



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO  
INTEGRAL DEL AGUA**

**DESARROLLO DE SISTEMA DE AERONAVE PILOTADA A  
DISTANCIA Y APLICACIÓN PARA LEVANTAMIENTO  
TOPOGRÁFICO AGRÍCOLA**

**TESIS**

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL  
AGUA, ORIENTACIÓN EN MECANIZACIÓN AGRÍCOLA**

Presenta:

**PÉREZ PAREDES JUAN JOSÉ.**

Bajo la supervisión de:

**DR. GILBERTO DE JESÚS LÓPEZ CANTEÑS**



**APROBADA**



Chapingo, Estado De México, noviembre del 2020

**DESARROLLO DE SISTEMA DE AERONAVE PILOTADA A DISTANCIA Y  
APLICACIÓN PARA LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO AGRÍCOLA**

Tesis realizada por **JUAN JOSÉ PÉREZ PAREDES** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA.**

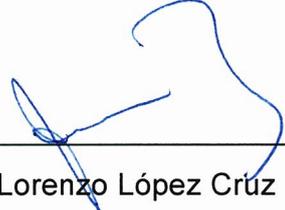
DIRECTOR: \_\_\_\_\_

  
Dr. Gilberto de Jesús López Canteñas

ASESOR: \_\_\_\_\_

  
Dr. Noé Velázquez López

ASESOR: \_\_\_\_\_

  
Dr. Irineo Lorenzo López Cruz

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma Chapingo, por todo lo que me dio.

Al programa de Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, por concederme la formación y los medios posibles para mis estudios de posgrado en la Maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme los medios posibles para la realización de la maestría, esperando retribuir a mi país el bien recibido

A los integrantes de mi comité asesor: Dr. Gilberto de Jesús López Canteñas, Dr. Noé Velázquez López, y al Irineo Lorenzo López Cruz.

## DATOS BIOGRÁFICOS



Nombre: Pérez Paredes Juan José.  
Fecha de nacimiento: 6 de enero de 1994  
Lugar de Nacimiento: Santa María Atzompa, Oaxaca.  
CURP: PEPJ940106HOCRRN06  
Profesión: Ingeniero Mecánico Agrícola  
Cedula profesional: 11177255

### **Desarrollo Académico:**

Preparatoria: Universidad Autónoma Chapingo  
Licenciatura: Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola,  
Universidad Autónoma Chapingo.  
Maestría: Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua,  
Universidad Autónoma Chapingo.

## CONTENIDO

|  |      |
|--|------|
| ÍNDICE DE CUADROS .....                                  | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                  | ix   |
| RESUMEN GENERAL .....                                    | xii  |
| GENERAL ABSTRACT .....                                   | xiii |
| 1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....                            | 1    |
| 1.1 Introducción .....                                   | 1    |
| 1.2 Objetivos .....                                      | 4    |
| 1.2.1 Objetivo general .....                             | 4    |
| 1.2.2 Objetivos específicos .....                        | 4    |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA .....                          | 5    |
| 2.1 Agricultura digital .....                            | 5    |
| 2.2 RPAS en la Agricultura .....                         | 7    |
| 2.2.1 Aplicaciones agrícolas de RPAS .....               | 8    |
| 2.3 Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia RPAS .....  | 13   |
| 2.3.1 Tipos de RPAS utilizados en la agricultura .....   | 13   |
| 2.3.2 Sistemas y componentes de los RPAS .....           | 17   |
| 2.3.3 Quadrotor o Cuadricóptero .....                    | 21   |
| 2.3.4 Dinámica y control de los Cuadricópteros .....     | 22   |
| 2.3.5 Requerimientos para el diseño Cuadricópteros ..... | 24   |
| 2.3.6 Vibraciones .....                                  | 25   |
| 2.3.7 Variables de control “PID” .....                   | 27   |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.3.8 | Patentes .....   | 30 |
| 2.3.9 | Normativa y legislación .....  | 31 |
| 2.4   | Topografía con RPAS (Proceso fotogramétrico).....  | 33 |
| 2.5   | Bibliografía.....  | 38 |
| 3.    | DESARROLLO DE UN SISTEMA DE AERONAVE PILOTADA A DISTANCIA (RPAS), PARA USO AGRÍCOLA.....   | 47 |
| 3.1   | Resumen .....  | 47 |
| 3.2   | Abstract.....  | 48 |
| 3.3   | Introducción .....   | 49 |
| 3.4   | Materiales y métodos.....  | 51 |
| 3.4.1 | Diseño del RPAS.....   | 51 |
| 3.4.2 | Construcción del RPAS.....   | 62 |
| 3.4.3 | Evaluación del prototipo RPAS .....  | 72 |
| 3.4.4 | Análisis económico.....  | 75 |
| 3.5   | Análisis del funcionamiento del prototipo RPAS .....                                       | 76 |
| 3.6   | Conclusiones .....   | 83 |
| 3.7   | Bibliografía. ....   | 83 |
| 4.    | EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE RPAS PARA EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CON IMÁGENES RGB..... | 86 |
| 4.1   | Resumen. ....  | 86 |
| 4.2   | Abstrac.....   | 87 |
| 4.3   | Introducción. ....   | 88 |
| 4.4   | Materiales y métodos.....  | 89 |

|                  |  |     |
|------------------|--|-----|
| 4.4.1            | Parcela experimental.....                      | 89  |
| 4.4.2            | Prototipo de RPAS .....                        | 90  |
| 4.4.3            | Levantamiento topográfico GPS .....            | 91  |
| 4.4.4            | Proceso fotogramétrico .....                   | 92  |
| 4.4.5            | Procesamiento de datos GPS en postproceso..... | 94  |
| 4.4.6            | Procesamiento digital de las imágenes.....     | 95  |
| 4.4.7            | Evaluación.....                                | 96  |
| 4.5              | Resultados y discusión .....                   | 97  |
| 4.6              | Conclusiones .....                             | 99  |
| 4.7              | Bibliografía. ....                             | 99  |
| APÉNDICE A ..... |  | 101 |
| APÉNDICE B ..... |  | 102 |
| APÉNDICE C.....  |  | 104 |
| APÉNDICE D.....  |  | 105 |
| APÉNDICE E ..... |  | 106 |
| APÉNDICE F ..... |  | 107 |
| APÉNDICE G.....  |  | 108 |
| APÉNDICE H.....  |  | 111 |
| APÉNDICE I.....  |  | 113 |
| APÉNDICE J.....  |  | 115 |

## ÍNDICE DE CUADROS

### CAPITULO 2

|   |    |
|---|----|
| Cuadro 1. Rasgos de fenotipado utilizando RPAS, diversos sensores y métodos. ....   | 10 |
| Cuadro 2. Trabajos de investigación de aplicaciones de Mapeo Agrícola con RPAS. ....  | 11 |
| Cuadro 3. Trabajos de investigación de aplicaciones de detección agrícola con RPAS. ....  | 12 |
| Cuadro 4. Trabajos de investigación de aplicaciones agrícola con RPAS. ....   | 12 |
| Cuadro 5. Tipos de RPAS utilizados en la agricultura. ....  | 13 |
| Cuadro 6. Ventajas y desventajas de RPAS utilizados en la agricultura. ....   | 14 |
| Cuadro 7. Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) disponibles en el mercado. .   | 16 |
| Cuadro 8. Componentes de los “RPAS”. ....   | 19 |
| Cuadro 9. Parámetros para el diseño de cuadricópteros. ....   | 25 |
| Cuadro 10. Clasificación de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia, de acuerdo con la NORMA Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019. .... | 31 |
| Cuadro 11. Trabajos topográficos, para la agricultura mediante el uso de RPAS. ....   | 33 |
| Cuadro 12. Proceso fotogramétrico. ....   | 34 |

### CAPITULO 3

|  |    |
|--|----|
| Cuadro 1. Parámetros de diseño aerodinámico. ....                      | 52 |
| Cuadro 2. Parámetros de diseño mecánico. ....                          | 52 |
| Cuadro 3. Parámetros del sistema de control. ....                      | 52 |
| Cuadro 4. Fuerza de empuje de los motores Race Star (2212 1400kv) .... | 54 |
| Cuadro 5. Características generales de la batería. ....                | 55 |
| Cuadro 6. Valores de la tensión (Von Mises). ....                      | 59 |
| Cuadro 7. Propiedades de masa del RPAS. ....                           | 60 |

|   |    |
|---|----|
| Cuadro 8. Especificaciones del controlador de vuelo Pixhawk. ....                   | 62 |
| Cuadro 9. Ángulos y vibración con distintos valores PID.....                        | 71 |
| Cuadro 10. Ajuste del control PID.....  | 71 |
| Cuadro 11. Costo de los componentes del RPAS. ....                                  | 75 |
| Cuadro 12. Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) disponibles en el mercado.<br>..... | 76 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPITULO 2

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Mavic Pro.....  | 14 |
| Figura 2. Dron senseFly eBee Plus. Fuente: Gonzales (2019).....   | 14 |
| Figura 3. Diagrama del Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia.....                                      | 18 |
| Figura 4. Comunicación entre el “RPA” y la estación de tierra. ....                                       | 19 |
| Figura 5. Controlador de vuelo Pixhawk. ....  | 19 |
| Figura 6. Módulo GPS para Pixhawk. ....   | 20 |
| Figura 7. Sensor "RGB" HawkEye Firefly .....  | 20 |
| Figura 8. Variador de velocidad “ESC” 3A UBEC. ....   | 20 |
| Figura 9. Motores Brushless .....   | 20 |
| Figura 10. Hélices 8045. ....   | 20 |
| Figura 11. Módulos de telemetría .....  | 21 |
| Figura 12. Radiocontrol Turnigy.....  | 21 |
| Figura 13. DJI Phantom 4 RTK.....   | 21 |
| Figura 14. Diagrama de configuración Plus Style (A) y Cross Style (B).....                                | 23 |
| Figura 15. Diagrama de la dinámica de un sistema cuadricóptero a partir de las<br>fuerzas de empuje. .... | 23 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 16. Esquema de movimientos de rotación. ....               | 24 |
| Figura 17. Algoritmo para calcular los niveles de vibración. .... | 27 |
| Figura 18. Diagrama de bloques de control "PID" .....             | 28 |
| Figura 19. Pasos del proceso fotogramétrico. ....                 | 34 |
| Figura 20. Proceso fotogramétrico.....                            | 36 |

### **CAPITULO 3**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama de flujo del diseño de RPAS.....   | 51 |
| Figura 2. Dimensiones del chasis .....  | 58 |
| Figura 4. Tensión del chasis (Von Mises) .....  | 58 |
| Figura 3. Simulación de esfuerzos.....  | 58 |
| Figura 5. Distancias del centro de masa.....  | 60 |
| Figura 6. Diagrama de la propuesta de RPAS .....  | 61 |
| Figura 7. Chasis f330 con motores. ....   | 63 |
| Figura 8. Alineación de la controladora, ESC y GPS .....  | 63 |
| Figura 9. Colocación de cámara .....  | 64 |
| Figura 10. Ensamblaje final. ....   | 64 |
| Figura 11. Diagrama general de conexión. ....   | 65 |
| Figura 12. Conexión de los ESC, cámara y receptor RC.....   | 66 |
| Figura 13. Numero de motor y sentido de giro.....   | 66 |
| Figura 14. Conexión ESC-Motores. ....   | 67 |
| Figura 15. Espacio de estado de la ecuación del control PID.....  | 68 |
| Figura 16. Diagrama del control PID, utilizado para corregir altura y ángulos, de la controladora de vuelo pixhawk..... | 69 |
| Figura 17. Vuelo del RPAS. ....   | 72 |
| Figura 18. RPAS, radiocontrol y telemetría.....   | 73 |
| Figura 19. Planificación del vuelo en "Qground Control". ....   | 73 |
| Figura 20. Waypoints del plan de vuelo. ....  | 74 |
| Figura 21. Voltaje del RPAS durante el vuelo.....   | 77 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 22. Consumo (A) y corriente(A) del RPAS.....                 | 78 |
| Figura 23. Giro en "Roll", "Pitch" y "Yaw" del RPAS (vuelo 1). .... | 79 |
| Figura 24. Giro en "Roll", "Pitch" y "Yaw" del RPAS (vuelo 2). .... | 79 |
| Figura 25. Vibración media en "X", "Y" y "Z". ....                  | 80 |
| Figura 26. Altura media del RPAS en los vuelos. ....                | 81 |
| Figura 27. Valores del control PID de altitud.....                  | 81 |
| Figura 28. Valores del control P y I de pitch y roll. ....          | 82 |
| Figura 29. Valores del control D de pitch y roll.....               | 82 |

#### **CAPITULO 4**

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Área de estudio. A) Vista satelital. B) Vista general.....                     | 90 |
| Figura 2. Prototipo de RPAS.....   | 90 |
| Figura 3. Equipamiento GPS. ....   | 91 |
| Figura 4. Puntos tomados en el área de estudio.....                                      | 92 |
| Figura 5. Puntos de control (GCP), ubicados en la superficie de estudio. ....            | 93 |
| Figura 6. Ajuste de traslape y cámara en Qground Control. ....                           | 93 |
| Figura 7. Plan de vuelo con waypoints. ....  | 94 |
| Figura 8. Diagrama de corrección de coordenadas en postproceso.....                      | 95 |
| Figura 9. Proceso fotogramétrico.....  | 96 |
| Figura 10. Residuales de la altura geodésica del MDE .....                               | 98 |
| Figura 11. Altura geodésica medida con el GPS y el modelo digital de elevación.<br>..... | 98 |

## RESUMEN GENERAL

### DESARROLLO DE SISTEMA DE AERONAVE PILOTADA A DISTANCIA Y APLICACIÓN PARA LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO AGRÍCOLA

La agricultura de precisión se caracteriza por identificar y manejar la variabilidad espacial y temporal, para maximizar los beneficios con el menor impacto ambiental, por lo que, se requieren de datos geocalizados del campo que permitan tomar decisiones. Los sistemas de aeronave pilotada a distancia (RPAS) son una alternativa para monitorear el estado de los cultivos, estimar rendimientos, así como generar datos sobre características del suelo y la parcela, con este fin se desarrolló y evaluó un RPAS tipo cuadricóptero, basado en software y hardware abierto que permite la realización de vuelos autónomos y estables para la obtención de imágenes georreferenciadas en tiempo real y de forma secuencial con misiones de vuelo. El diseño del chasis del RPAS se hizo en Solidworks, modelándose los esfuerzos en la estructura y el centro de masa, mientras que en el diseño electrónico y de control se incluyeron: motores brushless, sensor GPS, acelerómetro, giroscopio y cámara RGB de alta resolución con antivibración. El control PID se ajustó y se programó el sistema de navegación autónomo de la controladora Pixhawk para realizar misiones planeadas con telemetría mediante “waypoints” y almacenando los datos obtenidos. La evaluación del RPAS se realizó en misiones de vuelo autónomas con una velocidad constante de 1 m/s, a una altura de 20m y con vientos no mayores a 5 Km/h. El consumo del RPAS fue de 1650 mAh por 7 minutos de vuelo y las vibraciones medidas fueron menores a 20 m/s/s, además el movimiento en los ejes “yaw”, “pitch” y “roll” del vehículo fueron menores a 6 grados, obteniéndose una estabilidad con valores dentro de los parámetros recomendados por Bonney et al., (2020). También, se planificó una misión de vuelo con el prototipo, obteniéndose imágenes RGB que se corrigieron mediante puntos de control en tierra y, la nube densa de puntos generada se comparó con un levantamiento topográfico GPS en postproceso, siendo los errores absolutos y estándar de 0.020 y 0.024 m, respectivamente.

**Palabras clave:** RPAS, Diseño, Telemetría, GPS, Programación de vuelo.

## GENERAL ABSTRACT

### DEVELOPMENT OF REMOTE CONTROLLED AIRCRAFT SYSTEM AND APPLICATION FOR AGRICULTURAL SURVEYING.

Precision agriculture is characterized by identifying and managing spatial and temporal variability, to maximize benefits with the least environmental impact. Therefore, geolocalized field data is required to make decisions. Remote piloted aircraft systems (RPAS) are an alternative to monitor the state of crops, estimate yields, as well as generate data on soil and plot characteristics. For this purpose, a quadricopter type RPAS was developed and evaluated, based on open software and hardware that allows autonomous and stable flights to obtain georeferenced images in real time and in a sequential manner with flight missions. The chassis design of the RPAS was done in Solidworks, modeling the efforts in the structure and the center of mass, while the electronic and control design included: brushless motors, GPS sensor, accelerometer, gyroscope and high resolution RGB camera with anti-vibration. The PID control was adjusted and the autonomous navigation system of the Pixhawk controller programmed to perform planned missions with telemetry through "waypoints" and st

oring the data obtained. The evaluation of the RPAS was carried out in autonomous flight missions with a constant speed of 1 m/s, at an altitude of 20m and with winds no greater than 5 Km/h. The RPAS consumption was 1650 mAh for 7 minutes of flight and the vibrations measured were less than 20 m/s, in addition the movement in the axes "yaw", "pitch" and "roll" of the vehicle were less than 6 degrees, obtaining a stability with values within the parameters recommended by Bonney et al., (2020). Also, a flight mission with the prototype was planned obtaining RGB images that were corrected by control points on the ground and the generated dense point cloud was compared with a post-processing GPS topographic survey, being the absolute and standard errors of 0.020 and 0.024 m, respectively.

**Keywords:** RPAS, Design, Telemetry, GPS, Flight scheduling.

# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1 Introducción

El sistema agroalimentario mundial enfrenta el desafío de suministrar y poder generar suficientes alimentos de calidad, para alimentar a la población (FAO, 2020a). Debido a que, la demanda de alimentos aumentará un 69% de 2010 a 2050, ocasionado por el aumento de la población mundial de 7 a 9 mil millones de personas (Gerard, 2018), por lo que será necesario contar con sistemas alimentarios más productivos, eficientes, sostenibles, inclusivos, transparentes y resilientes (Trendov, Varas, & Zeng, 2019).

Las tecnologías digitales ofrecen la oportunidad de generar un cambio significativo, llenando el vacío entre la producción agrícola actual y las necesidades del futuro (Gerard, 2018). Estas tecnologías, mejorarán la producción en la agricultura y el comercio, ayudando a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, propuestos en la Asamblea General de las Naciones Unidas en el año 2015 (Trendov, Varas, & Zeng, 2019; FAO, 2020a).

La Agricultura Digital o Agricultura 4.0 es el uso de tecnologías digitales para integrar a los agricultores en un sistema agroalimentario de base digital. La agricultura 4.0 es una serie de conocimientos digitalizados e interconectados de los procesos de producción, utilizados para maximizar los rendimientos por unidad de área y que buscan la mejor alternativa para lograr el desarrollo de sistemas de producción de cultivos. Esta agricultura está enfocada a la sostenibilidad, el mejoramiento de los cultivos, el uso eficiente de los nutrientes y agua, evitando la pérdida, degradación de los suelos y el desperdicio a lo largo de la cadena de producción (FAO, 2020b).

En el contexto general, la agricultura digital engloba distintas tecnologías, en la cual se encuentra la agricultura de precisión (FAO, 2018), la tecnología de información y un concepto agronómico de gestión de parcelas agrícolas (Pino, 2019). La agricultura de precisión busca el manejo preciso de la variabilidad espacial y temporal, a nivel inter parcelario, para aumentar la eficiencia, la

rentabilidad, la gestión sostenible, reducir el impacto ambiental y mejorar el retorno económico (Tondato-Arantes, Matheus-Costa, & Abadia-Ventura, 2019).

La agricultura de precisión está basada en el geoposicionamiento de las labores culturales (manejo específico de un área de cultivo), la consideración de las variaciones de rendimiento en toda el área y la adaptación de técnicas de cultivo a las condiciones de cada punto del terreno. Los insumos, como: fertilizantes, plaguicidas, herbicidas, nutrientes y agua son optimizados, debido al uso de geo tecnologías (GPS, SIG, teledetección), junto con maquinaria agrícola desarrollada tecnológicamente (Pino, 2019).

En la Agricultura de Precisión se utilizan Sistemas de Aeronave Piloteada a Distancia “RPAS” conocidos generalmente como “Drones” (Gerard, 2018), aunque, inicialmente su implementación fue solo en los países con mayor inversión (Santoyo-Luévano, Cázares-Vieyra, Avilés-Cruz, Villegas-Cortez, & Zúñiga-López, 2016). Actualmente, el uso de las plataformas aéreas ha aumentado, debido a que constituyen una herramienta sumamente eficaz y poderosa, utilizada en la agricultura de precisión. Estas plataformas son capaces de captar grandes cantidades de información de objetos, fenómenos, áreas de vegetación o cultivos de manera precisa, fácil, eficiente y flexible (Yao et al., 2019; Messina & Modica, 2020; Poley & McDermid, 2020).

Los sistemas aéreos no tripulados permiten cartografiar las variables espaciales y temporales, mediante la adquisición de imágenes a gran detalle, con resoluciones menores al centímetro, en los entornos más dinámicos (Hassler & Baysal-Gurel, 2019; Tondato-Arantes et al., 2019). Los diferentes sensores y softwares de procesamiento y análisis evalúan la condición de los cultivos y las plantas (Gerard, 2018), proporcionando un medio para el monitoreo y tratamiento de cultivos mediante el análisis de las imágenes adquiridas por dispositivos que no están en contacto directo (mediante teledetección) (Yao et al., 2019; Nhamo, Magidi, Nyamugama, & Clulow, 2020; Messina & Modica, 2020).

La tecnología RPAS y las herramientas avanzadas de análisis y procesamiento de datos de imágenes, tienen un gran potencial para la industria agrícola, cumpliendo con las necesidades del futuro y ayudando a la toma de decisiones que determinan el crecimiento y desarrollo de un cultivo, maximizando los beneficios y optimizando los costos (Gerard, 2018). Una aplicación en tiempo real y alternativa de bajo costo en comparación a la clásica fotogrametría aérea tripulada (Hassler & Baysal-Gurel, 2019).

Los usos de los RPAS están bien establecidos y documentados, sin embargo, esta tecnología todavía se encuentra en desarrollo, con muchas aplicaciones aún por explorar y otras en la fase de investigación (Hassler & Baysal-Gurel, 2019). GyuJin et al., (2020) mencionan que existen varios proyectos de código abierto, que abordan la construcción de RPAS, con el uso de controladores de vuelo como Pixhawk, Naza y Navios, para su control, permitiendo la creación de sistemas de vehículos, autónomos y confiables.

La construcción de RPAS con sistemas abiertos (software y hardware libre), es fundamental para la investigación y desarrollo de nuevas aplicaciones, haciendo rápida y sencilla la implementación de distintos sensores (instrumentación) (Santoyo-Luévano, Cázares-Vieyra, Avilés-Cruz, Villegas-Cortez, & Zúñiga-López, 2016). Estos sistemas de aeronaves, en el que cualquier industria y desarrollador pueda contribuir, crean proyectos que evolucionan constantemente, debido a la retroalimentación de funcionalidades y actualizaciones que se desarrollan (Bonney et al., 2020).

Debido a las facilidades que proporciona un RPAS con un sistema abierto, en este trabajo se presenta, el estado del arte de los Sistemas de Aeronave Pilotadas a Distancia (RPAS) en la agricultura y dos artículos científicos, el primero, sobre el diseño, construcción y evaluación de un RPAS (quadcopter), basándose en plataformas abiertas para poder realizar vuelos autónomos y estables y el segundo, sobre la evaluación del RPAS, con un levantamiento topográfico, a partir de imágenes RGB georreferenciadas y con puntos de control en tierra.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Desarrollar y evaluar un RPAS, tipo cuadricóptero con un sistema funcional, que permita la realización de vuelos autónomos y estables para la obtención de imágenes georreferenciadas en forma secuencial, mediante la instrumentación de un sensor RGB.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Dibujar los componentes mecánicos del RPAS, utilizando un sistema “CAD” que permita modelar el centro de masa y esfuerzos.
- Diseñar el sistema electrónico y de control utilizando un controlador de código abierto pixhawk, que permita la programación de vuelos autónomos y estables para la captura y almacenamiento de imágenes georreferenciadas con un sensor RGB, cumpliendo con las normas de regulación de RPAS en México.
- Evaluar el funcionamiento del RPAS en cuanto a su consumo eléctrico, tiempo de vuelo, estabilidad (vibraciones, perturbaciones y giros), en los vuelos.
- Evaluar el prototipo de RPAS para el levantamiento topográfico, a partir de imágenes RGB georreferenciadas, incluyendo puntos de control en tierra.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Agricultura digital

Históricamente, la agricultura ha experimentado una serie de revoluciones, debido a la introducción de nuevas tecnologías, que han generado un gran impacto económico y social en la producción agrícola, incrementando la eficiencia, el rendimiento y la rentabilidad a niveles antes inalcanzables (Bonadeo, Repetto, Bessón, & Di Leo, 2017; Trendov, Varas, & Zeng, 2019).

En la última década se ha observado una revolución nombrada ciber agricultura, (nombre dado en las cumbres mundiales sobre la sociedad de la información en 2003 y 2005), término que ha evolucionado en agricultura digital o agricultura 4.0 (FAO, 2018). Este cambio es el resultado de la denominada “Cuarta Revolución Industrial” o “Industria 4.0” mencionada por Klaus Schwab, en 2015, en el World Economic Forum de Davos (Santacruz De León & Palacio Muñoz, 2020).

Una revolución digital, caracterizada por aprovechar los conjuntos de nuevas tecnologías, para proporcionar métodos modernos de gran escala de producción, formas revolucionarias en autosuficiencia y consciente de liberar al ser humano de ocupaciones y rutinas repetitivas. Por lo que, el sector agrícola, ha adoptado estas formas de trabajar, con el uso de las nuevas tecnologías en todas las etapas de su producción (Gomes De Macedo, Dias-Marques, Adriano-Belan, & Alves-Arujo, 2018).

La revolución agrícola digital es el cambio más novedoso que ayudará a conseguir que la agricultura satisfaga las necesidades de la población mundial (FAO, 2018), proporcionando soluciones tecnológicas diversas, para abordar los problemas existentes en la agricultura. Esta revolución, mejora los beneficios culturales y sociales mediante una mayor comunicación e inclusividad en las oportunidades de mercado, así como beneficios ambientales por medio de la optimización de recursos y adaptación al cambio climático,

dando lugar a una mayor seguridad alimentaria y sostenibilidad (Gomes De Macedo et al., 2018; FAO, 2018; Trendov, Varas, & Zeng, 2019).

La Agricultura 4.0 es la digitalización de toda la información de los procesos de la cadena productiva, para coordinar la planificación, supervisión y asegurar que la producción se ajuste a los requisitos óptimos (FAO, 2018; Trendov, Varas, & Zeng, 2019). Genera decisiones basadas en el análisis y procesamiento de la información reunida, mejorando la producción, eficiencia y rentabilidad (Gomes De Macedo et al., 2018).

La Agricultura digital utiliza las nuevas tecnologías de la información y la comunicación (FAO, 2018), como el internet de las cosas, la computación en la nube, visión por computadora, aprendizaje automático, inteligencia artificial, sistemas de información geográfica y los datos masivos (Gomes De Macedo et al., 2018). Así como, herramientas informáticas para la automatización, la robótica agrícola y creación de modelos de sistemas para análisis avanzados (FAO, 2018; Lavarello, Bil, Vidosa, Langard, & Federico, 2019; FAO, 2020b).

La agricultura digital engloba un concepto muy amplio denominado Agricultura de Precisión (AP), aplicación que permiten optimizar la capacidad de los equipos y la calidad de las labores (Bonadeo et al., 2017). Una tendencia actual para superar los desafíos con prácticas para maximizar los beneficios (Gomes De Macedo et al., 2018), mediante el mapeo de la variabilidad espacial y temporal, con el uso de herramientas de teledetección en vehículos aéreos no tripulados "RPAS" (Gerard, 2018; Nhamo et al., 2020; Messina & Modica, 2020).

Los RPAS llevan montados una gama de sensores como, lidar, cámaras multiespectrales, hiperespectrales, térmicas o RGB, para facilitar el monitoreo, detección o intervención de forma oportuna en cualquier anomalía. Los RPAS permiten evaluar la salud y desarrollo de la vegetación durante todo el ciclo de cultivo, combinando los datos de sensores e imágenes en tiempo real para el análisis y procesamiento. Activando, modelos analíticos para mejorar la gestión del agua, la productividad, la eficiencia de la aplicación de insumos y la

sostenibilidad (Gerard, 2018; Tondato-Arantes, Matheus-Costa, & Abadia-Ventura, 2019; Nhamo et al., 2020).

## **2.2 RPAS en la Agricultura**

El uso de RPAS en la agricultura, se ha extendido a un nivel global en los últimos años, haciéndose más frecuente su uso y existiendo estimaciones de que el 80 al 90% del mercado de vehículos aéreos no tripulados se utilizarán para el uso agrícola en los próximos años (Pino, 2019).

Debido a que, los métodos tradicionales de toma de muestras, manualmente, son laboriosos y llevan mucho tiempo, los RPAS equipados con diferentes sensores, se han convertido en una herramienta importante para el fenotipado de los cultivos, de una manera rápida, no destructiva y de alto rendimiento, con un funcionamiento flexible y fácil de usar (Yang et al.2017). Los RPAS, mediante los sistemas de visión y sensores utilizados, ofrecen posibilidades para comprender la variabilidad temporal y espacial de un cultivo, generando un planteamiento de agricultura por zonas (Bonadeo et al., 2017). Por lo que esta tecnología, encamina a los productores a la agricultura de precisión (Nhamo, Magidi, Nyamugama, & Clulow, 2020), mejorando la productividad, la administración y la gestión eficiente de recursos, en la agricultura (Pino, 2019; Poley & McDermid, 2020).

Los RPAS son una plataforma para la adquisición de imágenes (datos) o recolección de información mediante teledetección (sin dañar el entorno), durante las misiones de vuelo que cubren rápidamente grandes superficies, recopilando las imágenes por debajo del nivel de las nubes y con muchos más detalles que las imágenes satelitales (Messina & Modica, 2020). Además, realiza mediciones de la estructura de la vegetación a escalas mucho más precisas que con los datos convencionales de detección remota (Poley & McDermid, 2020), a un bajo costo en comparación con la clásica teledetección de aviones tripulados (Gerard, 2018).

Los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia proporcionan medios más fáciles para el monitoreo, análisis, detección y tratamiento de plantas, un

enfoque más integrado y optimizado para las tareas, debido a los numerosos sensores que permiten la recopilación y el tratamiento de datos en puntos específicos de cultivos (Hassler & Baysal-Gurel, 2019; Nhamo et al., 2020). Debido a los altos niveles de precisión (tamaños de píxel menores al centímetro), hacen posible monitorear la condición de las plantas y partes de ellas (Hassler & Baysal-Gurel, 2019; Nhamo et al., 2020). Esta tecnología ha adquirido gran importancia en el fenotipado de alto rendimiento, en la adquisición de temperatura del dosel y el índice de densidad de población de cultivos (Yang et al., 2017).

El nivel de información proporcionada por los “RPAS” permite a los agricultores realizar decisiones, informadas, tácticas y operativas del manejo de nutrientes, agua y malezas, además de poder saber, ¿cómo, cuánto, cuándo y dónde?, sembrar, regar o pulverizar pesticidas, fertilizantes y herbicidas de manera precisa (Nhamo et al., 2020), dosificando de acuerdo con la productividad de cada área y generando un planteo de agricultura por zonas (Bonadeo et al., 2017).

### **2.2.1 Aplicaciones agrícolas de RPAS**

Para la implementación de RPAS en la agricultura de precisión, se utilizan sensores de imágenes, que miden la reflectancia espectral de las hojas de las plantas, desde las longitudes de onda ultravioleta (UV), luz visible, infrarrojo cercano (NIR) hasta infrarrojo (IR) (Rueda-Ayala, Peña, Höglind, Bengochea-Guevara, & Andújar, 2019; Hassler & Baysal-Gurel, 2019)

Las cámaras de imágenes digitales, como las multiespectrales, hiperespectrales, RGB, NIR, infrarrojas y térmicas, son especialmente desarrolladas y diseñadas para operar a bordo de los RPAS, son ligeras para que no disminuya el tiempo de vuelo y con filtros especializados, como la Sentera, Micasense, MAIA Red-Edge y Parrot Sequoia (Lorduy-Hernández, 2017; Yang et al., 2017; Hassler & Baysal-Gurel, 2019; Pino, 2019; Gerard, 2018). Aunque también, se utilizan cámaras que no necesariamente han sido

producidas y calibradas para uso agrícola, sensores (RGB) que capturan imágenes rojo-verde-azul e infrarrojo cercano (NIR) como Go-Pro, Canon y Sony (Pino, 2019).

La mayoría de las plataformas comerciales de RPAS utilizan los sensores RGB (con diferente resolución espacial y con lentes ajustables a 90°), ampliamente utilizados en técnicas de detección remota debido a que proporcionan una alta resolución en los valores de radiación en rojo (~ 600 nm), verde (~ 550 nm) y azul (~ 450 nm). Estas cámaras digitales trabajan con espectros de imágenes en la luz visible, por lo que son utilizadas para determinar la cobertura del suelo, la altura de las plantas y el color (GyuJin et al., 2020), permitiendo caracterizar los cultivos de forma visual y morfológica (Sarabia-López, 2019).

Para las aplicaciones de los sensores, que utilizan los RPAS, se han propuesto enfoques metodológicos basados en la espectroscopia del infrarrojo visible, cercano y la combinación de las bandas espectrales como la térmica o de microondas, para obtener la temperatura del dosel, las características de absorción, la reflectancia de los cultivos y características fisiológicas (Yang et al., 2017).

Los procesos fotogramétricos, permiten modelar la superficie de la cubierta a una escala detallada de las plantas, con precisión centimétrica, para obtener rasgos físicos como: los parámetros geométricos (altura, forma, volumen), rasgos espectrales (cubierta del dosel o textura espectral del dosel), rasgos fisiológicos (fotosíntesis), indicadores de estrés abiótico/biótico (conductividad estomática, temperatura del dosel, potencial hídrico de las hojas (índice de senescencia), clorofila, biomasa, contenido de pigmentos, nutrientes, proteínas, índice de área foliar (LAI), índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de estrés hídrico de los cultivos (CWSI), índice de nutrición de nitrógeno (NNI), modelos de altura o modelos digitales de elevación (DEM) (Yang et al., 2017; Gerard, 2018; Hassler & Baysal-Gurel, 2019; Nhamo et al., 2020; Poley & McDermid, 2020), estimación de tamaños de árboles, ubicación y conteo de plantas (Sarabia-López, 2019).

Todos los índices mencionados, sirven para determinar la salud de un cultivo, valoración de niveles de nutrientes en suelo y planta, estimación de la humedad del suelo, determinación de parámetros de la estructura del dosel, identificación de plagas, enfermedades, detección de estrés hídrico o nutricional y estimación del rendimiento del cultivo, (Gerard, 2018; Hassler & Baysal-Gurel, 2019; Nhamo, et al., 2020).

En los cuadros 1 al 4, se relacionan las investigaciones realizadas por diferentes autores, con diferentes drones, sensores y métodos de procesamiento, sobre identificación de rasgos fisiológicos y morfológicos de las plantas, mapeo agrícola a partir de índices de vegetación, detección de estrés en la planta, malezas y enfermedades, entre otras aplicaciones agrícolas.

**Cuadro 1.** Rasgos de fenotipado utilizando RPAS, diversos sensores y métodos.

| <b>Ejemplos de opciones para obtener rasgos fisiológicos y morfológicos.</b> |                           |  |
|--|---------------------------|--|
| Rasgos   | Sensores                  | Métodos de procesamiento de imagen     |
| Altura de planta   | RGB                       | DSM - DTM, MGRVI                       |
| Cobertura vegetal  | RGB                       | ExG, ExR                               |
|  | Multiespectral            | NDVI, RVI, DVI, PVI, ARVI, ENDVI, RDVI |
| Biomasa  | RGB                       | ExG, ExR, MGRVI                        |
|  | Multiespectral            | NDVI, ARVI, ENDVI                      |
| Estrés de la planta  | Multiespectral            | PRI, NDVI, TCARI / OSAVI, ENDVI, NDREI |
| Contenido de clorofila   | Multiespectral            | TCARI / OSAVI, NDREI, PVI, CLG, CVI    |
| Estado del agua  | Multiespectral<br>Térmico | PRI, NDVI, TCARI / OSAVI CWSI, IG, I3  |
| Temperatura del dosel  | Térmico                   |  |
| Tasa de transpiración  | Térmico                   |  |

Fuente: GyuJin et al., (2020).

**Cuadro 2.** Trabajos de investigación de aplicaciones de Mapeo Agrícola con RPAS.

| <b>Aplicaciones de mapeo agrícola con RPAS</b>      |  |   |
|---|--|---|
| <b>Mapeo</b>  | <b>Ejemplos</b>  | <b>Bibliografía</b>   |
| Índice de Vegetación (IV), (SAVI), (EVI) (AVI)      | Cartografía del coeficiente de cultivo del maíz (Kc).<br>Aplicación de fitomejoramiento.<br>Análisis de imágenes multiespectrales.   | (Zhang, Han, Niu, & Li, 2019)<br>(Kharuf-Gutierrez, Hernández-Santana, Orozco-Morales, Aday Díaz, & Delgado Mora, 2018)   |
| Índice de Área Foliar (LAI)                         | Aplicación de fitomejoramiento.<br>Factores que influyen en la estimación de la vegetación sobre la biomasa.   | (GyuJin et al., 2020)<br>(Poley & McDermid, 2020)   |
| Estimación Biomasa (AGB)                            | Estimación de altura, biomasa y volumen de la hierba.<br>Predicción del rendimiento en el trigo de invierno.<br>Estimación de biomasa en el trigo ( <i>Triticum aestivum</i> L.).<br>Predicción del rendimiento de la alfalfa. | (Rueda-Ayala, Peña, Höglind, Bengochea-Guevara, & Andújar, 2019)<br>(Zecha, Peteinatos, Link, & Wilhelm, 2018)<br>(Geipel, Link, Wirwahn, & Claupein, 2016)<br>(Feng et al. 2020) |
| Índice verde Cubierta Vegetal (FC)                  | Estimación de la cubierta vegetal (FC).<br>Cubierta vegetal en Terrazas Agrícolas.   | (Zhang, Han, Niu, & Li, 2019)<br>(Cucchiario, et al. 2020,)   |
| Índice Reflectancia Fotoquímica (PRI),              | Aplicación de fitomejoramiento.  | (GyuJin et al. 2020)  |
| Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) | Cartografía del coeficiente de cultivo del maíz (Kc).<br>Diferenciar ciclos biológicos de la caña.   | (Zhang, Han, Niu, & Li, 2019)<br>(Kharuf-Gutierrez, Hernández-Santana, Orozco-Morales, Aday Díaz, & Delgado Mora, 2018)   |

Fuente: Elaboracion propia.

**Cuadro 3.** Trabajos de investigación de aplicaciones de detección agrícola con RPAS.

| <b>Aplicaciones de detección agrícola con RPAS</b> |  |   |
|--|--|---|
| <b>Detección</b>                                   | <b>Ejemplos</b>  | <b>Bibliografía</b>   |
| Estrés Hídrico                                     | Mapeo del estrés hídrico de nectarina y melocotonero y su variabilidad espacial.<br>Monitoreo del estrés hídrico de maíz<br>Índice de estrés hídrico del cultivo de viñedo.  | (Park et al.2017)<br>(Zhang et al., 2019)<br>(Poblete, Ortega-Farías, & Ryu, 2018)  |
| Estrés Nutricional                                 | Estimación del estado nutricional de nitrógeno en trigo.<br>Estado de nitrógeno en las hojas de arroz.<br>Predicción de la absorción de nitrógeno en el maíz.<br>Identificación del nivel de nitrógeno en el trigo.<br>Estimación del contenido de nitrógeno en trigo de invierno ( <i>Triticum aestivum</i> L.) | (Li et al., 2018)<br>(Yang et al., 2019)<br>(Nigon et al.2020)<br>(Zecha, Peteinatos, Link, & Wilhelm, 2018)<br>(Geipel, Link, Wirwahn, & Claupein, 2016) |
| Estrés Abiótico                                    | Aplicaciones de imágenes térmicas  | (Messina & Modica, 2020)  |
| Actividad Fotosintética                            | Relaciones de absorción de clorofila<br>Detección del contenido y distribución de la clorofila en los huertos de cítricos  | (Zhang, Han, Niu, & Li, 2019)<br>(Wang et al., 2018)  |
| Malezas, Plagas y Enfermedades                     | Mapeo de malezas para aplicación de herbicidas<br>Modelo de visión para detección de enfermedades y fenotipado   | (Mink et al., 2018)<br>(Wiesner-Hanks, et al., 2019)  |
| Rasgos fisiológicos                                | Aplicaciones de fitomejoramiento de campo<br>Detección remota del Fenotipado<br>Aplicaciones de imágenes térmicas  | (GyuJin et al., 2020)<br>(Yang et al., 2017)<br>(Messina & Modica, 2020)  |

Fuente: Elaboracion propia.

**Cuadro 4.** Trabajos de investigación de aplicaciones agrícola con RPAS.

| <b>Aplicaciones agrícolas con RPAS</b> |   |                            |
|--|---|----------------------------|
| <b>Aplicaciones</b>                    | <b>Ejemplos</b>   | <b>Bibliografía</b>        |
| Supervisión y Monitoreo                | Monitoreo de crecimiento del trigo.                       | (Yao et al.,2019)          |
| Topografía Y Cartografía               | Condiciones topográficas en terrazas Agrícolas.           | (Cucchiario et al., 2020,) |
| Conteo de plantas                      | Detección automatizada y conteo de olivos.                | (Sarabia-López, 2019)      |
| Identificación de fallas de siembra    | Determinar las hileras de plantas en las imágenes aéreas. | (Mink et al., 2018)        |
| Estimación del                         | Estimación del rendimiento del                            | (García-Martínez, Flores-  |

|             |               |   |
|-------------|---------------|---|
| rendimiento | grano de maíz | Magdaleno, Ascencio-Hernández, Khalil-Gardezi, & Tijerina-Chávez, 2020) |
|-------------|---------------|---|

Fuente: Elaboracion propia.

### 2.3 Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia RPAS

Los vehículos aéreos no tripulados “RPAS” (Remotely Piloted Aircraft System - Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente) o UAV (Unmanned Aerial Vehicles- vehículo aéreo no tripulado), corresponden a aeronaves, controladas mediante un sistema capaz de volar de manera autónoma con instrucciones programadas para realizar misiones o controladas remotamente a radio control por un operador en tierra (Gerard, 2018; Hassler & Baysal-Gurel, 2019).

En México el termino correcto conforme a la NORMA Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019 es “RPAS” o “RPA”, término más adecuado para las aeronaves civiles (Matienzo Merodio & Olmedilla García, 2016), aunque el término “dron”, “UAV” y “UAS” es más utilizado (Parra Patiño, 2016).

#### 2.3.1 Tipos de RPAS utilizados en la agricultura

En el mercado internacional hay diversos tipos de RPAS, sin embargo, la mayoría de las plataformas de uso común en la agricultura son las aeronaves de ala fija y las aeronaves de tipo multirrotores (Pino, 2019; Hassler & Baysal-Gurel, 2019; Zhang, Wei, Chenze, & Huang, 2020). Las características de los RPAS según el número de rotores se muestran en el Cuadro 5, mientras que, en el Cuadro 6 se relacionan las ventajas y desventajas de los RPAS utilizados en la agricultura.

**Cuadro 5.** Tipos de RPAS utilizados en la agricultura.

| RPAS utilizados en la agricultura  |   |
|--|---|
| Multirrotores.   | Ala Fija.   |
| Su uso es el más extendido, debido a su gran estabilidad (vuelo estático), | Debido al hecho de su habilidad para cubrir grandes áreas de tierra |

facilidad y cantidad de maniobras que pueden realizar (Pino, 2019).

rápidamente y su gran autonomía se utiliza para el mapeo de campo a gran escala (Hassler & Baysal-Gurel, 2019).

Son vehículos aéreos que posee más de dos rotores o motores (Figura 1), que están en puntos equidistantes del centro y colocados en los extremos de los brazos que conforman la estructura del RPAS (López-Milán, 2017)

Tienen un diseño de dos alas horizontales en torno al fuselaje que sirven para que se genere una fuerza sustentadora al ir a una determinada velocidad por diferencia de presiones y así permanecer en el aire (Figura 2) (Pino, 2019). Esta capacidad de planear es debido a la fuerza de elevación producida por la velocidad de avance, generada por una hélice conectada a un motor (Hinojosa-Pérez, 2018).

Existen varios tipos de multirrotor y normalmente son categorizados y llamados por el número de rotores que poseen y la disposición de los brazos en la estructura del vehículo, por lo que las configuraciones más comunes son: Cuadricópteros (4 hélices), Hexacópteros (6 hélices) y Octacópteros (8 hélices), donde el número de rotores y la disposición de éstos tienen efecto en la forma de vuelo (Hinojosa-Pérez, 2018).

En estos RPAS los motores se colocan de modo que el eje del motor coincida con la dirección en la que avanza, por lo que para maniobrar realizan cambios en la inclinación de las aletas consiguiendo un empuje lateral para ir cambiando de dirección (Hinojosa-Pérez, 2018)



**Figura 1.** Mavic Pro.



**Figura 2.** Dron senseFly eBee Plus. Fuente: Gonzales (2019).

Fuente: Elaboracion propia.

**Cuadro 6.** Ventajas y desventajas de RPAS utilizados en la agricultura.

| <b>Ventajas y desventajas de RPAS utilizados en la agricultura.</b> |  |                       |          |
|---|--|-----------------------|----------|
|   | Multirrotor  |                       | Ala Fija |
| Ventaja.  | Puede volar en los lugares cerrados y abiertos, debido a | Puede volar a altas   | alturas. |
|   |  | velocidades y grandes |          |

|                 |  |   |
|-----------------|--|---|
|                 | <p>su maniobrabilidad y estabilidad.</p> <p>Su despegue es de forma vertical.</p> <p>Pueden ajustar la velocidad de vuelo y despegue</p> <p>Mayor peso de levante (de acuerdo con los rotores), más potencia, estabilidad y seguridad en caso de que un motor falle.</p> | <p>Mayor tiempo de vuelo para adquisición de datos a gran escala en operaciones de mayor distancia.</p> <p>Poseen mayor resistencia a altas temperaturas, viento y lluvia.</p>  |
| Desventaja      | <p>No son aptos para volar a grandes altitudes.</p> <p>Necesita un gran consumo de energía para mantener el vuelo.</p> <p>Sensibles al viento y lluvia.</p>  | <p>Los métodos de aterrizaje y despegue son de forma manual y necesitan una gran superficie.</p> <p>No poseen una gran capacidad de carga en comparación con los multirrotores.</p> <p>Tienen menos maniobrabilidad, por lo que, no son adecuados para tareas que requieran vuelo estacionario, ya que no pueden permanecer inmóvil</p> |
| Tiempo de vuelo | <p>Tiempo de vuelo de 15 a 30 minutos y cobertura por vuelo de 65 ha.</p>  | <p>Tiempo de vuelo de 30 a 90 minutos y cobertura por vuelo de 120 a 3.800 ha.</p>  |
| Bibliografía.   | <p>(Yang et al., 2017; Lorduy-Hernández, 2017; Hinojosa-Pérez, 2018; Hassler &amp; Baysal-Gurel, 2019; Pino, 2019; Zhang, Wei, Chenze, &amp; Huang, 2020)</p>  |   |

Fuente: Elaboración propia.

Las características principales, de las plataformas RPAS son: el tiempo de vuelo, la resolución espacial, los sensores que se pueden montar (principalmente rojo, verde y azul “RGB”) y el precio. GyuJin et al. (2020) realizaron una investigación sobre las características de los principales RPAS utilizados en la agricultura (Cuadro 7), encontrando que la mayoría tienen rangos de vuelo entre 25 a 30 min, y la variación del precio depende de los sensores instalados. Los RPAS con tiempos de vuelo cortos limitan la superficie

que pueden cubrir, por lo que los que tienen rangos de vuelo más largos son relativamente más caros (Gerard, 2018).

**Cuadro 7.** Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) disponibles en el mercado.

| <b>Plataformas comerciales de vehículos aéreos no tripulados (UAV).</b> |                        |                       |   |
|---|------------------------|-----------------------|---|
| Modelo  | Precio USD (\$)        | Tiempo de vuelo (min) | Sensor (Resolución espacial)                          |
| DJI Mavic 2 pro   | 1599                   | 29                    | RGB (5472x3648)                                       |
| DJI Mavic 2 zoom  | 1349                   | 29                    | RGB (4000x3000)                                       |
| DJI Mavic Air   | 919                    | 20                    | RGB (4056x3040)<br>RGB (4056x2282)                    |
| DJI Mavic Pro Platinum  | 1149                   | 30                    | RGB (4000x3000)<br>RGB (5472x3648)                    |
| Phantom 4 Pro V2.0  | 1599                   | 30                    | RGB (4864x3648)<br>RGB (5472x3078)                    |
| Inspire 2   | 3299                   | 23 ~ 27               | RGB (24 Mega píxeles)<br>RGB (20.8 Mega píxeles)      |
| Parrot ANAFI Work   | 999                    | 25                    | RGB (5344x4016)<br>RGB (4000x3000)<br>RGB (5344x4016) |
| Parrot ANAFI Thermal  | 1900                   | 26                    | RGB (4608x3456)<br>Thermal (160x120)                  |
| Parrot Bluegrass Fields   | 4980                   | 25                    | Multispectral (1280x960)                              |
| Yuneec Mantis G   | 699.99                 | 33                    | RGB (4160x2340)<br>RGB (4160x2340)                    |
| Yuneec Mantis Q   | 499.99                 | 33                    | RGB (4160x2340)<br>RGB (4160x2340)                    |
| Yuneec Typhoon H  | 899.99                 | 25                    | RGB (4:3/ 12.4 Mega píxeles)                          |
| Yuneec Typhoon H520   | 1,561.79-<br>11,864.00 | 25                    | RGB (4:3/12 Mega píxeles)                             |
| Walkera Vitus   | 739                    | 28                    | RGB (4000x3000)                                       |
| Walkera Vitus Starlight   | 899                    | 22                    | RGB (1920x1080)                                       |
| Walkera VOYAGER 5   | 17,999.                | 20                    | RGB (3840x2160)                                       |
| HolyStone HS720 GPS Drone with 2K Camera                                | 299.                   | 26                    | RGB (2048x1152)                                       |

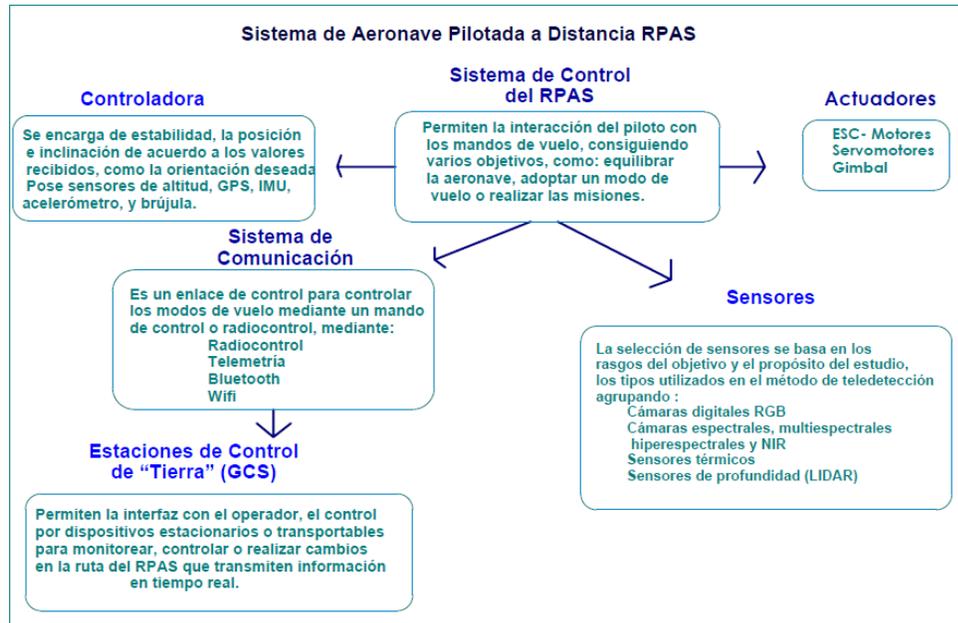
Fuente: GyuJin et al., (2020).

### **2.3.2 Sistemas y componentes de los RPAS**

El Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia, está conformada por la Aeronave Pilotada a distancia y sus componentes o dispositivos de soporte (Cuadro 8), que brindan la asistencia para operar correctamente. Los componentes son: módulos de comunicación y enlace (Radiocontrol, Telemetría, Bluetooth y Wifi), equipo de navegación o mecanismos de lanzamiento y recuperación (Fernández-Bobadilla, Torres-Landín, & Ramírez-Carmona, 2016; Yan et al., 2017).

Los vehículos aéreos, disponen de sistemas para monitorizar, comandar y controlar el estado del vehículo, el sistema de comunicación más utilizado en los RPAS consiste en tres enlaces diferentes: radio control, telemetría y video. El enlace de radio controla el modo de vuelo del RPAS, mediante un radiocontrol que trabaja con una frecuencia de 2.4 GHz. El enlace de telemetría comunica el RPAS con dispositivos como celulares, tabletas o computadoras, ubicados en las estaciones de control de tierra (GCS). El enlace de video permite ver la transmisión de videos o imágenes captadas por la cámara que está integrada en el RPAS (Lorduy-Hernández, 2017).

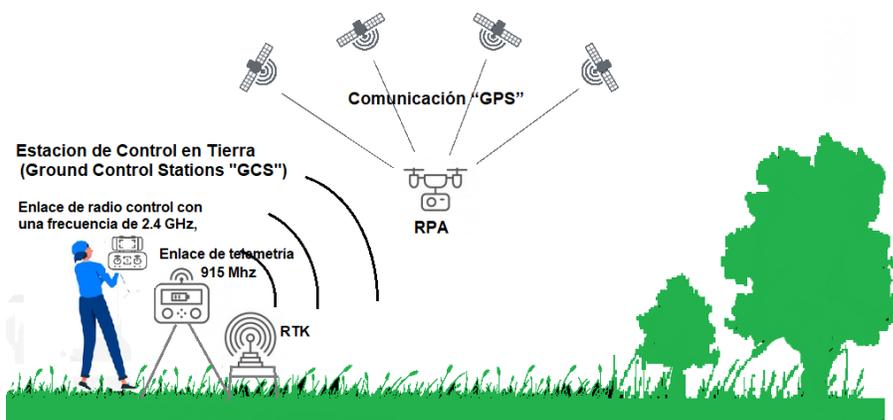
El sistema de control de un RPAS se encarga de la estabilidad, la orientación e inclinación deseada del dispositivo de acuerdo con los valores recibidos, mediante el sistema de comunicación, el cual después de analizar y corregir envía las señales PWM a los Controladores de Velocidad (ESC) de los Motores. Cuenta con un sistema de posicionamiento, mediante el uso de módulos de posicionamiento global (Global Navigation Satellite Systems) "GPS", además de sensores de altitud, unidades de medición de inercia "IMU", acelerómetros y brújulas electrónicas, que ayudan en el proceso de georreferenciación (Yang et al., 2017; Hassler & Baysal-Gurel, 2019). Los dispositivos electrónicos mencionados, son interconectados entre sí para formar un sistema de control general (Figura 3).



**Figura 3.** Diagrama del Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia.

Fuente: Elaboración propia

Las Estaciones de Control en Tierra (Ground Control Stations, GCS), son dispositivos de hardware / software estacionarios o transportables para monitorear y controlar la aeronave. En ellas, se encuentran dispositivos para visualizar, analizar los datos de telemetría y gestionar las órdenes en tiempo real (Figura 4). Las estaciones de control son tan importantes como los propios aviones no tripulados, ya que constituyen la interfaz del vehículo con el operador, permitiendo cualquier cambio en la ruta del RPAS (Lorduy-Hernández, 2017).



**Figura 4.** Comunicación entre el “RPA” y la estación de tierra.

Fuente: Elaboración propia

Los RPAS poseen equipos de última generación como cámaras de alta resolución, controles de radares, un sistema de posicionamiento global combinado con una unidad de medición inercial (GPS / IMU), un cardán estabilizador, un dispositivo de almacenamiento y software de procesamiento de datos (Yang et al., 2017, Zhang et al., 2020). En el cuadro 8 se relacionan los componentes y las características de un RPAS

**Cuadro 8.** Componentes de los “RPAS”.

| Componentes de los “RPAS”         |   |   |
|-----------------------------------|---|---|
| Componente                        | Descripción   | Figura  |
| Controladora                      | Genera las señales de control necesarias para un adecuado funcionamiento, en los diferentes modos de vuelo o en las misiones, controla la cámara y los giros del gimbal, además georreferencia las imágenes que son capturadas ya que cuenta con la unidad de posicionamiento global (GPS). |  <p><b>Figura 5.</b> Controlador de vuelo Pixhawk.<br/>Fuente: Bonney et al., (2020)</p> |
| Unidad de Medición Inercial (IMU) | Dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos (dentro de la controladora de vuelo y el GPS).   |    |
| Sistema de Posicionamiento        | Sistema que permite determinar la posición de cualquier objeto o un   |   |

|  |   |  |
|--|---|--|
| Global (GPS)   | vehículo en toda la superficie terrestre  | <b>Figura 6.</b> Módulo GPS para Pixhawk.<br>Fuente: Bonney et al., (2020)   |
| Sensor<br>RGB<br>Infrarrojo (Térmico)<br>Espectral<br>Multiespectral<br>Hiperespectral<br>NIR<br>LIDAR | La selección de los sensores depende del objetivo y el propósito del estudio. Los tipos utilizados en el método de teledetección se agrupan en el espectro de luz visible, infrarrojo, infrarrojo térmico, tipos de microondas y sensores de detección y alcance de luz   | <br><b>Figura 7.</b> Sensor "RGB" HawkEye Firefly         |
| El variador de velocidad "ESC"   | Es un circuito que sirve para controlar la velocidad de giro de los motores, así como su dirección, compuesto por un circuito integrado que hace de puente entre el controlador de la aeronave y los motores.   | <br><b>Figura 8.</b> Variador de velocidad "ESC" 3A UBEC. |
| Motor Brushless  | Los multirotores se propulsan por un tipo de motor eléctrico conocidos como brushless (sin escobillas), para su conmutación, se realiza electrónicamente, este tipo de motores presentan ventajas frente a los motores con escobillas y de inducción:<br>Mejor relación torque velocidad.<br>Alta eficiencia.<br>Larga vida útil.<br>Altos rangos de velocidad. | <br><b>Figura 9.</b> Motores Brushless                   |
| Hélices  | La hélice es la encargada de convertir la potencia suministrada por el motor en potencia útil para el vuelo, que al girar generan una fuerza de empuje, formada por un conjunto de perfiles aerodinámicos que van cambiando progresivamente su ángulo de incidencia, desde la raíz hasta el extremo.  | <br><b>Figura 10.</b> Hélices 8045.                     |
| Módulos de telemetría  | Se pueden usar (opcionalmente) para proporcionar una conexión inalámbrica entre una estación de control terrestre y un vehículo, haciendo posible ajustar los parámetros mientras un vehículo está en vuelo, en tiempo real, para poder cambiar una misión sobre la marcha.   |   |

**Figura 11.** Módulos de telemetría

|                         |   |   |
|-------------------------|---|---|
| Sistema RC Radiocontrol | Formado por una unidad de control remoto en tierra que es utilizada por el operador para controlar el vehículo mediante controles físicos que se pueden usar para especificar el movimiento del vehículo (velocidad, dirección, aceleración, guiñada, cabeceo y balanceo), además de habilitar los modos de vuelo del piloto automático (despegue, aterrizaje, regreso a tierra, misión). |  |
| Bibliografía            | (Fernández-Bobadilla et al., 2016; Yang et al., 2017; Lorduy-Hernández, 2017; Gerard, 2018; Bonney et al., 2020).   |   |

**Figura 12.** Radiocontrol Turnigy

Fuente: Elaboración propia

### 2.3.3 Quadrotor o Cuadricóptero

Los cuadricópteros son la configuración más conocida, ya que son los que más suelen utilizarse (Hassler & Baysal-Gurel, 2019) y pertenecen a la familia de multirrotores. Este vehículo se encuentra formado por 4 motores, que giran en el sentido opuesto y se encuentran dispuestos simétricamente, con la misma distancia al centro de masa (Fernández Gutiérrez, 2015). Los motores están dispuestos en los extremos de los brazos, formando una X (Jaramillo Gómez & Gómez Yepes, 2013) y poseen hélices de aspas fijas que impulsan el vehículo y lo mantienen en el aire (Ruipérez-Martín, 2016).



**Figura 13.** DJI Phantom 4 RTK.

Fuente: Bonadeo, Repetto, Bessón, & Di-Leo, (2017)

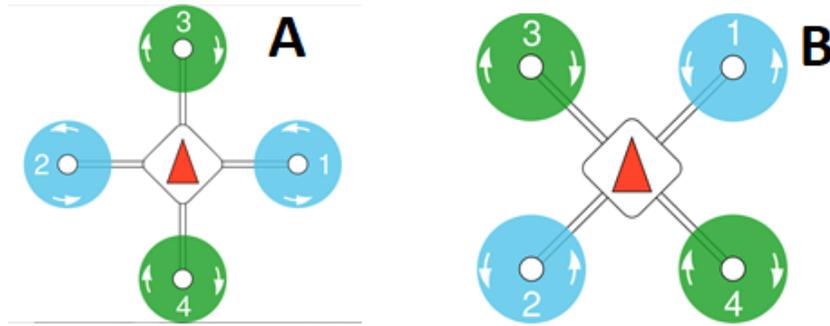
### **2.3.4 Dinámica y control de los Cuadricópteros**

La dinámica de un sistema cuadricóptero se puede explicar a partir de las fuerzas de empuje y torques producidos por cada motor. El sistema de vuelo controla el movimiento mediante la variación de la velocidad de giro de los motores, mediante los variadores de velocidad electrónicos (ESC) y así poder realizar giros, elevaciones, rotaciones o mantener una posición estática (Lorduy-Hernández, 2017).

Los cuadricópteros cuentan con un par de motores con sentido de giro horario y otro par con sentido antihorario (Figura 14 y Figura 15). Esta disposición de motores corresponde a la necesidad de que cada pareja anule el efecto giróscopo y torque aerodinámico producido por el otro par, y así evitar que el vehículo gire alrededor de su centro de masa (López-Milán, 2017)

Existen dos tipos de configuraciones empleadas para la construcción de cuadricópteros, una de ellas es la configuración "Plus Style", disposición en (+) ( Figura 14, A), que se caracteriza por tener un motor en la parte delantera del dispositivo. La otra configuración es la "Cross Style", disposición en (X) ( Figura 14, B), que se caracteriza por tener dos motores en la parte frontal, cuyo sentido de giro, es tal que apuntan hacia la parte delantera del centro del dispositivo, permitiendo que sea más fácil de maniobrar.

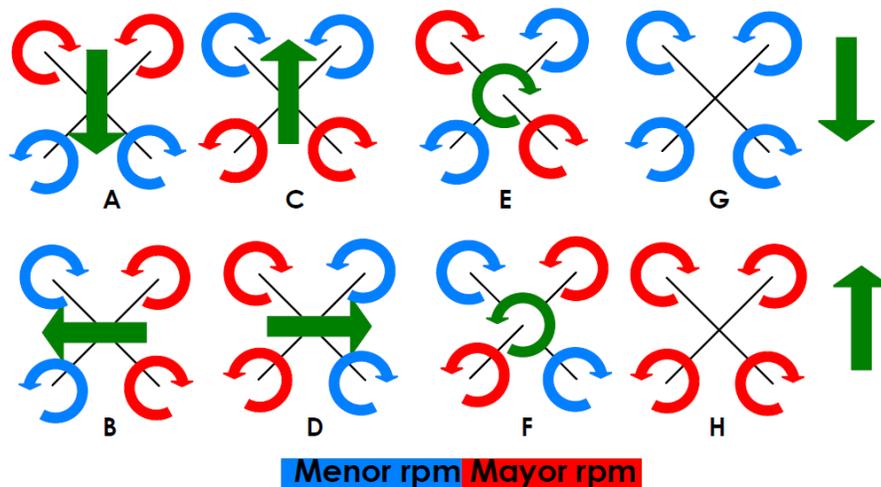
En la configuración "Cross Style", las aplicaciones de aerofotografía suelen ser más empleadas, debido a que, al instalar una cámara por debajo de la estructura, su campo de visión no se interfiere por los motores y las hélices (Fernández-Bobadilla, Torres-Landín, & Ramírez-Carmona, 2016).



**Figura 14.** Diagrama de configuración Plus Style (A) y Cross Style (B).

Fuente: Bonney et al., (2020).

La velocidad de giro define las fuerzas de empuje vertical del RPAS, para ascender o descender se debe aumentar o disminuir la velocidad de rotación de los cuatro motores simultáneamente (Figura 15, G y H) (Lorduy-Hernández, 2017). El movimiento hacia adelante se logra disminuyendo y aumentando las velocidades de los motores delanteros y traseros respectivamente (Figura 15, A y C). Para un desplazamiento lateral se realiza el mismo procedimiento, pero con los rotores derecha e izquierda, el movimiento de giro sobre su eje vertical (yaw), se obtiene acelerando el par de motores de un sentido, mientras se desaceleran el par de rotores con sentido contrario (Figura 15, E y F).

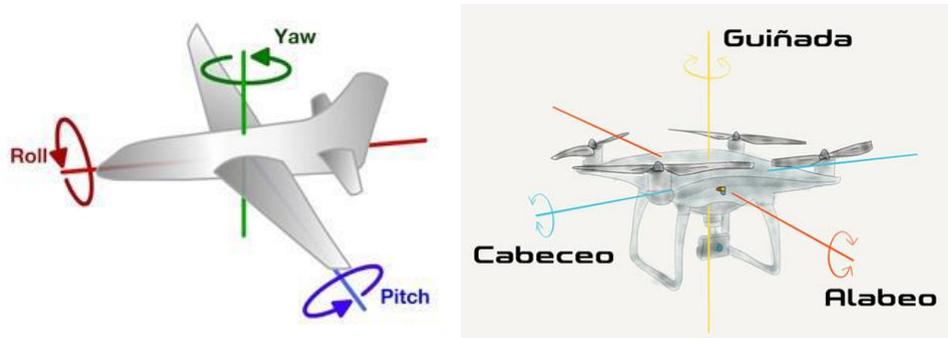


**Figura 15.** Diagrama de la dinámica de un sistema cuadricóptero a partir de las fuerzas de empuje.

Fuente: Elaboración propia.

Las aeronaves de tipo multirrotor poseen tres movimientos de rotación sobre distintos ejes (además de ascenso y descenso), estos movimientos son cabeceo (pitch), alabeo (roll) y giñada (yaw) (Figura 16) (López-Milán, 2017). los movimientos son ángulos eulerianos expresados en radianes sobre los tres ejes de coordenadas (Lorduy-Hernández, 2017), que se utilizan para controlar el vehículo, los cuales se describen a continuación:

- Roll o alabeo: Rotación sobre el eje X, permitiendo desplazamiento hacia la derecha o izquierda.
- Pitch o cabeceo: Rotación sobre el eje Y, permitiendo el desplazamiento hacia adelante o hacia atrás.
- Yaw o giñada: Rotación sobre el eje Z, permitiendo rotar sobre su eje vertical.



**Figura 16.** Esquema de movimientos de rotación.

Fuente: López-Milán, (2017).

### 2.3.5 Requerimientos para el diseño Cuadricópteros

Para el diseño de aeronave aéreas no tripulada, se debe tener en cuenta: el análisis aerodinámico, que permite determinar la potencia requerida según las condiciones de operación, el diseño mecánico, para que resista las cargas a las que el equipo se someta y el sistema de control (Cuadro 9) (Orna-Chávez, Balseca-Sampedro, Caicedo-Reyes, Mayorga-Pérez, & Viteri-Núñez, 2017).

**Cuadro 9.** Parámetros para el diseño de cuadricópteros.

| <b>Parámetros para el diseño de cuadricópteros</b>  |   |   |
|---|---|---|
| Diseño estructural<br>(chasis o carcasa)  | Sistema de potencia   | Sistema de Control  |
| Dimensionamiento de la nave, conforme al número de motores.<br>Peso total.<br>Resistencia mecánica. | Determinar la carga máxima (Peso propio más carga útil), conforme al tiempo de autonomía, para determinar cuanta potencia y energía es necesaria.<br>Seleccionar el circuito que controlará los motores (“ESC” Electronic Speed Controller), el tipo de motor (brushless), selección de hélices y baterías LiPo | Un controlador de vuelo que sea capaz de comunicarse con otros dispositivos y que tenga la suficiente capacidad de cálculo para procesar toda la información. |

Fuente: Elaboración propia.

### **2.3.6 Vibraciones**

Los controladores de vuelo tienen acelerómetros que son sensibles a las vibraciones, los valores del acelerómetro se combinan con datos del barómetro y GPS, para estimar la posición del vehículo. Con vibraciones excesivas, la estimación puede desviarse y conducir a un rendimiento inadecuado en los modos de vuelo que dependen de un posicionamiento preciso.

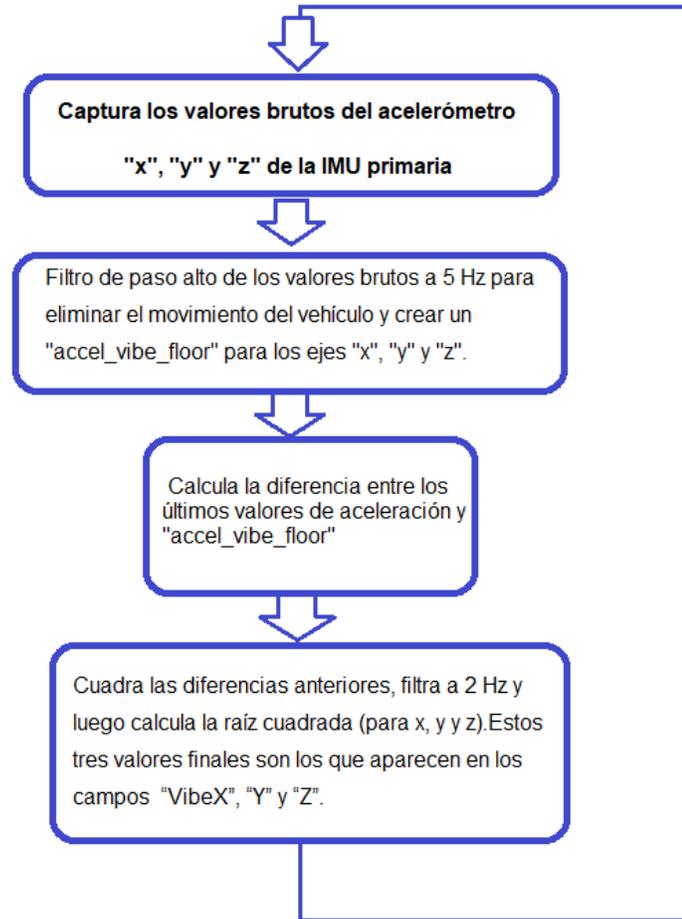
Para los multirrotores, la mayor fuente de vibración son las hélices, que pasan por encima de los brazos, pero también existen otras fuentes de vibración, como la flexión del marco (Bonney et al., 2020).

Las vibraciones deben amortiguarse, se necesita reducir la frecuencia y amplitud de vibración ocasionada por los motores y las hélices, que giran a grandes velocidades, requiriendo un aislamiento y amortiguación de la controladora. Las consideraciones sobre la reducción de vibraciones que se deben tomar en cuenta son las siguientes, (Bonney et al.2020):

- Equilibrio del motor (deben funcionar sin problemas).

- Las hélices deben estar completamente equilibradas
- Uso de un cable de alta flexibilidad y un enfoque de alivio de tensión en los cables conectados al piloto automático (utilizar la cantidad mínima de cables).
- Uso de marcos con características de vibración bajas.
- Utilizar almohadillas de amortiguación.

Mission Planner es un software en donde se pueden graficar y guardar los valores de vibración “VibeX”, “VibeY” y “VibeZ”, valores que muestran la desviación estándar de la salida del acelerómetro primario. Para generar los niveles de vibración, el algoritmo calcula la desviación estándar de las lecturas del acelerómetro conforme a los valores brutos y a dos métodos de filtrado (Bonney et al., 2020). En la Figura 17 se muestra el diagrama de bloques del algoritmo para calcular estos valores.



**Figura 17.** Algoritmo para calcular los niveles de vibración.

Fuente: Bonney et al., 2020).

### 2.3.7 Variables de control “PID”

El controlador “PID” (Proporcional, Integral, Derivativo) es un sistema de control ampliamente utilizado en la regulación automática de procesos, la implementación del control genera una señal de salida para contrarrestar el error existente entre la variable controlada y un valor de referencia del sistema “PID”. La ley de control está basada en la siguiente ecuación (Berra Villaseñor, 2020):

$$PID = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(t)dt + k_d \cdot \frac{de}{dt}$$

En donde:

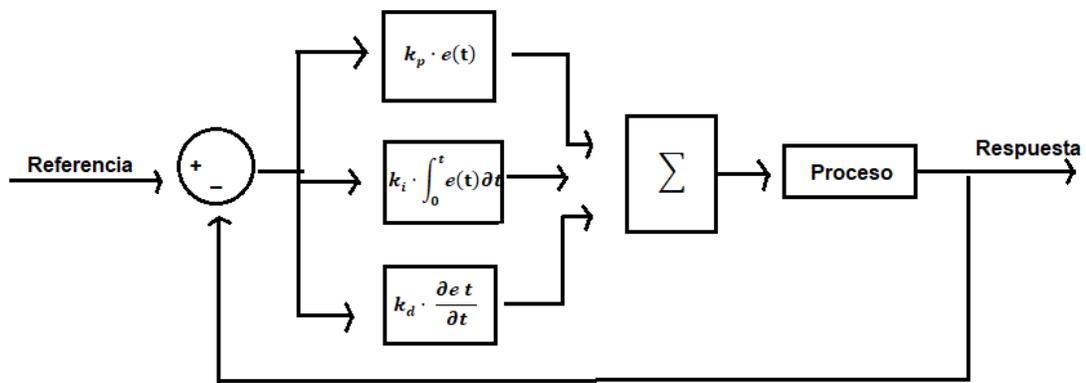
$e(t)$ : Error.

$k_p \cdot e(t)$ : Acción proporcional.

$k_i \cdot \int_0^t e(t) dt$  : Acción integral.

$k_d \cdot \frac{de t}{dt}$ : Acción derivativa.

La ecuación del controlador PID, en su representación en diagrama de bloques se presenta en la Figura 18.



**Figura 18.** Diagrama de bloques de control "PID".

Fuente: Elaboración propia.

La sintonización de un controlador PID consiste en determinar el ajuste de sus constantes "P", "I" y "D", para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y estable de acuerdo con algún criterio de desempeño establecido, en los RPAS, este control mejora la estabilidad y control de maniobras durante el vuelo, así como las variables que pueden afectar la eficiencia y desempeño del vehículo.

La acción de control es una suma de tres términos que representan el presente, pasado y futuro. El término "P" (proporcional), mantiene la estabilidad del vehículo, multiplica el error actual por la constante "P" y corrige al momento. El término "I" (integral), busca eliminar el error estacionario entre la medición y los valores acumulado en el tiempo, multiplica la constante I por el error

acumulado. El término “D” (derivativo), que provee al controlador la capacidad de anticipar los cambios (Berra Villaseñor, 2020).

Para el manejo de las fuerzas que actúan sobre el vuelo de cuadricópteros, se utilizan 3 tipos de “PID” (Berra Villaseñor, 2020):

1. Control PID Roll o control de giro horizontal: el equilibrio del dron se centra en este eje con lo que el control PID es crítico para evitar que el dron gire.
2. Control PID Yaw o control de giro vertical: evita que las fuerzas de movimiento de giro de las hélices hagan que el sistema gire sobre su propio eje, pero deja suficiente libertad para poder orientar la acción de maniobra izquierda y derecha.
3. Control PID Pitch o control de elevación, mantiene el control de avance o retroceso del sistema dejando la libertad necesaria para acelerar o disminuir la velocidad si las maniobras lo requieren.

Los ajustes de estos valores se basan en reglas, que dan pautas para modificar las constantes del control PID. Los valores que, no están completamente ajustados en el sistema (valores altos o bajos), generaran una inestabilidad en el control (Berra Villaseñor, 2020):

**Proporcional:** Corrección inmediata, cuanto más alto esté el valor, mayor será la corrección que realice conforme al error actual.

- Un incremento en la ganancia proporcional reduce la estabilidad y genera vibraciones, debido a que ocasiona un sistema con valores que cambian bruscamente en cada momento.
- Un decremento demasiado bajo en el cuadricóptero, lo volverá lento a las entradas de control del piloto, debido a que los valores en tiempo real son insuficientes para su control.

**Integral:** Corrección conforme a los errores acumulados a largo del tiempo, agrega una corrección adicional para disminuir el error, de acuerdo con los errores anteriores.

- Al aumentar la ganancia integral se disminuye el error ocasionado por el viento y un centro de masa descentrado. Además, ayuda al vehículo a responder con mayor velocidad a las entradas de control.
- Un valor más bajo, ocasionará que el vehículo se mueva en distintas direcciones, debido a que, tardará en corregir los errores ocasionados por el viento y un centro de masa descentrado.

**Derivada:** Corrección que evitar futuros cambios en el control, son valores contrarios a la corrección proporcional e integral, para evitar que estos valores generen cambios bruscos en el sistema.

- Un valor más alto hará que el vehículo responda con suavidad a las entradas de balanceo / cabeceo,
- Un valor bajo hará que el sistema sea más rápido.

### 2.3.8 Patentes

En México existen alrededor de 82 patentes registradas sobre el diseño, construcción, análisis, optimización, procedimiento, modelos o sistemas relacionados con las Aeronave Pilotadas a Distancia, de acuerdo con la Gaceta de la Propiedad Industrial. Medio por el cual se efectúa la difusión de la información de las publicaciones y notificaciones de la Ley de Propiedad Industrial, derivada de las patentes y registros (Sistema de Información de la Gaceta de la Propiedad Industrial, 2020)

De acuerdo con el SIGA (Sistema de Información de la Gaceta de la Propiedad Industrial), en el portal oficial de Internet para la consulta y descarga electrónica de ejemplares, la búsqueda de palabras claves “DRON UAV UAS y RPAS” genera 82 resultados relacionados con las patentes en vigor en México (Apéndice B). La Organización mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI), generó 60,192 resultados sobre patentes relacionadas con la búsqueda de las palabras clave “DRON, UAV, UAS y RPAS”.

### 2.3.9 Normativa y legislación

Existen normas, medidas o regímenes regulatorios que se deben cumplir en cada país respecto al uso de RPAS (Gerard, 2018), requisitos técnicos y operativos que definen las capacidades que debe tener un dron para volar de forma segura. En México existe la “NOM-107-SCT3-2019”, que establece los requerimientos para operar en Espacio Aéreo Mexicano un sistema de aeronave pilotada a distancia RPAS o RPA, con base al peso máximo de despegue (Micro, Pequeño y Grande) y su uso (Recreativo y Privado no comercial), (Cuadro 10).

**Cuadro 10.** Clasificación de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia, de acuerdo con la NORMA Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019.

| <b>CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA</b> |              |                                    |
|---|--------------|------------------------------------|
| Peso máximo de despegue   |              | Uso                                |
| Igual o menor a 2 Kg  | RPAS Micro   | Recreativo<br>Privado no comercial |
| Mayor a 2 kg y hasta 25 Kg  | RPAS Pequeño | Recreativo<br>Privado no comercial |
| Mayor a 25 kg   | RPAS Grande  | Recreativo<br>Privado no comercial |

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2019).

Cada categoría de RPAS tiene sus propias normas, a continuación, se exponen los principales requerimientos que debe cumplir los RPAS-Micro de acuerdo con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, (2019).

- El piloto debe operar el RPAS a una distancia de separación de al menos 9.2 Km de cualquier aeródromo y 0.9 Km de cualquier helipuerto.
- No operar la RPA más allá de una distancia horizontal de 457 metros respecto al piloto y a una altura máxima de 122 metros, con un software que no le permita al RPAS volar más allá de la distancia y altura permitida.

- No se debe dejar caer o arrojar, objetos o materiales que puedan causar daño.
- No se debe operar la aeronave si el vuelo no puede hacerse de manera segura o en áreas restringidas y no se debe operar más de una aeronave
- No se debe utilizar la aeronave para transportar mercancías peligrosas y/o sustancias prohibidas, ni para emplear o transportar armas o explosivos.
- El piloto debe mantener el control de la trayectoria de vuelo en todo momento, sin ayuda de ningún otro dispositivo que los lentes correctivos, por lo que debe ser capaz de verlo durante todo el vuelo con el fin de saber su localización.
- El piloto del RPAS, no debe operar el vehículo aéreo de una manera negligente o temeraria que ponga en peligro la vida o la propiedad de terceros.
- Se debe dar en todo momento y sin excepción el derecho de paso a cualquier aeronave tripulada, a menos que las aeronaves estén bajo control positivo por los Servicios de Tránsito Aéreo.
- Contar con la póliza de Seguro de Responsabilidad Civil por daños a terceros.
- En caso de captar fotografías aéreas dentro del espacio aéreo nacional; debe contar con la autorización de la Dirección General de Geografía y Medio Ambiente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- No se debe operar sobre personas a menos que participen en la operación de la RPA o estén debajo de una estructura de protección.

Además de estas medidas, existen otras especiales, que se deben cumplir en vuelos nocturnos o en Espacios Aéreos Controlados, por eso es necesario consultar la “NORMA Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019” (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2019), para garantizar el correcto uso de RPAS (Apéndice C).

## 2.4 Topografía con RPAS (Proceso fotogramétrico)

Uno de los usos que tienen los RPAS en la actualidad, es la realización de mediciones topográficas, para realizar representaciones del terreno, mediante fotogrametría. La fotogrametría es la ciencia o técnica que se encarga de determinar las propiedades geométricas y espaciales de los objetos en una zona determinada, a partir de la intersección de fotografías, las cuales deben tener una zona de correlación o zona en común, utilizando el principio de visión estereoscópica, para poder realizar medidas y obtener una visión 3D de dicha zona. (Zafra-Granados, 2018).

Los RPAS permiten obtener información, para la creación de cartografía, sistemas de información geográfica (SIG) Modelos Digitales de Terreno (MDT), Modelos Digitales de Elevación (MDE) y orto mosaicos (productos resultantes de la nube densa de puntos), permitiendo realizar medidas lineales, volumétricas y modelamientos 3D (Zafra-Granados, 2018).

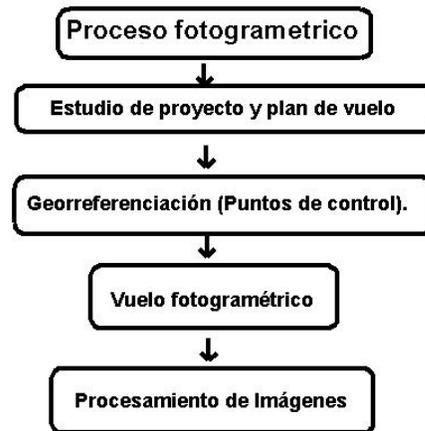
En la agricultura, se utilizan los sistemas RPAS, para mediciones topográficas y generación de modelos digitales del terreno (Cucchiaro et al., 2020). En el Cuadro 11, se mencionan los trabajos topográficos realizados para fines agrícolas, mediante el uso de RPAS.

**Cuadro 11.** Trabajos topográficos, para la agricultura mediante el uso de RPAS.

| <b>Topografía en la agricultura con el uso de RPAS</b>   |                           |
|--|---------------------------|
| <b>Título</b>  | <b>Autor</b>              |
| Fusión de datos de Multiplataforma-SfM y TLS para la vigilancia de las terrazas agrícolas en condiciones topográficas y de cobertura del suelo | (Cucchiaro et al., 2020,) |
| Aplicación de RPAS para apoyar proyectos de terrazas en zonas agrícolas  | (Pondian-Castro, 2019)    |
| Mapeo de la erosión y la deposición en un terreno agrícola: optimización de los esquemas de adquisición de imágenes de UAV para SfM-MVS        | (Meinen & Robinson, 2020) |
| Generación de modelos e índices digitales para el diagnóstico de la erosión de la superficie agrícola  | (Kawana-Franquitto, 2019) |

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento utilizado por los distintos autores (Cuadro 11), para la realización de fotogrametría mediante el uso de RPAS, se muestra en la Figura 19 y, en el Cuadro 12, se realiza la descripción de todos los puntos mencionados.



**Figura 19.** Pasos del proceso fotogramétrico.

Fuente: Elaboración propia

**Cuadro 12.** Proceso fotogramétrico.

| <b>Proceso fotogramétrico</b>  |
|--|
| <p><b>Estudio de proyecto y plan de vuelo.</b></p> <p>Es el conjunto de cálculos previos a la ejecución de un vuelo fotogramétrico, mediante el cual se organiza la operación de todas las actividades topográficas requeridas, para mejorar la precisión y conseguir el producto fotogramétrico propuesto (Claros-Zelaya, Guevara-Aguilar, &amp; Pacas-Cruz, 2016).</p> <p>Consta de una revisión de la zona de estudio, para tener en cuenta todos los factores que inciden en el vuelo y así evitar atrasos, errores y cambios de planes. Se verifica si la zona de estudio es la idónea para poder efectuar maniobras de despegue y aterrizaje, si existen zonas con elementos que puedan dificultar o impedir el uso de RPAS (árboles agrupados de forma densa).</p> <p>Se verifica si el terreno es montañoso (para realizar ajustes), debido a que se pueden producir huecos en los recubrimientos entre fotografías, cuando hay cotas altas. (García-Martínez, Flores-Magdaleno, Ascencio-Hernández, Khalil-</p> |

---

Gardezi, & Tijerina-Chávez, 2020).

---

### **Georreferenciación (Puntos de control).**

En vista que los GPS de los drones tienen una precisión de +/- 3 m. (Pino, 2019), se requieren puntos de control en tierra en los levantamientos para asegurar la precisión requerida (Claros-Zelaya, Guevara-Aguilar, & Pacas-Cruz, 2016; Lorduy-Hernández, 2017).

Un punto de control GCP (Ground Control Point) es un sitio físico ubicado en la superficie terrestre del cual se conoce su posición (X, Y o X, Y, Z.), respecto a un sistema de coordenadas, de ellos depende la georreferenciación del proyecto y son los que garantizan que los modelos digitales de terreno no vayan a estar desconfigurados en posición o en altura (Lorduy-Hernández, 2017; Zafra-Granados, 2018).

Los GCP son colocados en diferentes puntos estratégicos, de acuerdo con el plan de vuelo y, medidos con diversos receptores GPS de alta precisión, GPS diferencial o con estación total. La ubicación de los GCP debe ser homogénea en el área de interés, con la recomendación de colocar uno en el centro del área de estudio para incrementar la calidad y precisión de la reconstrucción, y con una cantidad de puntos de control no menor a tres (se recomienda por lo menos cinco o seis)

(Lorduy-Hernández, 2017; Zafra-Granados, 2018).

---

### **Vuelo fotogramétrico.**

Existen muchas aplicaciones móviles para planear vuelos de drones, la elección de la más adecuada dependerá del objetivo del proyecto y del dron. Las aplicaciones más comunes son DJI Ground Station Pro, Pix4D Capture y Drone Deploy, UGCS, Mission Planner, Qgroundcontrol, PX4, Q Litchi, DroneDeploy, y eMotion (para ala fija).

El software planificador de la misión marca un polígono, el cual delimitará el área de estudio y dentro de este se hará una ruta o plan de vuelo que se basará en coordenadas geográficas (*waypoints*), que el RPAS recorrerá en secuencia, desplazándose mediante la posición geográfica global determinado por el GPS incorporado (Lorduy-Hernández, 2017).

Para el procedimiento del vuelo se modifican varios parámetros, como: la velocidad de vuelo, la altura, la distancia entre líneas de vuelo, el traslape frontal y lateral de las imágenes (Zafra-Granados, 2018). Estos parámetros siempre están limitados principalmente por el modelo de la cámara (tipo de lente y distancia focal) y el tiempo máximo que la aeronave puede mantener

---

---

en el aire (Claros-Zelaya, Guevara-Aguilar, & Pacas-Cruz, 2016).

La determinación de los factores anteriores permitirá conocer el plan de adquisición de imágenes, factores como la cobertura efectiva de terreno, la distancia del isocentro longitudinal y lateral de cada fotografía (Claros-Zelaya, Guevara-Aguilar, & Pacas-Cruz, 2016).

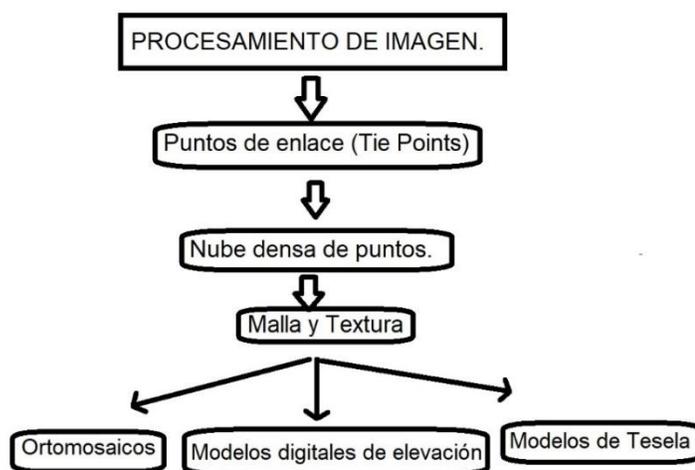
---

### **Procesamiento de Imágenes.**

En esta etapa se utiliza un software especializado en fotogrametría, el cual, integra la información de cada imagen georreferenciada, y de los puntos de apoyo terrestre, para la obtención de un modelo tridimensional de la superficie. Una imagen rectificadas de la zona, en tratamiento, para la a generación de cartografía básica. (Claros-Zelaya, Guevara-Aguilar, & Pacas-Cruz, 2016).

En la mayoría de los trabajos, realizados con imágenes obtenidas por RPAS, se realiza un preprocesamiento previo, el cual consiste en unir todas las imágenes para obtener una imagen única del sitio de estudio (mosaico de imágenes) (Sarabia-López, 2019). Los softwares utilizados para crear los mosaicos son: Autopano, Visual SFM, Agridsoft PhotoScan, Pix4D, ArcGis Pro, Trimble Inpho y PhotoModeler Technologies entre otros.

El procedimiento fotogramétrico (que utilizan los softwares antes mencionados), para la creación de ortomosaicos, modelos digitales de elevación y modelos Tesela, se muestra en la Figura 20.



**Figura 20.** Proceso fotogramétrico.

Fuente: Elaboración propia

### **Puntos de enlace.**

En esta etapa, se realiza una triangulación aérea, con las imágenes georreferenciadas, mediante, los emparejamientos o creación de puntos de enlace (puntos de amarre o Tie Points), permitiendo la coincidencia entre fotografías (Claros-Zelaya, Guevara-Aguilar, & Pacas-Cruz, 2016).

---

---

### **Nube Densa de Puntos.**

Al tener georreferenciadas las imágenes y creados los puntos de enlace, el siguiente paso es la densificación de la nube de puntos, en donde se integra la información de geolocalización interna en las fotografías y se carga las coordenadas conocidas de los puntos de control de apoyo terrestre, añadidos por el usuario (ubicados en las fotografías) (Zafra-Granados, 2018; Claros-Zelaya, Guevara-Aguilar, & Pacas-Cruz, 2016).

La calidad con la que se obtienen los productos es ajustable, teniendo en cuenta que los procesos se realizan internamente en la computadora y no en el programa, se debe considerar el tiempo de procesamiento respecto a la calidad deseada y las características del equipo.

Con la nube densa de puntos georreferenciada, se puede generar diferentes productos como: ortomosaicos, modelos digitales de elevación, o modelos digitales del terreno. Estos productos pueden ser exportados a diferentes tipos de software, para su edición o tratamiento, como ArcGIS, Autocad y Global mapper (Zafra-Granados, 2018).

### **Malla y Textura**

Después de la generación de la nube densa de puntos, se crea la malla, que es un modelo en tres dimensiones del terreno donde son triangulados los puntos densificados de la nube (Claros-Zelaya, Guevara-Aguilar, & Pacas-Cruz, 2016).. La textura se genera a partir de la malla calculada (Zafra-Granados, 2018).

De igual forma que en los procesos anteriores, la calidad con la que se desea construir la malla es ajustable, seleccionando el número de caras, el tipo de superficie, eligiendo la fuente de los datos (nube de puntos) y seleccionando el tipo de interpolación (Zafra-Granados, 2018).

### **Modelos digitales de elevación (MDE).**

El modelo digital de elevación es creado con la nube densa de puntos y a partir de esta imagen ráster es posible generar modelos digitales de terreno o curvas de nivel (Zafra-Granados, 2018).

### **Ortomosaico**

Cuando al mosaico de imágenes se le corrigen las deformaciones creadas por, la cámara, la altura o la velocidad de adquisición de las imágenes y se modifica a una perspectiva ortogonal, se le conoce como ortomosaico (Sarabia-López, 2019). Es una composición de imágenes georreferenciadas y corregidas geométricamente (para que cada punto en el terreno sea observado desde una perspectiva perpendicular). (Claros-Zelaya, Guevara-Aguilar, & Pacas-Cruz, 2016).

---

Fuente: Elaboración propia

## 2.5 Bibliografía.

- Berra Villaseñor, E. (2020). Cálculo de variables de control PID para Drones Cuadcopter. *Reaxión, Revista de divulgación tecnológica.*, 1-9. Obtenido de <http://reaxion.utleon.edu.mx/>
- Bonadeo, M., Repetto, L., Bessón, P., & Di-Leo, N. (2017). La Agricultura Digital y los nuevos desafíos profesionales. (Universidad Nacional de Rosario) *Agromensajes de la Facultad*, 47 - 48.
- Bonney, B., Siddharth, B. P., Shamaev, E., Walser, J., Gonçalves, L. V., Olson, C. O., Quilter, S. (30 de Agosto de 2020). <https://ardupilot.org/ardupilot/index.html>.
- Christiansen, M. P., Stigaard-Laursen, M., Nyholm, J. R., Skovsen, S., & Gislum, R. (noviembre de 2017). Designing and Testing a UAV Mapping System for Agricultural Field Surveying. *Sensors*, 17(12), 19. doi:10.3390/s17122703
- Claros-Zelaya, R.-A., Guevara-Aguilar, A.-E., & Pacas-Cruz, N. R. (2016). *Aplicación de Fotogrametría Aérea en Levantamientos Topográficos Mediante el Uso de Vehículos Aéreos no Tripulados*. San Miguel, El Salvador: Ciudad Universitaria de Oriente.
- Conejo Lima, J. (2016). *Control Y Monitorización De Drones Mediante Análisis Del Contexto*. Cáceres, España: Universidad De Extremadura, Escuela Politécnica.
- Cucchiaro, S., Fallu, D. J., Zhang, H., Walsh, K., Van Oost, K., Brown, A. G., & Tarolli, P. (17 de June de 2020,). Multiplatform-SfM and TLS Data Fusion for Monitoring Agricultural Terraces in Complex Topographic and Landcover Conditions. *Remote Sens*, 12(12), 1-29. doi:10.3390/rs12121946
- Dávila, P., Orna, J., Rosales, A., & Ávalos, E. (Abril de 2017). Diseño, Construcción de la Estructura Mecánica y Pruebas de Vuelo de un Hexacóptero de Monitoreo para Aplicaciones Militares. *Revista Politécnica*, 39(1), 11.
- Dronecode Foundation. (30 de Agosto de 2020). <https://www.dronecode.org/>. Obtenido de <https://docs.px4.io/v1.9.0/en/>
- FAO, a. (2020a). *Realizing The Potential Of Digitalization To Improve The Agri-Food System: Proposing A New International Digital Council For Food And Agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Obtenido de <http://www.fao.org/3/ca7485en/ca7485en.pdf>
- FAO, b. (2020b). Conferencia Regional de la FAO Para América Latina y el Caribe: Innovación y Agricultura Digital. *LARC/20/9*. Managua

(Nicaragua): Food and Agriculture Organization of the United Nations And International Telecommunication Union.

- FAO, c. (2018). La Ciberagricultura: Uso de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) para el Fomento de Sistemas Alimentarios Sostenibles e Inclusivos y la Integración del Comercio. *Conferencia Regional de la FAO para Europa. ERC/18/3*. Vorónezh, Federación de Rusia: Food And Agriculture Organization Of The United Nations.
- Feng, L., Zhang, Z., Ma, Y., Du, Q., Williams, P., Drewry, J., & Luck, B. (24 de June de 2020). Alfalfa Yield Prediction Using UAV-Based. *Remote Sens*, 12(12), 1-23.doi:10.3390/rs12122028
- Fernández Gutiérrez, F. (2015). *Diseño e Implementación de un Sistema de Control Asistido Para Plataforma Aérea Multi-rotor*. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- Fernández-Bobadilla, H. A., Torres-Landín, I. J., & Ramírez-Carmona, U. (2016). *Diseño, Construcción y Control de una Aeronave Tipo Dron*. Ciudad de México, Mexico: Universidad Nacional Autónoma De México.
- Fernández-Movilla, S. (2019). *Influencia De Los Puntos De Control Sobre El Terreno En La Precisión de Modelos Digitales de Superficies Generados Mediante Fotogrametría Aérea*. Madrid, España: Universidad Politécnica De Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería De Montes, Forestal y del Medio Natural.
- Figueiras Sánchez, S. (2018). *Integración De Nubes De Puntos Generadas A Partir De Técnicas De Fotogrametría Aérea Por Multicorrelación En Zonas Urbanizadas*. Madrid: Escuela Técnica Superior De Ingenieros En Topografía. Geodesia Y Cartografía, Universidad Politécnica De Madrid.
- Florentino-Soriano, R. C. (2017). *Aplicación de Fotogrametría con RPAS para Mejorar la Efectividad en Cuantificación de la Explotación en la Cantera Santa Genoveva -2016*. Lima – Perú: Facultad De Ingeniería, Escuela Profesional De Ingeniería Civil.
- Galimov, M., Fedorenko, R., & Klimchik, A. (June de 2020). UAV Positioning Mechanisms in Landing Stations: Classification and Engineering Design Review. *Sensors*, 20(13), 31.doi:10.3390/s20133648
- García-Martínez, H., Flores-Magdaleno, H., Ascencio-Hernández, R., Khalil-Gardezi, A., & Tijerina-Chávez. (8 de July de 2020). Corn Grain Yield Estimation from Vegetation Indices, Corn Grain Yield Estimation from Vegetation Indices, Canopy Cover, Plant Density, and a Neural Network Using Multispectral and RGB Images Acquired with Using Multispectral and RGB Images Acquired with UAV. *Agriculture* , 10(7), 1-24. doi:doi:10.3390/agriculture10070277

- Geipel, J., Link, J., Wirwahn, J. A., & Claupein, W. (16 de January de 2016). A Programmable Aerial Multispectral Camera System for In-Season Crop Biomass and Nitrogen Content Estimation. *Agriculture*, 6(4), 1-19. doi:10.3390/agriculture6010004
- Gerard, S. (2018). *E-Agriculture In Action: Drones For Agriculture*. Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations And International Telecommunication Union and International Telecommunication Union.
- Gomes De Macedo, R.-A., Dias-Marques, W., Adriano-Belan, P., & Alves-Arujo, S. (2018). Automatic Visual Inspection Of Grains Quality In Agroindustry 4.0. *International Journal of Innovation*, 6(3), 207-216. doi.org/10.5585/iji.v6i3.339
- González Valencia, E. (2017). *México Exportador De Orones A República De Chile*. Ciudad De México, Mexico: Instituto Politécnico Nacional, Centro De Estudios Científicos Y Tecnológico 5 "Benito Juárez".
- GyuJin, J., Jaeyoung, K., Ju-Kyung, Y., Hak-Jin, K., Yoonha, K., Dong-Wook Kim 1, K.-H. K., . . . Yong Suk, C. (20 de March de 2020). Review: Cost-Effective Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform for Field Plant Breeding Application. *Remote Sens.*, 12(6), 2-20. doi:10.3390/rs12060998
- Hassler, S. C., & Baysal-Gurel, F. (9 de October de 2019). Unmanned Aircraft System (UAS) Technology and. *Agronomy*, 9(10), 2-21. doi:10.3390/agronomy9100618
- Hinojosa-Pérez, M. (2018). *Diseño y Construcción de Drone Autónomo para Medición de Radiación Solar*. sevilla, España: Universidad de Sevilla ,Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Jaramillo Gómez, F., & Gómez Yepes, A. (2013). *Sistema de Control para la Estabilidad y Orientación de un Helicóptero Quadrotor*. Antioquia, Colombia: Escuela De Ingeniería De Antioquia.
- Kawana-Franquitto, J. (2019). *GENERACIÓN DE MODELOS E ÍNDICES DIGITALES PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN DE LA SUPERFICIE AGRÍCOLA*. PONTA GROSSA: Universidade Estadual de Ponta Grossa,.
- Kharuf-Gutierrez, S., ernández-Santana, L., Orozco-Morales, R., Aday Díaz, O. d., & Delgado Mora, I. (Mayo de 2018). Análisis de Imágenes Multiespectrales Adquiridas con Vehículos Aéreos no Tripulados. *RIELAC*, 39(2), 79-91.
- Kuo-Jen, C., Chun-Wei, T., Chih-Ming, T., Ta-Chun, L., & Ci-Jian, Y. (2020). Application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Acquired Topography for Quantifying Typhoon-Driven Landslide Volume and Its Potential

Topographic Impact on Rivers in Mountainous Catchments. *10*(17), 16. doi:10.3390/app10176102

- Lavarello, P., Bil, D., Vidoso, R., Langard, & Federico. (2019). Reconfiguración del oligopolio mundial y cambio tecnológico frente a la agricultura 4.0: implicancias para la trayectoria de la maquinaria agrícola en Argentina. *Ciclos*, *26*(53), 163-193.
- Li, S., Ding, X., Kuang, Q., Ata-Ul-Karim, S. T., Cheng, T., Liu<sup>1</sup>, X., . . . Cao, Q. (2018). Potential of UAV-Based Active Sensing for Monitoring Rice Leaf Nitrogen Status. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 1-14. doi: 10.3389/fpls.2018.01834
- López-Milán, S. (2017). *Desarrollo de Sistema de Aterrizaje Autónomo Preciso para Multicóptero*. Cartagena, Colombia: Universidad Politécnica De Cartagena, Escuela Técnica Superior De Ingeniería De Telecomunicación,.
- Lorduy-Hernández, S. (2017). *Generación de Ortoimágenes Usando Vehículos Aéreos no Tripulados Aplicado a la Agricultura*. Medellín, Colombia: Universidad Eafit , Departamento De Ciencias Físicas.
- Lu, N., Wang, W., Zhang, Q., Li, D., Yao, X., Tian, Y., . . . Cheng, T. (6 de December de 2019). Estimation of Nitrogen Nutrition Status in Winter Wheat From Unmanned Aerial Vehicle Based Multi-Angular Multispectral Imagery. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 1-15. doi: 10.3389/fpls.2019.01601
- Matienzo Merodio, J. J., & Olmedilla García, A. (2016). *Estudio, Ensamblaje, Caracterización y Ensayos de dos Modelos Reales de RPA*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid,Dpto. De Teoría De La Señal Y Comunicaciones.
- Meinen, B. U., & Robinson, D. T.-M. (2020). Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization. *Remote Sensing of Environment*. doi.org/10.1016/j.rse.2020.111666
- Messina, G., & Modica, G. (8 de May de 2020). Applications of UAV Thermal Imagery in Precision Agriculture: State of the Art and Future Research Outlook. *Remote Sens*, *12*(9), 1-26. doi:10.3390/rs12091491
- Mink, R., Dutta, Peteinatos, G. G., Sökefeld, M., Engels, J. J., Hahn, M., & Gerhards, R. (2018). Multi-Temporal Site-Specific Weed Control of *Cirsium arvense* (L.) Scop. and *Rumex crispus* L. in Maize and Sugar Beet Using Unmanned Aerial Vehicle Based Mapping. *Agriculture*, *8*(5), 1-14. doi:10.3390/agriculture8050065
- Mooney, P., & Grupo ETC. (2018). *Blocking the chain - Industrial food chain concentration, Big Data platforms and food sovereignty solutions*. Benjamin Luig (Rosa-Luxemburg-Stiftung), Franza Drechsel (GLOCON),

- Jan Urhahn. Obtenido de <https://www.etcgroup.org/content/blocking-chain>
- Moyano-Díaz, S. (2014). *Diseño y Construcción de un Quadcopter*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21902/102664.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Navarro-Rubio, D. (2019). *Análisis De Un Sistema De Vuelo De Rpas Con Controladora Px4 Y Subsistema De Visión*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Nhamo, L., Magidi, J., Nyamugama, A., & Clulow, A. D. (2020). Prospects of Improving Agricultural and Water Productivity through Unmanned Aerial Vehicles. *Agriculture*, 10(7), 2-18. doi:10.3390/agriculture10070256
- Nigon, T. J., Yang, C., Dias Paiao, G., Mulla, D. J., Knight, J. F., & Fernández, F. G. (12 de April de 2020). Prediction of Early Season Nitrogen Uptake in Maize Using High-Resolution Aerial Hyperspectral Imagery. *Remote Sens.*, 12(8), 1-23. doi:10.3390/rs12081234
- Nistal-Lastra, J. (2017). *Diseño de un Drone Programable de Bajo Coste*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. Obtenido de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12091/396747.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Olivos Lara, D. (2017). *Diseño del Perfil Aerodinámico de un Dron*. Ciudad de Mexico: Universidad Nacional Autónoma De México, Facultad De Ingeniería.
- Organizacion Mundial Sobre Propiedad Intelectual, O. (28 de Agosto de 2020). <https://ipportal.wipo.int/>. Obtenido de <https://patentscope.wipo.int/search/es/search.jsf>
- Orna-Chávez, J. E., Balseca-Sampedro, O. F., Caicedo-Reyes, J., Mayorga-Pérez, D. F., & Viteri-Núñez, E. F. (February de 2017). Análisis Y Diseño De Una Aeronave No Tripulada Para Uso Agrícola. *European Journal of Scientific Research*, 135-156. doi: 10.19044/esj.2017.v13n6p135
- Ortega-Cárdenas, V. E. (2018). *Procedimiento Para La Captura De Datos Fotogramétricos Con La Ayuda De Aparatos Controlados Remotamente, Como Herramienta Para La Evaluación En Estabilidad De Taludes Y Difusión Con Realidad Aumentada*. Medellín, Colombia: Facultad de Minas, Ingeniería Civil, Universidad Nacional De Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68620>
- Park, S., Ryu, D., Fuentes, S., Chung, H., Hernández-Montes, E., & Connell, M. (17 de August de 2017). Adaptive Estimation of Crop Water Stress in Nectarine and Peach Orchards Using High-Resolution Imagery from an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sens.*, 9(8), 1-15. doi:10.3390/rs9080828

- Parra Patiño, J. (2016). *Control de drones basado en MAVLink para la plataforma Eyes of Things*. Ciudad Real, España: Universidad De Castilla-La Mancha Escuela Superior De Informática Departamento De Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática Y Comunicaciones.
- Pedraza -Santos, A. (2019). *Análisis Comparativo del Levantamiento Topográfico Tradicional y el Levantamiento Topográfico con RPAS en la Huaca Aznapuquio, Los Olivos - 2019*. Lima, Perú: Facultad De Ingeniería Escuela Académico Profesional De Ingeniería Civil.
- Pei-Hsiang, C., Der-Ming, M., & Jaw-Kuen, S. E. (July de 2019). Design, Manufacturing, and Flight Testing of an. *Applied Sciences*, 9(15), 22. doi:10.3390/app9153043
- Pino, V. E. (13 de Junio de 2019). Los Drones Una Herramienta Para Una Agricultura Eficiente: Un Futuro De Alta Tecnología. *IDESIA, Universidad de Tarapacá. Facultad de Ciencias Agronómicas*, 37(1), 75-84. doi:10.4067/S0718-34292019005000402.
- Poblete, T., Ortega-Farías, S., & Ryu, D. (30 de January de 2018). Automatic Coregistration Algorithm to Remove Canopy Shaded Pixels in UAV-Borne Thermal Images to Improve the Estimation of Crop Water Stress Index of a Drip-Irrigated Cabernet Sauvignon Vineyard. *Sensors*, 18(2). doi:10.3390/s18020397
- Poley, L. G., & McDermid, G. J. (25 de March de 2020). A Systematic Review of the Factors Influencing the Estimation of Vegetation Aboveground Biomass Using Unmanned Aerial Systems. *Remote Sens*, 12(7), 1-46. doi:10.3390/rs12071052
- Pondian-Castro, F. (2019). Application of RPAs to support terracing projects in agricultural areas. *Brazilian Journal of Technology*, 2(2), 695-715.
- Reyes-Pausà, P. (2017). *Diseño de un Multicóptero para Investigación Controlado Vía Terminal Android*. Valencia, España: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Informàtica, Universitat Politècnica de València.
- Rueda-Ayala, V. P., Peña, J. M., Höglind, M., Bengochea-Guevara, J. M., & Andújar, D. (28 de January de 2019). Comparing UAV-Based Technologies and RGB-D Reconstruction Methods for Plant Height and Biomass Monitoring on Grass Ley. *Sensors*, 19(3), 1-17. doi:10.3390/s19030535
- Ruipérez-Martín, P. (2016). *Diseño Y Fabricación De Un Dron Mediante Impresión 3D*. Valencia, España: Universidad Politécnica De Valencia, Escuela Técnica Superior De Ingeniería Del Diseño. Obtenido de <https://riunet.upv.es/handle/10251/73170>
- Santacruz De León, E. E., & Palacio Muñoz, V. H. (2020). Industria 4.0 en la agricultura y la ingeniería automotriz: La agricultura y la educación agrícola. *Innovación Educativa*, 20(82), 11-24. Obtenido de

<https://www.ipn.mx/innovacion/numeros-antiores/innovacion-educativa-82.html>

- Santana Cruz, E. E. (2017). *Propuesta de Sistema Multi-UAV para Aplicaciones de Cobertura de Area*. Barcelona, Universitat Autònoma de Barcelona, España.
- Santoyo-Luévano, I., Cázares-Vieyra, J. I., Avilés-Cruz, C., Villegas-Cortez, J., & Zúñiga-López, A. (2016). Diseño y Construcción de un Dron de Bajo Costo Para Adquisición de Datos del Clima. *Pistas Educativas*, 923-938.
- Sarabia-López, R. (2019). *Conteo Automático de Olivos Mediante Morfología Matemática con Imágenes Adquiridas por Sistema Aéreo Tripulado Remotamente*. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo ,Posgrado En Ingeniería Agrícola Y Uso Integral Del Agua.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, C. C. (2019). *NORMA Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, Que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano*. Mexico: Diario Oficial de la Federación.
- SERRANO CORDERO CRISTIAN, P. C. (2017). *Análisis, Diseño Estructural y Construcción de un Dron para la Detección de Minas Antipersona*.
- Serrano Cordero, C., & Pérez Curutchet, O. (2017). *Análisis, Diseño Estructural y Construcción de un Dron para la Detección de Minas Antipersona*. Catalunya, España: Universidad Politécnica de Catalunya. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/102000?show=full>
- Sistema de Información de la Gaceta de la Propiedad Industrial, M. (28 de Agosto de 2020). <https://siga.impi.gob.mx/>. Obtenido de Gaceta de la Propiedad Industrial: <https://siga.impi.gob.mx/newSIGA/content/common/principal.jsf>
- Thibbotuwawa, A., Bocewicz, G., Bocewicz, G., Nielsen, P., & Banaszak, Z. (June de 2020). Unmanned Aerial Vehicle Routing Problems: A Literature Review. *Applied Sciences*, 10(13), 20. doi.org/10.3390/app10134504
- Tondato-Arantes, B. H., Matheus-Costa, E., & Abadia-Ventura, M.-V. (2019). Drone Aplicado na Agricultura Digital. *Ipê Agronomic Journal*, 14 – 18. Obtenido de <http://anais.unievangelica.edu.br/index.php/ipeagronomicjournal/issue/view/139>
- Trendov, N. M., Varas, S., & Zeng, M. (2019). *Digital Technologies In Agriculture And Rural Areas*. Rome, Italia: Food And Agriculture Organization Of The United Nations. Obtenido de <http://www.fao.org/publications/card/es/c/CA4887EN>
- Tucci, G., Gebbia, A., Conti, A., Fiorini, L., & Lubello, C. (2019). Monitoring and Computation of the Volumes of of Photogrammetric Surveying. *Remote Sens*, 11(12), 27. doi:10.3390/rs11121471

- Vargas-Fonseca, L. M. (2015). *Desarrollo De Algoritmos Para El Seguimiento De Trayectorias de Un Quadrotor Utilizando Técnicas Modernas de Control don Álgebra Lineal*. Facultad de Ingeniería Eléctrica Y Electrónica.
- Vázquez Paulino, J. C., & Backhoff Pohls, M. A. (2017). *Procesamiento Geo-Informático de Datos Generados Mediante Drones Para la Gestión de Infraestructura del Transporte*. Publicación Técnica No. 490, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Qro.
- Wang, K., Li, W., Deng, L., Lyu, Q., Zheng, Y., Yi, S., . . . He, S. (March, de 2018). Rapid detection of chlorophyll content and distribution in citrus orchards based on low-altitude remote sensing and bio-sensors. *Int J Agric & Biol Eng*, 11(2), 164-170.
- Wiesner-Hanks, T., Wu, H., Stewart, E., DeChant, C., Kaczmar, N., Lipson, H., . . . Nelson, R. (12 de December de 2019). Millimeter-Level Plant Disease Detection From Aerial Photographs via Deep Learning and Crowdsourced Data. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1-11. doi:10.3389/fpls.2019.01550
- Yang, B., Wang, M., Sha, Z., Wang, B., Chen, J., Yao, X., . . . Zhu, Y. (12 de October de 2019). Evaluation of Aboveground Nitrogen Content of Winter Wheat Using Digital Imagery of Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*, 19(20), 1-18. doi:10.3390/s19204416
- Yang, G., Liu, J., Zhao, C., Li, Z., Huang, Y., Yu, H., . . . Yang, H. (30 de June de 2017). Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing for Field-Based Crop Phenotyping: Current Status and Perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 8. doi: 10.3389/fpls.2017.01111
- Yao, L., Wang, Q., Yang, J., Zhang, Y., Zhu, Y., Cao, W., & Ni, J. (17 de February de 2019). UAV-Borne Dual-Band Sensor Method for Monitoring Physiological Crop Status. *Sensors*, 19(4), 1-19. doi:10.3390/s19040816
- Zafra-Granados, Y. (2018). *Manual Para El Postproceso De Imágenes Obtenidas A Partir De Una Aeronave Tripulada Remotamente (Drone) En Los Software Agisoft Photoscan Y Pix4d*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Obtenido de <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/14055>
- Zecha, C. W., Peteinatos, G. G., Link, J., & Wilhelm, C. (8 de June de 2018). Utilisation of Ground and Airborne Optical Sensors for Nitrogen Level Identification and Yield Prediction in Wheat. *Agriculture*, 8(6), 2-13. doi:10.3390/agriculture8060079
- Zhang, H., Yang, J., Baartman, J. E., Li, S., Jin, B., Han, W., . . . Geissen, V. (May de 2018). Quality of terrestrial data derived from UAV photogrammetry: A case study of Hetao irrigation district in northern

China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(3), 171-176. Obtenido de <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe>

Zhang, H., Zhang, B., Wei, Z. W., Chenze, W., & Huang, Q. (February de 2020). Lightweight Integrated Solution for a UAV-Borne Hyperspectral Imaging System. *Remote Sensing*, 12(657), 2-17. doi:10.3390/rs12040657

Zhang, L., Niu, Y., Zhang, H., Han, W., Li, G., Tang, J., & Peng, X. (9 de October de 2019). Maize Canopy Temperature Extracted From UAV Thermal and RGB Imagery and Its Application in Water Stress Monitoring. *Frontiers in Plant Science*, 10. doi: 10.3389/fpls.2019.01270

Zhang, Y., Han, W., Niu, X., & Li, G. (29 de November de 2019). Maize Crop Coefficient Estimated from UAV-Measured Multispectral Vegetation Indices. *Sensors*, 19(23), 1-17.:doi:10.3390/s19235250

### **3. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE AERONAVE PILOTADA A DISTANCIA (RPAS), PARA USO AGRÍCOLA.**

Juan J. Pérez-Paredes<sup>1</sup>.

Gilberto de J. López-Canteñas<sup>1\*</sup>.

Noé Velázquez-López<sup>1</sup>.

Irineo L. López-Cruz<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, MÉXICO. Autor de correspondencia: alelopez10@hotmail.com, tel. 01 (595) 9521500 ext.5556

#### **3.1 Resumen**

En la agricultura de precisión, el uso de Sistemas de Aeronave Pilotadas a Distancia (RPAS) ha aumentado significativamente, debido a la ventaja de obtener información de los cultivos mediante distintos sensores. Esto ha generado la necesidad contar con aeronaves capaces de realizar vuelos autónomos y georreferenciados para obtener la información deseada con precisión. Con este fin se realizó el diseño, construcción y evaluación de un RPAS, tipo cuadricóptero con un sistema, que permita la realización de vuelos autónomos y estables para la obtención de imágenes georreferenciadas, mediante la instrumentación de un sensor RGB (Sony IMX117) y un GPS. Para el diseño del RPAS se consideraron como requisitos el peso, el tiempo de vuelo, la altura de vuelo, la carga útil y el sistema de control. Con los parámetros de diseño, se construyó un RPAS, equipado con una controladora Pixhawk con GPS, motores race star de 1400kv, hélices de ocho pulgadas (8045) y ESC de 30 A. Se realizaron pruebas de vuelo en misiones autónomas con una velocidad constante de 1 m/s, a una altura de 20m y con vientos no mayores a 5 Km/h. Obteniéndose un consumo promedio de 1520 mAh por 7

minutos de vuelo, vibraciones menores a  $18 \frac{m}{s^2}$  y movimientos en los ejes “yaw”, “pitch” y “roll” menores a 6 grados.

**Palabras clave:** RPAS, Diseño, Telemetría, Programación de vuelo. Georreferenciación.

### **3.2 Abstract**

In precision agriculture, the use of Remote Pilot Aircraft Systems (RPAS) has increased significantly, due to the advantage of obtaining crop information from different sensors. This has generated the need for aircraft capable of performing autonomous and georeferenced flights to obtain the desired information with precision. With this purpose, it was designed, built and evaluated a quadricopter RPAS with a system that allows the realization of autonomous and stable flights to obtain georeferenced images, through the instrumentation of a RGB sensor (Sony IMX117) and a GPS. For the design of the RPAS, weight, flight time, flight height, payload and control system were considered as requirements. With the design parameters, a RPAS was built, equipped with a Pixhawk controller with GPS, 1400kv race star engines, eight-inch propellers (8045) and 30A ESC. Flight tests were carried out in autonomous missions with a constant speed of 1 m/s, at an altitude of 20m and with winds of no more than 5 Km/h. An average consumption of 1520 mAh was obtained for 7 minutes of flight, vibrations less than  $18 \text{ m/s}^2$  and movements in the "yaw", "pitch" and "roll" axes less than 6 degrees.

**Keywords:** Dron, Design, Telemetry, Flight scheduling. Georeferencing.

### **3.3 Introducción**

En los últimos años se han registrado avances significativos en el desarrollo de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) (principalmente multirrotores), convirtiéndose en una tecnología estable y confiable, aplicada en la agricultura (Dávila, Orna, Rosales, & Ávalos, 2017; Thibbotuwawa, Bocewicz, Bocewicz, Nielsen, & Banaszak, 2020).

Los RPAS pueden proporcionar información con una resolución mucho más alta que los datos sensoriales de satélites y aeronaves tripuladas. Estos vehículos, utilizados en la agricultura, proporcionan imágenes de alta resolución espacial, utilizada para monitorear cultivos a escala milimétrica (Christiansen, Stigaard-Laursen, Nyholm Jorgensen, Skovsen, & Gislum, 2017). Por lo que constituyen una aplicación en tiempo real y alternativa de bajo costo en comparación con la clásica fotogrametría aérea tripulada (Hassler & Baysal-Gurel, 2019).

Los RPAS son capaces de cubrir grandes áreas en el campo, de manera flexible, sin embargo, para utilizar este recurso de manera eficiente, es necesario establecer una configuración adecuada, con sistemas de vuelo autónomos, capaces de determinar una ruta de vuelo mediante geolocalización (Thibbotuwawa, Bocewicz, Bocewicz, Nielsen, & Banaszak, 2020).

La automatización de las plataformas tiene como objetivo, ayudar en el control de despegue, vuelo y aterrizaje de los RPAS, manteniendo su aeronavegabilidad y posicionamiento (Galimov, Fedorenko, & Klimchik, 2020). Además, de proveer sistemas de seguridad, que en fallos de componentes o del programa, alertan al operador o toman medidas correctivas para afrontar problemas (Dávila, Orna, Rosales, & Ávalos, 2017).

En los últimos años, se han propuesto diferentes diseños para plataformas, mostrando un fuerte desarrollo para el vuelo, control y aterrizaje de forma autónoma, con los dispositivos de posicionamiento global (GPS) (Galimov, Fedorenko, & Klimchik, 2020). Aun así, el desafío es seleccionar correctamente los componentes en una plataforma RPAS, para que cumpla con las necesidades y objetivos deseados (Christiansen, Stigaard-Laursen, Nyholm

Jorgensen, Skovsen, & Gislum, 2017). Además de la configuración de parámetros de vuelo, y un correcto ajuste en el control PID (proporcional, integral y derivativo), que regula las correcciones de los errores, ocasionados por las perturbaciones originadas por el viento o diferencias en los motores y las hélices (Bonney et al., 2020)

La tecnología actual, ofrece sistemas de control como Pixhawk, un hardware de sistema de navegación y control de vuelo para uso civil, utilizado en la investigación y desarrollo de vehículos autónomos. Esta controladora, consiste en una unidad de medida inercial IMU (giroscopio y acelerómetro), magnetómetro (brújula), barómetro y módulo del sistema de posicionamiento global (GPS), sensores utilizados para la navegación y orientación (Pei-Hsiang, Der-Ming, & Jaw-Kuen, 2019).

La controladora puede hacer que el RPAS vuele de forma autónoma, manejando todos los controles de vuelo y navegación (Pei-Hsiang, Der-Ming, & Jaw-Kuen, 2019), además, se puede comunicar con una estación de control en tierra (mediante telemetría), y enviar imágenes, vídeo o información referente al estado del RPAS, como: posición, altitud, velocidad, batería y consumo eléctrico (Dávila, Orna, Rosales, & Ávalos, 2017).

La construcción de RPAS con sistemas abiertos, es fundamental para la investigación y desarrollo de nuevas aplicaciones en la agricultura de precisión, haciendo rápida y sencilla la prueba e implementación de distintos sensores (instrumentación) (Santoyo-Luévano, Cázares-Vieyra, Avilés-Cruz, Villegas-Cortez, & Zúñiga-López, 2016).

Teniendo en cuenta las características necesarias con que deben contar las aeronaves para uso en la agricultura de precisión, el objetivo del presente trabajo es diseñar, construir y evaluar un RPAS, tipo cuadricóptero con un sistema, que permita la realización de vuelos autónomos y estables para la obtención de imágenes georreferenciadas en forma secuencial, mediante la instrumentación de un sensor RGB.

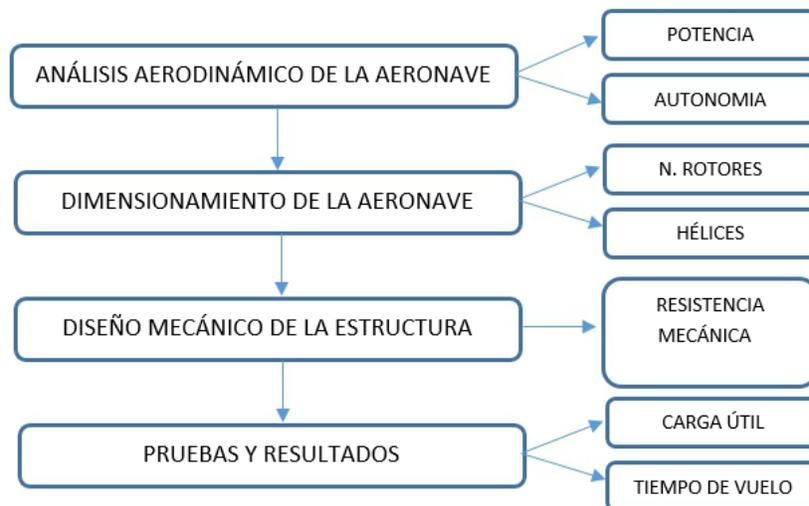
### 3.4 Materiales y métodos.

#### 3.4.1 Diseño del RPAS

Los parámetros de diseño de un RPAS están interrelacionados en el proceso conceptual, no es fácil encontrar la mejor configuración para cada tipo de aeronave. En la práctica, se necesitan revisar varios modelos de configuración para llegar a un objetivo establecido (Pei-Hsiang, Der-Ming, & Jaw-Kuen, 2019).

Para llevar a cabo el diseño óptimo y competitivo del RPAS, se consideraron los parámetros recomendados por Orna-Chávez, Balseca-Sampedro, Caicedo-Reyes, Mayorga-Pérez, & Viteri-Núñez, (2017) y Nistal-Lastra, (2017), (Figura 1), los cuales son:

- El análisis aerodinámico: que permite determinar la potencia requerida según las condiciones de operación,
- El diseño mecánico: en el que se propone una estructura que resista las cargas a las que el equipo se someta.
- El sistema de control (controladora): que permite la comunicación (telemetría y radio control), el geoposicionamiento y los vuelos autónomos.



**Figura 1.** Diagrama de flujo del diseño de RPAS.

Fuente: Orna-Chávez, et al., (2017).

En los cuadros 1, 2 y 3, se relaciona los parámetros que se utilizaron, para el diseño del RPAS, teniendo en cuenta que es para fotogrametría agrícola y su peso no debe sobrepasar los 2 kg para cumplir con la NOM-107-SCT3-201

**Cuadro 1.** Parámetros de diseño aerodinámico

| <b>Parámetros de diseño aerodinámico</b>           |  |   |
|--|--|---|
| Parámetro  | Valores  | Observaciones   |
| Carga máxima (Peso propio + Carga útil) (Potencia) | Peso propio <1.5 KG<br>(Peso propio + Carga útil) <2Kg | La carga útil que se utilizará es de 200 g (cámara Hawkeye Firefly 8S)          |
| Tiempo de autonomía de vuelo                       | 10 minutos   | A una altura de 20 m, con una velocidad de 1m/s, usando telemetría y una cámara |

Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 2.** Parámetros de diseño mecánico.

| <b>Parámetros de diseño mecánico</b> |                           |  |
|--------------------------------------|---------------------------|--|
| Parámetro                            | Valores                   | Observaciones  |
| Esfuerzos estructurales              | Factor de seguridad >2    | Simulación de esfuerzos en un chasis comercial (f330) (Solid Works).       |
| Número de motores                    | 4 motores (cuadricóptero) | Estructura en X, configuración "Cross Style", (Mejor Simplicidad mecánica) |

Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 3.** Parámetros del sistema de control

| <b>Parámetros del sistema de control (uso fotogramétrico)</b> |   |
|---|---|
| Parámetro   | Características   |
| Controladora  | Vuelo autónomo. (Misiones de vuelo con "waypoints").<br>Geoposicionamiento (GPS).<br>Distintos modos de vuelo para un buen control (Loiter, RTL, Alt Hold, Stabilize, Auto)<br>Configuración de parámetros de vuelo (velocidad, PID, aceleración).<br>Un sistema de uso libre, estable, documentado y fácil de usar para la incorporación de distintos sensores.<br>Un sistema que permita diferentes comunicaciones entre el piloto y la controladora (Rc, telemetría, bluetooth, wifi). |
| Comunicación  | Telemetría de 911 MHz. (información del vehículo durante el   |

---

vuelo)  
Radio control de 8 canales (RC 2.4 GHz)  
Opcional (video)

---

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que, los multirrotores de seis y ocho motores son estructuralmente más grandes y por lo tanto más pesados, que los de tres y cuatro motores, se determinó utilizar el modelo de diseño de un cuadricóptero con una capacidad de levante adicional de 200 g (carga útil), el cual garantiza una buena maniobrabilidad y estabilidad (Fernández-Bobadilla, Torres-Landín, & Ramírez-Carmona, 2016).

### **Cálculo de potencia**

#### **Empuje**

Nistal-Lastra, (2017) menciona que, partiendo del requerimiento de levante de un RPAS conforme a su peso y su carga útil, se lleva a cabo el cálculo de empuje vertical. Esta fuerza hace alusión a la capacidad de los motores con sus respectivas hélices, para sustentar el vuelo, lo que. Implica una distribución uniforme de la fuerza total generada entre la cantidad de motores en el vehículo (Fernández-Bobadilla, Torres-Landín, & Ramírez-Carmona, 2016).

Este término se describe como:

$$Et = (Nm) * (fe)$$

Donde:

*Et*: Empuje total (Kgf)

*Nm*: Numero de motores en el multirrotor.

*fe*: Fuerza de empuje de cada motor con una hélice específica (Kg).

En nuestro caso, se seleccionaron 4 motores de la marca “Racer Star (2212)”, que proporcionan cada uno, un empuje de 910g con hélices de ocho pulgadas y un ángulo de ataque de cinco pulgadas (Cuadro 4), por lo tanto, al tener 4 motores se podrá levantar un peso total de 3.6 kg (funcionando a su máxima

potencia). Sabiendo que el peso total del cuadricóptero es de 1600g, se deduce que, no será necesario el uso de la potencia máxima de los motores para poder volar.

**Cuadro 4.** Fuerza de empuje de los motores Race Star (2212 1400kv)

| <b>Modelo<br/>BR2212<br/>1400KV</b> | <b>Voltaje<br/>(v)</b> | <b>Hélice</b> | <b>Corriente<br/>de carga<br/>(A)</b> | <b>Fuerza de<br/>empuje<br/>(g)</b> | <b>Potencia<br/>(W)</b> |
|-------------------------------------|------------------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 100%<br>Trabajo                     | 11.1 v                 | 8045          | 19.0 A                                | 910g                                | 210 W                   |
| 50%<br>trabajo.                     | de 11.1 v              | 8045          | 9.5 A                                 | 455                                 | 105 W                   |

Fuente: Elaboración propia.

### **Controlador electrónico de velocidad.**

El controlador electrónico de velocidad (ESC), es el circuito encargado de generar una señal trifásica para alimentar a los motores y regular la velocidad de giro de las hélices a partir de la señal suministrada PWM por la controladora de vuelo (Nistal-Lastra, 2017).

La selección del ESC, fue realizada en base a la corriente máxima que se suministra al motor eléctrico (Cuadro 4), y al amperaje que deben suministrar los ESC que es de 19 A. También, se consideró la recomendación de Bonney et al., (2020), que indican que los valores de los ESC estén por lo menos un 30% arriba del valor de consumo máximo de los motores. Se escogieron ESC de 30 (A) debido que aseguran el amperaje de suministro necesario.

### **Selección de la batería.**

Las baterías utilizadas en los RPAS son del tipo “LiPo”, ya que, este tipo de baterías proporcionan gran cantidad de potencia en un periodo reducido de tiempo, además de ser ligeras, en comparación con las típicas baterías de plomo o Niquel-Cadmio (Nistal-Lastra, 2017). Moyano-Díaz (2014), menciona que, para seleccionar una batería hay que tener en cuenta:

- La intensidad de descarga constante (C).

- La capacidad de la batería (mAh).
- El voltaje de la batería (v).

**Constante de carga y descarga.**

Este parámetro se utiliza para identificar la capacidad de almacenamiento (carga) en la batería y señalar la intensidad de corriente a la que se puede descargar, para que no sufra daños (Fernández-Bobadilla, Torres-Landín, & Ramírez-Carmona, 2016).

La expresión matemática que define dicha constante es la siguiente:

$$C = \frac{Q}{1000}$$

Donde:

Q: Capacidad total de carga de la batería en (mAh)

C: Constante de carga/descarga en  $\left(\frac{mAh}{A}\right)$

Con la constante de carga/descarga de la batería, se puede calcular la corriente máxima que puede suministrar la batería,

$$Corriente_{max} = Ct \cdot C$$

Donde:

*Corriente<sub>max</sub>*: Capacidad corriente máxima que puede suministra la batería (A).

Ct : Intensidad de descarga constante (dada por el fabricante)

La tasa de descarga de la batería utilizada es de 50 C (Cuadro 5), lo que indica que el suministro de corriente máxima es de 200 A. Por lo tanto, la batería puede alimentar el sistema de potencia (ESC), control, comunicación y sensores, (mientras no excedan 200 A de corriente).

**Cuadro 5.** Características generales de la batería.

| <b>Características generales de la batería</b> |                   |
|--|-------------------|
| Número de celdas de batería                    | 3 celdas (11.1 v) |
| Dimensiones                                    | 137x42.5x23.8mm   |
| Capacidad                                      | 4000 mAh          |

|                               |             |
|-------------------------------|-------------|
| Peso                          | 405 g       |
| Intensidad de Descarga Máxima | 40C (55 A)  |
| Intensidad de Descarga Pico   | 50 C (200A) |

Fuente: Elaboración propia.

### **Cálculo del tiempo de vuelo.**

Para realizar el cálculo del tiempo de vuelo, se tiene en cuenta el consumo de los motores, ya que el resto de los componentes no consume demasiada corriente (Fernández-Bobadilla, Torres-Landín, & Ramírez-Carmona, 2016) y se considera que los vehículos estarán al 50 % del consumo máximo, en vuelos de avance horizontal, 20 % en vuelos axiales ascendentes y 20 % en vuelos a punto fijo (Serrano Cordero & Pérez Curutchet, 2017). Para calcular el tiempo de vuelo se utiliza la siguiente formula:

$$T = \frac{\text{Cap} \cdot \text{Vol}}{P_t}$$

Donde:

*T*: Tiempo estimado de vuelo (h).

*Cap*: Capacidad de almacenaje de la batería (mAh)

*P<sub>t</sub>* : Consumo total de los motores (W)

*Vol*: Voltaje de la batería (v)

De acuerdo con el cálculo del tiempo de vuelo y la corriente máxima que puede suministra la batería, se escogió una batería de 400mAh 3S (3 celdas), con voltaje nominal (11.1 v) y una intensidad de descarga constante de 50C, la cual genera un tiempo de vuelo de 7 minutos (teóricamente) y una intensidad de descarga de 200(A), suficiente para suministrar a los motores, la controladora y la cámara.

### **Diseño mecánico.**

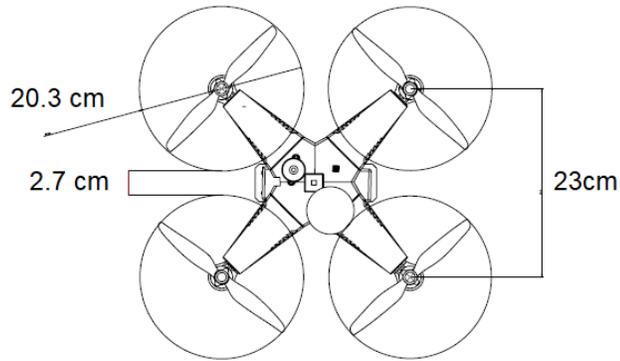
Un factor que está relacionado con el peso, es la resistencia mecánica y la fatiga de los materiales del chasis, aunque existen una gran cantidad de

materiales baratos y de bajo peso, muchos de ellos no son apropiados, debido a que su resistencia mecánica no es la adecuada (Nistal-Lastra, 2017)

El chasis o “frame”, es la estructura en la cual se colocan todos los componentes. El centro del chasis consta de elementos que soportan a los componentes electrónicos como la controladora, los receptores (RC, telemetría), GPS, la batería y la cámara. Por otro lado, en los brazos están montados los controladores de velocidad ESC, motores y hélices (Fernández-Bobadilla, Torres-Landín, & Ramírez-Carmona, 2016).

Los factores que se utilizan para elegir el correcto chasis son: el tamaño de la hélice y el espacio que ocupan los diferentes módulos electrónicos (Navarro-Rubio, 2019). La estructura del chasis debe tener una distancia entre motores igual al diámetro de la hélice, más una distancia de seguridad, que evitar que las hélices no choquen (Bonney et al., 2020).

En el mercado, se encuentra disponibles estructuras de distintas configuraciones, tamaños y materiales, los cuales poseen diferentes propiedades mecánicas. (Fernández-Bobadilla, Torres-Landín, & Ramírez-Carmona, 2016). Analizando las dimensiones y costos requeridos, se eligió el chasis f330, debido a que permite colocar motores con hélices de 8 pulgadas (20.32 cm), asegurando que las hélices no choquen entre sí (Figura 2). El chasis f330, permite colocar componentes, como la controladora, GPS, módulo de telemetría y cámara, además, es configurable con el modo de vuelo Cross Style (para fotografía) (Bonney et al., 2020).



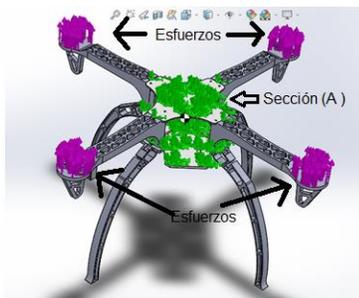
**Figura 2.** Dimensiones del chasis

Fuente: Elaboración propia.

**Análisis de esfuerzos.**

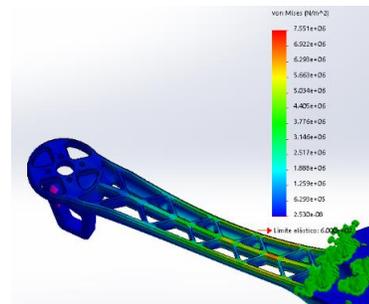
El análisis mecánico se realizó con la finalidad de asegurar la resistencia estructural de la aeronave conforme al peso que soportará. En la Figura 3 se muestra el chasis dibujado en el software Solid Works, el cual se sometió al análisis de simulación de esfuerzos. El material elegido para la simulación fue “Nailo 101”, y con un mallado de 0.5 mm.

Se aplicó una fuerza en cada extremo de los brazos del chasis de 4.9 N, tomando en cuenta que el peso máximo es de 2 kg (se multiplicó la masa por la aceleración de la gravedad, resultando 19.62 N), esta fuerza se dividió entre los 4 motores y se aplicó en la posición correspondiente a cada uno. La sección (A) de la Figura 3 se fijó durante la simulación, para encontrar la tensión de Von Mises en cada brazo (Figura 4)



**Figura 3.** Simulación de esfuerzos

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 4.** Tensión del chasis (Von Mises)

Fuente: Elaboración propia.

Con la simulación de esfuerzos en el chasis, se obtuvo la tensión mínima y máxima de Von Mises (Cuadro 6), una magnitud física proporcional a la energía de distorsión (Serrano Cordero & Pérez Curutchet, 2017), calculada mediante la fórmula:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2}{2}}$$

Donde:

$\sigma_{VM}$ : Tensión de Von Mises ( $N/m^2$ )

$\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ : Tensiones principales del tensor tensión en un punto de un sólido deformable ( $N/m^2$ ).

Con los valores de la tensión máxima del Cuadro 6, se calculó el factor de seguridad (FS) ( $FS = \frac{\sigma_{\text{limite del material (vonMises)}}}{\sigma_{\text{calculado (vonMises)}}$ ), resultando un valor de 7.95, un factor entre los límites recomendado por Serrano Cordero & Pérez Curutchet (2017).

**Cuadro 6.** Valores de la tensión (Von Mises).

| Nombre      | Tipo                 | Mín.                              | Máx.                             |
|-------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Chasis f330 | Tensión de Von Mises | 2.530e-08 $N/m^2$                 | 7.551e+06 $N/m^2$<br>Nodo: 12336 |
| Nailon 101  | Tensión de Von Mises | Limite elástico: 6.00e+07 $N/m^2$ |                                  |

Fuente: Elaboración propia.

### Centro de masa.

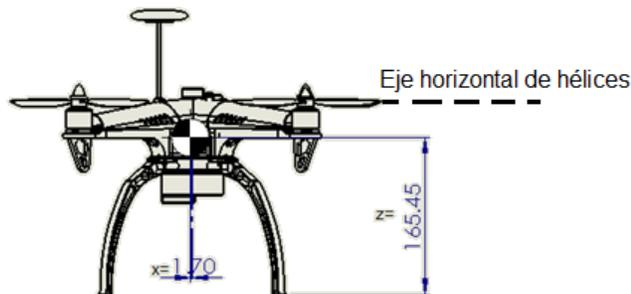
Con el modelo del prototipo del RPAS en Solid Works (CAD), se calculó el centro de masa, que permite, identificar anomalías del ensamblaje y rectificar la posición de los componentes. Un centro de masa por arriba del eje horizontal de las hélices (Figura 5), ocasionará un desbalanceo en el vuelo y necesitara un mejor ajuste en el control PID, pero si se tiene un centro de masa por debajo, en el ajuste del control PID los valores tendrán un rango más amplio de ajuste (Bonney et al., 2020). En el Cuadro 7 se muestra, los valores obtenidos del cálculo del centro de masa en Solid Works.

### Cuadro 7. Propiedades de masa del RPAS

| Propiedades de masa de componentes seleccionados |  |
|--|--|
| Masa   | Centro de masa   |
| 1495.27 g  | X = 1.7 mm<br>(Respecto al centro geométrico)<br>Y = -1.9 mm<br>(Respecto al centro geométrico)<br>Z = 165.45 mm<br>(Respecto a la base) |

Fuente: Elaboración propia.

Vargas-Fonseca (2015) menciona que, para que el RPAS pueda volar correctamente, el centro de masa debe estar situado en el centro de la estructura. Como se observa en el Cuadro 7 y la Figura 5, el centro de masa en eje "X" y "Y", no está geoméricamente centrado, debido a la ubicación de los dispositivos, GPS, sensor RGB y batería, por lo que fue necesario ajustar el control PID del RPAS.



**Figura 5.** Distancias del centro de masa.

Fuente: Elaboración propia.

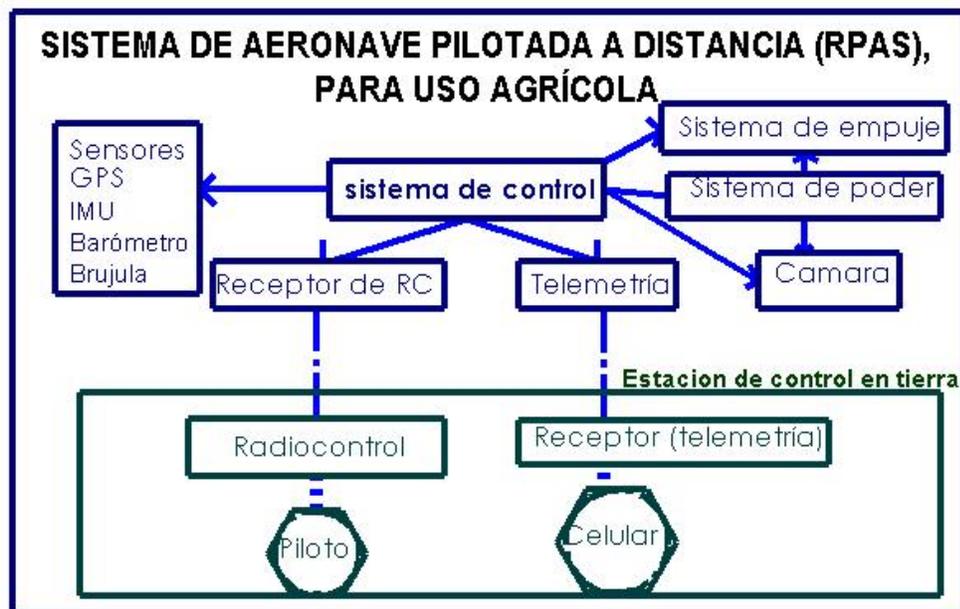
### Sistema de control

Uno de los requisitos más importantes, en el diseño de un RPAS, es la capacidad de ser autónomo (Nistal-Lastra, 2017), mediante una tarjeta de control, en la cual se pueden programar diferentes movimientos y órdenes (Nistal-Lastra, 2017). Existen tarjetas controladoras de vuelo disponibles, con diversas características y especificaciones técnicas, aunque, principalmente se manejan dos opciones, una es la controladora de vuelo AIO V2.0 y la otra es la controladora Pixhawk. Estas controladoras, son, proyectos de hardware libre;

por lo que su programación es accesible. (Fernández-Bobadilla, Torres-Landín, & Ramírez-Carmona, 2016).

El sistema de control tiene la función de evaluar continuamente el estado del RPAS y es el encargado de gestionar las funciones de navegación y control. Es considerado el cerebro del UAV, ya que ejerce un control directo sobre su comportamiento. Es responsable de la estabilización y la navegación de la aeronave, en modo de vuelo automático y en modo de vuelo manual. (Santana Cruz, 2017)

En la Figura 6, se muestra el diagrama del sistema de control del RPAS con las características necesarias para cumplir con los objetivos planteados, como es el uso de sensores para su geolocalización (GPS, IMU, barómetro y brújula) y comunicación (telemetría y radiocontrol).



**Figura 6.** Diagrama de la propuesta de RPAS

Fuente: Elaboración propia.

El controlador utilizado fue el Pixhawk, basado en el proyecto independiente de hardware libre de Ardupilot, un controlador de vuelo de alta calidad al menor precio posible (Nistal-Lastra, 2017). Este controlador cuenta con todas las

funciones mencionadas de geoposicionamiento, control y comunicación. En el Cuadro 8 se relacionan las características y sensores de la controladora pixhawk.

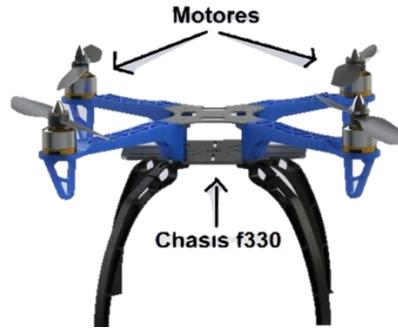
**Cuadro 8.** Especificaciones del controlador de vuelo Pixhawk.

| <b>Especificaciones del controlador de vuelo Pixhawk.</b>  |   |
|--|---|
| <b>Características</b>   | <b>Sensores</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vuelos autónomos (misiones programadas).</li> <li>• Comunicación (radio control, telemetría, wifi, bluetooth)</li> <li>• Geoposicionamiento (GPS), (RTK).</li> <li>• Disparado de cámara en waypoints.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• MPU6000 (acelerómetro y girocompás) (IMU)</li> <li>• Giroscopio</li> <li>• Acelerómetro, brújula (magnetómetro)</li> <li>• Barómetro</li> <li>• Sensores lidar (opcional).</li> <li>• Sensores externos, velocidad de viento, brújula, barómetro (opcional)</li> </ul> |
| <b>Interfaces</b>  | <b>Dimensiones</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Puertos serie UART, con control de flujo de HW</li> <li>• Entrada de satélite DSM / DSM2 / DSM-X</li> <li>• Entrada S.BUS</li> <li>• Señal de suma de PPM</li> <li>• Entrada RSSI (PWM o voltaje)</li> <li>• I2C, SPI, 2x CAN, USB</li> <li>• Entradas ADC de 3.3V y 6.6</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Peso 38 g.</li> <li>• Ancho 50 mm.</li> <li>• Altura 15.5 mm.</li> <li>• Longitud 81.5 mm.</li> </ul>  |

Fuente: Bonney et al., (2020).

### 3.4.2 Construcción del RPAS

Para realizar la construcción del RPAS, se monto del chasis, para disponer de la estructura en donde se ensamblaron todos los componentes, y montaron los motores en los extremos de los brazos (Figura 7).

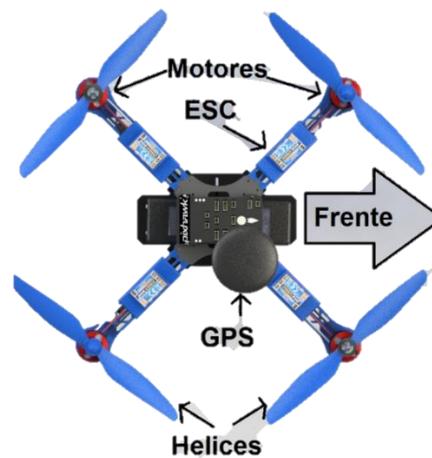


**Figura 7.** Chasis f330 con motores.

Fuente: Elaboración propia.

La controladora de vuelo pixhawk se situó en el centro del chasis, para que los acelerómetros y giroscopios funcionen correctamente (Fernández-Bobadilla, Torres-Landín, & Ramírez-Carmona, 2016), orientada con la flecha, apuntando hacia la parte delantera del vehículo (Figura 8) (Bonney et al., 2020). La controladora se montó con almohadillas de espuma amortiguadoras de vibraciones.

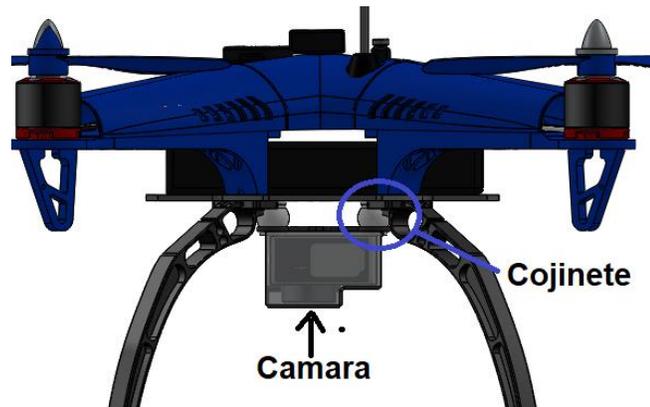
Los variadores de velocidad ESC, se colocaron en los brazos del chasis. El GPS se situó, en el lado derecho de la controladora de vuelo, sujetándolo con tornillos.



**Figura 8.** Alineación de la controladora, ESC y GPS

Fuente: Elaboración propia.

La cámara se sujetó a una base antivibración con cojinetes, para disminuir el movimiento y evitar distorsiones en las fotografías (Figura 9).



**Figura 9.** Colocación de cámara

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10 se muestra el cuadricóptero, ensamblado con todos los componentes: controladora (Pixhawk), GPS, batería, variadores de velocidad (ESC), motores, hélices y sensor RGB (cámara). Se utilizó una carcasa en la parte superior, para evitar que los componentes estuvieran en contacto con el polvo, generado por el movimiento de las hélices.



**Figura 10.** Ensamblaje final.

Fuente: Elaboración propia.

## Ensamble del sistema electrónico

En este apartado se detalla cómo se realizó toda la conexión eléctrica y electrónica del cuadricóptero desarrollado y como se distribuye la energía y las señales de la controladora de vuelo.

Como se observa en el diagrama general de conexión (Figura 11), la batería se encarga de suministrar energía a la controladora y a los ESC, mediante el módulo de poder. Además, el módulo de poder distribuye la potencia de entrada de la batería hacia los 4 controladores de velocidad (ESC).

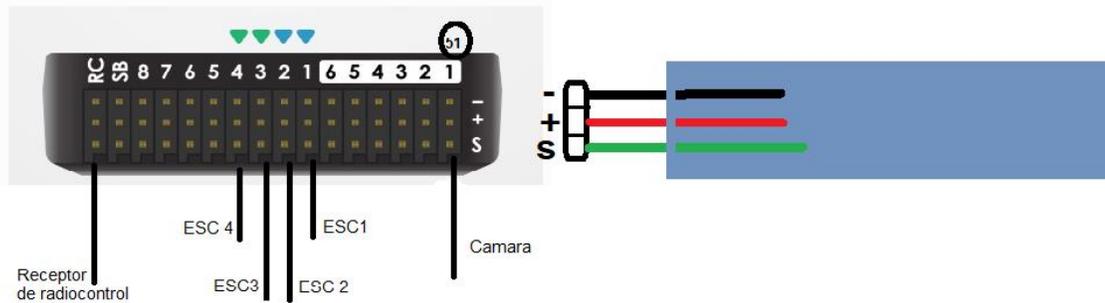
La controladora de vuelo alimenta al receptor de radio control, el GPS, el zumbador, la cámara, el módulo de telemetría y el led RGB. La controladora tiene puertos específicos para los componentes, en los cuales, se menciona el dispositivo a conectar y cada dispositivo contiene un conector con el número correcto de pines, para ser encajado.



**Figura 11.** Diagrama general de conexión.

Fuente: Elaboración propia.

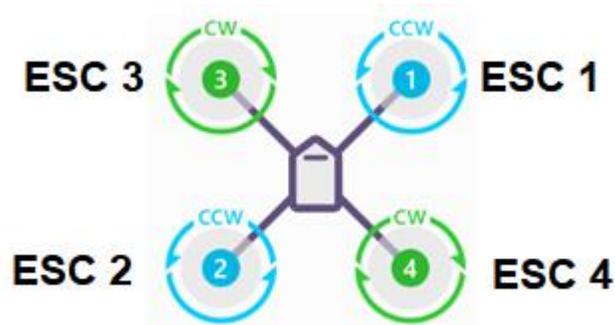
Los cables de control de los ESC se colocaron en los puertos PWM de la controladora (1-4, respectivamente), el cable de disparo automático de la cámara se conectó en el puerto 51 y el receptor de radio control en el puerto RC (Figura 12). Se puede observar, que la parte superior corresponde a la masa (-), la parte de en medio a la alimentación (+5v) y la parte de abajo a la señal PWM que envía o recibe la controladora.



**Figura 12.** Conexión de los ESC, cámara y receptor RC.

Fuente: Elaboración propia.

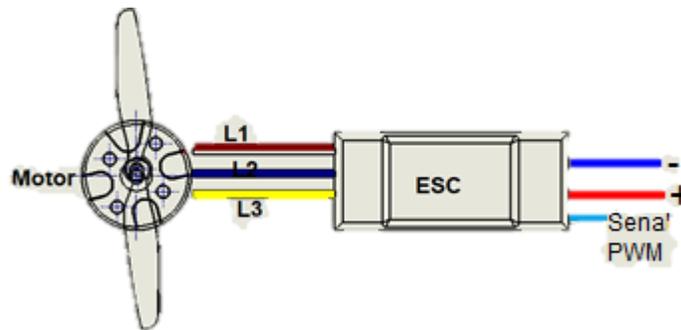
El número de ESC, corresponde al número de motor de la Figura 13, los cables de señal PWM de los ESC, se colocaron de acuerdo con el número de motor en los puertos 1-4 de la controladora de vuelo.



**Figura 13.** Numero de motor y sentido de giro.

Fuente: GyuJin et al., 2020.

Los ESC suministran energía a los motores mediante una señal trifásica (Figura 14) (Fernández-Bobadilla, Torres-Landín, & Ramírez-Carmona, 2016). Los ESC y los motores poseen 3 cables L1, L2 y L3, que se conectaron entre si (sin importar el orden o color). Los motores son capaces de girar tanto en el sentido horario (CW) como en sentido antihorario (CCW), el giro correcto de cada uno se muestra en la Figura 13, para ajustar el giro de los motores, se intercambiaron la L1 y L2 de los motores, que van a los ESC.



**Figura 14.** Conexión ESC-Motores.

Fuente: Elaboración propia.

### **Configuración Pixhawk**

Con el RPAS ensamblado, se procedió a configurar la controladora de vuelo con el programa “Mission Planner”, una herramienta que proporciona de manera simple y gráfica la configuración de aeronaves basadas en el protocolo de comunicación y control “MAVLINK” (Reyes-Pausà, 2017).

Primero se cargó el firmware, “ArduCopter V3.611” (específico para cuadricópteros), se calibró el acelerómetro, el compás, el radio, modos de vuelo (loiter, stabilize y RTL) y la telemetría a 20 mA. Además, se ajustaron los parámetros de vuelo y control del RPAS, en la lista “Full Parameter List”, con una velocidad de avance horizontal y vertical de 1 m/s, altura máxima de vuelo de 30m, voltaje mínimo de vuelo de 10.5v (activando el regreso a casa autónomo, RTL),

Un ajuste importante, es el control PID (Proporcional, Integral, Derivativo), que regula las correcciones de los errores ocasionados por las perturbaciones

originadas por el viento o diferencias en los motores y las hélices (Bonney et al., 2020). El control PID es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado (Serrano Cordero & Pérez Curutchet, 2017).

EL controlador PID, genera una señal de salida para contrarrestar el error existente entre la variable controlada y un valor de referencia del sistema (Berra Villaseñor, 2020). La ley de control está basada en la siguiente ecuación:

$$PID = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(t)dt + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

En donde:

$t$ : Tiempo

$e$ : Error

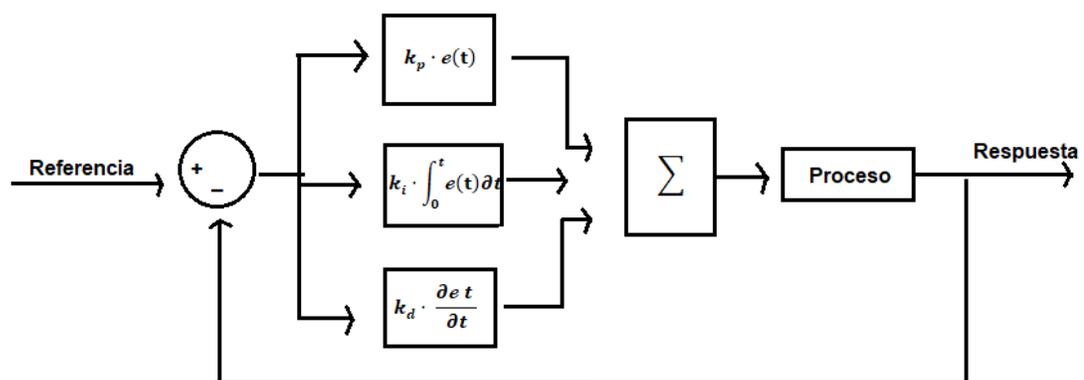
$k_p, k_i, k_d$ : Constantes

$k_p \cdot e(t)$ : Acción proporcional.

$k_i \cdot \int_0^t e(t)dt$ : Acción integral.

$k_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$ : Acción derivativa.

El espacio de estado de la ecuación de control PID se presenta en Figura 15.

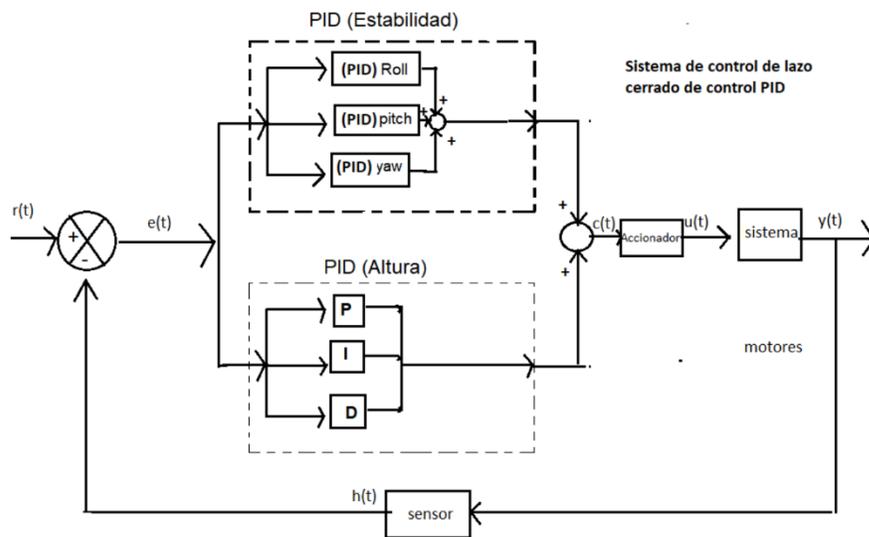


**Figura 15.** Espacio de estado de la ecuación del control PID.

Fuente: Elaboración propia.

En misiones autónomas, la controladora de vuelo pixhawk, incorpora un control PID, que corrige la altitud y estabilidad (Figura 16). El control se basa en los valores calculados por la IMU y el barómetro, los cuales miden el ángulo del vehículo y la altura, respectivamente. Estos valores son comparados con los deseados, para calcular el error, y así aplicarlo al sistema de control (Bonney et al., 2020).

En la Figura 16, se desarrolla el diagrama de control PID, de la controladora de vuelo pixhawk, utilizado para corregir la estabilidad y altura. El valor “Roll”: es la rotación sobre el eje X, permitiendo el desplazamiento hacia la derecha o izquierda. El valor “Pitch”, es la rotación sobre el eje Y, permitiendo el desplazamiento hacia adelante o hacia atrás. El valor “Yaw”, es la rotación sobre el eje Z, permitiendo rotar sobre su eje vertical



**Figura 16.** Diagrama del control PID, utilizado para corregir altura y ángulos, de la controladora de vuelo pixhawk.

Fuente: Elaboración propia.

Los ajustes de los valores PID se basaron en reglas, de acuerdo con Berra-Villaseñor (2020) y Bonney et al., (2020), que dan pautas para modificar las constantes, las cuales son:

Proporcional: Corrección inmediata, cuanto más alto esté el valor, mayor será la corrección que realice conforme al error actual.

- Un incremento en la ganancia proporcional reduce la estabilidad y genera vibraciones, debido a que ocasiona un sistema con valores que cambian bruscamente en cada momento.
- Un decremento demasiado bajo en el cuadricóptero, lo volverá lento a las entradas de control del piloto, debido a que los valores en tiempo real son insuficientes para su control.

Integral: Corrección conforme a los errores acumulados a largo del tiempo, agrega una corrección adicional para disminuir el error, de acuerdo con los errores anteriores.

- Al aumentar la ganancia integral se disminuye el error ocasionado por el viento y un centro de masa descentrado. Además, ayuda al vehículo a responder con mayor velocidad a las entradas de control.
- Un valor más bajo lo hará más suave, debido a que se moverá en distintas direcciones.

Derivada: Corrección que evita futuros cambios en el control, son valores contrarios a la corrección proporcional e integral, para evitar que estos valores generen cambios bruscos en el sistema.

- Un valor más alto hará que el RPAS responda con suavidad a las entradas de balanceo / cabeceo,
- Un valor bajo hará que el sistema sea más rápido a las entradas de control.

Conforme a las reglas de ajuste de control PID, de Berra-Villaseñor (2020) y Bonney et al., (2020), se realizaron diferentes pruebas de vuelo, para encontrar los valores correctos de P, I y D. Los valores máximos, que se utilizaron para empezar a corregir los valores de control PID en el RPAS, fueron de  $P=0.060$ ,  $I=0.050$  y  $D=0.0036$  en roll y pitch, recomendados por Bonney et al., (2020).

En el Cuadro 9, se muestra los valores promedio de ángulos y vibración, resultado de los distintos ajustes del control PID, con diferentes valores en P, I y D, en roll y pitch.

**Cuadro 9.** Ángulos y vibración con distintos valores PID

| <b>Ángulos y vibración, con distintos valores PID en "Roll", "Pitch".<br/>("Yaw en P=0.10 I=0.025 D=0)</b> |   |  |
|--|---|--|
| Valor: Roll y Pitch  | Giro en Roll y Pitch<br>(valores absolutos) | Vibración promedio   |
| Prueba 1<br>P=0.065, I=0.050, D=0.0036   | Máximo: 19°<br>Promedio: 11°                | Máximo: $20 \frac{m}{s^2}$<br>Promedio: $16 \frac{m}{s^2}$ |
| Prueba 2<br>P=0.047, I=0.050, D=0.0036   | Máximo: 10°<br>Promedio: 6°                 | Máximo: $18 \frac{m}{s^2}$<br>Promedio: $14 \frac{m}{s^2}$ |
| Prueba 3<br>P=0.032, I=0.050, D=0.0036   | Máximo: 10°<br>Promedio: 6°                 | Máximo: $18 \frac{m}{s^2}$<br>Promedio: $10 \frac{m}{s^2}$ |
| Prueba 4<br>P=0.046, I=0.047, D=0.0036   | Máximo: 9°<br>Promedio: 4°                  | Máximo: $13 \frac{m}{s^2}$<br>Promedio: $8 \frac{m}{s^2}$  |
| Prueba 5<br>P=0.045, I=0.030, D=0.0036   | Máximo: 11°<br>Promedio: 6°                 | Máximo: $13 \frac{m}{s^2}$<br>Promedio: $7 \frac{m}{s^2}$  |

Fuente: Elaboración propia.

Conforme a los resultados obtenidos de giro y vibración del Cuadro 9, se observó que, en la prueba 4 se encontraron los valores óptimos, que mantenían el giro para "Roll" y "Pitch dentro de los rangos establecidos de  $\pm 6^\circ$  y las menores vibraciones (no mayores a  $30 \frac{m}{s^2}$ ).

En el Cuadro 10, se muestra los valores de ajuste del control PID del RPAS, que utilizaron en las misiones de vuelo. Para los valores P de velocidad y PID de altura, se utilizaron los valores recomendados por Bonney et al., (2020), los cuales recomienda que, no se modifiquen estos parámetros.

**Cuadro 10.** Ajuste del control PID.

| <b>Parámetros extendidos de sintonización para el control PID (Mission Planner)</b> |       |     |              |
|---|-------|-----|--------------|
| Valores P para estabilizar el error de velocidad:                                   |       |     |              |
| Roll  | Pitch | Yaw | Posición X,Y |
|   |       |     |              |

|  |             |           |              |
|--|-------------|-----------|--------------|
| P=4.0  | P=4.0       | P=4.0     | P=1          |
| Valores PID para estabilizar el error de ángulos.                |             |           |              |
| Valor roll   | Valor pitch | Valor yaw | Velocidad XY |
| P=0.046  | P=0.046     | P=0.10    | P=2          |
| I= 0.047   | I=0.047     | I=0.025   | I=1          |
| D=0.0036   | D= 0.0036   | D=0       | D=0.5        |
| Valores PID para estabilizar el error de altura (Throttle Accel) |             |           |              |
| P=0.5  |             |           |              |
| I=1.0  |             |           |              |
| D=0.0  |             |           |              |

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.3 Evaluación del prototipo RPAS

La evaluación se realizó en el campo experimental “Tlapeaxco”, de la Universidad Autónoma Chapingo, en Texcoco, Estado de México, Latitud Norte 19°28'57.41", Longitud Oeste -99°6'33.69 (Figura 17). Mediante misiones de vuelos autónomas, que se realizaron a una altura de 20m, con una velocidad de avance horizontal de 1 m/s y con vientos no mayores a 5km/h, cubriendo un área de 2258  $m^2$  (0.23 ha).



**Figura 17.** Vuelo del RPAS.

Para planificar el vuelo (en campo), se utilizó un dispositivo móvil (celular) con la aplicación “Qground Contol”, además, el celular estaba enlazado al RPAS mediante telemetría (Figura 18).

Para planificar el vuelo (en campo), se utilizó un dispositivo móvil (celular) con la aplicación "Qground Control", además, el celular estaba enlazado al RPAS mediante telemetría (Figura 18).



**Figura 18.** RPAS, radiocontrol y telemetría.

En la aplicación de Qground Control, se definió el área de vuelo y ajustaron los parámetros de traslape de las fotografías con un 75% frontal y un 65% lateral (Figura 19). Los parámetros del sensor sony IMX117, de la cámara Hawkeye Firefly 8SE que se utilizó en el RPAS, se ajustaron con un ancho de 6.17 mm y un largo de 4.55 mm, una resolución de 4608 pixeles en lo ancho y 3456 en lo alto y una distancia focal de 3mm (Figura 19).

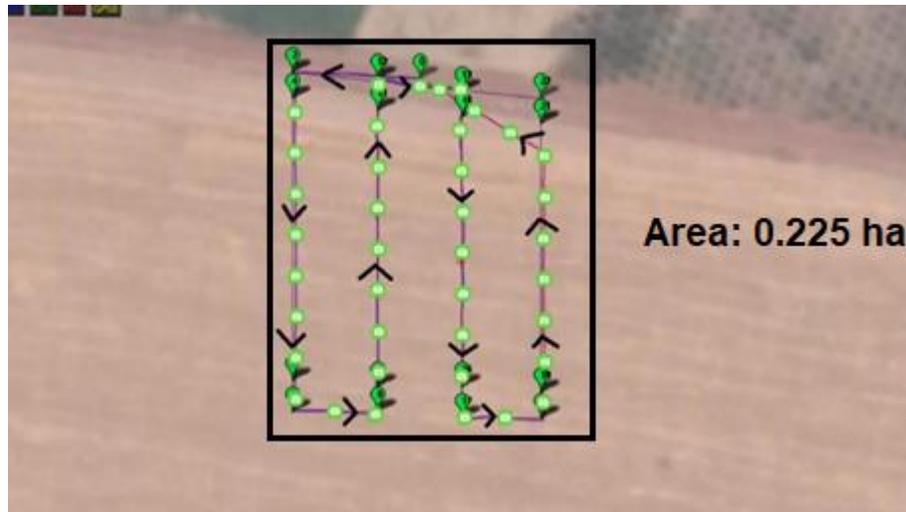


**Figura 19.** Planificación del vuelo en "Qground Control".

Otros valores que se ajustaron fueron: el punto de salida y el punto de regreso en la misión de vuelo, estos valores se definieron en el punto en donde se

encontraba el RPAS en el momento de configurar la misión (posicionado en una superficie plana y sin maleza).

Después de ajustar los valores mencionados, la aplicación calcula la cantidad de fotos que debe tomar y en qué localización (waypoints), de acuerdo con el traslape configurado y las características de la cámara. En la Figura 20, se observan los puntos (en verde), en donde se tomaron las fotografías.



**Figura 20.** Waypoints del plan de vuelo.

El plan de vuelo (configurado), se cargó al RPAS (mediante telemetría), y se realizaron los vuelos, la aplicación mostro el avance del vehículo en tiempo real y características del vuelo como, el tiempo de vuelo, el estado de la batería y recepción satelital.

### **Procesamiento.**

La información generada por los distintos sensores que posee el vehículo, como velocidad, altura, voltaje de la batería, consumo de corriente, posición geográfica, vibraciones y ángulo de posición (x,y,z), fue almacenada por la controladora vuelo.

Los registros de vuelo se descargaron mediante Mission Planner, en un archivo de lectura de Matlab (.mat), por lo cual, se necesitó convertir la información en

un archivo (.xlsx), mediante un código de programación desarrollado. Con la información en un archivo (.xlsx), formato de lectura de hoja de cálculo de Microsoft Excel, se graficaron los valores deseados.

#### 3.4.4 Análisis económico

En el Cuadro 11, se enlistan los costos de los componentes utilizados en la construcción del prototipo RPAS, siendo el costo total del RPAS de \$12,819. MXN (\$634. USD),

**Cuadro 11.** Costo de los componentes del RPAS.

| <b>Pieza</b>                    | <b>Descripción</b>   | <b>Proveedor</b>                             | <b>Costo (MXN)</b> |
|---------------------------------|--|--|--------------------|
| Controladora y accesorios.      | Pixhawk 2.4.8<br>GPS M8N, telemetría a 915mhz, mini OSD, interruptor de seguridad, buzzer, led RGB y conexión PPM e I2C. | AliExpes. com<br>(Readytosky Official Store) | \$2,707.           |
| Radiocontrol                    | Turnigy 9X (2.4 GHz).<br>Nueve canales (Modo 2) y receptor de 8 canales  | hobbyking.com                                | \$2,500.           |
| Batería                         | Bateria LIPO.<br>3S (3 celdas), 4000 mAH 50C.  | Ag electrónica.                              | \$1,155            |
| Cámara (sensor RGB)             | Hawkeye Firefly 8S, 90°.<br>Cámara deportiva sin distorsión  | banggood.com<br>(Hawkeye)                    | \$3,235.           |
| Cable de conexión de la cámara. | Cable AV de control remoto para cámara de Hawkeye Firefly 8s   | banggood.com<br>(Hawkeye)                    | \$245.             |
| Variador de velocidad (ESC)     | Manía Rey 30A<br>(Cuatro piezas)   | hobbyking.com                                | \$997.             |
| Motores brushless               | Racerstar BR2212 1400KV<br>Motor sin escobillas para modelos RC, 2-4 celdas.   | FC<br>Electronica.                           | \$1,440.           |
| Hélices                         | Juego de hélices 8045.<br>Dos piezas con rotación cww y dos cw.  | hobbyking.com                                | \$70.              |
| Chasis                          | Estructura para dron F330.   | FC<br>Electronica.                           | \$350.             |
| otros                           | termofit, pegamento, cinta de aislar, velcro, pasta y estaño para soldar.  |  | \$120              |
| <b>Total:</b>                   |  |  | <b>\$12,819.</b>   |

Fuente: Elaboración propia.

Nistal-Lastra, (2017), menciona que la construcción de vehículos, con plataformas con sistemas abiertos de control, ayuda a reducir los costos en la adquisición de RPAS. Como se observa en el Cuadro 12, los costos de adquisición de un RPAS comercial con características similares, oscilan desde los \$899. USD (\$18,076. MXN) hasta los \$1561 USD (\$31,387. MXN). Por lo que el costo del RPAS desarrollado, es 30% menor al del RPAS comercial más económico.

**Cuadro 12.** Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) disponibles en el mercado.

| <b>Plataformas comerciales de vehículos aéreos no tripulados (UAV).</b> |                 |                       |   |
|---|-----------------|-----------------------|---|
| Modelo  | Precio USD (\$) | Tiempo de vuelo (min) | Sensor (Resolución espacial)                          |
| DJI Mavic 2 pro   | 1599            | 29                    | RGB (5472x3648)                                       |
| Phantom 4 Pro V2.0  | 1599            | 30                    | RGB (4864x3648)<br>RGB (5472x3078)                    |
| Inspire 2   | 3299            | 23 ~ 27               | RGB (24Mp)<br>RGB (20.8Mp)                            |
| Parrot ANAFI Work   | 999             | 25                    | RGB (5344x4016)<br>RGB (4000x3000)<br>RGB (5344x4016) |
| Parrot ANAFI Thermal  | 1900            | 26                    | RGB (4608x3456)<br>Thermal (160x120)                  |
| Yuneec Mantis G   | 699.99          | 33                    | RGB (4160x2340)<br>RGB (4160x2340)                    |
| Yuneec Typhoon H  | 899.99          | 25                    | RGB (4:3/ 12.4 Mp)                                    |
| Yuneec Typhoon H520   | 1,561.79-       | 25                    | RGB (4:3/12<br>Megapíxeles)                           |

Fuente: GyuJin et al., 2020.

### 3.5 Análisis del funcionamiento del prototipo RPAS

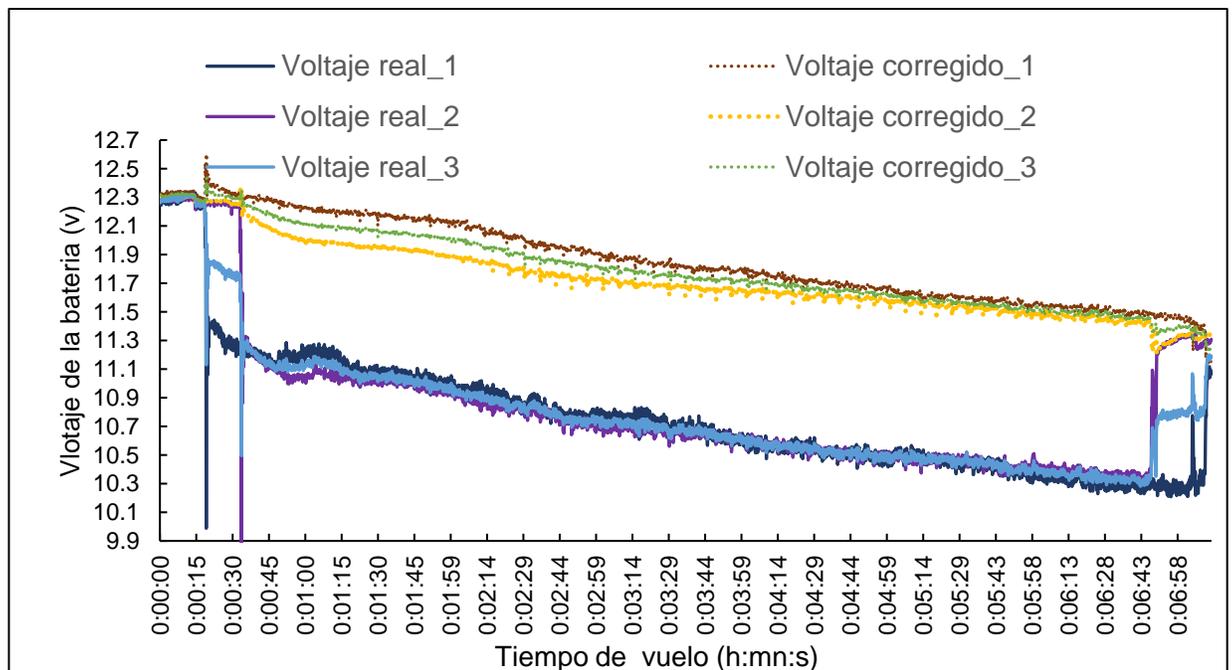
Se realizaron tres misiones de vuelo y se midieron los parámetros de voltaje, consumo, corriente, giro, vibración y altura de vuelo, que se utilizaron para la evaluación del funcionamiento del RPAS, los cuales se graficaron y analizaron, a continuación.

En la Figura 21, se observa el comportamiento del voltaje de la batería, durante las tres misiones de vuelo. La controladora de vuelo detecta, el voltaje de la

batería (voltaje real) y realiza una corrección (voltaje corregido), debido a que, el voltaje real, desciende rápidamente, ocasionado por la corriente suministrada a los ESC.

En nuestro caso, se utilizó el voltaje real, para evaluar el estado de la batería y configurar el regreso seguro a casa (RTL), el cual está configurado para activarse, al detectar voltajes mínimos de 10.5 v en la batería. Bonney et al., (2020), mencionan que se puede utilizar el valor del voltaje corregido de la batería, para alargar la duración del vuelo, pero reduce la vida útil de la batería.

En la Figura 21, se observa que en los primeros 30s aparecen picos negativos en el voltaje real, esto es debido a que, en ese momento, el RPAS inicio su ascenso a 20 m de altura, ocasionando un descenso brusco de voltaje. Conforme al tiempo transcurrido, el voltaje disminuye de los 12.5 v (carga completa) hasta los 10.4v, limitando el vuelo a aproximadamente 7 minutos (debido a que el regreso a casa RTL está configurado con un voltaje mínimo de 10.5 v).

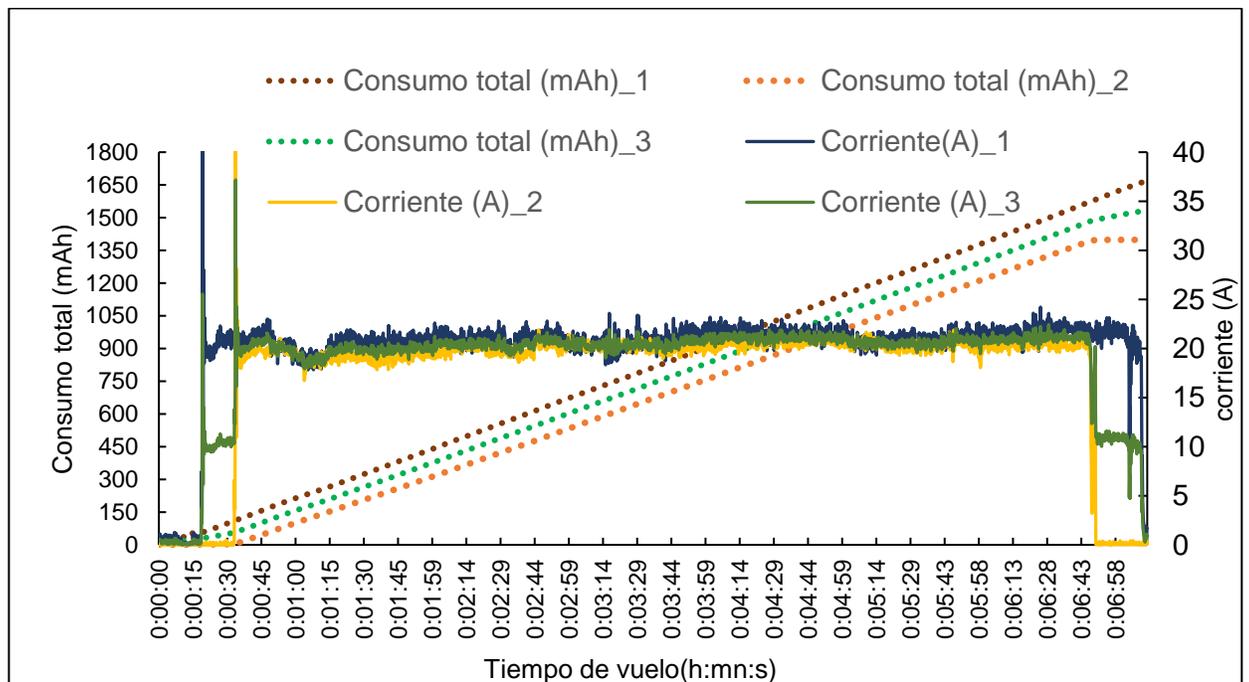


**Figura 21.** Voltaje del RPAS durante el vuelo.

El consumo medio de la batería en los tres vuelos fue de 1520 mAh, por 7 minutos de vuelo (aproximadamente) (Figura 22), un 38 % de la capacidad total

de la batería (4,000 mAh), por lo que, la batería puede soportar el doble de tiempo de vuelo (teóricamente), si el factor de seguridad de voltaje mínimo se configura conforme al voltaje corregido y no al voltaje real, aumentando considerablemente el tiempo de vuelo.

Como se mencionó en la sección de cálculo de potencia, la batería puede suministrar una intensidad de corriente continua de 200A, para poder alimentar todos los componentes electrónicos. En la Figura 22 se puede comprobar que la intensidad máxima de corriente, que se requirió durante los vuelos, no fue mayor a 23 A.

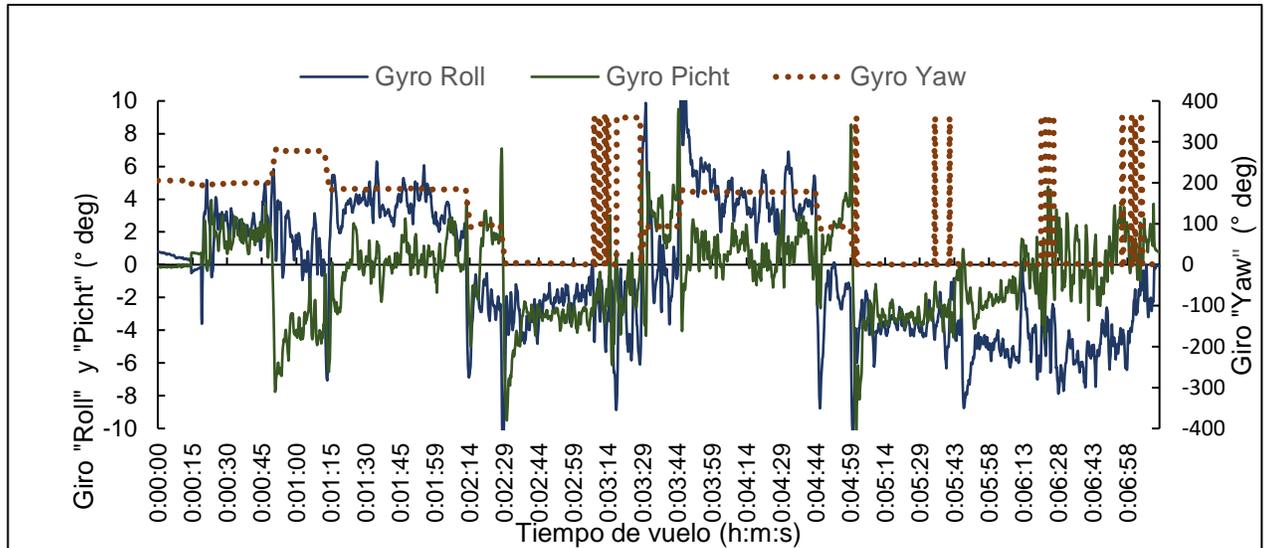


**Figura 22.** Consumo (A) y corriente(A) del RPAS

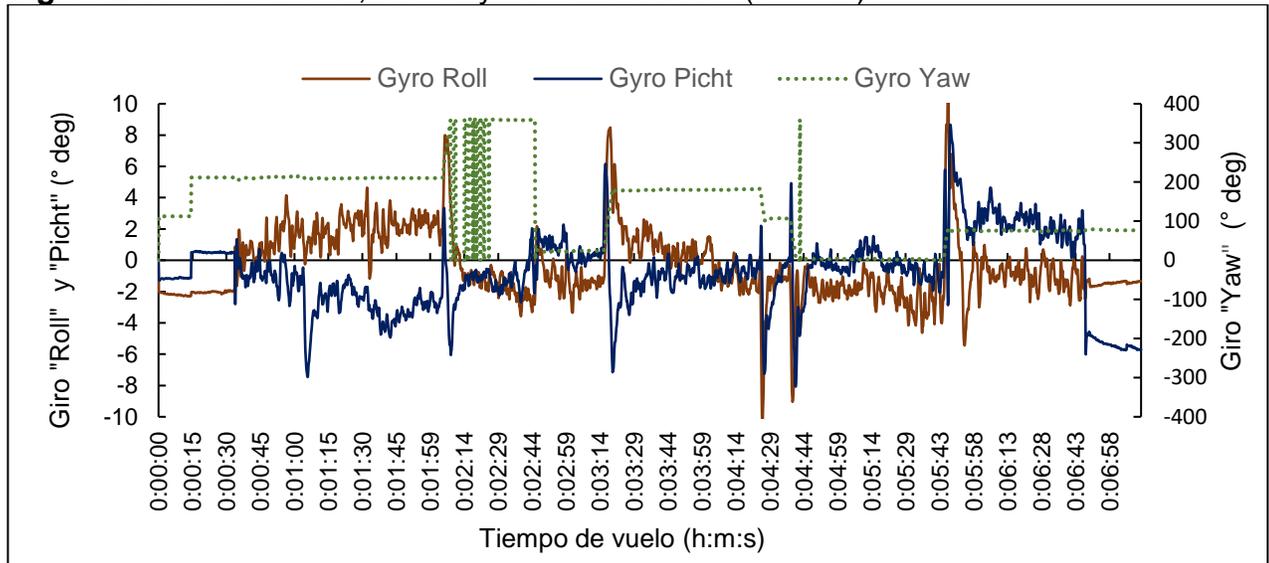
Uno de los puntos importantes para evaluar la estabilidad de un RPAS, es el giro en los ejes “Roll”, “Pitch” y “Yaw, estos valores representan la inclinación del vehículo en sus 3 ejes de movimiento (Fernández-Bobadilla, Torres-Landín, & Ramírez-Carmona, 2016). Para evaluar este factor se realizaron dos misiones de vuelo, que se muestran en la Figura 23 y Figura 24, en donde se puede apreciar que el giro para “Roll” y “Pitch” en los vuelos autónomo del RPAS,

varían de  $-6^\circ$  a  $5^\circ$ , estos valores, no superaron los límites recomendados por Bonney et al., (2020), que son  $\pm 6^\circ$  para "Roll" y "Pitch".

El giro en "Yaw" posee valores de 0-360°, debido a que, se representan los cambios de la trayectoria (giro sobre su propio eje), además, el origen está orientado al norte, por lo que cualquier despegue con el frente del RPAS que no esté orientado al norte tendrá valores de 0-360°.



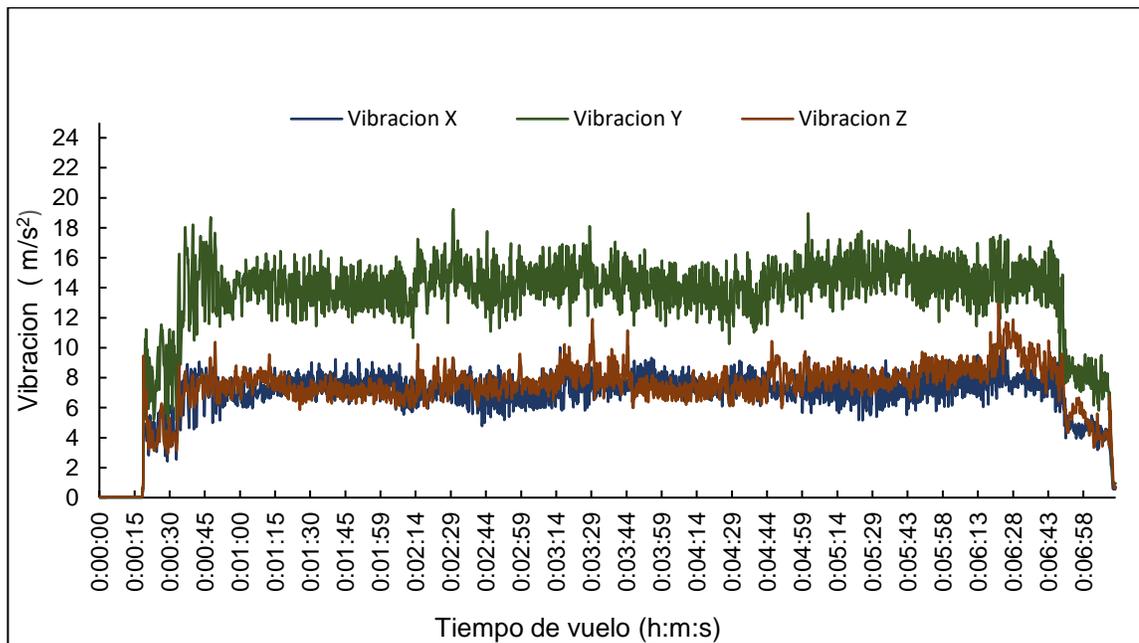
**Figura 23.** Giro en "Roll", "Pitch" y "Yaw" del RPAS (vuelo 1).



**Figura 24.** Giro en "Roll", "Pitch" y "Yaw" del RPAS (vuelo 2).

Otro parámetro que se utilizó para evaluar la estabilidad el RPAS, fue la vibración, que es la propagación de ondas, que producen deformaciones y tensiones sobre el chasis (movimientos repetitivos alrededor de la posición de equilibrio) (Bonney et al., 2020). En la Figura 25 se observa que la vibración media (de los tres vuelos), se encuentra entre 6 y  $16 \frac{m}{s^2}$ , por lo tanto, los valores obtenidos están dentro de los parámetros recomendados por Bonney et al., (2020) de  $0-30 \frac{m}{s^2}$ .

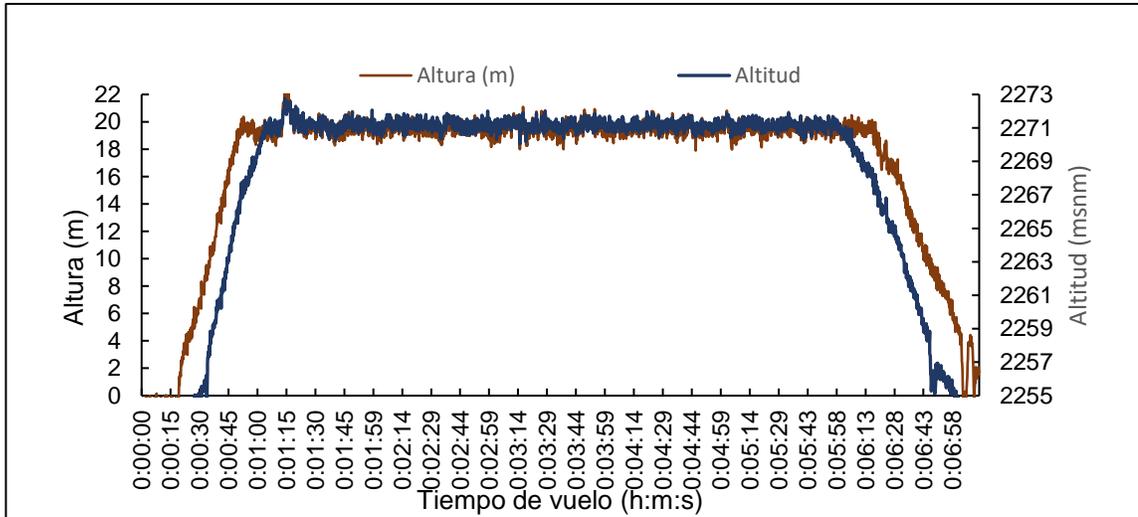
En los primeros 30 segundos de vuelo, la vibración oscilaba de 3 a  $18 \frac{m}{s^2}$ , debido a que se genera una burbuja de aire entre el suelo y el RPAS, conforme el ascenso la burbuja desaparece y las vibraciones disminuyen. Esta vibración, no es posible disminuirla con los ajustes en el control PID, solo con alturas de vuelo mayores a 5m desaparece la vibración (Bonney et al., 2020).



**Figura 25.** Vibración media en “X”, “Y” y “Z”.

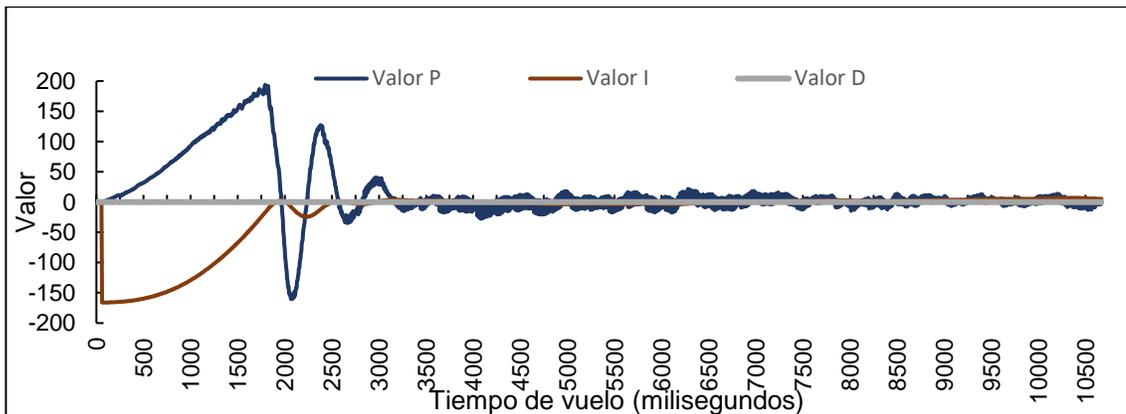
Se obtuvieron los valores medios de altura (m) y altitud (msnm), de los tres vuelos (Figura 26). Estos valores, son generados por el barómetro, que mide la

presión atmosférica y corregidos por el acelerómetro (Bonney et al., 2020). El control PID realizó la corrección de la altura de vuelo, manteniendo la altura en 20 m con un error de  $\pm 0.5\text{m}$ , un error aceptado en la fotogrametría.



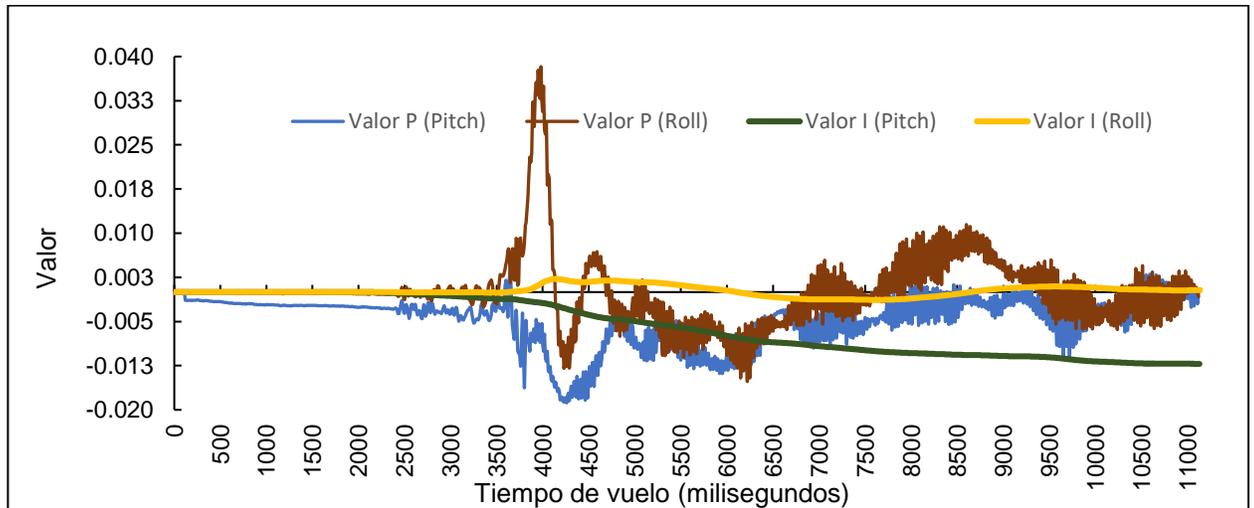
**Figura 26.** Altura media del RPAS en los vuelos.

Se obtuvo la gráfica del comportamiento de los valores de control PID, que corrigen la altura de vuelo (Figura 27). En los primeros tres segundos el valor de la acción proporcional “P”, oscila de  $\pm 200$  y la acción integral de -150 a 15, esto es debido a que el RPAS ha iniciado el vuelo y los parámetros buscan reducir el error de altura conforme al tiempo. Después de tres segundos, el control PID, estabiliza la altura que el sistema desea y el error tiende a cero.

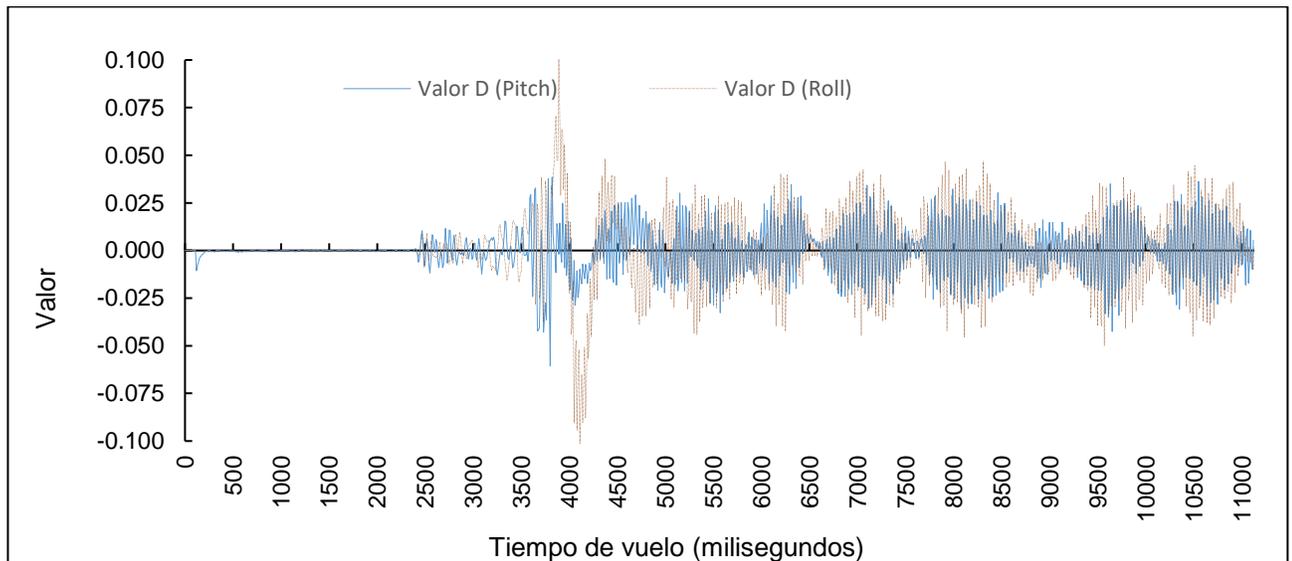


**Figura 27.** Valores del control PID de altitud.

El comportamiento de los valores del control PID de los ejes pitch (eje Y) y roll (eje X), se graficó en la Figura 28 y Figura 29. El RPAS, al iniciar el vuelo se encuentra en una superficie plana, por lo que el control PID detecta que el error es cercano a cero, en el segundo tres, el RPAS inicia el ascenso y es cuando el control PID disminuye los errores rápidamente, con un tiempo de estabilización de dos segundos, obteniendo un comportamiento robusto.



**Figura 28.** Valores del control P y I de pitch y roll.



**Figura 29.** Valores del control D de pitch y roll.

### 3.6 Conclusiones

Se diseñó y construyó un RPAS tipo cuadricóptero, con un peso menor a los 2 Kg y con un sistema que permite realizar vuelos autónomos y toma de fotografías georreferenciadas, mediante la instrumentación de un sensor RGB.

Se dibujó el RPAS en 3D, utilizando un sistema "CAD", lo que permitió modelar el centro de masa y esfuerzos ocasionados por el peso del vehículo, obteniendo un factor de seguridad de 7.95 con la tensión de Von Mises.

Se evaluó el funcionamiento del RPAS en cuanto a su consumo eléctrico, obteniendo un vuelo de 7 minutos con un consumo total de 1520 mAh, al utilizar el 38% de la capacidad total de la batería y un voltaje final de 10.3v, en vuelos con una altura de 20m y una velocidad horizontal de 1 m/s.

Se realizaron los ajustes del control PID, con valores de  $P=0.046$ ,  $I=0.047$  y  $D=0.0036$  en los ejes roll y pitch y valores de  $P=0.1$ ,  $I=0.025$  y  $D=0.5$  en el eje yaw, obteniendo un comportamiento robusto del sistema, con un tiempo de estabilización de dos segundos, vibraciones promedio de  $9 \frac{m}{s^2}$ , que oscilan entre 6 y  $18 \frac{m}{s^2}$ , y un giro promedio de 4 grados en los ejes X y Y.

### 3.7 Bibliografía.

- Berra Villaseñor, E. (2020). Cálculo de variables de control PID para Drones Cuadcopter. *Reaxión, Revista de divulgación tecnológica.*, 1-9. Obtenido de <http://reaxion.utleon.edu.mx/>
- Bonney, B., Siddharth, B. P., Shamaev, E., Walser, J., Gonçalves, L. V., Olson, C.O., Quilter, S. (30 de Agosto de 2020). <https://ardupilot.org/ardupilot/index.html>. Obtenido de Ardupilot.org: <https://ardupilot.org/copter/index.html>
- Christiansen, M. P., Stigaard-Laursen, M., Nyholm Jorgensen, R., Skovsen, S., & Gislum, R. (noviembre de 2017). Designing and Testing a UAV Mapping System for Agricultural Field Surveying. *Sensors*, 17(12), 19. doi:doi:10.3390/s17122703
- Dávila, P., Orna, J., Rosales, A., & Ávalos, E. (Abril de 2017). Diseño, Construcción de la Estructura Mecánica y Pruebas de Vuelo de un

- Hexacóptero de Monitoreo para Aplicaciones Militares. *Revista Politécnica*, 39(1), 11.
- Fernández-Bobadilla, H. A., Torres-Landín, I. J., & Ramírez-Carmona, U. (2016). *Diseño, Construcción y Control de una Aeronave Tipo Dron*. Ciudad de México, Mexico: Universidad Nacional Autónoma De México.
- Galimov, M., Fedorenko, R., & Klimchik, A. (June de 2020). UAV Positioning Mechanisms in Landing Stations: Classification and Engineering Design Review. *Sensors*, 20(13), 31.doi:10.3390/s20133648
- GyuJin, J., Jaeyoung, K., Ju-Kyung, Y., Hak-Jin, K., Yoonha, K., Dong-Wook Kim 1, K.-H. K.,Yong Suk, C. (20 de March de 2020). Review: Cost-Effective Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform for Field Plant Breeding Application. *Remote Sens.*, 12(6), 2-20. doi:10.3390/rs12060998
- Moyano-Díaz, S. (2014). *Diseño y Construcción de un Quadcopter*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/21902/102664.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Navarro-Rubio, D. (2019). *Análisis De Un Sistema De Vuelo De Rpas Con Controladora Px4 Y Subsistema De Visión*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Nistal-Lastra, J. (2017). *Diseño de un Drone Programable de Bajo Coste*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. Obtenido de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12091/396747.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Orna-Chávez, J. E., Balseca-Sampedro, O. F., Caicedo-Reyes, J., Mayorga-Pérez, D. F., & Viteri-Núñez, E. F. (February de 2017). Análisis Y Diseño De Una Aeronave No Tripulada Para Uso Agrícola. *European Journal of Scientific Research*, 135-156. doi: 10.19044/esj.2017.v13n6p135
- Ortega-Cárdenas, V. E. (2018). *Procedimiento Para La Captura De Datos Fotogramétricos Con La Ayuda De Aparatos Controlados Remotamente, Como Herramienta Para La Evaluación En Estabilidad De Taludes Y Difusión Con Realidad Aumentada*. Medellín, Colombia: Facultad de Minas, Ingeniería Civil, Universidad Nacional De Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68620>
- Pei-Hsiang, C., Der-Ming, M., & Jaw-Kuen, S. E. (July de 2019). Design, Manufacturing, and Flight Testing of an. *Applied Sciences*, 9(15), 22. doi:10.3390/app9153043
- Reyes-Pausà, P. (2017). *Diseño de un Multicóptero para Investigación Controlado Vía Terminal Android*. Valencia, España: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Informàtica, Universitat Politècnica de València.

- Santana Cruz, E. E. (2017). *Propuesta de Sistema Multi-UAV para Aplicaciones de Cobertura de Area*. Barcelona, Universitat Autònoma de Barcelona, España.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes, C. C. (2019). *NORMA Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, Que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano*. Mexico: Diario Oficial de la Federación.
- Serrano Cordero, C., & Pérez Curutchet, O. (2017). *Análisis, Diseño Estructural y Construcción de un Dron para la Detección de Minas Antipersona*. Catalunya, España: Universidad Politécnica de Catalunya. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/102000?show=full>
- Thibbotuwawa, A., Bocewicz, G., Bocewicz, G., Nielsen, P., & Banaszak, Z. (June de 2020). Unmanned Aerial Vehicle Routing Problems: A Literature Review. *Applied Sciences*, 10(13), 20. doi.org/10.3390/app10134504
- Vargas-Fonseca, L. M. (2015). *Desarrollo De Algoritmos Para El Seguimiento De Trayectorias de Un Quadrotor Utilizando Técnicas Modernas de Control don Álgebra Lineal*. Facultad de Ingeniería Eléctrica Y Electrónica.

## **4. EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE RPAS PARA EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CON IMÁGENES RGB.**

Juan J. Pérez-Paredes<sup>1</sup>.

Gilberto de J. López-Canteñs<sup>1\*</sup>.

Noé Velázquez-López<sup>1</sup>.

Irineo L. López-Cruz<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, MÉXICO. Autor de correspondencia: alelopez10@hotmail.com, tel. 01 (595) 9521500 ext.5556

### **4.1 Resumen.**

Los sistemas de aeronave pilotada a distancia (RPAS), se han convertido en una herramienta importante para la adquisición de información georreferenciada en la agricultura. En particular, en la nivelación de tierras se puede utilizar esta tecnología, haciendo más eficiente y preciso, los levantamientos topográficos de los campos agrícolas. Debido a lo anterior, y a la necesidad de contar con cartografía de alta resolución, se realizó la evaluación de un prototipo de RPAS para el levantamiento topográfico, a partir de imágenes RGB georreferenciadas, incluyendo puntos de control en tierra. Para ello, se realizó en el campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, México, una misión de vuelo autónoma, a una altura de 20m, con una velocidad de avance horizontal de 1 m/s y con vientos no mayores a 5km/h, cubriendo un área de 2151 m<sup>2</sup> (0.23 ha). Las imágenes RGB obtenidas con el RPAS, se corrigieron mediante puntos de control en tierra y, la nube densa de puntos generada se comparó

con un levantamiento topográfico GPS en postproceso, obteniendo errores absolutos y estándar de 0.020 y 0.024 m, respectivamente.

**Palabras clave:** Dron, Topografía, Fotogrametría, Georreferenciación, Puntos de Control en Tierra.

#### **4.2 Abstrac.**

Remote piloted aircraft systems (RPAS) have become an important tool for the acquisition of georeferenced information in agriculture. In particular, land leveling can use this technology, making agricultural field surveys more efficient and accurate. Due to the above, and the need to have high resolution cartography, an evaluation of a prototype of RPAS for topographic surveys, from georeferenced RGB images, including ground control points, was carried out. For this purpose, an autonomous flight mission was carried out in the experimental field of the Universidad Autónoma Chapingo, Mexico, at an altitude of 20m, with a horizontal advance speed of 1 m/s and with winds not higher than 5km/h, covering an area of 2151 m<sup>2</sup> (0.23 ha). The RGB images obtained with the RPAS were corrected by means of ground control points and the dense cloud of points generated was compared with a post-processing GPS topographic survey, obtaining absolute and standard errors of 0.020 and 0.024 m, respectively.

**Keywords:** Dron, Topography, Photogrammetry, Georeferencing, Ground Control Points.

### **4.3 Introducción.**

Tradicionalmente, el levantamiento topográfico se realiza mediante el uso de estaciones totales y sistemas globales de navegación por satélite, los cuales, permiten medir puntos en el campo, de manera precisa, para reconstruir una superficie. Estos sistemas son eficientes para medir áreas que no utilicen una gran cantidad de puntos, en los casos, en donde se necesite reconstruir una superficie con una gran cantidad de puntos, se requerirá más tiempo en la medición y por lo tanto tendrá un mayor costo (Tucci, Gebbia, Conti, Fiorini, & Lubello, 2019; Pedraza -Santos, 2019; Cucchiaro et al., 2020,).

Las técnicas tradicionales de levantamientos topográficos, como GNSS -RTK o levantamiento con estación total, no son ideales para áreas con un relieve accidentado, escarpado, con pendientes, inaccesibles o zonas con grandes desniveles, por lo que se han adoptado nuevas tecnologías y metodologías para la medición de superficies (Cucchiaro et al., 2020).

En la actualidad, los Sistemas de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS), están transformando el campo de la topografía, una alternativa para las mediciones y procesamientos de datos, mediante imágenes aéreas georreferenciadas y técnicas fotogramétricas para obtener información topográfica (Pedraza - Santos, 2019). Tucci et al., (2019) mencionan que el uso de RPAS, permite realizar muestreos rápidos y densos, de superficies complejas sin necesidad de acceder directamente a los sitios, disminuyendo los costos operativos y asegurando modelos más precisos. En consecuencia, estas técnicas ahora están reemplazando a las técnicas tradicionales de levantamientos topográficos con GNSS -RTK o estación total.

Los RPAS, permiten obtener información mediante fotogrametría, para la creación de cartografía de alta resolución (con tamaños de píxeles menores al  $\text{cm}^2$ ), sistemas de información geográfica, Modelos Digitales de Terreno, Modelos Digitales de Elevación y ortomosaicos, permitiendo realizar medidas lineales, volumétricas y modelamientos 3D (Zafra-Granados, 2018; Kuo-Jen, Chun-Wei, Chih-Ming, Ta-Chun, & Ci-Jian, 2020)

La fotogrametría, permite determinar las propiedades geométricas de los objetos o situaciones espaciales, a partir de imágenes con solapes que generan una visión estereoscópica (información tridimensional), por lo que es una técnica de medición de coordenadas 3d, que utiliza fotografías y puntos de referencia topográficos sobre el terreno (Florentino-Soriano, 2017).

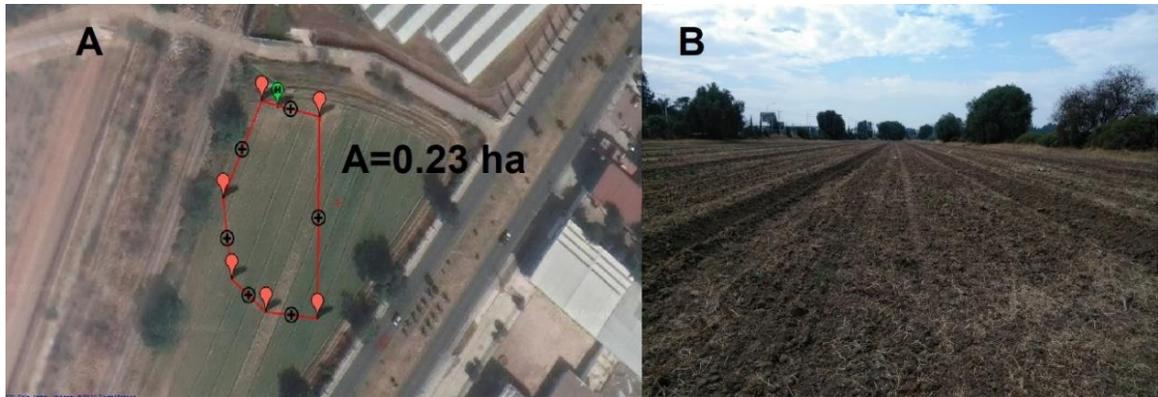
En aplicaciones topográficas, la fotogrametría, permite medir de forma remota y rápida grandes áreas, además, genera una alta densidad de puntos del terreno, en los modelos digitales. Obteniendo, resultados precisos y de bajo costo en comparación a la topografía tradicional (Tucci, Gebbia, Conti, Fiorini, & Lubello, 2019)

Teniendo en cuenta, las características necesarias para la fotogrametría, mediante el uso de RPAS y el beneficio que representaría en la nivelación de tierras agrícolas, el objetivo en este trabajo fue, evaluar un prototipo de RPAS para el levantamiento topográfico, a partir de imágenes RGB georreferenciadas, incluyendo puntos de control en tierra.

#### **4.4 Materiales y métodos.**

##### **4.4.1 Parcela experimental**

El estudio se realizó en el campo experimental "Tlapeaxco", de la Universidad Autónoma Chapingo, en Texcoco, Estado de México, Latitud Norte 19°28'59".56, Longitud Oeste -98°53'16".19, con una superficie de 0.23 ha (Figura 1 A). El suelo de la parcela es franco arcilloso y se encontraba con dos pases de rastra y libre de malezas, un factor importante para reducir el ruido ocasionado por la vegetación y así disminuir los errores en la medición de la altitud (Pedraza -Santos, 2019).(Figura 1 B).



**Figura 1.** Área de estudio. A) Vista satelital. B) Vista general

#### **4.4.2 Prototipo de RPAS**

Se utilizó un prototipo de RPAS, tipo cuadricóptero (Figura 2), desarrollado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo, equipado con cámara RGB Hawkeye Firefly 8SE con el sensor sony IMX117, que tiene resolución de 4608 por 3456 pixeles, tamaño de píxel de  $1.55 \mu\text{m}$  y distancia focal de 4mm. La controladora de vuelo modelo pixhawk, que utiliza, es de código abierto y supervisa el funcionamiento del RPAS en los diferentes modos de vuelo, controla la cámara y los giros del gimbal, además georreferencia las imágenes que son capturadas.



**Figura 2.** Prototipo de RPAS.

#### 4.4.3 Levantamiento topográfico GPS

Para la evaluación del RPAS y el procedimiento implementado, se realizó un levantamiento topográfico con un sistema GNSS Trimble R8 en modo postproceso, equipado con dos receptores GPS y controladora TSC3. Para la corrección de las coordenadas de posición y la altitud, se utilizaron los registros de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del instituto nacional de estadística y geografía (INEGI), específicamente la estación ICMX ubicada en las coordenadas  $19^{\circ} 24' 20.30''\text{N}$ ,  $99^{\circ} 10' 15.06''\text{O}$ , con una altitud geodésica de 2267.252 m.



A) Sistema GNSS Trimble



B) Receptor GPS de la RGNA

**Figura 3.** Equipamiento GPS.

Con la estación GPS se midieron un total de 40 puntos en el área de estudio, de los cuales cinco se utilizaron para la georreferenciación de los puntos de control en tierra (GCP) y los otros 35, corresponden a un muestreo aleatorio para la evaluación del procedimiento de levantamiento topográfico mediante el RPAS (Figura 4).

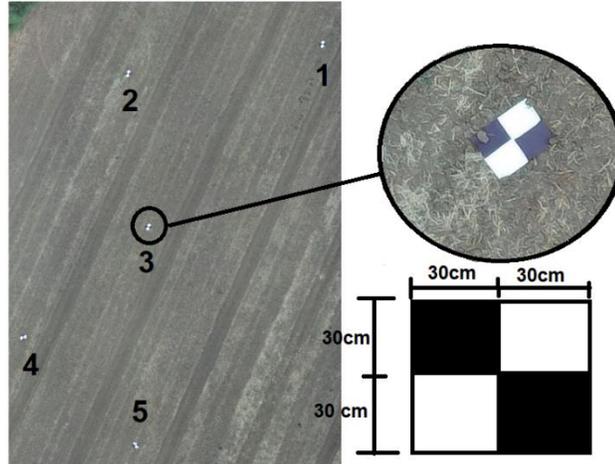


**Figura 4.** Puntos tomados en el área de estudio

#### 4.4.4 Proceso fotogramétrico

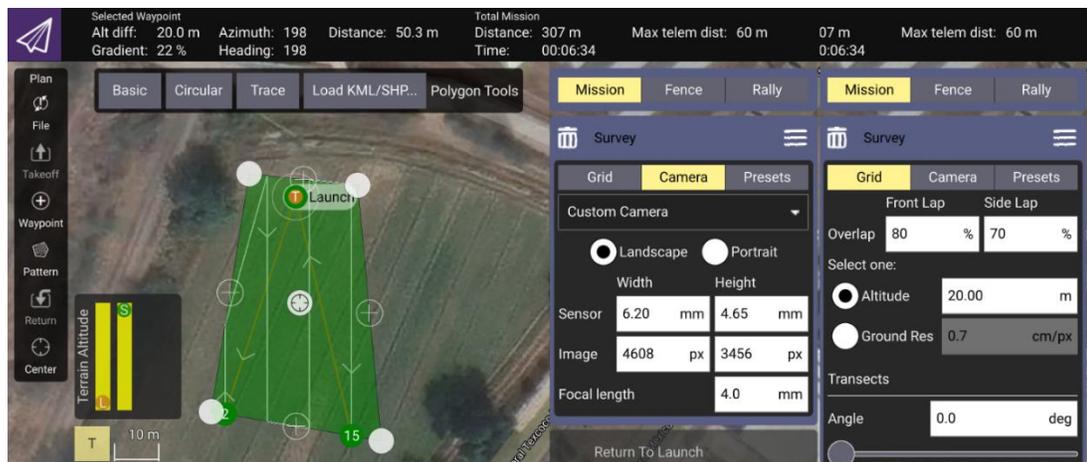
Se realizó una inspección de campo, identificando: el sitio de despegue y aterrizaje, objetos que pudieran interferir en el vuelo, la altura máxima de los árboles, así como las condiciones climáticas, en particular, la velocidad del viento que debe ser menor a 5 km/h. En base a las condiciones observadas en la parcela, se estableció una altura de vuelo de 20 m y una velocidad de vuelo de 1 m/s.

Para el vuelo fotogramétrico se colocaron cinco GCP, de los cuales se conocía su posición (x, y, z.). La ubicación de los GCP en el área de estudio se realizó siguiendo las recomendaciones de Lorduy-Hernández (2017), este autor plantea que debe colocarse un punto en el centro del área de estudio y los demás, esparcidos en el área a mapear (Figura 5). Las dimensiones de los puntos de control fueron de 60cm x 60cm, con un cuadrulado de 2x2, combinando negro-blanco (Figura 5).



**Figura 5.** Puntos de control (GCP), ubicados en la superficie de estudio.

Para la planificación del vuelo, se utilizó un dispositivo móvil (celular) enlazado al RPAS mediante telemetría, con la aplicación Qground Control. En la aplicación Qground Control, se ajustaron los parámetros de traslape de las fotografías, con un 80% frontal y un 70% lateral (Figura 6). Se ajustaron los parámetros de la cámara que se utilizó en el RPAS, con un ancho de 6.20 mm y un largo de 4.65 mm, una resolución de 4608 pixeles en lo ancho y 3456 en lo alto y una distancia focal de 4mm (Figura 6).



**Figura 6.** Ajuste de traslape y cámara en Qground Control.

Otros valores que se ajustaron fueron: el punto de salida y el punto de regreso en la misión de vuelo, estos valores se definieron en el punto en donde se encontraba el RPAS al momento de configurar la misión (posicionado en una superficie plana y sin maleza).

Después de ajustar los valores mencionados, la aplicación Qground Control, calcula la cantidad de fotos que debe tomar, que fue de 32 fotos, y en qué localización (waypoints), de acuerdo con el traslape y el sensor de la cámara. En la Figura 7 se observan los waypoints (en verde), en donde se tomaron las fotografías.



**Figura 7.** Plan de vuelo con waypoints.

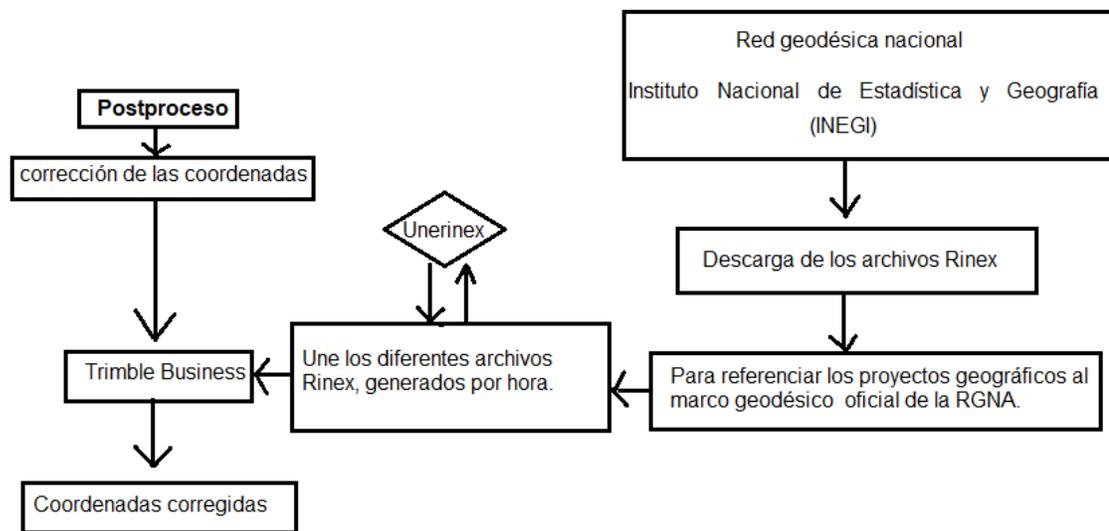
#### **4.4.5 Procesamiento de datos GPS en postproceso**

Los datos de las coordenadas X, Y y Z de los puntos GPS levantados en campo, contienen un error de posicionamiento (Claros-Zelaya, Guevara-Aguilar, & Pacas-Cruz, 2016), por lo que es necesario, realizar una corrección mediante un postproceso de la información obtenida.

Para la corrección de las coordenadas X, Y y Z, y referenciación al marco de referencia ITRF 2008 época 2010.0, se descargaron los archivos “Rinex”, de la estación ICMX en la página del INEGI ([www.inegi.org.mx/app/geo2/rgna/](http://www.inegi.org.mx/app/geo2/rgna/)), para

el periodo de tiempo comprendido entre las 10:00 y las 13:00 horas del día 20 de noviembre de 2020.

Los archivos Rinex descargados, se almacenan por horas, siendo necesario utilizar el software UNERINEXv5.1 para unir los archivos. Posteriormente, se importaron al software Trimble Business Center, para la corrección de las coordenadas de localización y altitud. En la Figura 8, se muestra el procedimiento seguido para la corrección de las coordenadas GPS medidas, utilizando el método de posicionamiento en postproceso.

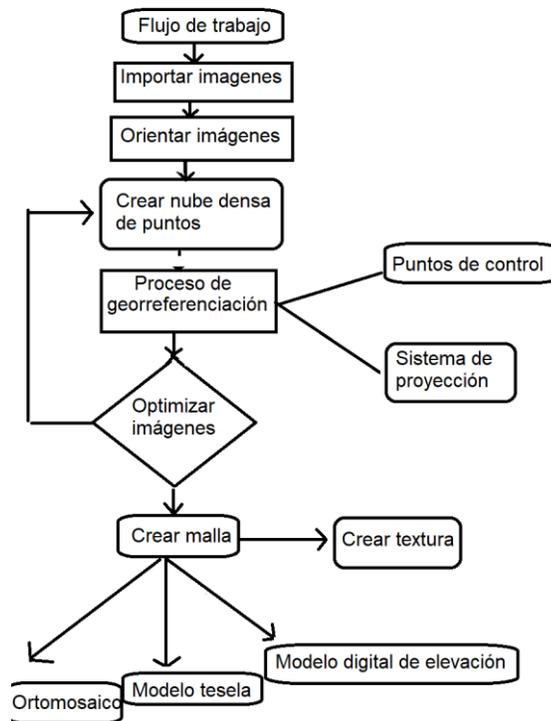


**Figura 8.** Diagrama de corrección de coordenadas en postproceso

#### 4.4.6 Procesamiento digital de las imágenes.

Con las 32 fotografías georreferenciadas, obtenidas del vuelo del prototipo de RPAS, se realizó el procesamiento fotogramétrico, utilizando el software PIX4D mapper versión 4.5.6. Con las imágenes cargadas en el software, se procedió a orientarlas mediante la generación de puntos de enlace, se añadieron los puntos de control en tierra para corregir las coordenadas y se generó la nube densa de puntos, **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** finalmente, se generó la malla y textura. y el modelo digital de elevación. En la

Figura 9, se muestra el procedimiento seguido para el procesamiento de las fotografías.



**Figura 9.** Proceso fotogramétrico

#### 4.4.7 Evaluación

La evaluación del proceso fotogramétrico se realizó comparando la altura del modelo digital de terreno, obtenido con las fotografías aéreas, y el levantamiento topográfico GNSS corregido, siguiendo los criterios, gráfico y estadístico. Para la evaluación gráfica se compararon las alturas geodésicas, medidas con el sistema GNSS y con el prototipo de RPAS, realizándose una valoración cualitativa del ajuste entre ambos conjuntos de datos. El segundo criterio de ajuste fue cuantitativo, para ello, se realizó un análisis de frecuencia de los errores absolutos y se calcularon los parámetros estadísticos del error relativo, error estándar y error absoluto, que son un indicativo de la dispersión entre los valores de altura geodésica obtenidos con el prototipo de RPAS.

El Error relativo ( $E_r$ ) se calcula como:

$$Er = \frac{1}{n} \sum \left( \frac{|Z1 - Z2|}{Z1} \right) * 100$$

El Error estándar (SE) se calcula como:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Z1 - Z2)^2}{n}}$$

El Error absoluto (Ea) se calcula como:

$$Ea = \frac{\sum|Z1 - Z2|}{n}$$

Donde:

Z1: Valor de la altura geodésica, medida con el sistema GNSS (m)

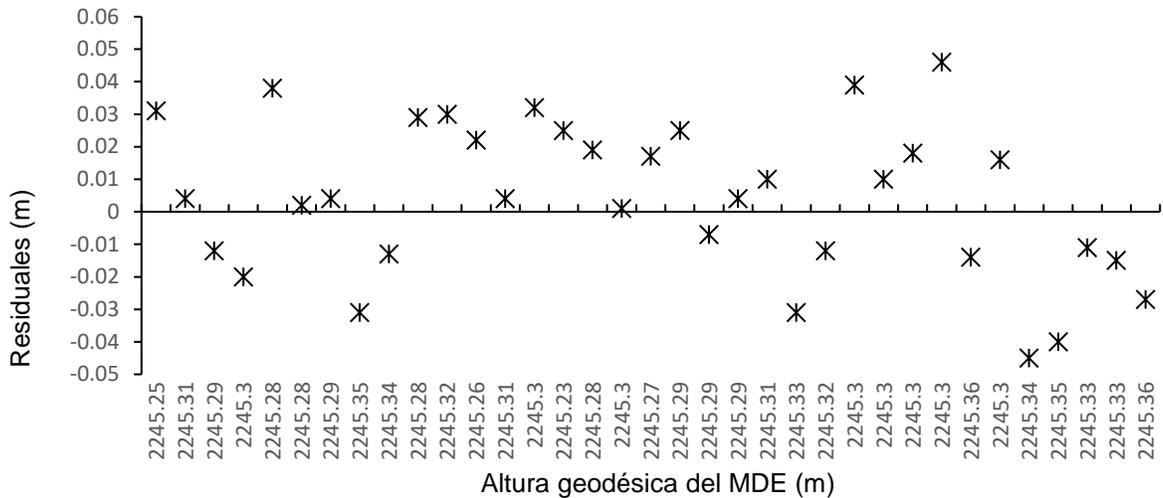
Z2- Valor de la altura geodésica, obtenida a partir del modelo digital de elevación (m)

n: Numero de muestras.

#### **4.5 Resultados y discusión**

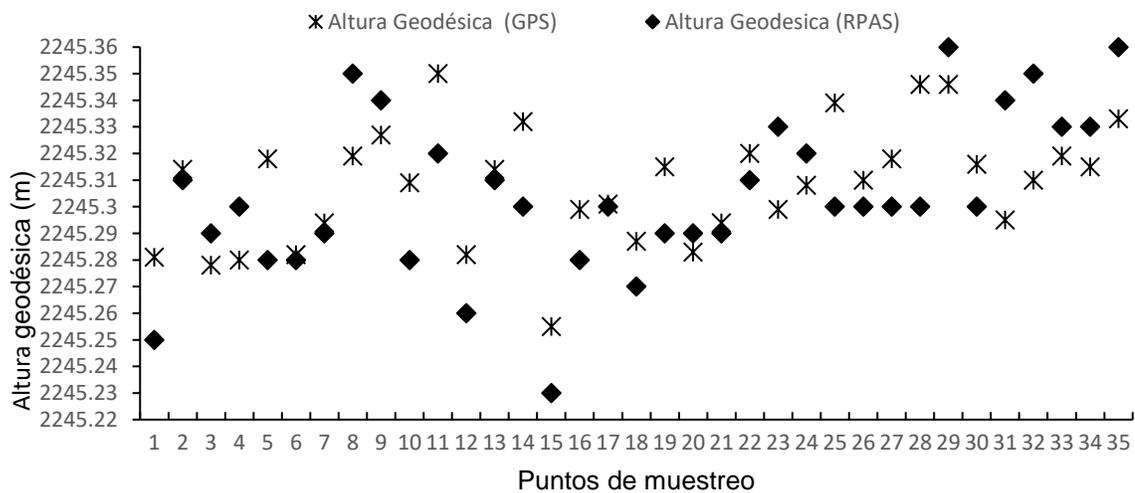
Se calcularon los valores residuales del modelo digital de elevación, es decir, la diferencia de la altura geodesia obtenida con el GPS y la medida en el MDE (los errores para los 35 puntos de muestreo del levantamiento topográfico).

En la Figura 10, se observa que los valores residuales del modelo digital de elevación tienen una distribución aleatoria alrededor de 0, en los cuales, el 85 % de los valores, se encontraron entre -0.031 y 0.033 m, siendo los errores pequeños, lo que permite aseverar que el MDE puede utilizarse para la estimación de la altura geodésica de superficies. El 15 % de los errores absolutos entre 0.034 y 0.049, se debe a la presencia de canales de riego en el área de estudio que influyo en el procesamiento de las imágenes. Además, el 37% del valor residual es negativo, lo que indica que, la altura obtenida con el MDE fue superior a la medida con el GPS.



**Figura 10.** Residuales de la altura geodésica del MDE

En la Figura 11, se observa que la altura geodésica del GPS, en la mayoría de los casos (22 puntos), es mayor que la altura geodésica del modelo digital, por lo que, el 63% de los puntos obtenidos a través del levantamiento GPS, sobreestima la altura geodésica obtenida con el modelo digital, resultado del procesamiento digital de las imágenes capturadas con el prototipo de RPAS.



**Figura 11.** Altura geodésica medida con el GPS y el modelo digital de elevación.

En los errores calculados de puntos de muestreo del levantamiento topográfico, el valor promedio total del error absoluto fue de 2 cm, el error estándar de 2.3 cm y el error relativo de 0.00089 %. Lo que indica que la precisión es alta, muy similar a los valores que se obtienen con un sistema GNSS trabajando en tiempo real, en la geodésica.

#### **4.6 Conclusiones**

Se obtuvo el procedimiento para realizar el levantamiento topográfico de una parcela, mediante el prototipo de cuadricóptero equipado, con fines nivelación de tierras.

Se minimizaron los errores en la altura geodésica, incorporando puntos de control en tierra para la generación de la nube densa de puntos y el modelo digital de elevación

A partir del análisis de los datos de levantamiento topográficos mediante el procesamiento de imágenes del dron y el sistema GNSS, se obtuvieron errores absolutos que fueron menores al 0.033 m en el 85% de los datos, por lo que pudiera considerar como una alternativa para realizar los levantamientos topográficos de terrenos agrícolas.

#### **4.7 Bibliografía.**

- Claros-Zelaya, R.-A., Guevara-Aguilar, A.-E., & Pacas-Cruz, N. R. (2016). Aplicación de Fotogrametría Aérea en Levantamientos Topográficos Mediante el Uso de Vehículos Aéreos no Tripulados. San Miguel, El Salvador: Ciudad Universitaria de Oriente.
- Cucchiaro, S., Fallu, D. J., Zhang, H., Walsh, K., Van Oost, K., Brown, A. G., & Tarolli, P. (17 de junio de 2020,). Multiplatform-SfM and TLS Data Fusion for Monitoring Agricultural Terraces in Complex Topographic and Landcover Conditions. *Remote Sens*, 12(12), 1-29. doi:10.3390/rs12121946
- Fernández-Movilla, S. (2019). Influencia De Los Puntos De Control Sobre El Terreno En La Precisión de Modelos Digitales de Superficies Generados Mediante Fotogrametría Aérea. Madrid, España: Universidad Politécnica De Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería De Montes, Forestal y del Medio Natural.

- Florentino-Soriano, R. C. (2017). Aplicación de Fotogrametría con RPAS para Mejorar la Efectividad en Cuantificación de la Explotación en la Cantera Santa Genoveva -2016. Lima Perú: Facultad De Ingeniería, Escuela Profesional De Ingeniería Civil.
- Kuo-Jen, C., Chun-Wei, T., Chih-Ming, T., Ta-Chun, L., & Ci-Jian, Y. (2020). Application of Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Acquired Topography for Quantifying Typhoon-Driven Landslide Volume and Its Potential Topographic Impact on Rivers in Mountainous Catchments. 10(17), 16. doi:10.3390/app10176102
- Lorduy-Hernández, S. (2017). Generación de Ortoimágenes Usando Vehículos Aéreos no Tripulados Aplicado a la Agricultura. Medellín, Colombia: Universidad Eafit , Departamento De Ciencias Físicas.
- Pedraza-Santos, A. (2019). Análisis Comparativo del Levantamiento Topográfico Tradicional y el Levantamiento Topográfico con RPAS en la Huaca Aznapuquio, Los Olivos 2019. Lima, Perú: Facultad De Ingeniería Escuela Académico Profesional De Ingeniería Civil.
- Tucci, G., Gebbia, A., Conti, A., Fiorini, L., & Lubello, C. (2019). Monitoring and Computation of the Volumes of of Photogrammetric Surveying. Remote Sens, 11(12), 27. doi:10.3390/rs11121471
- Zafra-Granados, Y. (2018). Manual Para El Postproceso De Imágenes Obtenidas A Partir De Una Aeronave Tripulada Remotamente (Drone) En Los Software Agisoft Photoscan Y Pix4d. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Obtenido de <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/14055>

## APÉNDICE A

### Abreviaturas usadas.

**Piloto del RPAS:** Persona que manipula los controles de vuelo de un sistema de aeronave pilotada a distancia.

**RPA:**(Remotely Piloted Aircraft - Aeronave Pilotada a Distancia): Aeronave no tripulada, que es pilotada desde una estación de pilotaje a distancia.

**UA:** (Unmanned Aircraft): Aeronave no Tripulada.

**Dron:** Aeronave no tripulada.

**VANT:** Un Vehículo Aéreo No Tripulado.

**UAV:** (Unmanned Aerial Vehicle - Vehículo Aéreo no Tripulado),

**UAS** (Unmanned Aircraft System): Sistema de Aeronave no Tripulada.

**RPAS:**(Remotely Piloted Aircraft System - Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia): Sistema Aéreo Tripulado Remotamente.

**RPAS de uso Comercial:** Sistema de aeronave pilotada a distancia destinado por el operador de RPAS a realizar tareas con fines de lucro.

**RPAS de uso Recreativo:** Es aquel sistema de aeronave pilotada a distancia que se destina por el operador de RPAS a la recreación.

**RPAS de uso Privado No comercial:** Sistema de aeronave pilotada a distancia, destinado por el operador de RPAS a realizar tareas sin fines de lucro.

**AP:** Agricultura de Precisión.

**GNSS:** Sistema mundial de navegación por satélite.

**LiDAR:** Detección de luz y rango.

**IMU:** Unidad de medida Inercial.

**PPM:** Pulso por segundo.

**RGB:** Rojo, verde y azul.

**RTK:** Cinemática en tiempo real.

**Waypoints:** Coordenadas para ubicar puntos de referencia tridimensionales utilizados en la navegación basada en GPS

## APÉNDICE B

| <b>Solicitudes de Patente, de Registros de Modelo de Utilidad y de Diseños Industriales</b>   |                          |   |                                |
|---|--------------------------|---|--------------------------------|
| <b>(Sistema de Información de la Gaceta de la Propiedad Industrial, 2020)</b>   |                          |   |                                |
| Título  | Número de solicitud (MX) | Solicitante(s)  | Fecha de Puesta en Circulación |
| UN SISTEMA DE VEHICULO AEREO NO TRIPULADO PARA INSPECCIONAR ACTIVOS FERROVIARIOS.   | MX/a/2020/001767         | BNSF RAILWAY COMPANY [US]                                     | 13/08/2020                     |
| ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE VEHÍCULO AÉREO PARA APLICACIONES DE SESADO REMOTO  | MX/u/2018/000706         | UNIVERSIDAD DE MONTERREY [MX]                                 | 13/08/2020                     |
| SISTEMA DE SEGUIMIENTO PARA MONITOR DE PARAMETROS CRITICOS DE PROTECCION CATODICA   | MX/a/2018/016009         | NTEGRIDAD DE INFRAESTRUCTURA DEL PACIFICO, S.A. DE C.V. [MX]  | 17/07/2020                     |
| UN VEHICULO AEREO NO TRIPULADO (UAV) Y UN SISTEMA PARA MONITOREAR Y MANTENER LUMINARIAS UTILIZANDO EL UAV                             | MX/a/2019/012151         | GREENSTAR RESEARCH AND DEVELOPMENT INDIA PRIVATE LIMITED [IN] | 17/07/2020                     |
| OPTIMIZACION DE LA ASIGNACION DE RECURSOS DE RADIO CON BASE EN INFORMACION DE TRAYECTORIA DE VUELO DE VEHICULOS AEREOS NO TRIPULADOS. | MX/a/2020/000074         | TELEFONAKTIEBOLAGET LM ERICSSON (PUBL) [SE]                   | 05/03/2020                     |
| DRON PARA COMPLETAR UNA TAREA DE FORMA AUTONOMA.  | MX/a/2019/007385         | WALMART APOLLO, LLC [US]                                      | 05/03/2020                     |
| SISTEMA PARA ASPERSIÓN DE FLUIDOS EN CULTIVOS   | MX/u/2019/000562         | Martin GARCÍA HERNANDEZ [MX]                                  | 14/01/2020                     |
| SISTEMA Y METODO PARA ENTREGA AUTOMATICA ENTRE VEHICULOS AEREOS NO TRIPULADOS Y VEHICULOS TERRESTRES AUTONOMOS.                       | MX/a/2019/010770         | WALMART APOLLO, LLC [US]                                      | 14/01/2020                     |
| SISTEMA DE RECUPERACION DE UAV AUTONOMO   | MX/a/2019/009749         | WALMART APOLLO, LLC [US]                                      | 14/01/2020                     |
| DRON AUTONOMO Y SELECCION DE HERRAMIENTAS Y ENTREGA   | MX/a/2019/006371         | WALMART APOLLO, LLC [US]                                      | 14/01/2020                     |
| MODELO DE NAVEGACION PARA DRONES CUATRIROTOR.   | MX/a/2018/007907         | INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE TEPEACA [MX]                | 14/01/2020                     |
| DIFUSION DE INFORMACION DE GEOLOCALIZACION EN UNA TRAMA DE RADIO TRANSMITIDA DESDE UN VEHICULO AEREO NO TRIPULADO.                    | MX/a/2019/011477         | TELEFONAKTIEBOLAGET LM ERICSSON (PUBL) [SE]                   | 10/12/2019                     |
| METODO Y DISPOSITIVO PARA CONTROLAR UN VEHICULO AEREO NO TRIPULADO  | MX 368890 B              | XIAOMI INC. [CN] ;  | 13/11/2019                     |

|   |                  |   |            |
|---|------------------|---|------------|
| SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE VEHICULO AEREO NO TRIPULADO (UAV) DE TEMPERATURA CONTROLADA  | MX/a/2019/010011 | WALMART APOLLO, LLC [US]  | 11/11/2019 |
| SISTEMA DE ENTREGA UAV GUIADO POR LASER.  | MX/a/2019/009737 | WALMART APOLLO, LLC [US]  | 11/11/2019 |
| SISTEMA DE APARTADO DE ARTICULOS PARA SU POSTERIOR COMPRA.  | MX/a/2019/005571 | WALMART APOLLO, LLC. [US]   | 11/11/2019 |
| SISTEMAS Y METODOS QUE UTILIZAN INTERCAMBIO COMPUTACIONAL A TRAVES DE MULTIPLES VEHICULOS NO TRIPULADOS PARA MONITOREO DE UN AREA GEOGRAFICA. | MX/a/2019/002714 | WALMART APOLLO, LLC [US]  | 11/11/2019 |
| SISTEMAS Y METODOS PARA VEHICULO NO TRIPULADO RECARGABLE CON ENERGIA SOLAR PARA MONITOREAR UN AREA GEOGRAFICA.                                | MX/a/2019/002710 | WALMART APOLLO, LLC [US]  | 11/11/2019 |
| SISTEMAS Y METODOS PARA IDENTIFICAR PLAGAS EN AREAS QUE CONTIENEN CULTIVOS A TRAVES DE VEHICULOS NO TRIPULADOS.                               | MX/a/2019/002646 | WALMART APOLLO, LLC [US]  | 11/11/2019 |
| SISTEMAS Y METODOS PARA IDENTIFICAR PLAGAS EN AREAS QUE CONTIENEN CULTIVOS A TRAVES DE VEHICULOS NO TRIPULADOS.                               | MX/a/2019/002646 | WALMART APOLLO, LLC [US]  | 11/11/2019 |
| SISTEMA DE DIRECCION DE UN DRON.  | MX/a/2017/009570 | PARADOX ENGINEERING SA [CH] ;SUPSI (SCUOLA UNIVERSITARIA PROFESSIONALE DELLA SVIZZERA ITALIANA) | 17/09/2019 |
| SISTEMA DE MONITOREO DE GANADO NO TRIPULADO Y METODOS DE USO.   | MX/a/2018/008785 | DINKLAGE FEED YARD, INC. [US]   | 21/08/2019 |
| MODULO DE EXTENSION DEL SISTEMA DE MOVIMIENTO EN TIERRA PARA DESPEGUE VERTICAL Y ATERRIZAJE DE VEHICULOS AEREOS NO TRIPULADOS.                | MX/a/2017/012941 | ARCHON TECHNOLOGIES S. R. L. [IT]   | 20/11/2018 |
| DISPOSITIVO DE PRUEBA DE ALGORITMOS DE CONTROL Y MEDICION DE LA POSE DE VEHICULOS AEREOS NO TRIPULADOS  | MX/a/2017/005377 | VILLANUEVA GRIJALVA [MX]  | 29/06/2018 |

## APÉNDICE C

Requerimientos generales de operación de un RPAS Micro. NORMA Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019 de la (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2019).

- El piloto debe operar el RPAS a una distancia de al menos 9.2 km de cada aeródromo.
- El piloto debe operar el RPAS a una distancia de al menos 0.900 km de cada helipuerto.
- El piloto de RPAS no debe dejar caer ni arrojar ningún objeto o material que pueda causar lesiones a personas o bienes.
- El piloto RPAS no podrá operar la aeronave si el vuelo no se puede realizar de manera segura. Esta condición debe determinarse durante una inspección previa al vuelo.
- El piloto RPAS no puede operar la aeronave a control remoto en áreas prohibidas, restringidas o peligrosas.
- El operador y / o piloto de RPAS no podrá utilizar la aeronave teledirigida para transportar mercancías peligrosas y / o sustancias prohibidas o para utilizar o transportar armas o explosivos.
- El piloto RPAS debe mantener el control de la trayectoria de vuelo de la aeronave teledirigida en todo momento.
- El piloto de RPAS no debe operar el RPAS de manera negligente o imprudente que ponga en peligro la vida o propiedad de otros.
- El operador y / o piloto del RPAS debe operar entre el amanecer y el atardecer, a menos que el operador del RPAS reciba un permiso de la autoridad aeronáutica para vuelos nocturnos de acuerdo con el artículo 8 de esta Norma Oficial Mexicana.
- El piloto RPAS debe ceder el paso a toda aeronave tripulada en todo momento, sin excepción, a menos que la aeronave teledirigida y la aeronave tripulada estén bajo control positivo del control de tráfico aéreo.
- A menos que exista un permiso de operación especial, el piloto del RPAS no puede operar desde vehículos en movimiento en el modo de operación restringido, a menos que el vehículo se esté moviendo sobre el agua, y esto es esencial para su correcto funcionamiento.
- Las operaciones RPAS que provoquen accidentes o incidentes o daños a terceros deben informarse al mando del aeropuerto más cercano con el mayor detalle posible.

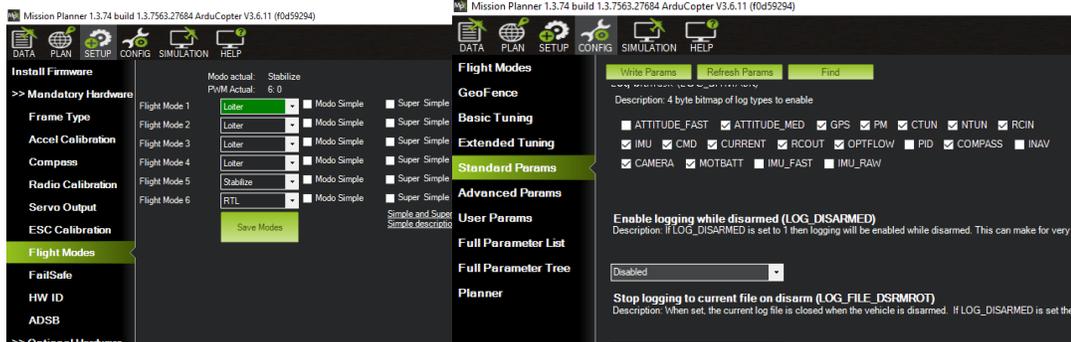
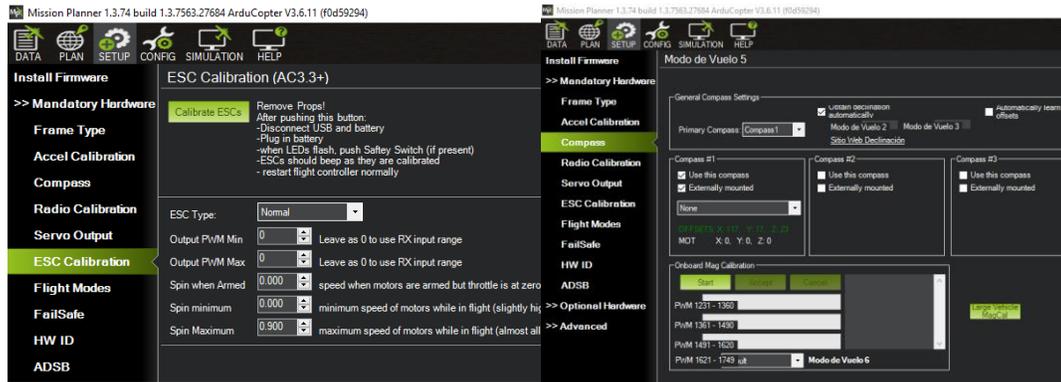
## APÉNDICE D

| <b>Valores de ajuste de vuelo con la controladora Pixhawk (Arducopter V3.6.11).</b> |       |                             |   |
|---|-------|-----------------------------|---|
| Comando   | Valor | Unidad                      | Descripción   |
| ANGLE_MAX   | 3000  | grados                      | Ángulo máximo -de inclinación-durante los vuelos.   |
| ATC_THR_MIX_MAN   | 0.5   |                             | Priorización- del acelerador frente al control de altitud (valores más altos, significan que priorizamos el control de altitud, frente al -acelerador). |
| BATT_FS_CRT_ACT   | 2     | 2: RTL<br>regreso<br>a casa | Acción que realizar el vehículo si la una batería está en estado crítico  |
| FLTMODE_CH  | 6     |                             | Canal RC usado para el control de los- modos de vuelo.  |
| INS_GYRO_FILTER   | 40    | Hz                          | Filtro de frecuencia de corte de los giróscopos.  |
| INS_STILL_THRESH  | 2.5   |                             | Umbral de tolerancia a la vibración para determinar si el vehículo está inmóvil.  |
| LOIT_ACC_MAX  | 500   | cm/s/s                      | Aceleración máxima de corrección en modo loiter (valores altos, hacen que el multirrotor corrija los errores de posición de forma más agresiva).        |
| LOIT_BRK_ACCEL  | 250   | cm/s/s                      | Aceleración de frenado (modo loiter), los valores más altos detienen el RPAS más rápidamente  |
| LOIT_SPEED  | 70    | cm/s                        | Velocidad máxima horizontal (modo loiter).  |
| MOT_BAT_VOLT_MAX  | 12.6  | v                           | Voltaje máximo de la batería  |
| MOT_BAT_VOLT_MIN  | 10.5  | v                           | Voltaje mínimo de la batería.   |
| MOT_THST_EXPO   | 0.65  |                             | Exponente de la curva de empuje motor   |
| PILOT_SPEED_DN  | 50    | cm/s                        | Velocidad Máxima vertical para descender  |
| PILOT_SPEED_UP  | 70    | cm/s                        | Velocidad Máxima vertical para ascender   |
| THR_DZ  | 150   | PWM                         | Porcentaje de la zona muerta por encima y por debajo del acelerador, para mantener la altitud.  |
| WPNAV_ACCEL   | 100   | cm/s/s                      | Aceleración horizontal utilizada durante las misiones.  |
| WPNAV_SPEED   | 100   | cm/s                        | Velocidad que la aeronave durante una misión.   |
| WPNAV_SPEED_DN  | 40    | cm/s                        | Velocidad que la aeronave mientras desciende durante una misión.  |
| WPNAV_SPEED_UP  | 70    | cm/s                        | velocidad que la aeronave al subir  |

durante una misión.

## APÉNDICE E

Ajustes del cuadricóptero en Mission Planner.



## APÉNDICE F

Código en Matlab para extraer información de un archivo (.mat) y convertirlo en (.xlsx):

```
clc
clear
cd
folder=cd('C:\Users\JUANJO\Desktop\tesis y articulos\Matlab_graficas_exel');
if strcmp(folder, cd)==1
else
    folder=cd('C:\Users\JUANJO\Desktop\tesis y articulos\Matlab_graficas_exel');
end
load("datos_vuelo", '-mat');
TITULO= {'VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO'};
%%Titulos=Seen(:);
Titulos={['Hora de vuelo(hrs)'} {'Tiempo de vuelo (s)'} {'Voltaje de la bateria(v)'} {'Voltaje de la
Bateriasin sin caida (v)'} {'Consumo de corriente (A)'} {'Consumo de corriente total (A)'} {'Giro
(Roll)'} {'Giro (Pitch)'} {'Giro (Yaw)'} {'Vibracion (X)'} {'Vibracion (Y)'} {'Vibracion (Z)'} {'Altura (m)'}
{'latitud (°)'} {'Longitud (°)'}];
%%titulo_tiem={'TIEMPO'};
datos_tiempo1=(1:2893);    %(12:20:11):(12:27:07);
datos_tiempo2=(1:2893);
datos_bateria1=BAT(:,3);
datos_bateria2=BAT(:,4);
datos_corr1=BAT(:,5);
datos_corr2=BAT(:,6);
datos_giro1=AHR2(:,3);
datos_giro2=AHR2(:,4);
datos_giro3=AHR2(:,5);
datos_vibx=VIBE(:,3);
datos_viby=VIBE(:,4);
datos_vibz=VIBE(:,5);
datos_gps1=AHR2(:,6);
datos_gps2=AHR2(:,7);
datos_gps3=AHR2(:,8);
```

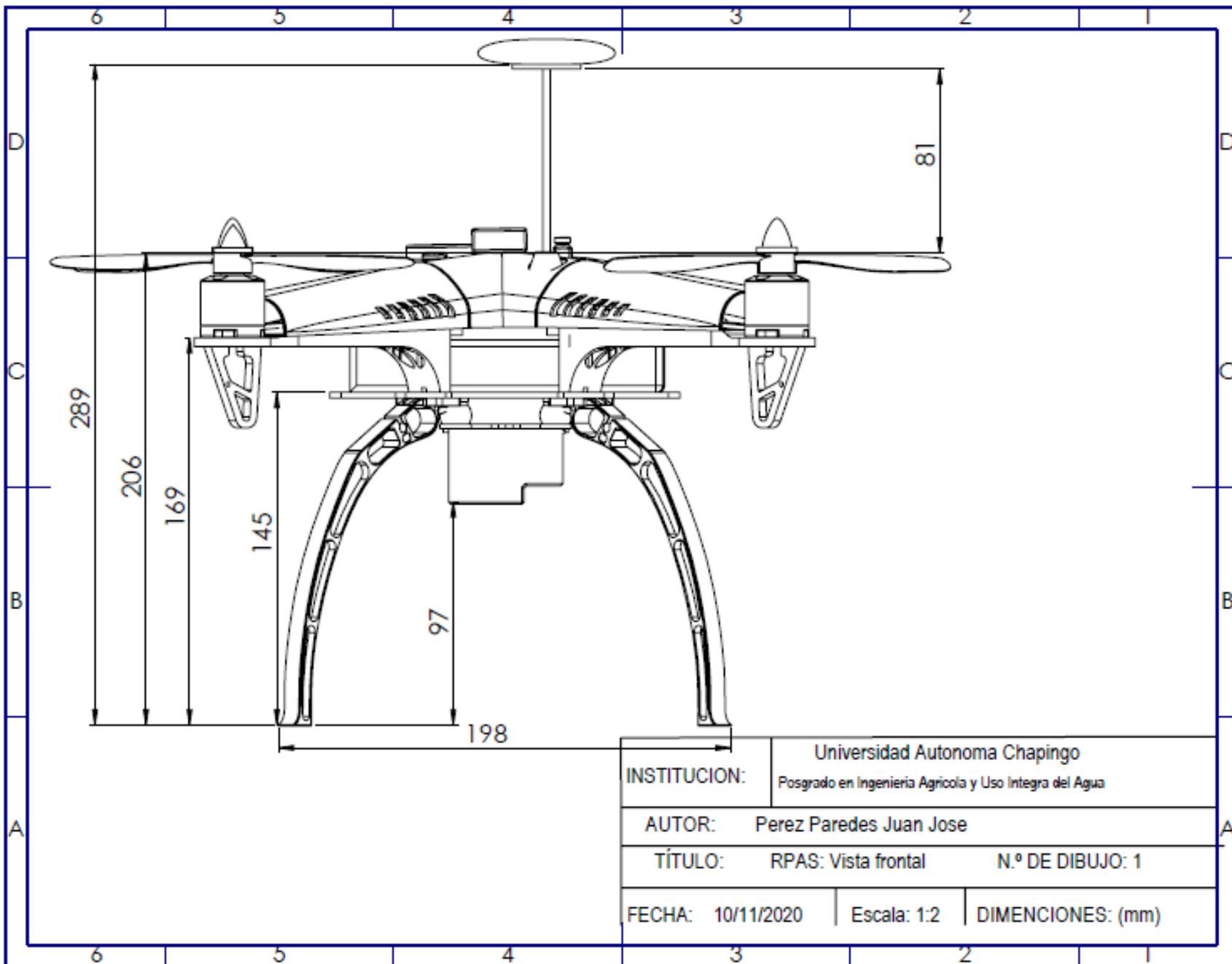
```

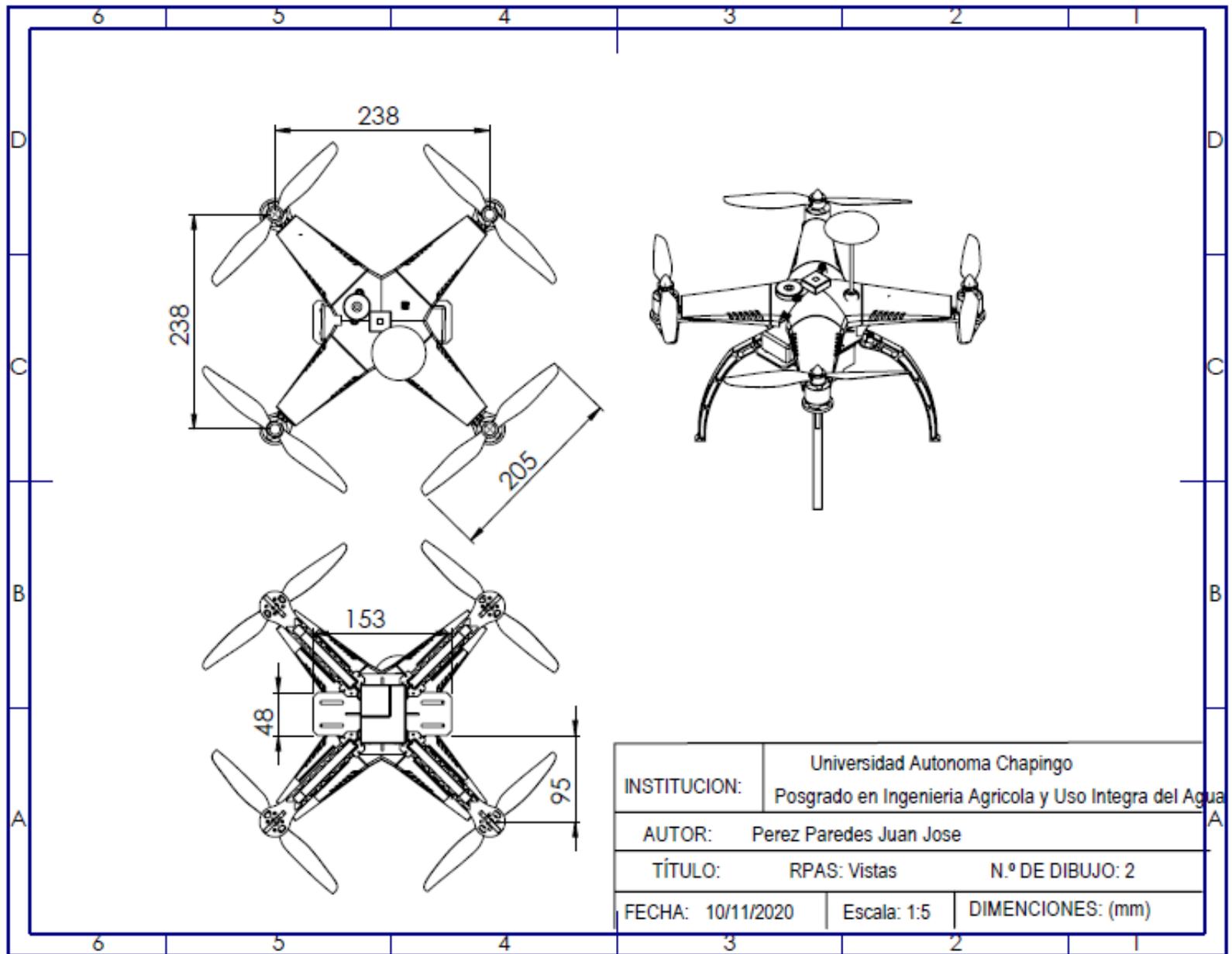
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',TITULO,'HOJA1','c1');
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',Titulos,'HOJA1','c4');
%%xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',titulo_tiem,'HOJA1','c4');
%%tiempo
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_tiempo1,'HOJA1','C5');
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_tiempo2,'HOJA1','D5');
%%bateria
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_bateria1,'HOJA1','E5');
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_bateria2,'HOJA1','F5');
%%corriente
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_corr1,'HOJA1','G5');
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_corr2,'HOJA1','H5');
%%giro
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_giro1,'HOJA1','I5');
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_giro2,'HOJA1','J5');
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_giro3,'HOJA1','K5');
%%vibraciones
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_vibx,'HOJA1','L5');
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_viby,'HOJA1','M5');
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_vibz,'HOJA1','N5');
%%gps
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_gps1,'HOJA1','O5');
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_gps2,'HOJA1','P5');
xlswrite('VALORES DE LA CONTROLADORA DE VUELO.xlsx',datos_gps3,'HOJA1','Q5')

```

## **APÉNDICE G**

Dibujos 2D, del prototipo RPAS realizados en Solid Works, vista frontal (Dibujo 1), y vistas superior, inferior e isométrica (Dibujo 2).





## APÉNDICE H

| <b>Latitud y longitud de los waypoints</b> |              |            |             |             |
|--|--------------|------------|-------------|-------------|
| Waypoint                                   | Imagen       | Latitud    | Longitud    | Altitud (m) |
| 1  | 00153400.JPG | 19.4830561 | -98.8880896 | 2269.29     |
| 2  | 00153800.JPG | 19.4831111 | -98.8880916 | 2269.77     |
| 3  | 00154300.JPG | 19.4831665 | -98.8880932 | 2269.79     |
| 4  | 00154700.JPG | 19.4832216 | -98.888093  | 2269.79     |
| 5  | 00155100.JPG | 19.4832767 | -98.8880929 | 2269.83     |
| 6  | 00155500.JPG | 19.4833323 | -98.8880897 | 2269.7      |
| 7  | 00160000.JPG | 19.4833811 | -98.8880642 | 2269.87     |
| 8  | 00160400.JPG | 19.4834315 | -98.8880391 | 2269.81     |
| 9  | 00160900.JPG | 19.4834818 | -98.8880145 | 2269.36     |
| 10   | 00161300.JPG | 19.483531  | -98.887989  | 2269.38     |
| 11   | 00162200.JPG | 19.4834781 | -98.8879771 | 2269.79     |
| 12   | 00162700.JPG | 19.4834223 | -98.887974  | 2269.73     |
| 13   | 00163100.JPG | 19.4833663 | -98.8879739 | 2269.59     |
| 14   | 00163500.JPG | 19.4833102 | -98.887974  | 2269.45     |
| 15   | 00163900.JPG | 19.4832555 | -98.8879739 | 2269.4      |
| 16   | 00164400.JPG | 19.4831994 | -98.8879744 | 2269.28     |
| 17   | 00164800.JPG | 19.4831451 | -98.8879749 | 2269.17     |
| 18   | 00165200.JPG | 19.4830886 | -98.8879738 | 2269.11     |
| 19   | 00165600.JPG | 19.4830322 | -98.8879746 | 2269.18     |
| 20   | 00170000.JPG | 19.4829758 | -98.887974  | 2269.31     |
| 21   | 00170500.JPG | 19.4829473 | -98.8879237 | 2269.09     |
| 22   | 00170900.JPG | 19.4829328 | -98.8878683 | 2268.72     |

|    |              |            |             |         |
|----|--------------|------------|-------------|---------|
| 23 | 00171400.JPG | 19.4829876 | -98.887859  | 2268.67 |
| 24 | 00171900.JPG | 19.483043  | -98.8878572 | 2268.69 |
| 25 | 00172300.JPG | 19.483099  | -98.8878581 | 2268.94 |
| 26 | 00172700.JPG | 19.4831538 | -98.8878576 | 2268.98 |
| 27 | 00173200.JPG | 19.4832093 | -98.8878585 | 2269.05 |
| 28 | 00173600.JPG | 19.4832644 | -98.8878566 | 2269.03 |
| 29 | 00174000.JPG | 19.483321  | -98.8878571 | 2268.94 |
| 30 | 00174400.JPG | 19.4833764 | -98.8878574 | 2269.03 |
| 31 | 00174900.JPG | 19.483432  | -98.8878578 | 2269.17 |
| 32 | 00175300.JPG | 19.4834877 | -98.8878588 | 2269.27 |

## APÉNDICE I

Geolocalización de los puntos de muestreo

| Referencia | Este (m) X | Norte (m) Y | Elev (m) | longitud    | latitud    |
|------------|------------|-------------|----------|-------------|------------|
| GCP1       | 511774.178 | 2154317.57  | 2245.344 | -98.8878033 | 19.4833795 |
| GCP2       | 511755.234 | 2154314.63  | 2245.356 | -98.8879839 | 19.4833531 |
| GCP3       | 511757.213 | 2154299.68  | 2245.319 | -98.8879651 | 19.483218  |
| GCP4       | 511745.026 | 2154289.02  | 2245.332 | -98.8880813 | 19.4831217 |
| GCP5       | 511755.87  | 2154278.48  | 2245.325 | -98.887978  | 19.4830264 |
| punto 1    | 511747.455 | 2154279.45  | 2245.281 | -98.8880582 | 19.4830352 |
| punto 2    | 511753.165 | 2154276.9   | 2245.314 | -98.8880038 | 19.4830121 |
| punto 3    | 511756.964 | 2154285.43  | 2245.278 | -98.8879676 | 19.4830892 |
| punto 4    | 511751.409 | 2154287.71  | 2245.28  | -98.8880205 | 19.4831098 |
| punto 5    | 511744.174 | 2154291.07  | 2245.318 | -98.8880894 | 19.4831402 |
| punto 6    | 511747.954 | 2154299.63  | 2245.282 | -98.8880533 | 19.4832176 |
| punto 7    | 511755.136 | 2154296.42  | 2245.294 | -98.8879849 | 19.4831885 |
| punto 8    | 511760.883 | 2154294.17  | 2245.319 | -98.8879302 | 19.4831682 |
| punto 9    | 511764.842 | 2154303     | 2245.327 | -98.8878924 | 19.4832479 |
| punto 10   | 511752.241 | 2154309.09  | 2245.309 | -98.8880124 | 19.483303  |
| punto 11   | 511763.61  | 2154315.21  | 2245.35  | -98.887904  | 19.4833582 |
| punto 12   | 511770.515 | 2154312.16  | 2245.282 | -98.8878383 | 19.4833307 |
| punto 13   | 511774.008 | 2154319.44  | 2245.314 | -98.8878049 | 19.4833965 |
| punto 14   | 511767.019 | 2154322.36  | 2245.332 | -98.8878715 | 19.4834228 |
| punto 15   | 511759.472 | 2154325.66  | 2245.255 | -98.8879434 | 19.4834527 |
| punto 16   | 511760.4   | 2154321.15  | 2245.299 | -98.8879346 | 19.4834119 |
| punto 17   | 511755.961 | 2154311.39  | 2245.301 | -98.8879769 | 19.4833238 |

|          |            |            |          |             |            |
|----------|------------|------------|----------|-------------|------------|
| punto 18 | 511751.913 | 2154302.21 | 2245.287 | -98.8880156 | 19.4832408 |
| punto 19 | 511748.122 | 2154293.07 | 2245.315 | -98.8880518 | 19.4831583 |
| punto 20 | 511749.401 | 2154288.77 | 2245.283 | -98.8880396 | 19.4831194 |
| punto 21 | 511753.807 | 2154287.54 | 2245.294 | -98.8879976 | 19.4831082 |
| punto 22 | 511756.347 | 2154286.5  | 2245.32  | -98.8879734 | 19.4830989 |
| punto 23 | 511763.124 | 2154290.72 | 2245.299 | -98.8879088 | 19.4831369 |
| punto 24 | 511761.283 | 2154297.63 | 2245.308 | -98.8879263 | 19.4831994 |
| punto 25 | 511759.473 | 2154301.71 | 2245.339 | -98.8879435 | 19.4832363 |
| punto 26 | 511759.603 | 2154310.23 | 2245.31  | -98.8879423 | 19.4833133 |
| punto 27 | 511761.676 | 2154315.07 | 2245.318 | -98.8879225 | 19.483357  |
| punto 28 | 511766.014 | 2154314.35 | 2245.346 | -98.8878811 | 19.4833504 |
| punto 29 | 511768.218 | 2154313.4  | 2245.346 | -98.8878601 | 19.4833419 |
| punto 30 | 511770.986 | 2154318.85 | 2245.316 | -98.8878337 | 19.4833911 |
| punto 31 | 511772.089 | 2154310.74 | 2245.295 | -98.8878233 | 19.4833178 |
| punto 32 | 511769.424 | 2154303.75 | 2245.31  | -98.8878487 | 19.4832547 |
| punto 33 | 511764.591 | 2154294.1  | 2245.319 | -98.8878948 | 19.4831675 |
| punto 34 | 511761.473 | 2154286.87 | 2245.315 | -98.8879246 | 19.4831022 |
| punto 35 | 511756.611 | 2154275.71 | 2245.333 | -98.887971  | 19.4830013 |
| base     | 511770.832 | 2154332.86 | 2245.576 | -98.8878351 | 19.4835177 |
| ICMX     | 482061.772 | 2145720.65 | 2267.252 | -99.1708527 | 19.4056415 |

## APÉNDICE J

| Errores en los puntos de muestreo |                       |                |   |                |
|-----------------------------------|-----------------------|----------------|---|----------------|
| Punto.                            | Error<br>(GPS-Imagen) | Error absoluto | Error <sup>2</sup><br>(GPS-Imagen) <sup>2</sup> | Error relativo |
| 1                                 | 0.031                 | 0.031          | 0.000961  | 1.38067E-05    |
| 2                                 | 0.004                 | 0.004          | 1.6E-05   | 1.78149E-06    |
| 3                                 | -0.012                | 0.012          | 0.000144  | 5.34455E-06    |
| 4                                 | -0.02                 | 0.02           | 0.0004  | 8.90758E-06    |
| 5                                 | 0.038                 | 0.038          | 0.001444  | 1.69241E-05    |
| 6                                 | 0.002                 | 0.002          | 4E-06   | 8.90757E-07    |
| 7                                 | 0.004                 | 0.004          | 1.6E-05   | 1.7815E-06     |
| 8                                 | -0.031                | 0.031          | 0.000961  | 1.38065E-05    |
| 9                                 | -0.013                | 0.013          | 0.000169  | 5.7898E-06     |
| 10                                | 0.029                 | 0.029          | 0.000841  | 1.29158E-05    |
| 11                                | 0.03                  | 0.03           | 0.0009  | 1.33609E-05    |
| 12                                | 0.022                 | 0.022          | 0.000484  | 9.79832E-06    |
| 13                                | 0.004                 | 0.004          | 1.6E-05   | 1.78149E-06    |
| 14                                | 0.032                 | 0.032          | 0.001024  | 1.42518E-05    |
| 15                                | 0.025                 | 0.025          | 0.000625  | 1.11346E-05    |
| 16                                | 0.019                 | 0.019          | 0.000361  | 8.46212E-06    |
| 17                                | 0.001                 | 0.001          | 1E-06   | 4.45375E-07    |
| 18                                | 0.017                 | 0.017          | 0.000289  | 7.57142E-06    |
| 19                                | 0.025                 | 0.025          | 0.000625  | 1.11343E-05    |
| 20                                | -0.007                | 0.007          | 4.9E-05   | 3.11765E-06    |
| 21                                | 0.004                 | 0.004          | 1.6E-05   | 1.7815E-06     |
| 22                                | 0.01                  | 0.01           | 0.0001  | 4.45371E-06    |

|    |                       |             |             |             |
|----|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| 23 | -0.031                | 0.031       | 0.000961    | 1.38066E-05 |
| 24 | -0.012                | 0.012       | 0.000144    | 5.34448E-06 |
| 25 | 0.039                 | 0.039       | 0.001521    | 1.73693E-05 |
| 26 | 0.01                  | 0.01        | 1E-04       | 4.45373E-06 |
| 27 | 0.018                 | 0.018       | 0.000324    | 8.01668E-06 |
| 28 | 0.046                 | 0.046       | 0.002116    | 2.04868E-05 |
| 29 | -0.014                | 0.014       | 0.000196    | 6.23512E-06 |
| 30 | 0.016                 | 0.016       | 0.000256    | 7.12595E-06 |
| 31 | -0.045                | 0.045       | 0.002025    | 2.00419E-05 |
| 32 | -0.04                 | 0.04        | 0.0016      | 1.78149E-05 |
| 33 | -0.011                | 0.011       | 0.000121    | 4.89908E-06 |
| 34 | -0.015                | 0.015       | 0.000225    | 6.68058E-06 |
| 35 | -0.027                | 0.027       | 0.000729    | 1.20249E-05 |
|    | Suma                  | 0.704       | 0.019764    | 0.000313542 |
|    | Error absoluto<br>(m) | 0.020114286 |             |             |
|    | Error estándar<br>(m) |             | 0.023763117 |             |
|    | Error relativo<br>(%) |             |             | 0.000895835 |