silvestre y una variedad de otros servicios trabajan legal y rutinariamente en el espacio aéreo de bajo nivel (menores a los 100 m). Los operadores que controlan los VANT en estas áreas deben mantener la conciencia de la situación, ceder el paso y mantenerse a una distancia segura de estos aviones y helicópteros tripulados de bajo nivel.

F.2.2 Uso para negocios

Esta categoría engloba los usos comerciales del VANT. Es decir, cualquier actividad para lo cual el producto del VANT se utilice de forma lucrativa. Algunos ejemplos son:

- Venta de fotos o videos tomados desde el VANT. Por ejemplo, fotografías para eventos sociales, transmisiones de video y fotografía de cine profesional para una producción cinematográfica o televisiva.
- Monitoreo aéreo por contrato, tales como inspecciones para plantas industriales o fábricas.
- Uso de drones para proporcionar servicios profesionales, tales como seguridad o telecomunicaciones.
- Uso de VANT para supervisar el progreso de construcciones, labores de limpieza, funcionamiento de infraestructura hidráulica, entre otros.
- Prestación de servicios contractuales para cartografía o levantamiento de perfiles topográficos.

Los pilotos para este tipo de uso deben tener más de 16 años, y estar certificados por parte de la agencia responsable, o estar bajo la supervisión de un piloto certificado. En el caso de México, corresponde a la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) emitir dichos certificados (Chávez, 2015). El dron, por otro lado, debe pesar menos de 25 kg, y ser revisado previamente por el piloto responsable. Recomendaciones:

- Debe volar a menos de 120 metros sobre el nivel del suelo (SNS). Es posible volar a alturas superiores con ayuda de estructuras, como plataformas o andamios, siempre y cuando la altura del VANT respecto a la estructura no exceda los 120 m
- Debe mantener el dron a la vista, ya sea por parte del piloto en la emisora u otro observador

- Se debe volar durante las horas de la luz del día o las horas crepusculares civiles (30 minutos antes del amanecer oficial a 30 minutos después de la puesta del sol oficial, hora local), siempre con la iluminación anticollisión adecuada
- Debe volar a o por debajo de 160 km/h
- Debe ceder derecho de paso a las aeronaves tripuladas
- No se debe volar sobre las personas
- No debe volar desde un vehículo en movimiento a menos que esté en un área escasamente poblada.

F.2.3 Entidades gubernamentales

En este caso, el uso del VANT es por parte de una entidad relacionada con el Gobierno, como por ejemplo, una universidad pública, un instituto de investigación, una asociación policiaca, alguna agencia de seguridad o el departamento de bomberos, entre otros. En este caso, hay dos opciones:

1. Seguir los mismos requisitos que los usuarios de negocios
2. Tramitar un permiso especial por parte de la agencia responsable (DGAC)

No obstante, es importante recordar que el permiso de volar el VANT no exime a los operadores de cumplir y respetar todas las leyes, de cualquier naturaleza (Chávez, 2015).

F.2.4 Uso educacional

Los estudiantes pueden aprender a diseñar, construir y operar pequeñas aeronaves no tripuladas (menos de 25 kg) como parte de algunos cursos científicos o tecnológicos relacionados con la aviación, o bien como parte de otros propósitos educativos, como cursos de televisión, cine o fotografía. Estos usos caen bajo uso de hobby o recreacional. Las escuelas y los estudiantes deben seguir todos los mismos protocolos que una escuela de aeromodelismo.

Para las escuelas interesadas en operar un VANT para fines distintos al uso recreativo (por ejemplo, para investigación), deben aplicar las recomendaciones para uso comercial y entidades gubernamentales.

F.3 Legislación por regiones geográficas

Los VANT representan un sector de la aviación en desarrollo rápido con mucho potencial de crear empleos y crecimiento económico. El marco regulatorio igual se encuentra todavía en desarrollo continuo en diferentes zonas geográficas. Dependiendo en el país en donde se encuentra el operador, hay una variación en los reglamentos que se han desarrollado e implementado, desde lo más básico hasta lo más avanzado.

F.3.1 Europa

En los países que forman la Unión Europea (EU), hay diferencias locales en sus reglamentos de los VANT y no existe una coherencia de las reglas de seguridad, por lo cual la EU mediante la Agencia Europea de Seguridad Aérea recién propuso una Comisión Prototipo de Regulación de Operaciones de los VANT (EASA, 2016a y 2016b) y espera implementar su nuevo reglamento por fines de este año. Dicho reglamento se basa en una opinión técnica emitida en diciembre 2015 incluyendo veintisiete propuestas concretas del marco regulatorio para los VANT con tres categorías principales los cuales llevan diferentes requerimientos de seguridad, en proporción al riesgo implicado:

1. Categoría abierta (bajo riesgo): No requiere autorización para operación del VANT mientras que no se vuelan en zonas restringidas por la Autoridad Nacional de Aviación (ANA). No requiere permisos de operación solamente el cumplimiento con reglas básicas de seguridad de operación del equipo.
2. Categoría específica (riesgo medio): Se requiere autorización de la ANA después de llevar a cabo una revisión de riesgo por el operador de acuerdo de escenarios estándar por tipo de operación. Para ciertos escenarios de riesgo bajo, los operadores en esta categoría obtendrán permisos con llenar un simple formato.
3. Categoría certificada (alto riesgo): Requisitos comparables a los de la aviación tripulada, bajo supervisión de la ANA para el otorgamiento de licencias y aprobación de mantenimiento, operación y entrenamiento. En caso de organizaciones foráneas, se requiere aprobación por parte de la EASA de acuerdo con un proceso similar a la aviación tripulada.

Se espera que cada país de la EU desarrolla e implementa su propio reglamento bajo estos términos de referencia a la brevedad. Por ejemplo, la Agencia Española de Seguridad Aérea desde 2014 cuenta con un reglamento temporal que contempla los distintos escenarios en los que se podrán realizar los distintos trabajos aéreos y en función del peso de la aeronave. Además, las condiciones ahora aprobadas se completan

con el régimen general de la Ley sobre Navegación Aérea, y establecen las condiciones de operación con este tipo de aeronaves (AESA, 2014). Dicho reglamento temporal español se tiene que adaptar a lo estipulado en la antes mencionada propuesta regulatoria de la EASA.

F.3.2 Estados Unidos

Por otro lado, la Administración Federal de Aviación de los EUA en el 21 junio 2016 emitió una circular sobre sistemas de aeronaves no-tripuladas pequeñas (FAA, 2016a), y un resumen de reglas para aeronaves no-tripuladas pequeñas (parte 107; FAA 2016b) especificando las limitaciones operacionales, certificación y responsabilidades de pilotos de control remoto y requisitos por operación segura del VANT. Entre estos, destacan el peso máximo permitido del VANT de 25 kg, velocidad máxima de 100 millas por hora, altura máxima de 400 pies, prohibición de pilotear desde un avión en movimiento o de transportar materiales peligrosos, requerimiento de mantener línea de vista en todo tiempo entre piloto y VANT, prohibición de operar en espacios cerrados o encima de personas espectadoras, o en la noche.

Se estipula que el operador del VANT debe contar con certificado de piloto remoto o ser supervisado por un piloto certificado para operar un VANT. Los certificados se emiten por un centro de entrenamiento de la FAA o en uno de sus cursos en línea. La edad mínima del piloto de VANT es de 16 años. El piloto debe llevar a cabo un chequeo pre-vuelo para asegurar que su VANT está en condiciones de operación segura y cumple con los requisitos de registraci3n vigentes, y debe reportar a la FAA y en su caso, pagar una multa en caso de causar un accidente que resulta en lesiones serias o daño a propiedad.

F.3.3 América Latina y México

F.3.3.1 Países de América Latina

En contraste, en los países de América Latina, la regulaci3n todavía se encuentra en una etapa más básica. Hay escasa informaci3n disponible para esta regi3n.

F.3.3.2 México

En el caso de México, desde el 8 de abril 2015 se cuenta solamente con una “Circular Obligatoria” de la Direcci3n General de Aeronáutica Civil (SCT, 2015), que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia. La

regulación se enfoca en la “protección de las personas y de las propiedades en tierra y en vuelo”, con fines de no incrementar el riesgo de personas o propiedades comparado con una categoría equivalente de aeronave tripulada. En la circular se trata de un primer paso para alcanzar dicho objetivo y se espera que el gobierno mexicano emita reglamentos más precisos en un futuro.

El reglamento vigente clasifica los VANT en tres categorías: micro (de 2 kg o menos), ligero (2 a 25 kg) y pesado (25 kg o más), cualquiera de estos puede tener uso recreativo o comercial. Las reglas más importantes que aplican a todas las categorías son: Prohibición de dejar caer o aventar cualquier objeto o material desde un VANT que puede causar daño a una persona o propiedad; asegurar operación segura del VANT mediante inspección pre-vuelo; prohibición de operar en áreas restringidas o peligrosas según Publicación de Información Aeronáutica de México y otras autoridades asociadas. Prohibición de utilizar el VANT para transportar materiales prohibidas por la ley o peligrosas, como armas o explosivos.

El piloto es responsable de cualquier daño causado por su VANT a objetos o personas, y del mal uso que se dé a la información obtenida durante su operación. No se debe operar un VANT fuera de horario de luz de día sin autorización previa de las autoridades aeronáuticas; Aeronaves tripulados tienen la preferencia en el espacio aéreo sobre cualquier VANT; los VANT no se deben operar desde un vehículo en movimiento salvo un vehículo acuático en caso de ser necesario para su adecuada operación. VANT de procedencia extranjera o pilotados por operadores extranjeros con fines científicos deben contar con permiso de la Secretaría de Defensa Nacional. Las siguientes limitaciones aplican a las tres categorías de clasificación de VANT antes mencionadas:

i. VANT micro

No requieren autorización especial si vuelan a altitud menor de 122 m, se operan en línea de vista con el operador con una distancia máxima horizontal entre operador y VANT de 457 m. No pueden volar a menos de 9.2 km de cualquier aeropuerto controlado o 3.7 km de un aeródromo no controlado, o 0.9 km de un helipuerto. Su velocidad máxima varía de 55 km/h a 20.89 km/h (para peso de 0.001 a 2 kg, respectivamente). Las VANT de esta categoría deben descomponerse fácilmente en caso de impactarse, para presentar peligro mínimo. Se pueden volar arriba de personas solamente si su altura es de 46 m cuando menos sobre las personas. Si se utilizan para fines comerciales, deben contar con seguro de responsabilidad civil.

ii. VANT ligeros

a) De uso recreativo

De uso recreativo. Operados dentro de clubes de aeromodelismo autorizadas por autoridades aeronáuticas, de acuerdo con las reglas que aplican al club; no pueden

exceder la velocidad de 161 km/h y con pilotos calificados con conocimiento aeronáutico apropiado. No volar más bajo que 152 m de altura si vuelan sobre personas.

A.1.1.1.1.4 De uso comercial

De uso comercial: Deben obedecer las reglas anteriores aplicables, y tener registro y placa de identificación ante la Dirección General Adjunta de Transporte y Control Aeronáutico.

iii. VANT pesados

a) De uso recreativo

Aplican las mismas reglas como para VANT Ligero recreativo.

A.1.1.1.1.5 De uso comercial

Se debe contar con registro y placa de identificación ante la Dirección General Adjunta de Transporte y Control Aeronáutico, aprobación de tipo de RPAS y autorización de operación, la cual se obtiene cumpliendo con requisitos estipulados en Apéndices Normativos de la Dirección de Ingeniería, Normas y Certificación (DINC). Aplican inspecciones de verificación.

F.4 Mejoras a futuro

El tema de la aplicación de los VANT en usos civiles todavía es un campo nuevo y por lo tanto, está en un constante proceso de mejoramiento la reglamentación de la operación de estas aeronaves no tripuladas por todo el mundo. Algunas regiones ya cuentan con reglamentos y leyes más específicos, como son algunos países de la Unión Europea y los Estados Unidos, mientras que todavía se encuentra en su infancia en la región de América Latina.

Se espera que se tomen como guía las experiencias obtenidas en otros países para elaborar un mejor reglamento para México, ya que es de suma importancia la operación segura de los equipos VANT. A pesar de los múltiples usos benéficos en muchos campos de aplicación, incluyendo la agricultura de precisión, se han causado daños significativos a vida y propiedad por el mal uso de los VANT debido a que no se siguen las reglas. Un caso ha sido el de operadores contratados por televisoras de noticieros que interfieren con la importante labor de los helicópteros bomberos en el proceso de apagar incendios en California. No debe ser tomado como una molestia que hace el trabajo más difícil, pero sí tener en mente la razón por la cual deben existir reglamentos claros y específicos que ayuden a salvaguardar la seguridad pública.

F.5 Bibliografía del capítulo

- AESA. (2014). BOE no. 252, Sección 6^a Aeronaves civiles pilotadas por control remoto. http://www.seguridadaerea.gob.es/media/4389070/ley_18_2014_de_15_octubre.pdf Agencia Española de Seguridad Aérea. 7 pp.
- Chávez, G. (2015). ¿Cómo obtengo una licencia para volar mi dron?. www.expansion.mx. Recuperado 26 de enero de 2017, a partir de <http://expansion.mx/tecnologia/2015/08/13/como-obtengo-una-licencia-para-volar-mi-drone>
- EASA. (2016a). 'Prototype' Commission Regulation on Unmanned Aircraft Operations Agencia Europea de Seguridad Aviática. 72 pp.
- EASA. (2016b). Nota explicatoria al documento titulado 'Prototype' Commission Regulation On Unmanned Aircraft Operations Explanatory Note Agencia Europea de Seguridad Aviática. 16 pp.
- FAA. (2016a). Advisory Circular. Small Unmanned Aircraft Systems. Federal Aviation Administration. 53 pp.
- FAA. (2016b). Summary of Small Unmanned Aircraft Rule (Part 107) FAA News, 21 junio, 2016. 3 pp.
- Know Before You Fly. www.knowbeforeyoufly.org. Recuperado el 27 de enero 2017, a partir de <http://knowbeforeyoufly.org/>
- SCT. (2015). Requerimientos para Operar un Sistema de Aeronave Piloteada a Distancia (RPAS). Dirección Aeronáutica Civil, México. 27 pp.