REPÚBLICA DEL ECUADOR
Escuela Politécnica Nacional
"E SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.

- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.

- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES EN LA BANDA UHF Y SHF PARA UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO DE ALA FIJA PARA EL MONITOREO DE LOS HUMEDALES PUGLLOHUMA Y JATUNHUAYCU EN LAS INMEDIACIONES DEL VOLCÁN ANTISANA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

HENRY DAVID GUERRA CAMPOVERDE

DIRECTOR: Dr. DIEGO JAVIER REINOSO CHISAGUANO

Quito, abril 2020

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Henry David Guerra Campoverde, bajo mi supervisión.

Dr. DIEGO JAVIER REINOSO CHISAGUANO
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Henry David Guerra Campoverde, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

HENRY DAVID GUERRA CAMPOVERDE

DEDICATORIA

A mis padres y hermana. No abandonamos, no nos rendimos. A mi amada, lo logramos. Porque aun cuando parecía oscurecer, cuando todo parecía estar en contra, lo conseguimos, este logro es nuestro.

David.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, María de Lourdes y Bladimir, quienes jamás me han abandonado y me han apoyado aun cuando las circunstancias parecían vencerme. Han sido motor y brújula. Definitivamente no hubiese llegado a ningún lugar sin su cuidado y amor.

A mi hermana Karen, a quien muchas veces me ha esperado y me ha compartido con las circunstancias más adversas. Mi amor y tiempo son tuyos, mi pequeña gran hermana.

A mi amada Jennifer, quien con su amor y paciencia en todo tiempo sostuvo mi mano. A ti que siempre iluminas mi horizonte por gris que se encuentre y pintas una sonrisa cuando la amargura me borra la fe.

A mi casi hermano Francisco, con quienes hemos compartido los momentos más tristes, felices y gloriosos de varias etapas de nuestra vida.

Al Dr. Diego Reinoso, quien a costa de su propio tiempo se ha afanado con profesionalismo y empatía a la consecución y éxito de este trabajo.

Al Dr. Esteban Valencia por el apoyo en este trabajo, el cual no habría sido posible sin su ayuda, apertura a opiniones y la confianza para delegarme esta responsabilidad.

Al Dr. Víctor Hidalgo por la confianza y valiosos consejos, por la colaboración y el concederme un espacio para desarrollar mi trabajo de investigación,

Al Ing. Javier Cabrera, quien fue mi mentor cuando la teoría tomaba forma en la práctica. Me enseñó sin egoísmo, me aconsejó con empatía y ha sido un sincero amigo a quien le debo parte de mi conocimiento.

A todos los buenos maestros quienes aun siendo estrictos y enérgicos me han ayudado y formado en mi carrera universitaria.

A la mismísima Escuela Politécnica Nacional, quien me ha enseñado a que aún hay mucho que mejorar pero que nos formamos para corregir y diseñar un nuevo y mejor futuro para nosotros y la sociedad.

A todos muchos otros amigos que han endulzado mi vida, compartiendo momentos grandes y pequeños. Cuyos nombres quedarán siempre en mi corazón.

Por todos ustedes la universidad fue posible y la vida amena.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA II
DEDICATORIA III
AGRADECIMIENTO IV
ÍNDICE DE CONTENIDO VI
RESUMEN XI
ABSTRACT XII
1 INTRODUCCIÓN 1
1.1 OBJETIVOS 2
1.2 ALCANCE 2
1.3 MARCO TEÓRICO 3
1.3.1 RESERVA ECOLÓGICA ANTISANA 3
1.3.1.1 Problema de la explotación agrícola y ganadera 4
1.3.1.2 Ubicación de los humedales 5
1.3.2 SISTEMA AÉREO NO TRIPULADO 8
1.3.2.1 Vehículo Aéreo no Tripulado 9
- UAVs de ala rotatoria 10
- UAVs de ala fija 10
1.3.2.2 Estación Terrena 14
1.3.2.3 Plan de vuelo 15
1.3.2.4 Sistema de Control Aéreo y Piloto Automático 16
1.3.2.5 Sensores 18
1.3.2.6 Aterrizaje 19
1.3.3 SISTEMA DE TELECOMUNICACIONES 20
1.3.3.1 Bandas de Frecuencia 20
- Legislación Ecuatoriana para Bandas Libres 22
1.3.3.2 Sistema de telemetría 23
- Protocolos de telemetría 24
1.3.3.3 Sistema de control remoto 24
1.3.3.4 Sistema de video 25

1.3.3.5 Antenas 26
- Lóbulos de Radiación 27
- Ejemplos de Lóbulos de Radiación de Antenas Representativas 28
- Ganancia de las Antenas 28
- Polarización 30

1.3.4 ENLACES DE MICROONDAS 30
1.3.4.1 Zonas de Fresnel 32
1.3.4.2 Margen de desvanecimiento 34
1.3.4.3 Transmisor 35
- Potencia del transmisor 35

1.3.4.4 Receptor 35
- Umbral de Potencia 36

1.3.4.5 Presupuesto del enlace 36
2 METODOLOGÍA 38
2.1 CÁLCULO DE PRESUPUESTO DEL ENLACE PARA HUMEDAL JATUNHUAYCU 40
2.1.1 ENLACE DE TELEMETRÍA 40
2.1.1.1 Pérdidas en espacio libre del enlace de telemetría 41
2.1.1.2 Desvanecimiento por condiciones geográficas para telemetría 41
2.1.1.3 Atenuación por obstrucción de la primera zona de Fresnel 41
2.1.1.4 Presupuesto del enlace de telemetría para el Humedal Jatunhuaycu . 46
2.1.2 ENLACE DE RADIOCONTROL 47
2.1.2.1 Pérdidas en espacio libre para el enlace de Radiocontrol 48
2.1.2.2 Desvanecimiento por condiciones geográficas para radiocontrol 48
2.1.2.3 Atenuación por obstrucción de la primera zona de Fresnel 49
2.1.2.4 Presupuesto del enlace de Control Remoto para el Humedal Jatunhuaycu 49
2.1.3 ENLACE DE VIDEO ANALÓGICO 50
2.1.3.1 Pérdidas de espacio libre para el enlace de video analógico 51
2.1.3.2 Desvanecimiento por condiciones geográficas para video analógico .. 51
2.1.3.3 Atenuación por obstrucción de la primera zona de Fresnel 51
2.1.3.4 Presupuesto del enlace de video analógico para el Humedal Jatunhuaycu 51
2.2 CÁLCULO DEL PRESUPUESTO DEL ENLACE PARA EL HUMEDAL PUGLLOHUMA 53
2.2.1 ENLACE DE TELEMETRÍA 53
2.2.1.1 Pérdidas en espacio libre del enlace de telemetría 53

2.2.1.2 Desvanecimiento por condiciones geográficas para telemetría 53
2.2.1.3 Atenuación por obstrucción de la primera zona de Fresnel..... 53
2.2.1.4 Presupuesto del enlace de telemetría para el Humedal Pugllohuma... 53
2.2.2 ENLACE DE RADIOCONTROL 55
2.2.3 ENLACE DE VIDEO ANALÓGICO 55
2.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS EN FUNCIÓN DE LOS CÁLCULOS REALIZADOS EN EL PRESUPUESTO DE ENLACE 55
2.3.1 EQUIPOS DE TELEMETRÍA COMERCIALES..... 55
2.3.1.1 3DR Radio Telemetry System [26] 55
2.3.1.2 RFD 900 [27] 56
2.3.2 SELECCIÓN DE ANTENAS PARA EQUIPOS DE TELEMETRÍA..... 57
2.3.2.1 Antena Dipolo 900 MHz (900-928 MHz) Rubber Duck [28] 57
2.3.2.2 ANT900 (SUCONEL) [29] 58
2.3.2.3 Antena STUBBY de ¼ de onda [30] 58
2.3.2.4 AN2404 [31] 58
2.3.3 EQUIPOS DE CONTROL REMOTO COMERCIALES..... 59
2.3.3.1 QUANUM I8 [32] 59
2.3.3.2 SPEKTRUM DX6 [16] 59
2.3.3.3 Receptor AR610 [33]..... 60
2.3.3.4 Spektrum AR6600T [34]..... 60
2.3.3.5 Receptor Quanum I8 2.4 GHz [35]. 61
2.3.4 EQUIPOS DE VIDEO ANALÓGICO COMERCIALES 61
2.3.4.1 FX796T [36]..... 61
2.3.4.2 TS832 FVP 5.8G [37]..... 62
2.3.4.3 Receptor de video RC832 [38]..... 62
2.3.5 SELECCIÓN DE ANTENAS PARA EQUIPOS DE VIDEO 63
2.3.5.1 DJI FVP Antena de aire [39] 63
2.3.5.2 Banbie8409 FVP antena de trébol [40] 63
2.3.5.3 SpiroNet LHCP inmersionRC [41] 64
2.3.6 SELECCIÓN DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES EN FUNCIÓN DEL ANÁLISIS REALIZADO 64
2.3.6.1 Selección de equipos de telemetría..... 65
2.3.6.2 Cálculo corregido con datos reales de equipos de telemetría 65
2.3.6.3 Selección de equipos de radiocontrol..... 66
2.3.6.4 Selección de los equipos de video analógico..... 66
2.3.6.5 Cálculo corregido con datos reales de equipos de video..... 67

2.4 SIMULACIÓN DE COBERTURA DE ENLACES DE TELECOMUNICACIONES PARA EL HUMEDAL JATUNHUAYCU EN EL SOFTWARE RADIO MOBILE 67
2.4.1 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA EL HUMEDAL JATUNHUAYCU 67
2.4.2 SIMULACIÓN DE COBERTURA DE SISTEMA DE CONTROL REMOTO PARA EL HUMEDAL JATUNHUAYCU 72
2.4.3 SIMULACIÓN DE COBERTURA DEL SISTEMA DE VIDEO ANALÓGICO PARA EL HUMEDAL JATUNHUAYCU 72
2.5 SIMULACIÓN DE COBERTURA DE ENLACES DE TELECOMUNICACIONES PARA EL HUMEDAL PUGLLOHUMA EN EL SOFTWARE RADIO MOBILE 75
2.5.1 SIMULACIÓN DE COBERTURA DE SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA EL HUMEDAL PUGLLOHUMA 75
2.5.2 SIMULACIÓN DE COBERTURA DE SISTEMA DE RADIOCONTROL PARA EL HUMEDAL PUGLLOHUMA 77
2.5.3 SIMULACIÓN DE COBERTURA DE SISTEMA DE VIDEO ANALÓGICO PARA EL HUMEDAL PUGLLOHUMA 78
2.6 ENSAMBLAJE DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES EN LA PLATAFORMA AÉREA 79
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 82
3.1 PRUEBAS DEL SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA EL HUMEDAL PUGLLOHUMA 82
3.1.1 PRUEBA 1 82
3.1.2 PRUEBA 2 85
3.1.3 PRUEBA 3 87
3.2 PRUEBA DEL SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA EL HUMEDAL JATUNHUAYCU 89
3.2.1 PRUEBA 1 91
3.2.2 PRUEBA 2 92
3.2.3 PRUEBA 3 94
3.3 PRUEBA DEL SISTEMA DE CONTROL REMOTO 97
3.3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL CONTROL REMOTO 97
3.4 PRUEBA DEL SISTEMA DE VIDEO 97
3.4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE VIDEO 98
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 99
4.1 CONCLUSIONES 99
4.2 RECOMENDACIONES 101
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 102

ANEXOS.....106

RESUMEN

Este trabajo se enfoca en el diseño de sistemas de telecomunicaciones tales como: telemetría, radiocontrol y video analógico, equipos de fotogrametría y sensores aplicados a UAVs para el monitoreo y protección de recursos hídricos, concretamente de los humedales Pugllohuma con radio aproximado de 329 metros y Jatunhuaycu de 3835.35 metros, en las inmediaciones del volcán Antisana.

En el Capítulo 1 se muestran los objetivos, el alcance y el marco teórico necesario para el desarrollo de este trabajo, el cual incluye información sobre el volcán Antisana y la importancia de la conservación de sus recursos hídricos. Se encuentra también información sobre los drones que se pueden usar y sobre los equipos de telecomunicaciones, las ecuaciones que modelan matemáticamente el cálculo del presupuesto del enlace y la legislación ecuatoriana para el uso de bandas libres del espectro electromagnético.

En el capítulo 2 se presenta la metodología, misma que consta de: cálculo del presupuesto del enlace para telemetría, control remoto y video analógico y el proceso para la selección de equipos en función del análisis del presupuesto del enlace. Al final del capítulo se muestran imágenes del dron con los equipos ensamblados y montados en la plataforma aérea.

El capítulo 3 consta de los resultados de las pruebas realizadas en los humedales y sus respectivos análisis.

Finalmente, en el capítulo 4 se dan a conocer las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo considerando como se han cumplido los objetivos planteados y la concordancia con el alcance de la tesis.

PALABRAS CLAVE: UAV, telemetría, fotogrametría, sensores, recursos hídricos, enlace de telemetría, enlace de control remoto, enlace de video analógico.

ABSTRACT

This work focuses on the design of telecommunications systems such as telemetry, radio-control and analogical video, photogrammetry equipment, and sensors applied to UAVs for monitoring and protection of water resources, specifically of Pugllohuma wetlands with an approximate radio of 329 meters and Jatunhuaycu of 3835.35 meters, near the Antisana volcano.

Chapter 1 shows the objectives, scope and theoretical framework necessary for the development of this work, which includes information about the Antisana volcano and the importance of the conservation of its water resources. It is also available information about the drones that can be used and telecommunications equipment, the equations that mathematically model the calculation of the link budget and the Ecuadorian legislation for the use of free bands of the electromagnetic spectrum.

Chapter 2 presents the methodology, which consists of calculation of the link budget for telemetry, remote-control and analogical video, and the process for the selection of equipment based on the analysis of the link budget. At the end of the chapter, drone images are shown with the equipment assembled and integrated on the aerial platform.

Chapter 3 consists of the results of the tests carried out in the wetlands and their respective analyses.

Finally, in chapter 4 the conclusions and recommendations of this work are presented considering how the objectives have been reached and the concordance with the scope of the thesis.

KEYWORDS: UAV, telemetry, photogrammetry, sensors, water resources, telemetry link, remote-control link, analogical video link.

1 INTRODUCCIÓN

Hoy por hoy las telecomunicaciones radioeléctricas están presentes en múltiples ámbitos de las telecomunicaciones y de la cotidianidad. Se pueden encontrar enlaces inalámbricos en cualquier lugar, por ejemplo, en una casa se pueden tener: la conexión inalámbrica de internet, los controles remotos, reproductores de música mediante Bluethooth, además, están presentes las señales de los satélites, tanto de órbitas estacionarias como los de canales de televisión, así como también, los de órbitas bajas como de monitoreo terrestre. Sin importar a donde se vaya, las telecomunicaciones por medios inalámbricos nos rodean y hacen posible un sinnúmero de aplicaciones que son ya parte de la vida diaria de casi la totalidad de los ciudadanos del mundo. Una de las aplicaciones más actuales de las telecomunicaciones inalámbricas es el desarrollo de comunicaciones de drones. Estos se han incorporado a varias ramas de la investigación, militares, desarrollo económico, entre otros. El enfoque principal de este trabajo es demostrar la factibilidad de incorporar sistemas de telecomunicaciones a drones para monitoreo e investigación de recursos hídricos, los cuales son sumamente importantes para la preservación de ecosistemas frágiles como lo son los humedales en las cercanías del volcán Antisana, en la provincia de Napo – Ecuador. Para este fin se usarán sensores que lleven a cabo la tarea de recolección de datos de temperatura, velocidad del viento, geolocalización, altura, presión, etc. Estos datos son sumamente importantes para comprender los cambios que se suscitan en los humedales, de cuya existencia dependen una gran cantidad de especies incluida la humana, pues gran parte del agua que recibe el sur de Quito proviene de estos.

En la región andina ya se han usado drones para adquisición de datos sobre características importantes de ciertos volcanes, la flora y fauna que en él se encuentra. En Perú se usaron drones para levantar información sobre el volcán Ubinas mediante técnicas de fotogrametría aérea en 3D [1]. En dicho trabajo las imágenes se ordenan en función de las coordenadas GPS llevadas a bordo de un UAV de ala fija. De esta manera se genera un modelo tridimensional georreferenciado. Este tipo de investigación ayuda a monitorear diferentes entornos de difícil acceso humano. El uso de los UAVs de ala fija demuestra una reducción considerable de recursos. El vuelo del dron en el trabajo mencionado en el volcán Ubinas, ha sobrevolado alturas entre los 5000 y 6200 msnm .

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es: desarrollar un sistema de comunicaciones en la banda UHF y SHF para un vehículo aéreo no tripulado de ala fija para el monitoreo de los humedales Pugllohuma y Jatunhuaycu en las inmediaciones del volcán Antisana.

Los objetivos específicos son:

- Diseñar los enlaces de telemetría, video y radiocontrol.
- Simular cada uno de los enlaces de comunicaciones en el software Radio Mobile.
- Seleccionar equipos electrónicos y de telecomunicaciones.
- Implementar el sistema de telecomunicaciones en la plataforma aérea.
- Probar el funcionamiento en tierra y durante el vuelo.

1.2 ALCANCE

Se realizará el diseño de un sistema de telecomunicaciones que consta de telemetría en la banda UHF a 928 MHz. Este enlace se usará para transmitir los datos de sensores como temperatura, humedad, posición y altura mediante GPS, velocidad del viento, intensidad de señal, giroscopio y presión. Esto con el fin de recolectar información que se considere relevante para el monitoreo de los humedales Pugllohuma y Jatunhuaycu. Sobre este enlace también viajará información de control como el cambio de los modos de vuelo y el control de la cámara de fotografía aérea la cual indica cuando iniciar o pausar la captura de imágenes. Las imágenes recolectadas se almacenarán en una memoria MicroSD ubicada en el controlador de vuelo PIXHAWK para su posterior análisis en tierra. Este enlace se planifica para 4 kilómetros con línea de vista. Se espera un enlace de telemetría de alta disponibilidad, para esto, se usarán antenas omnidireccionales con diversidad espacial.

El software de visualización en tierra será Mission Planner, en el cual se dibujarán las rutas y se observarán los datos de telemetría en tiempo real, además del mapa GPS para la ubicación del UAV. Este software estará instalado en un computador en la estación terrena y es en donde se planificarán las rutas que seguirá el dron para volar mediante el piloto automático, el cual será un programa instalado en el controlador PIXHAWK. Durante el desarrollo de las misiones no será necesario el uso del control remoto desde tierra ya que el UAV seguirá el plan de vuelo preprogramado antes de iniciar el vuelo.

Se integrará paralelamente un módulo de transmisión de datos de control remoto para controlar manualmente el UAV en la banda SHF a 2.4 GHz, a través del cual se controlan los parámetros de velocidad y dirección tanto para el despegue como para el aterrizaje. El control remoto usado en tierra es un SPECTRUM DX6. Tanto el despegue como el aterrizaje se realizarán de forma manual haciendo uso del control remoto.

Se implementará también un sistema que permita la captura de video en la frecuencia de 5.8 GHz para la transmisión analógica de éste a la estación terrena. El enlace de video está planificado para un alcance máximo en condiciones ideales de 1 km.

Se implementarán los tres sistemas inalámbricos en bandas de frecuencia diferentes para evitar interferencias entre ellos. Además, se pueden encontrar dichos sistemas fácilmente disponibles en el mercado en estas bandas de frecuencia. Los sistemas mencionados serán implementados en un fuselaje comercial de ala fija del tipo avión, el cual funcionará con el uso de baterías, las cuales energizarán los sensores, motores, equipos de transmisión, recepción, cámaras de video y fotografía aérea. El módulo de control automático será implementado en un PIXHAWK 4.

Una vez diseñado el sistema de telecomunicaciones para los tres enlaces, estos serán simulados en el software Radio Mobile para la validación de datos. Se compararán con los resultados de los cálculos de presupuesto del enlace para la posterior selección de equipos e implementación en el fuselaje comercial.

El producto final será la implementación de todos los módulos sobre un fuselaje comercial, el mismo que será puesto a prueba primero en tierra para comprobar el funcionamiento independiente de todos los elementos de control y comunicaciones. Finalmente, se llevarán a cabo pruebas en el lugar de análisis, en las inmediaciones del volcán Antisana primero en tierra y luego en el aire para asegurar su correcto funcionamiento.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 RESERVA ECOLÓGICA ANTISANA

La Reserva Ecológica Antisana (REA en adelante), se encuentra localizada a aproximadamente 50 Km hacia el suroeste de Quito, en la provincia de Napo. La zona protegida se ubica en las inmediaciones del volcán con el mismo nombre. La altura del volcán es de 5 758 msnm y la reserva se ubica a su derredor. Las zonas protegidas, cubren una gran cantidad de páramos próximos al volcán, en el norte se extiende desde la cuenca

del río Tambo hasta la carretera Pifo-Papallacta. Dependiendo de la región (más cercano a la cordillera de los Andes o a la Amazonía) las precipitaciones pueden variar entre los 2000 y 4000 mm anuales y temperaturas entre 12 – 23 °C. El volcán Antisana es uno de los más grandes y altos del país. Se lo categoriza como un estratovolcán activo [2].

La REA posee gran riqueza en recursos hídricos debido a su ubicación geográfica, entre ellos: humedales, lagunas, lagunas de formación y retención de aguas como Micacocha, Papallacta y sus bosques montanos. Estos abastecen a aproximadamente 600 mil habitantes del sur de la capital. Adicionalmente, se genera energía eléctrica para alrededor de 100 mil personas y sus hogares [2].

En la REA se encuentran ecosistemas vivos. Estos son ecosistemas altamente productivos, fuentes de diversidad biológica, agua y sustento para muchas especies animales y vegetales. Además, son ecosistemas muy frágiles ya que pueden ser dañados por causas naturales, cambios climáticos, sequías, y la manipulación humana de los humedales por el pastoreo intensivo sobre ellos y sus cercanías, la agricultura que erosiona el suelo y la minería [3].

En lo referente a la flora, se sabe que la REA posee una vasta variedad florística, pues cubre un amplio rango altitudinal en ambas regiones del país. Su estudio se lo realiza comúnmente separando la zona protegida en dos partes: la alta, situada entre los 3100-4700 msnm y la segunda entre los 1200-3100 msnm [2].

En lo referente a especies animales, existen 552 especies de vertebrados, siendo las aves la especie más representativa de estos, seguido por 73 especies de mamíferos y finalmente reptiles y anfibios con 61 [2].

1.3.1.1 Problema de la explotación agrícola y ganadera

Dado el crecimiento poblacional, la demanda de productos cárnicos y agrícolas se ven también incrementados. Fenómenos propios del Ecuador han producido cambios sistemáticos en los límites agrícolas. Tal como se observa en [2], la crisis de la naranjilla, la introducción de ganado bovino poco productivo y manejo inadecuado del suelo, entre otros, son los detonantes de una permanente expansión agrícola y ganadera. El ganado pasta libremente en la REA lo que constituye un foco de erosión del suelo, pues no todos los suelos se recuperan pronto, o lo suficientemente rápido, como ocurre en la parte baja de la reserva [2]. Según un informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO, la ganadería es uno de los principales responsables de los problemas medioambientales de la actualidad, dado que, a más de producir gases de efecto invernadero, es la principal causa de la degradación de la tierra y los recursos

hídricos [4]. También se menciona en el mismo informe, que cerca del veinte por ciento de los pastizales se degradan a causa del sobrepastoreo, la compactación y la erosión. Una gestión ganadera inadecuada puede provocar la desertificación de lugares poco fértiles, de lo cual parte de la responsabilidad también la comparte la mala política de uso.

En el Ecuador hace más de un siglo el pastoreo de ovejas fue uno de los principales causantes del deterioro de la parte alta de la REA, ya que este inició un notable deterioro en el sector conocido como la Pampada de la Ovejería [2]. Para la Reserva constituye un problema la determinación limítrofe, pues han existido invasiones de los territorios protegidos, así como la afectación a propiedad privada como fue el caso de la Cooperativa San José de El Tablón Alto, el cual no poseía límites bien establecidos.

Finalmente, otra amenaza permanente para la REA es la explotación de canteras. En [2] se menciona particularmente el caso de la Hacienda Pinantura, ya que en ese lugar se puede observar la presencia permanente de maquinaria pesada en el derrame lávico, junto a la hacienda. También es conocido el uso de dinamita para remover piedra. La sobreexplotación de este sector podría contaminar los ríos subterráneos del derrame lávico los cuales abastecen de agua al sector de Pintag.

1.3.1.2 Ubicación de los humedales

La primera etapa del proyecto persigue el monitoreo del humedal Pugllohuma dado que es el más pequeño y, por lo tanto, el más fácil de monitorear. La siguiente etapa consiste en el monitoreo del humedal Jatunhuaycu el cual es más extenso. El monitoreo de ambos humedales es de suma importancia debido a que estos surten de agua a la EMOPQ.

El humedal Pugllohuma se encuentra situado en las inmediaciones del Volcán Antisana. El monitoreo de este humedal es el principal objetivo de este trabajo. Su ubicación se encuentra en las coordenadas: Latitud: 0°30'8.40"S, Longitud: 78°12'52.04"W como se muestra en la Figura 1.1. Su radio del Pugllohuma es de aproximadamente 329 metros (ver Figura 1.2), siendo el área de interés de monitoreo menor a la de la circunferencia, ya que ésta se encuentra dentro del círculo mostrado en la Figura 1.3.

Otro humedal de gran importancia para el proyecto PIE-CEPRA-XII-2018, del cual es parte este proyecto, es el humedal Jatunhuaycu (ver Figura 1.4). Este humedal será monitoreado en la segunda etapa del proyecto por lo cual el sistema de telecomunicaciones debe ser capaz de funcionar correctamente en ambos humedales. Este humedal es el mayor desafío del diseño del sistema de comunicaciones debido a la presencia de obstáculos geográficos,

su extensión, las reflexiones existentes debido al agua del humedal, precipitaciones y nubosidad constante.

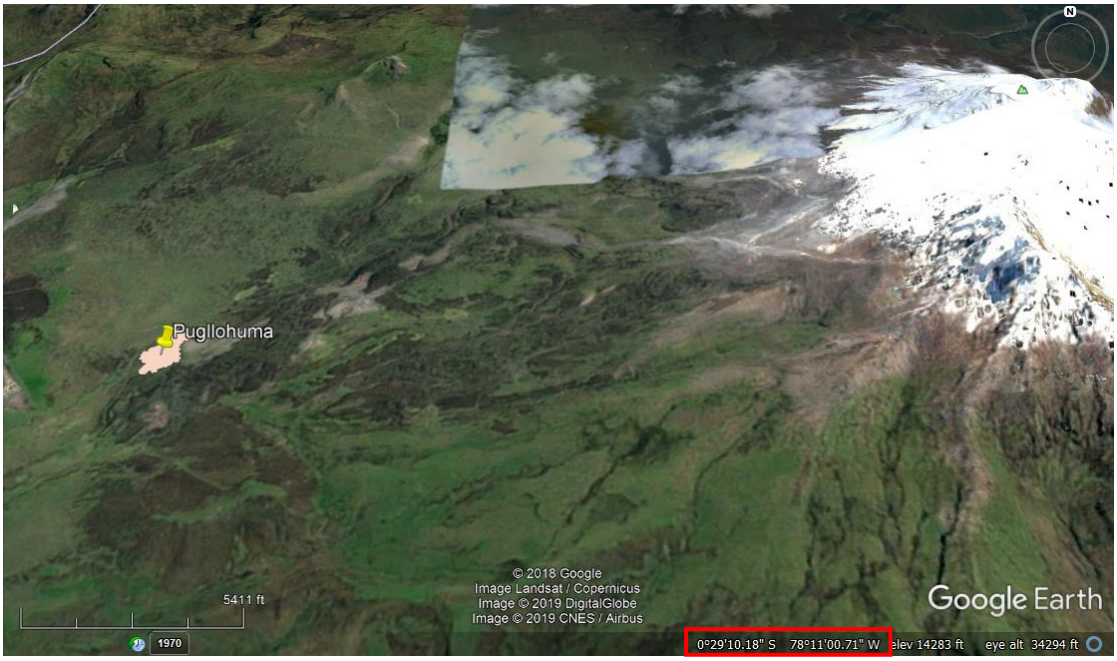

Figura 1.1 Ubicación del Humedal Pugllohuma.

Figura 1.2 Radio aproximado de la circunferencia que contiene al Humedal Pugllohuma.

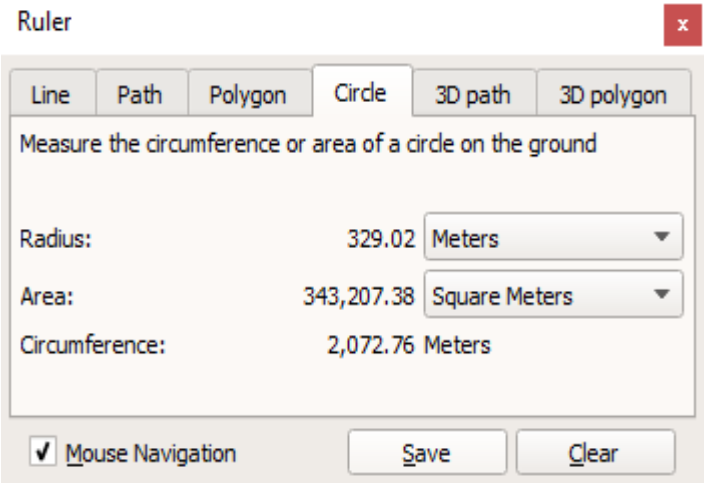

Figura 1.3 Radio de la circunferencia circunscrita del Humedal Pugllohuma usando Google Earth.

Figura 1.4 Circunferencia aproximada que contiene al Humedal Jatunhuaycu.

El humedal Jatunhuaycu tiene un radio de 3835.35 metros (ver Figura 1.5), y un área de circunferencia circunscrita de 46657452 metros cuadrados. Se ubica en las coordenadas: Latitud: 0°30'57.38"S, Longitud: 78°15'18.27"W.

Ambos humedales se encuentran cercanos entre sí y cerca de la Laguna Micacocha, y cercanas al volcán Antisana como se observa en la Figura 1.6.

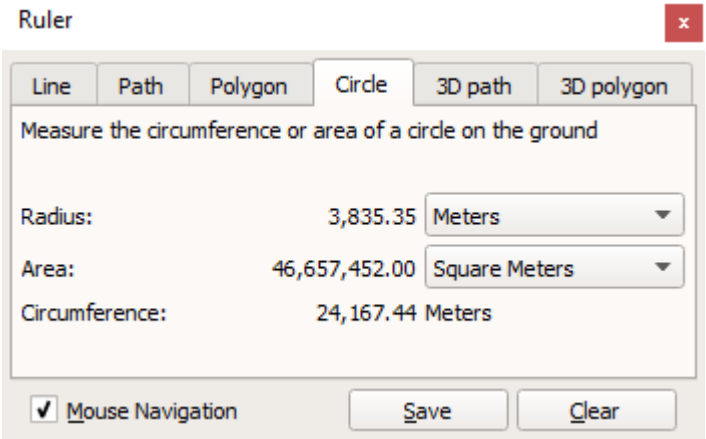

Figura 1.5 Radio de la circunferencia circunscrita del Humedal Jatunhuaycu usando Google Earth.

Figura 1.6 Ubicación de los Humedales Jatunguaycu y Pugllohuma en las inmediaciones del volcán Antisana.

Las áreas de las circunferencias que contienen a estos humedales son útiles debido a que con esta área se planificará la cobertura de los sistemas de telecomunicaciones en capítulos posteriores de este trabajo.

1.3.2 SISTEMA AÉREO NO TRIPULADO

El Sistema Aéreo no Tripulado (UAS, en adelante, por sus siglas en inglés) se analiza en tres partes por separado como se muestra en la Figura 1.7: la plataforma aérea, el sistema de control y el sistema de telecomunicaciones. Cada parte del sistema aéreo se diseña, analiza e implementa por separado. Sin embargo, todos los elementos tienen presente las condiciones de operación del volcán Antisana, por lo tanto, cada uno se seleccionará

tomando en cuenta la altura de vuelo, condiciones de presión, temperatura, humedad, lluvia, etc.

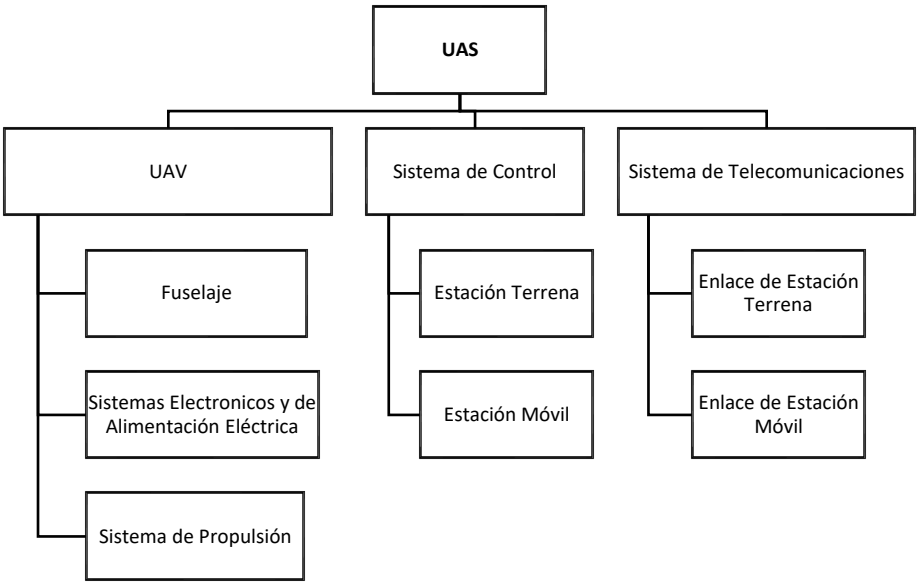

Figura 1.7 Diagrama de componentes de un Sistema Aéreo no Tripulado.

En el presente trabajo el análisis se hace especial énfasis en los sistemas de telecomunicaciones, mismos que permiten supervisar el correcto funcionamiento del dron desde la estación terrena, así como también observar y recolectar los datos para su posterior análisis.

1.3.2.1 Vehículo Aéreo no Tripulado

Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs, en adelante, por sus siglas en inglés) se categorizan en función de su tamaño y peso, no obstante, se pueden categorizar en función de su uso, la altura a la que viajan, etc. Para el caso de este trabajo, se mencionan sus características en función de su tamaño y peso.

El departamento de defensa de Estados Unidos define un vehículo aéreo no tripulado como: “un vehículo motorizado que no lleva un operador humano a bordo. Puede ser operado autónoma o remotamente, puede ser prescindible o recuperable y puede llevar carga (*payload*) letal o no letal” [5]. Esta definición cubre múltiples formas de sistemas, como son: aéreos, terrestres, marinos o submarinos.

Los vehículos aéreos son el componente primario de un sistema aéreo no tripulado. La definición formal expresada con anterioridad, en la cual se requiere que sean vehículos motorizados, excluyen sensores sin alguna forma de propulsión. Sin embargo, el uso de *gliders* (planeadores) los cuales pueden llevar a cabo misiones de manera autónoma o

remota, muchas veces son llamados vehículos aéreos no tripulados debido a su utilidad, a su capacidad de planeo y la capacidad de carga aun cuando no cuenten con propulsión propia. Son capaces de llevar a cabo misiones de vuelo por su capacidad de convertir energía potencial en cinética, cubrir grandes extensiones de terreno y transportar variedad de sensores además de equipos de telecomunicaciones.

Una forma común de tratar a los UAVs es separarlos en dos categorías: de ala fija y de ala rotatoria.

- **UAVs de ala rotatoria**

Estos UAVs son ampliamente utilizados cuando se carece de una plataforma amplia de lanzamiento, es decir, cuando se requiere de un despegue y/o aterrizaje vertical. Presentan gran facilidad de pilotaje, aterrizaje y despegue. Sin embargo, una de sus principales desventajas es la gran cantidad de energía que se requiere para mantenerlo operativo en una misión. Esto puede ser una limitante a la hora de cumplirlas. Se podrían requerir varios despegues y aterrizajes para cubrir una zona de investigación [6].

Los drones de ala rotatoria se conocen comúnmente como multicópteros. Éstos pueden ser: helicópteros, tricópteros, cuadricópteros, hexacópteros, etc. Las configuraciones más comunes de multicópteros se muestran en la Figura 1.8.

- **UAVs de ala fija**

Por su parte los UAVs de ala fija tienen una elevada autonomía de vuelo, y se pueden cubrir mayores áreas que los multirotores. A pesar de esto, requieren áreas apropiadas tanto para el despegue como para su aterrizaje. Estos dependen fuertemente de la habilidad del piloto para realizar cualquiera de las dos acciones con éxito y evitar el daño del UAV [6]. Las configuraciones más comunes de UAVs de ala fija se muestran en la Figura 1.9.

La Figura 1.10 muestra un ejemplo del lanzamiento manual de un dron de ala fija por parte de la armada de Estados Unidos de América. El tamaño del dron de este ejemplo es similar al usado en este proyecto. El lanzamiento manual ejemplifica didácticamente la forma de lanzamiento de este tipo de UAVs de ala fija.

A manera de resumen se muestra la Tabla 1.1 incluyendo algunas categorías que debido al alcance de este trabajo no se mencionan en el resumen anterior.

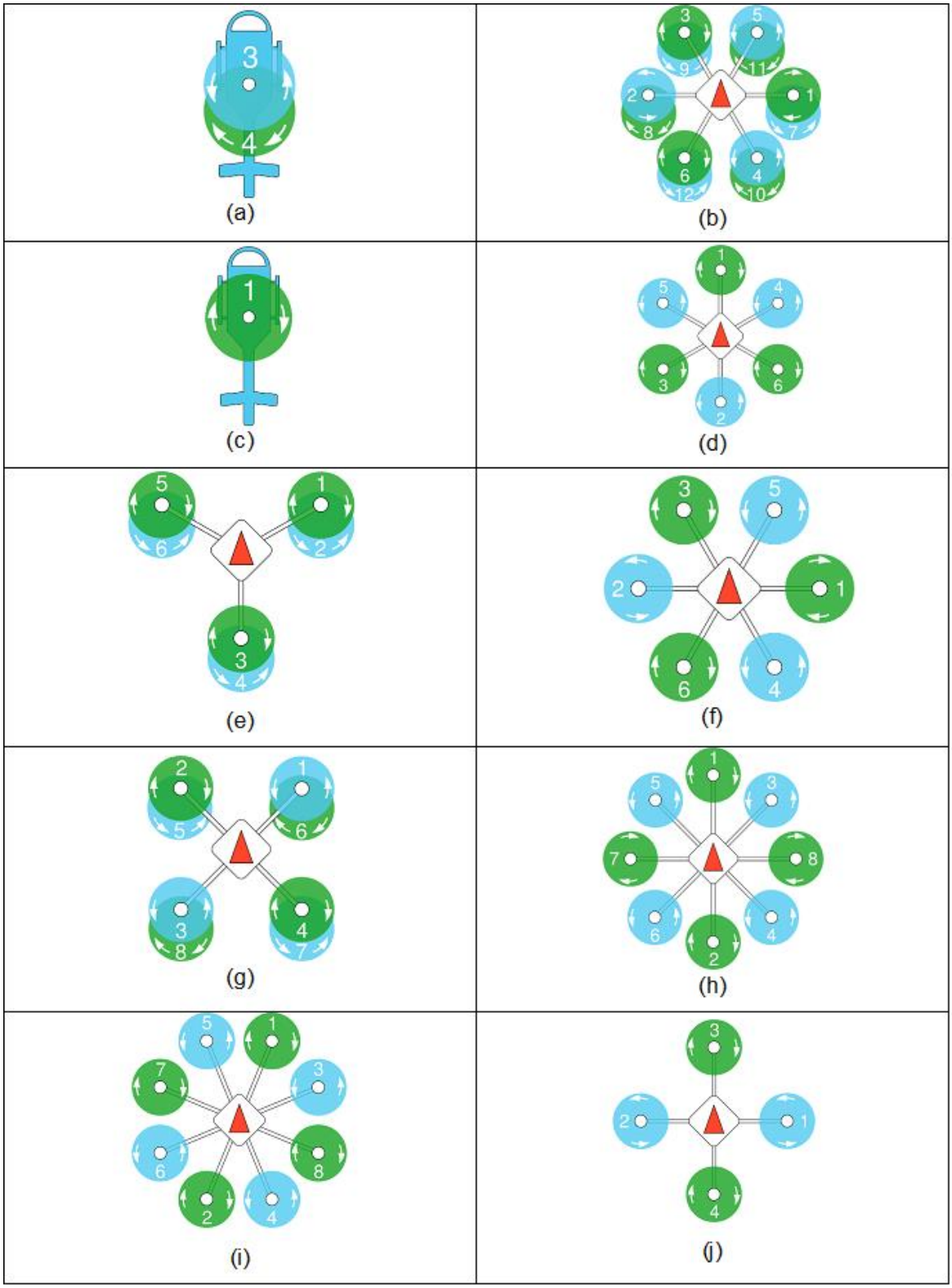

Figura 1.8 Coaxial helicopter (a), dodecarotor cox (b), helicopter (c), hexarotor + (d), hexarotor coaxial (e), hexarotor x (f), octo coax wide (g), octorotor + (h), octorotor x (i), cuadrotor + (j), cuadrotor H (k), Quadrotor wide (l) [7].

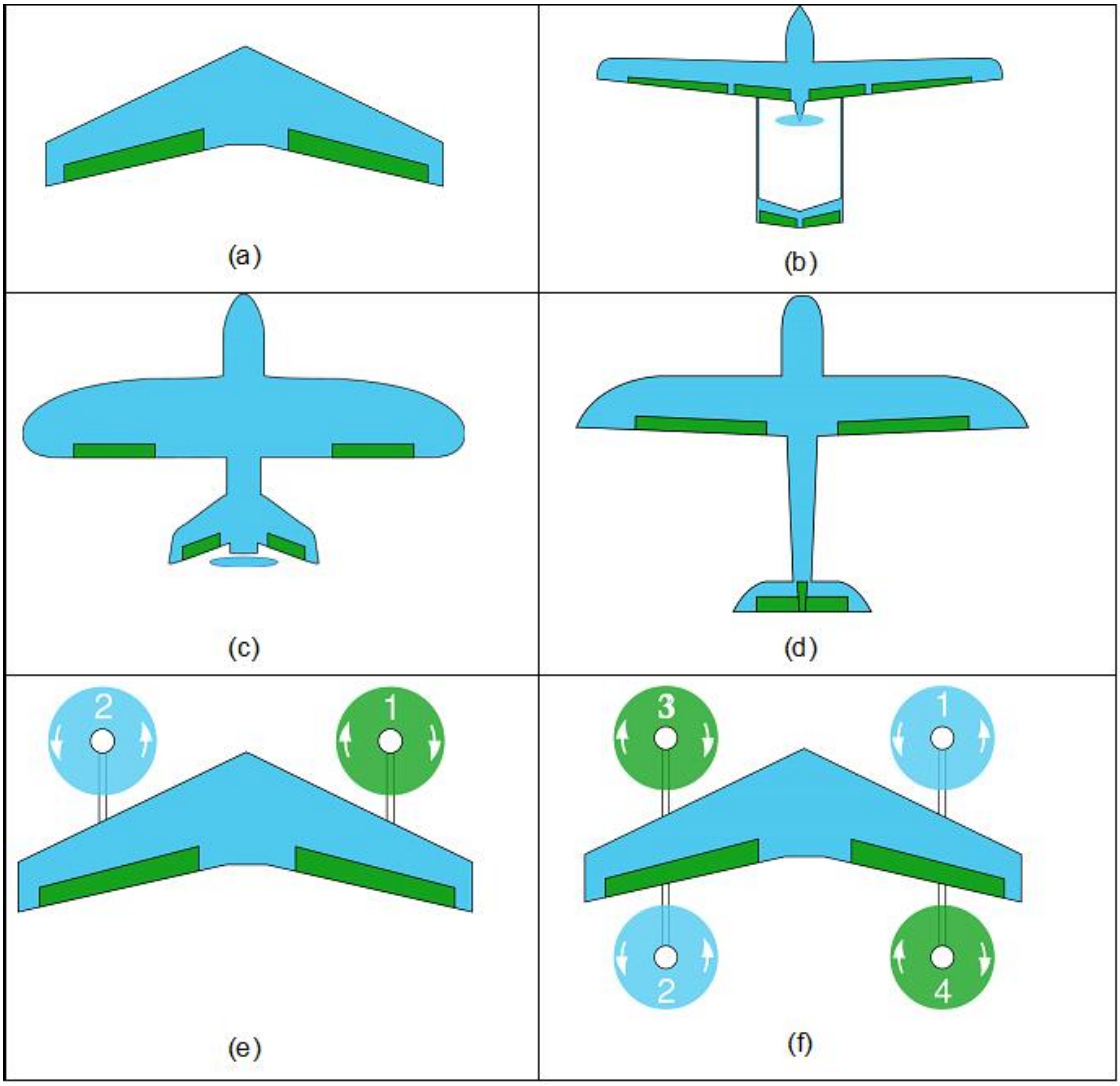

Figura 1.9 Flying wing (a), plane A-tail (b), plane V-Tail (c), Standard Plane (d), VTOL Duo Tailsitter (e), VTOL Quad Tailsitter (f) [7].

Figura 1.10 Lanzamiento de un UAV por parte de la armada de Estados Unidos [8].

Tabla 1.1 Categorización de vehículos aéreos en función de parámetros de alcance, altitud, autonomía y peso máximo de despegue

Categorías de UAV	Alcance (km)	Altitud (m)	Autonomía (h)	Máximo peso al despegar (kg)
Estratosféricos	>2000	20000 - 30000	48	<3000
Elevada Altitud y gran autonomía (“High Altitude and long endurance”, HALE)	>2000	20000	48	15000
Altitud media y gran autonomía (“Medium altitude and long endurance”, MALE)	>500	14000	24-48	1500
Baja altitud y gran autonomía (“Low altitude and long endurance”, LALE)	>500	3000	~24	~30
Baja altitud y penetración profunda	>250	50-9000	0.25-1	350
Alcance medio	70 a >500	8000	6-18	1250
Alcance corto	10-70	3000	3-6	200
Mini	<10	<300	<2	<30
Micro	<10	<250	<0.5	<1

El fuselaje comercial usado en el proyecto PIE-CEPRA-XII-2018 es el EVENT E386 (ver Figura 1.11), el cual es muy usado en aplicaciones de agricultura, topografía, construcción, minería y conservación de áreas naturales. Este fuselaje ha sido probado por miles de horas desde selvas húmedas hasta montañas y nevados sobre los 13000 pies (3962.4 msnm) [9].

Figura 1.11 EVENT E386. Imagen: propiedad de la página oficial del fabricante [9].

1.3.2.2 Estación Terrena

La estación terrena es el cerebro del UAS. La estación terrena consta de un computador principal que permite el análisis de los datos enviados por el UAV de los sensores y también de los sistemas de telecomunicaciones que permitirán entregarle información de control al vehículo aéreo. El computador ejecuta una interfaz mediante la cual el hombre se comunica con el UAV, se planifican y configuran las misiones y se reciben y procesan los datos recolectados por los sensores a bordo del UAV. La comunicación se lleva a cabo creando un enlace de telecomunicaciones tierra-aire conocido como *Up-link*. Los enlaces de comunicaciones se tratarán meticulosamente más adelante, en el subcapítulo 1.3.3, referente al sistema de telecomunicaciones. La Figura 1.12 muestra una estación terrena comercial.

Figura 1.12 Estación terrena comercial. Imagen: propiedad de UAV FACTORY [10].

En la estación terrena, se programa la misión que será llevada a cabo por el UAV de manera autónoma. Para esto, se requiere un sistema de software que traduzca las órdenes del personal en tierra a comandos de control codificados adecuadamente y enviados en forma de ondas electromagnéticas a través de una antena.

El UAV retorna información o imágenes mediante el enlace de *Down-link*. La información consta de datos del *payload*, información del estado del UAV, de los subsistemas y sensores. Parte de la información que retorna a la estación terrena puede ser de control o información útil para el procesamiento y ésta a su vez puede ser información en tiempo real o datos almacenados para su análisis en tierra una vez terminada la misión.

El software utilizado en este proyecto es la plataforma de software libre Mission Planner del cual se trata con mayor detalle en la subsección 1.3.2.3 referente al plan de vuelo. En este se observarán los datos recolectados por los sensores en el vehículo aéreo.

1.3.2.3 Plan de vuelo

La programación de las misiones es una tarea relativamente sencilla. El plan de vuelo es una de las tareas fundamentales para llevar a cabo un vuelo exitoso. La planificación del vuelo se lleva a cabo en el software Mission Planner. La Figura 1.13 muestra la interfaz inicial al ejecutar dicho software.

Figura 1.13 Interfaz de usuario del software Mission Planner.

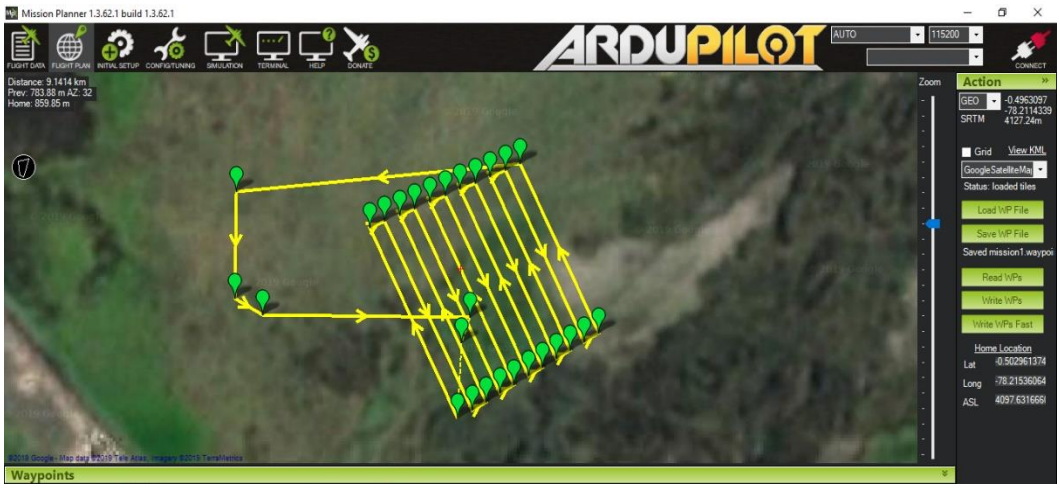

Figura 1.14 Plan de vuelo en Mission Planner.

Una vez ejecutado el software se conecta el UAV a la estación terrena. Cuando se ha creado el enlace de telemetría, éste está listo para la transmisión de información bidireccional para el cumplimiento de la misión enviando la información de los sensores como son: GPS, altura, velocidad, nivel de señal, nivel de batería, etc. La Figura 1.14 muestra una misión planificada en Mission Planner.

1.3.2.4 Sistema de Control Aéreo y Piloto Automático

El sistema de control aéreo consta de un circuito electrónico que integra en sus puertos los datos recibidos por los sensores. Con estos datos el sistema de control a bordo es capaz de tomar decisiones en función de la misión programada.

En el presente trabajo se hace uso del controlador PIXHAWK (ver Figura 1.15). En él se programan las misiones a través del software Mission Planner. Una vez cargadas las misiones el UAV puede trabajar en dos modos de operación: manual y piloto automático.

El modo automático tiene configurada en el PIXHAWK la programación suficiente para realizar los despegues, misiones y aterrizajes sin intervención humana. Generalmente este modo se usará para lo mencionado debido a que el propósito del uso de un UAV es la de llevar a cabo misiones en las que las personas no intervengan en el proceso, sino que una vez cargadas, el UAV las ejecute usando como directrices los datos recibidos desde los sensores. El modo manual permite al piloto realizar vuelos quitándole el control al piloto automático.

Figura 1.15 Controladora de vuelo PIXHAWK 4 [7].

El Pixhawk 4 cuenta con un procesador de 32 bits a 216 MHz, 2 MB de memoria, 512 KB de memoria RAM. Además, periféricos de entrada y salida, a ellos se pueden conectar diferentes sensores y dispositivos. Sensores a bordo, entre ellos: acelerómetro/giroscopio ICM-20689, acelerómetro/giroscopio BMI055, Magnetómetro IST8310, barómetro MS5611. Incluye también, GPS ublox Neo-M8N GPS/GLONASS receiver, integrado con el magnetómetro.

Entre sus interfaces cuenta con: salidas de 8-16 PWM[1] (8 para IO[2], 8 para FMU[3]), 3 entradas dedicadas PWM/Capture en FMU, entradas dedicadas R/C[4] para CPPM, entradas R/C dedicadas para Spektrum / DSM[5] y S.Bus[6] con entradas analógicas PWM RSSI[7], salida dedicada de servo S.Bus, 5 puertos seriales de propósito general, 3 puertos I2C[8], 4 buses SPI[9], hasta 2 CANBuses para dual CAN con ESC serial, entradas de voltaje/corriente analógicas para 2 baterías. En la Figura 1.16 el fabricante muestra la disposición de los puertos en el PX4.

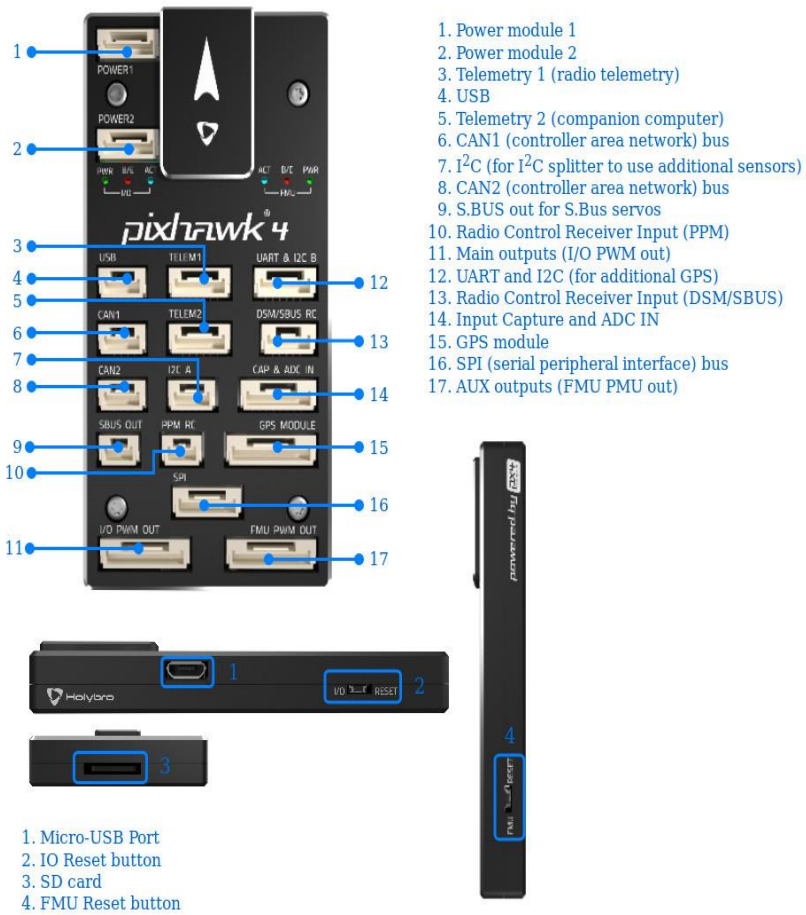

Figura 1.16 Descripción de los periféricos del Pixhawk 4 [7].

[1] PWM es un tipo de modulación digital, la misma consiste en cambiar el ancho del pulso respecto al periodo.
[2] IO es una forma de referirse a los periféricos de entrada salida (input/output).
[3] FMU es, por sus siglas en inglés, Flight Management Unit.
[4] R/C representa las siglas de Radio-Control.
[5] DSM es un protocolo usado en transmisores Spektrum a 2.4 GHz. Muy poco susceptible al ruido.
[6] SBUS es un tipo de comunicación serial usado por algunos dispositivos electrónicos.
[7] RSSI es el indicador de señal recibida.
[8] I2C es un protocolo de comunicación serial de baja velocidad.
[9] SPI son las siglas en inglés de Interfaz Periférico Serial.

El sistema de alimentación cuenta con: módulo de salida de energía: 4.9~5.5V, entrada USB: 4.75~5.25V, entrada de riel de servo: 0~36V.

El modo de piloto automático pone en marcha los sensores para guiar el UAV a través de la misión. Sensores como el de altitud, giroscopio permiten controlar la dirección y estabilidad del UAV haciendo uso de los actuadores necesarios (superficies de control como alerones, timón de dirección, timón de profundidad). Asimismo, se pone en marcha el controlador de velocidad. Este medirá la velocidad a la que se desplaza el UAV y la compara con la velocidad programada y buscará mantenerla en ésta. Para controlar la velocidad se tiene un ESC que manipula la corriente dirigida al motor de propulsión. La idea es mantener la velocidad crucero constante de manera que las fotografías puedan ser tomadas equidistantemente. Esto facilita la reconstrucción en tierra de las fotografías.

El PIXHAWK es capaz también de enviar la información de la misión: altitud, velocidad, datos de giroscopio, GPS, entre otros, de manera que en la estación terrena se pueda tener un control en tiempo real del UAV y su estado.

1.3.2.5 Sensores

Son todos aquellos sistemas que permiten convertir una medida física en una medida eléctrica, mediante transductores. Estas señales eléctricas son transmitidas en el enlace de telemetría y analizadas en la estación terrena para ejecutar una acción en función de ellas como la corrección del curso mediante GPS, aumento o reducción de velocidad en función de velocidad relativa, corrección de altura, etc.

Los sensores necesarios en el dron para el cumplimiento del proyecto PIE-CEPRA-XII-2018 son:

- GPS el cual entrega también información sobre: velocidad y altura absoluta (msnm).
- IMU: Unidad de movimiento inercial, la cual consta de acelerómetro y giroscopio.
- Sensor de corriente.
- Sensor de voltaje.
- Barómetro: el cual entrega datos de altura relativa.
- Sensor de velocidad respecto al viento (tubo Pitot).
- Brújula digital, la cual se consigue mediante el sensor de orientación presente en el GPS y Pixhawk.
- Cámara de video.

- Cámara fotográfica, tanto la propia del dron (RGB) como multiespectral.

1.3.2.6 Aterrizaje

El PX4 (Pixhawk 4) incluye funciones de autopiloto para drones de ala fija (*fixed-wing*) que permiten aterrizar. Estas funciones son: misiones, modo de aterrizaje y modo de retorno.

El aterrizaje automático se lleva a cabo mediante la consecución de varias fases. La primera consiste en conducir el dron por una trayectoria fija dirigida a tierra. La siguiente consiste en el descenso del dron a la "altura de aterrizaje" describiendo una trayectoria curva perdiendo altura progresivamente y aproximándose a tierra. El objetivo final es el punto de aterrizaje programado. La Figura 1.17 muestra como el PX4 realiza la aproximación a tierra [7].

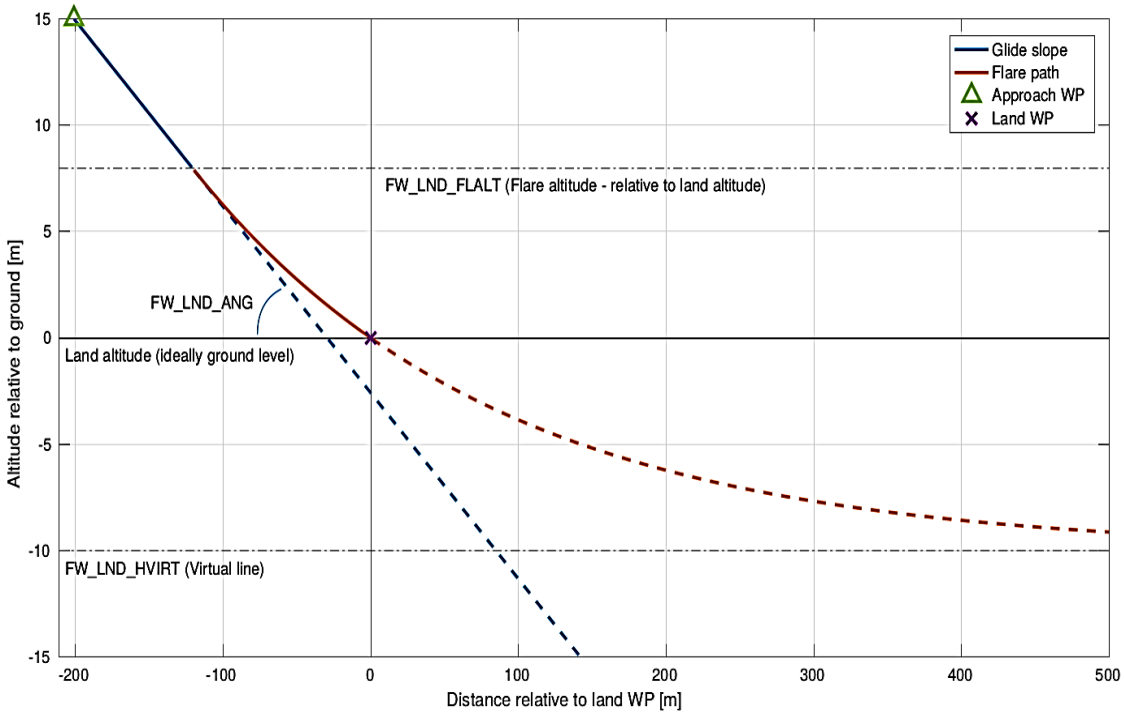

Figura 1.17 Método de aterrizaje programado en PX4 [7].

Una de las principales dificultades consiste en que el piloto automático asume que la altura de aterrizaje final son 0 msnm. Sin embargo, la altura de aterrizaje puede ser mayor o mucho mayor que el nivel del mar. Cuando esto ocurre, el dron debe aterrizar siguiendo únicamente la primera etapa, es decir, el dron aterriza antes de alcanzar la altitud de aterrizaje de la segunda etapa.

1.3.3 SISTEMA DE TELECOMUNICACIONES

El sistema de telecomunicaciones consiste mayoritariamente en enlaces radioeléctricos con sus respectivos equipos. Este sistema es fundamental para la construcción de un UAS pues mediante él existe comunicación entre el UAV y la estación terrena. Estos sistemas son diseñados y configurados para operar generalmente con línea de vista.

Sin el sistema de telecomunicaciones tanto el despegue y aterrizaje se pueden convertir en una tarea muy difícil. La telemetría es otra función que no se podría llevar a cabo sin este sistema. Son los canales de frecuencia quienes hacen posible llevar información de varios tipos, de varios sensores, cada uno con su función e importancia. Si, por ejemplo, no existiera el sistema de telemetría, la información de GPS no podría llegar a la estación terrena, de esta forma las misiones automáticas no podrían realizarse y si el UAV se perdiera o tuviera una falla mecánica, no se lo podría recuperar. Si el dron cae se lo puede localizar gracias al GPS.

El sistema de telecomunicaciones tiene elementos presentes tanto en la estación terrena como en el UAV. De esta manera, la comunicación se lleva a cabo bidireccionalmente y de manera continua.

Aun cuando el procesamiento de los datos se realice en tierra, todo el tiempo el UAV entrega información de control y de condiciones meteorológicas que conciernen al vuelo y el cumplimiento de la misión. Se puede saber si las misiones preprogramadas se desarrollan con éxito o con problemas. Un sistema de telemetría permite también la pronta intervención del personal humano en tierra para corregir defectos en la programación del piloto automático o del controlador de vuelo. A través de los canales de telemetría se controla el vuelo automático o manual.

El sistema de telecomunicaciones se compone por tres subsistemas, a saber, el subsistema de telemetría, radiocontrol y video generalmente.

1.3.3.1 Bandas de Frecuencia

Las bandas de frecuencia son la forma en la que las distintas frecuencias se organizan para brindar un servicio determinado. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R) en su recomendación V.431-8 muestra la nomenclatura de cada una de las bandas de frecuencia y las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones [11]. La Tabla 1.2 muestra la distribución de frecuencias según la UIT-R con sus respectivos anchos de banda.

En la Tabla 1.3 Bandas con nomenclatura literal usada en frecuencias del orden de GHz se mencionan las bandas usadas en radares y para comunicaciones espaciales. Estas frecuencias son usadas frecuentemente en comunicaciones satelitales [11].

Tabla 1.2 Distribución de frecuencias según la UIT-R [11]

Número de la banda	Símbolos en inglés	Gama de frecuencias	Subdivisión métrica correspondiente	Abreviaturas métricas para las bandas
3	ULF	300-3000 Hz	Ondas hectokilométricas	B.hkm
4	VLF	3-30 kHz	Ondas miriamétricas	B.Mam
5	LF	30-300 kHz	Ondas kilométricas	B.km
6	MF	300-3000 kHz	Ondas hectométricas	B.hm
7	HF	3-30 MHz	Ondas decamétricas	B.dam
8	VHF	30-300 MHz	Ondas métricas	B.m
9	UHF	300-3000 MHz	Ondas decimétricas	B.dm
10	SHF	3-30 GHz	Ondas centimétricas	B.cm
11	EHF	30-300 GHz	Ondas milimétricas	B.mm
12		300-3000 GHz	Ondas decimilimétricas	B.dmm
13		3-30 GHz	Ondas centimilimétricas	B.cmm
14		30-300 GHz	Ondas micrométricas	B. µm
15		300-3000 GHz	Ondas decimicrométricas	B.dµm

El ancho de banda es definido como el rango de frecuencias dentro del cual el desempeño de los equipos conforma un estándar específico. En general el ancho de banda es especificado como el radio entre la frecuencia superior y la inferior. Suele también ser expresado como un porcentaje de la frecuencia central [12]. En otras palabras, el ancho de banda de una banda de frecuencia consiste en un conjunto de infinitas frecuencias separadas simétricamente de una frecuencia central. Adicionalmente la Figura 1.18 muestra el espectro electromagnético usado en comunicaciones inalámbricas y también guiadas mediante fibra óptica.

La UIT asigna un espacio de frecuencias destinado al libre uso sin necesidad de adquisición de licencias ni el pago a la entidad reguladora de las mismas por su uso. A este espacio de frecuencias se lo conoce como “Bandas libres”. Las bandas libres están

ubicadas en rangos específicos dependiendo de la legislación del país. Ecuador tiene una entidad encargada de la administración del espectro electromagnético de frecuencias de radio.

Tabla 1.3 Bandas con nomenclatura literal usada en frecuencias del orden de GHz [11]

Símbolo literal	**Utilización en el campo del radar (GHz)**		**Radiocomunicaciones espaciales**	
	Gama del espectro	**Ejemplos**	**Designación nominal**	**Ejemplos (GHz)**
L	1-2	1.125-1.4	Banda de 1.5 GHz	1.525-1.710
S	2-4	2.3-2.5 2.7-3.4	Banda de 2.5 GHz	2.5-2.690
C	4-8	5.25-5.85	Banda de 4/6 GHz	3.4-4.2
X	8-12	8.5-10.5	-	-
Ku	12-18	13.4-14.0 15.3-17.3	Banda de 11/14 GHz Banda de 12/14 GHz	10.7-13.25 14.0-14.5
K	18-27	24.05-24.25	Banda de 20 GHz	17.7-20.2
Ka	27-40	33.4-36.0	Banda de 30 GHz	27.5-30.0
V	-	-	Banda de 40 GHz	37.5-42.5

- **Legislación Ecuatoriana para Bandas Libres**

Según la legislación ecuatoriana, es posible usar “bandas libres”, la regulación formal se encuentra presente en la resolución No. TEL-489-22-CONATEL-2013 del 30 de septiembre de 2013 [13]. En la misma se expidió la Norma Técnica para el uso de bandas libres para aplicaciones industriales científicas y médicas. Operan, a título secundario[10], sistemas que ocupan espectro radioeléctrico para “Uso Determinado en Bandas Libres” (UDBL), para los servicios fijo y móvil, prohibiéndoseles interferir con estaciones de servicio primario. No pueden reclamar protección ante interferencias perjudiciales causadas por estaciones de servicio primario, éstas están dispuestas como se muestra en Tabla 1.4. Esto está presente en las “Notas Nacionales” relacionadas con el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias EQA.45 y EQA.50 [14].

10 Los títulos secundarios son aquellos que se pueden usar sin necesidad de licencia, se expresan en la Norma Técnica del Espectro de Uso Libre en las notas nacionales EQA.45 y EQA.50.
Los títulos primarios son aquellos que requieren un proceso de concesión adecuado en la ARCOTEL. Para que sea posible se requiere un estudio técnico y la aprobación firmada y legalizada.

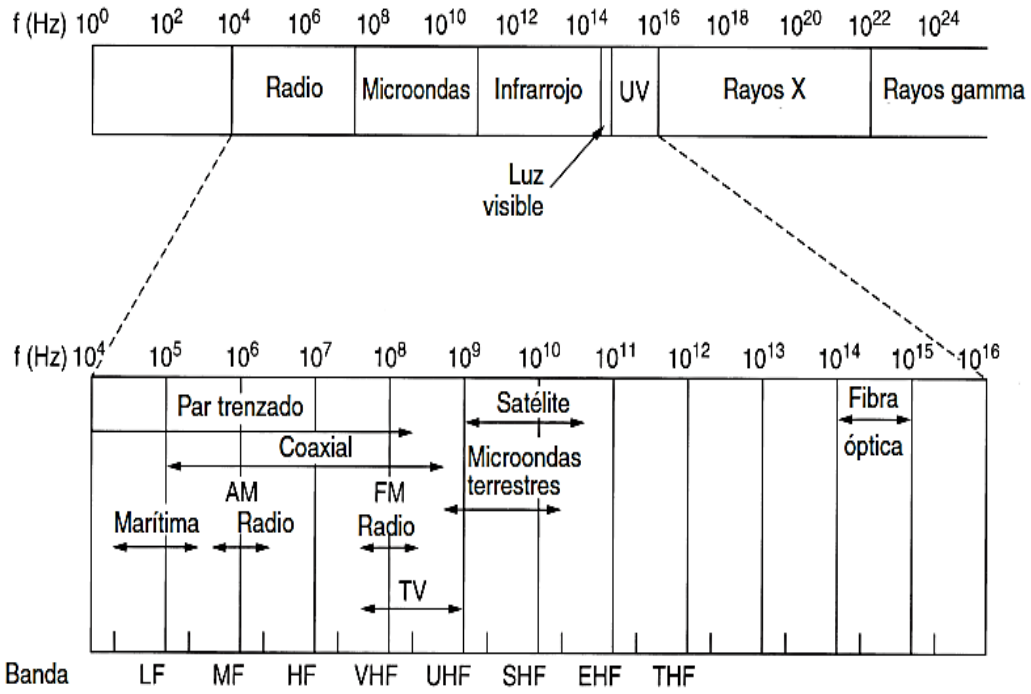

Figura 1.18 Espectro electromagnético usado en telecomunicaciones.

Tabla 1.4 Atribución de bandas libres en la legislación ecuatoriana

BANDAS LIBRES EN ECUADOR		
Frecuencia mínima	**Frecuencia máxima**	**Unidades**
915	928	MHz
2 400	2 483.5	MHz
5 150	5 350	MHz
5 470	5 725	MHz
5 725	5 850	MHz
24.05	24.25	GHz

1.3.3.2 Sistema de telemetría

El sistema de telemetría se encarga de la comunicación de los datos recolectados por los sensores, GPS (incluyendo información de altura), canales de control para la conmutación entre piloto automático y el modo manual, captura de imágenes, grabación de video, información de la velocidad, presión, etc. Se pueden, además, configurar parámetros mientras el vehículo se encuentra en vuelo, así como también inspeccionar los parámetros de telemetría en tiempo real [7]. La comunicación es transmitida tanto desde la estación terrena al UAV o viceversa. La canalización se realiza en función de la cantidad de sensores y modos de vuelo que se programen. Se pueden tener múltiples canales de

subida como de bajada. Generalmente el procesamiento de los datos se realiza en tierra debido a las limitaciones en autonomía de vuelo. A medida que aumenta el procesamiento en aire, aumenta también el consumo de energía, la cual es suministrada por la batería del UAV, pero reduce notablemente el tiempo de vuelo.

- **Protocolos de telemetría**

El protocolo usado por el PX4 es MAVLink. Éste permite el intercambio bidireccional de información entre la estación terrena y el UAV. El protocolo consiste en una librería con recursos suficientes para el intercambio de tramas de información entre estaciones. La librería contiene ficheros con extensión ".xml" por lo cual la estructuración y empaquetamiento puede ser llevada a cabo por distintos lenguajes de programación. Los mensajes se definen usando cabeceras en lenguaje C. Una característica de esta librería es que permite la creación e integración de nuevos mensajes personalizados. MAVLink posee licencia *GNU Lesser General Public License*. Esto permite modificar el código fuente y personalizar dicha librería [15].

La trama de información se estructura como se muestra en la Figura 1.19.

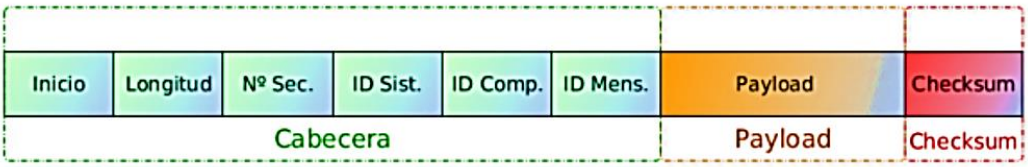

Figura 1.19 Trama MAVLink [15].

Cada campo de la trama cumple una función en las tareas de comunicación. La explicación de cada campo se presenta en la Tabla 1.5.

Los comandos de navegación permiten controlar los movimientos del vehículo, además del despegue, aterrizaje y movimiento hacia los *waypoints*. Estos comandos tienen la más alta prioridad entre comandos tomando en cuenta que existen varios comandos [15].

1.3.3.3 Sistema de control remoto

Los sistemas de control remoto han ido ganando campo en el control manual de vehículos ya sea acuáticos, terrestres o aéreos. Las tecnologías usadas más frecuentemente son las de espectro expandido. Generalmente se usan estas técnicas en bandas libres debido a su gran capacidad para reducir la interferencia usando saltos de frecuencia pseudoaleatorios o usando chips de secuencia para el mismo fin. Los controles remotos usan mayoritariamente la técnica *Direct sequence spread spectrum* por su ganancia de

código. Es decir, permiten ser escuchados a pesar de la alta interferencia sin necesidad de requerir elevar la potencia [16].

Tabla 1.5 Trama MAVLink [15]

BYTE	EXPLICACIÓN
Inicio	Este byte indica el comienzo del paquete MAVLink.
Longitud	Indica el número de bytes que se van a enviar como payload del mensaje. Puede tomar un valor entre 0 y 255.
Número de secuencia	Muestra el número de paquete enviado según su pertenencia a la secuencia de estos con el objetivo de reordenar éstos en el destino (por si fuera éste de gran tamaño) o detectar paquetes perdidos. Puede tomar un valor entre 0 y 255.
Identificación del sistema	Identifica el sistema, mediante un número natural, que ha enviado el mensaje permitiendo diferenciar entre varios sistemas de la misma red. Puede tomar un valor entre 0 y 255.
Identificación del componente del sistema	Señala, mediante un número natural, el componente de dicho sistema que ha enviado el mensaje permitiendo de este modo diferenciar varios componentes dentro del mismo sistema. Puede tomar un valor entre 0 y 255.
Identificación del mensaje	Indica el tipo de mensaje enviado, señalando cómo se tiene que leer el payload que viene a continuación. Utilizando un símil, es una leyenda que indica cómo se debe leer y traducir la carga útil del mensaje. Puede tomar un valor entre 0 y 255.

La banda de frecuencia más usada en control remoto es la banda de 2.4 GHz. Es posible encontrar actualmente controles a 5.8 GHz debido al poco uso de esta banda al ser relativamente nueva además de su alta atenuación. Existe una gran variedad de controles con numerosos canales que se adaptan a las necesidades más extremas.

1.3.3.4 Sistema de video

Existen en el mercado sistemas de video tanto analógicos como digitales. Los analógicos permiten un menor consumo de potencia debido a que no realizan un procesamiento digital en las imágenes. Por esta razón, son los más usados en drones para misiones de larga distancia.

Los sistemas digitales permiten tener una imagen más clara, sin embargo, una de sus limitantes es su elevado precio y su menor rango de cobertura. El video digital si no cumple con las condiciones de potencia simplemente se pierde, no así, el video analógico es capaz de ser recibido aún en estas condiciones proporcionando imágenes de mala calidad, pero útiles para los fines de observación de terreno [17].

El video cobra importancia especialmente en el aterrizaje. Debido a que en ocasiones se pierde la percepción de la altura y el espacio observando desde un punto fijo en tierra. El aterrizaje manual puede mejorar si se lo realiza observando desde el dron la aproximación a tierra. Sin embargo, los sistemas de piloto automático permiten aterrizar sin necesidad de la intervención del piloto a menos que se trate de una emergencia.

1.3.3.5 Antenas

En Balanis [12] se define la antena como un medio de radiación o recepción de ondas de radio. Es una estructura de transacción entre el espacio libre y las líneas de transmisión. El medio de transmisión puede ser un cable coaxial o una guía de onda. Las antenas convierten las ondas eléctricas en ondas electromagnéticas por lo que se puede considerar a las antenas como un transductor, que convierte un tipo de energía en otro. Al ser la frontera entre un sistema electromagnético y eléctrico, la antena es una interfaz entre ambos medios de transmisión, el alámbrico y el inalámbrico.

Las antenas son los componentes clave de un sistema inalámbrico pues sin ellas, la transmisión no es posible aun si se tienen los mejores transmisores, receptores o líneas de transmisión. Las antenas comerciales presentan una gran variedad en el mercado y su uso es ampliamente extendido debido al acelerado desarrollo de tecnologías inalámbricas, mismas que facilitan la movilidad de los dispositivos.

Una de las clasificaciones [18] más comunes de las antenas es:

a) Antenas lineales: monopolo, dipolo, helicoidal, de lazo.

b) Antenas de apertura: ranuradas, de corneta, parabólicas.

c) Antenas impresas: Parche, dipolo impreso, espiral impresa.

Las antenas pueden ser de baja, mediana o alta ganancia dependiendo de la aplicación requerida. Los dipolos, monopolos, de lazo, ranuradas y tipo parche presentan generalmente ganancias bajas, mientras que las de corneta presentan una ganancia media respecto a las antenas de disco, parabólicas y elípticas, pues estas son usadas en enlaces radioeléctricos de punto a punto con separación de varios kilómetros.

Las antenas, dependiendo de su geometría, presentan diferentes formas en sus lóbulos de radiación. Las antenas omnidireccionales, en un plano presentan un lóbulo de radiación circular, ejemplos de estas antenas son los dipolos. Las antenas de apertura presentan lóbulos de radiación alargados en una dirección mientras que en los demás la potencia radiada es nula o prácticamente nula.

- **Lóbulos de Radiación**

Los lóbulos de radiación de las antenas se definen como una función matemática, la cual se puede representar gráficamente en un espacio de coordenadas. El mejor sistema de coordenadas para el análisis de los lóbulos de radiación es el de coordenadas esféricas. En este sistema de coordenadas se representa la magnitud del campo lejano[11] versus la posición alrededor de la antena [19].

Los lóbulos de radiación frecuentemente son normalizados respecto a su valor máximo, lo cual permite la fácil visualización de sus características y su relevancia. A este patrón de radiación se lo conoce como campo normalizado o patrón de potencia. La escala más común en la que se representan las gráficas de los valores de la intensidad de potencia son los decibelios (dB). Al usar la escala logarítmica de los decibelios es posible visualizar los valores muy bajos que pueden llegar a ser significativos para ciertos análisis. La escala en decibelios representa la magnitud de los campos eléctricos o magnéticos como una función del espacio angular como se muestra en la Figura 1.20 [12].

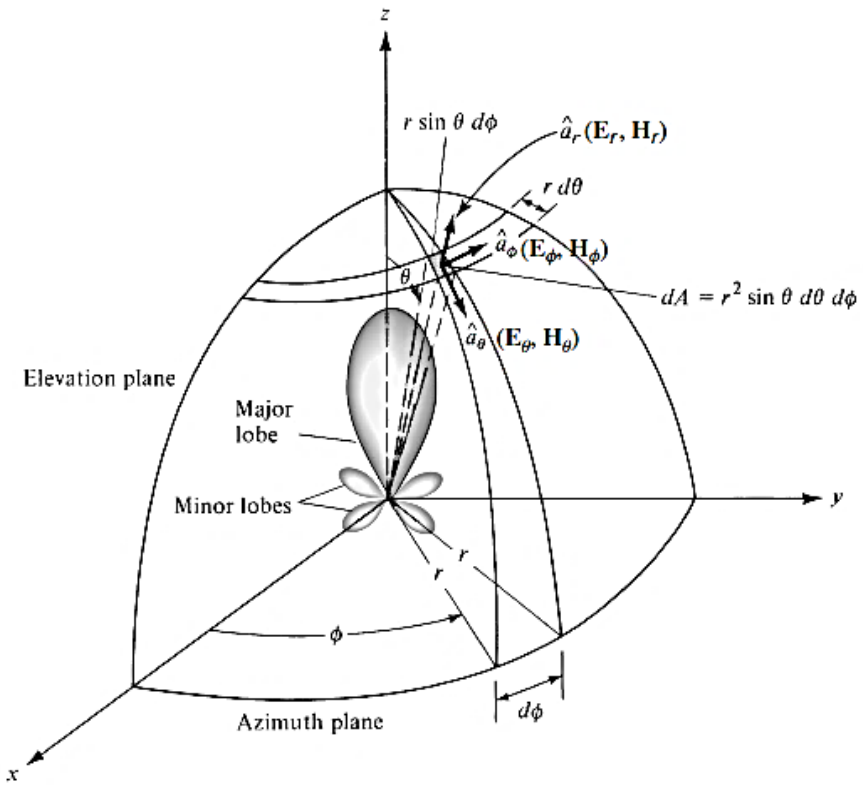

Figura 1.20 Sistema de coordenadas para el análisis de antenas [12].

[11] El campo lejano de una antena es una zona del espacio en donde los frentes de onda lucen (aproximadamente) como una onda plana. Es en esta zona donde se miden los lóbulos de radiación [18].

Es común mostrar los lóbulos de radiación descompuestos en el plano eléctrico y magnético, en otras palabras, en el plano horizontal y vertical como se muestra en la Figura 1.21.

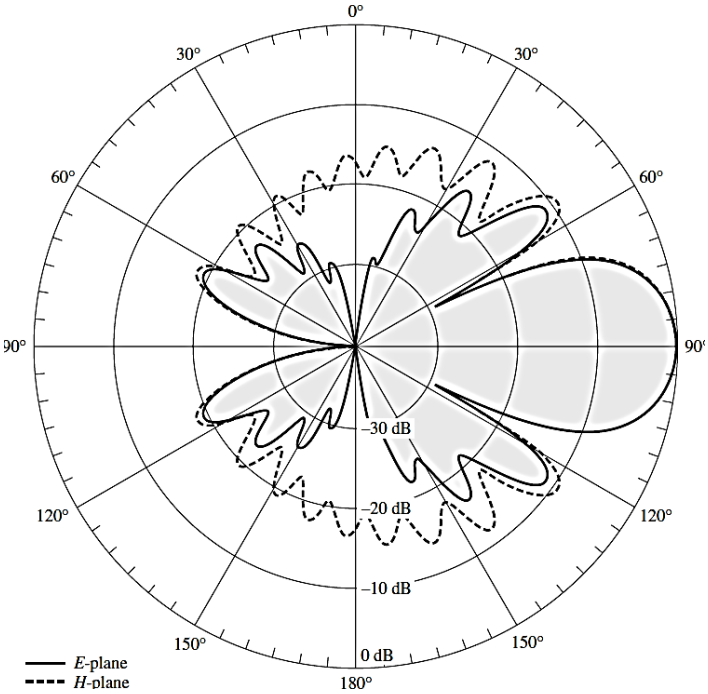

Figura 1.21 Proyección del lóbulo de radiación de una antena en el plano eléctrico (vertical) y magnético (horizontal) [12].

- **Ejemplos de Lóbulos de Radiación de Antenas Representativas**

Los monopolos y dipolos tienen lóbulos de radiación omnidireccionales, es decir que en uno de sus planos se verán como una circunferencia, en tanto que en otro plano se verán como un lazo. En la Figura 1.22 se observa un patrón de radiación omnidireccional en 3D.

En la Figura 1.23 se observa la proyección de un lóbulo omnidireccional en el plano eléctrico (E) y magnético (H).

- **Ganancia de las Antenas**

En Pozar [19], se muestra cómo la ganancia de las antenas, en la práctica, se relaciona con las imperfecciones de los componentes de éstas, las cuales se traducen en pérdidas de potencia. Debido a esto, la eficiencia de radiación depende de estas pérdidas y de la potencia suministrada a la antena como se muestra en la Ecuación (1.1).

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}} \tag{1.1}$$

donde P_{rad} es la potencia radiada por la antena, P_{in} es la potencia a la entrada de la antena, P_{loss} es la potencia perdida en la antena.

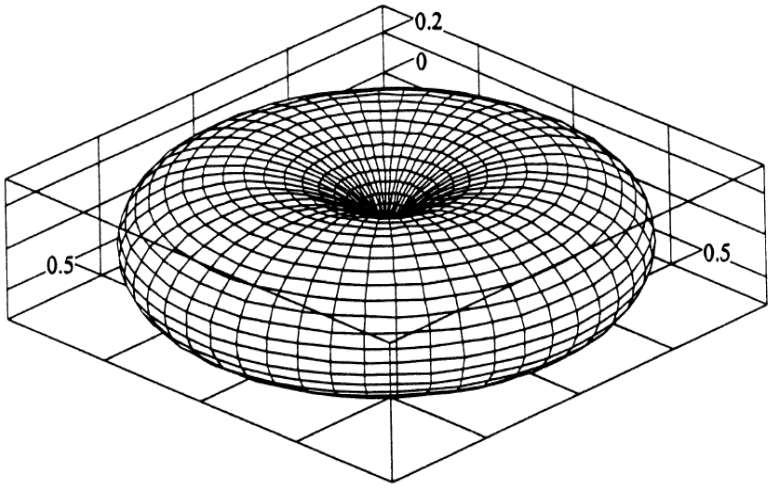

Figura 1.22 Vista tridimensional de un patrón de radiación de un dipolo [18].

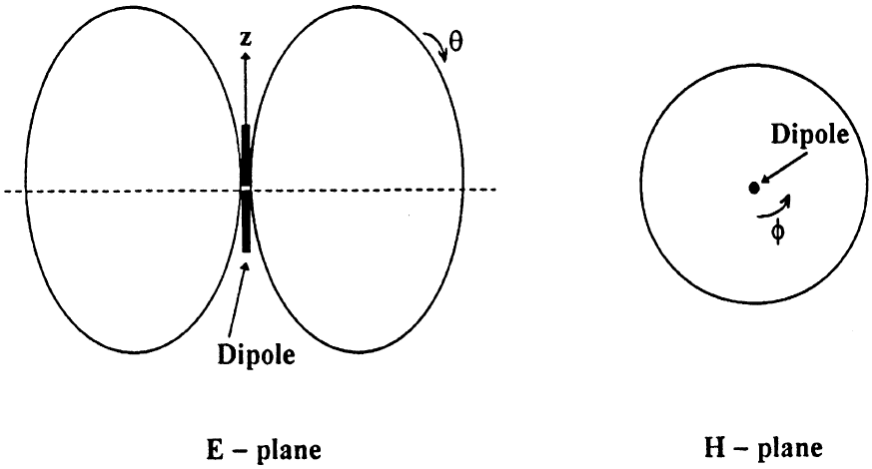

Figura 1.23 Descomposición del lóbulo de radiación de una antena dipolo en los planos eléctrico (E) y magnético (H) [18].

La directividad se define como la máxima intensidad de radiación en el lóbulo principal U_{max} sobre el promedio de intensidad radiado U_{avg}. La Ecuación (1.2) muestra la equivalencia matemática de este concepto.

$$D = \frac{U_{max}}{U_{avg}} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} = \frac{4\pi U_{max}}{\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} U(\theta,\varphi) sin\,\theta d\theta d\varphi} \tag{1.2}$$

siendo $U_{avg} = \frac{P_{rad}}{4\pi}$, $P_{rad} = \int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} U(\theta,\varphi) sin\,\theta d\theta d\varphi$. En una antena isotrópica $U(\theta\varphi) = 1$ por lo que $D = 1$, o $0\ dB$.

Algunas directividades típicas de antenas comunes se muestran en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6 Directividades típicas de antenas conocidas [19]

ANTENA	**DIRECTIVIDAD (dBi)**
Dipolo	2.2
Microstrip patch	7
Guía de onda	23
Parabólica	35

Finalmente, la ganancia de las antenas se define como el producto de la directividad y la eficiencia de radiación [19].

$$G = \eta_{rad} D \tag{1.3}$$

- **Polarización**

La polarización de una antena en una dirección dada se define como “la polarización de la onda transmitida por la antena”. La misma se define como la propiedad de una onda electromagnética describiendo una dirección variante en el tiempo y magnitud relativa del vector de campo eléctrico a lo largo de la dirección de propagación. Los tipos de polarización de las antenas pueden ser: lineal, circular o elíptica [12].

1.3.4 ENLACES DE MICROONDAS

Los enlaces de microondas son comunicaciones punto a punto que usan la propagación de información sobre ondas electromagnéticas a través del espacio libre o el aire. Un esquema típico de un sistema de telecomunicaciones se muestra en la Figura 1.24.

Los enlaces pueden ser mejorados usando técnicas de diversidad. A saber, las técnicas más conocidas de diversidad son: Diversidad en frecuencia, espacial, temporal, polarización, entre otras.

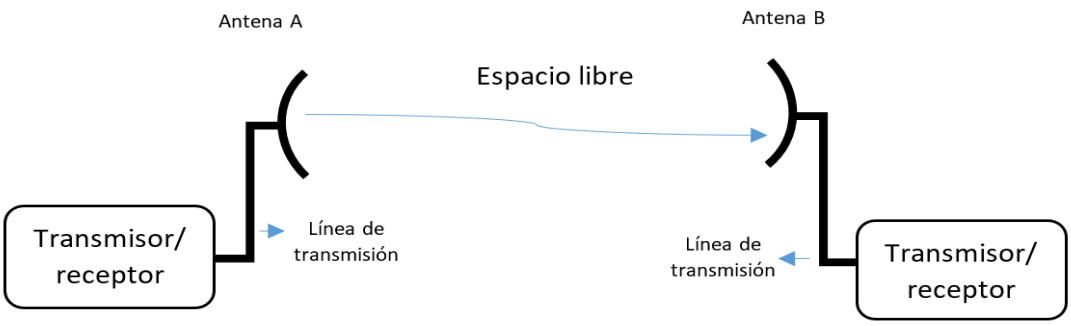

Figura 1.24 Esquema del sistema de telecomunicaciones punto a punto.

- **La diversidad en frecuencia**

Esta técnica consiste en usar dos o más frecuencias portadoras separadas un porcentaje del espectro radioeléctrico. De tal forma, las señales con una separación en frecuencia distintas presentan también desvanecimientos distintos. Aumentando la separación en frecuencia se pueden obtener canales parcial o totalmente no-correlacionados. Esta técnica tiene la desventaja de requerir un ancho de banda significativamente mayor, con el mismo número de receptores que otras técnicas de diversidad [20].

- **La diversidad espacial**

Consiste en el uso de varios receptores con su respectiva antena. Las antenas se separan una distancia específica de las demás. A la salida de cada receptor se realiza una estimación del nivel de señal a ruido y con esta información a la salida de todos los receptores se lleva a cabo un proceso de selección o combinación. En el proceso de selección se escoge la señal del receptor que haya tenido la mejor relación señal a ruido. En el proceso de combinación se ingresan las señales de los receptores a un combinador, el cual mediante algoritmos reconstruirá una mejor señal para su procesamiento. Lo crucial de esta técnica es obtener señales estadísticamente independientes unas de otras. Esto permite evitar desvanecimientos profundos simultáneamente en todas las ramas. De esta manera se mejoran las características globales en el receptor. La independencia estadística se caracteriza por la correlación. La Figura 1.25 muestra la correlación entre la potencia recibida por dos receptores en función de su separación para propagación en interiores a 5 GHz. La correlación, como se observa, disminuye rápidamente en función de

la distancia. El caso ideal es conseguir una correlación igual a cero. Además, p es la probabilidad de tener un cierto desvanecimiento, con la selección entre N canales independientes esta probabilidad se reduce a p^n [21].

- **La diversidad temporal**

Stavroulakis [22] define la diversidad temporal como el envío de un mensaje idéntico en diferentes "slots" de tiempo. El intervalo de separación entre slots debe ser mayor a $0.5/fd$, donde fd representa la máxima frecuencia Doppler.

- **La diversidad de polarización**

En Tomasi [23] se explica que para obtener este tipo de diversidad, se envía una sola onda de radiofrecuencia con dos polarizaciones diferentes, Las cuales son generalmente ortogonales. Estas ondas con diferentes polarizaciones no necesariamente son sometidas a las mismas degradaciones del canal.

1.3.4.1 Zonas de Fresnel

En Cardama [21] se considera este análisis cuando existen obstáculos que interrumpen el camino directo entre la antena transmisora y la receptora, por lo tanto, se vuelve relevante la difracción. Estas zonas son elipsoides de revolución, cuyo eje mayor tiene una longitud de $R + n\,\lambda/2$, siendo $n = 1,2,3,\ldots$ y λ la longitud de onda de la señal de radiofrecuencia. La intersección de las Zonas de Fresnel con el plano P son circunferencias cuyo radio puede calcularse para el caso que sea mucho menor que d_1 y d_2 como se muestra en la Ecuación (1.4).

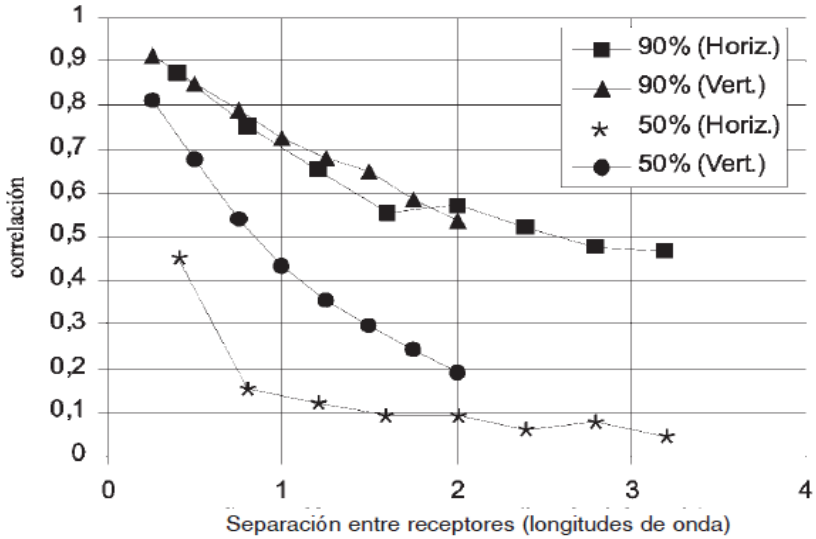

Figura 1.25 Separación entre receptores en longitudes de onda [21].

$$R_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \tag{1.4}$$

donde d_1 corresponde a la distancia entre el transmisor y el punto donde se grafica la zona de Fresnel en un plano y d_2 corresponde a la distancia entre el punto donde se desea graficar la zona de Fresnel y el receptor. La Figura 1.26 ilustra gráficamente el método de cálculo del radio de las zonas de Fresnel.

Simplificando la ecuación (*1.4*) se obtiene para el primer radio de Fresnel:

$$R_1 = 17{,}3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f\ d}} \tag{1.5}$$

Siendo d_1, d_2 distancias en km, d la distancia total en km y la frecuencia f en GHz.

Al aplicar el principio de Huygens, el campo sobre la antena receptora puede formarse como la superposición de fuentes elementales de ondas esféricas situadas en el plano P, radiando cada una de estas fuentes con un desfase función de la distancia r_1. A estas fuentes equivalentes se les llama fuentes secundarias. Las fuentes equivalentes de Huygens situadas en la zona 1 se sumarán en la antena receptora con una fase inferior a 180°, es decir constructivamente. Las contribuciones producidas por las fuentes 2 y 3 tienden a cancelarse mutuamente, de similar manera en las siguientes zonas de Fresnel.

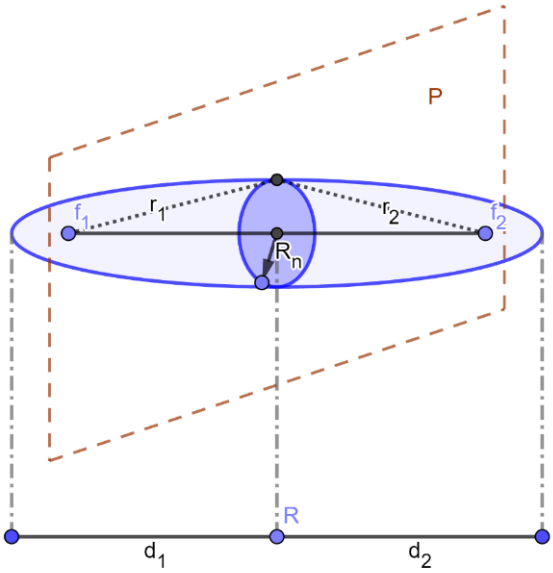

Figura 1.26 Zonas de Fresnel en un plano P [21]

Por tal razón se considera que la primera zona de Fresnel permite definir la condición de visibilidad entre antenas, de forma que resulta despreciable el obstáculo cuando éste no

obstruye la primera zona de Fresnel. Si existe una obstrucción dentro de la zona de Fresnel existirá una disminución apreciable en la potencia recibida [21].

La atenuación debida a la obstrucción de las zonas de Fresnel, en un terreno medio se pueden calcular aproximadamente mediante la ecuación (*1.6*) [21].

$$A_d = -\frac{20h}{F_1} + 10\ [dB] \tag{1.6}$$

h representa la altura en metros del obstáculo más importante en el trayecto, por encima o debajo de la línea de visibilidad directa. Sin embargo, si la obstrucción no supera el 60% de la primera zona de Fresnel, se puede ignorar el valor de esta atenuación.

1.3.4.2 Margen de desvanecimiento

Las señales en el receptor, debido a las condiciones variables del canal de comunicaciones inalámbrico, hacen que la señal que sale del transmisor fluctúe de forma impredecible, por lo tanto, es útil para cualquier propósito práctico tener un rango estimado de pérdidas, en el cual las señales pueden desvanecerse ya sea de manera rápida (*fast fading*) o lenta (*slow fading*). El objetivo es lograr un nivel de potencia reconocible por el receptor de dicha señal para poder reconstruir el mensaje enviado y poder procesar la información contenida en el mismo.

El rango estimado de pérdidas se conoce como margen de desvanecimiento. Se define matemáticamente como la diferencia entre la potencia recibida de diseño y el límite de potencia mínima del receptor como se muestra en la Ecuación (1.7).

$$LM = P_r - P_{r_m in} > 0\ \ [dB] \tag{1.7}$$

Valores comunes los comprendidos entre 3 y 20 dB. Un LM adecuado permite un sistema más robusto contra variaciones debidas al clima, movimiento del Tx/Rx, multitrayectoria, etc. [19].

Se deben resolver las ecuaciones de Barnett-Vigant para una disponibilidad específica en un sistema no protegido sin diversidad. La ecuación(*1.8*) permite encontrar el margen de desvanecimiento en decibeles.

$$F_m = 30\, log\, D + 10\, log(6ABf) - 10\log(1 - \mathrm{R}) - 70\ [\mathrm{dB}] \tag{1.8}$$

Donde F_m corresponde al margen de desvanecimiento en [dB], D a la distancia en [km], f la frecuencia [GHz], R la confiabilidad[12] en tanto por uno ($0 < R < 1$), $1 - R$ el objetivo de confiabilidad para una ruta de 400 km en un sentido, A es el factor de rugosidad[13], B el factor de conversión[14] para la peor probabilidad mensual en una probabilidad anual [23].

1.3.4.3 Transmisor

El equipo transmisor es el encargado de procesar la información para adecuarla al canal de comunicaciones inalámbrico. Éste se compone de varios subsistemas que cumplen las tareas de: modulación, filtrado, mezcla y amplificación de potencia. La Figura 1.27 ilustra el diagrama de bloques de un transmisor [18]. El transmisor es capaz de radiar la información en un ancho de banda determinado buscando siempre hacerlo con estabilidad de frecuencia.

- **Potencia del transmisor**

A la salida del transmisor, la señal se encuentra lista para ser radiada por alguna antena, esta señal tiene una potencia la cual debido a la eficiencia de las antenas no será la potencia radiada. La potencia entregada por el transmisor se mide en Watts o miliwatts. Sin embargo, es útil para el diseño de sistemas inalámbricos usar la potencia en unidades de dBm.

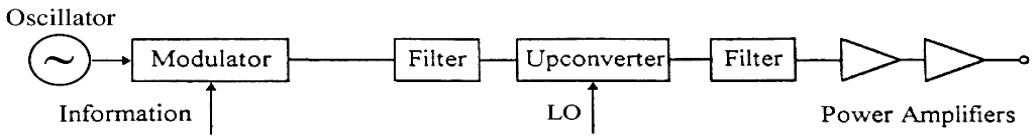

Figura 1.27 Diagrama de bloques del transmisor [18].

En la Figura 1.27, Las siglas *LO* significa Oscilador Local, por sus siglas en inglés.

1.3.4.4 Receptor

El equipo receptor es el encargado de la recepción de las señales y su interpretación en bits para su posterior análisis. La Figura 1.28 muestra el diagrama de bloques típico de un receptor de señales de radiofrecuencia.

---

[12] $1 - R$ representa el objetivo de confiabilidad para una ruta de 400 km en un solo sentido.
[13] A puede tomar el valor de 4 cuando el enlace está sobre agua o un terreno muy liso, 1 sobre un terreno promedio y 0.25 sobre un terreno muy áspero y montañoso.
[14] B puede tomar el valor de 1 para pasar una disponibilidad anual a la peor base mensual, 0,5 para áreas calientes y húmedas, 0.25 para áreas continentales promedio y 0.125 para áreas muy secas o montañosas.

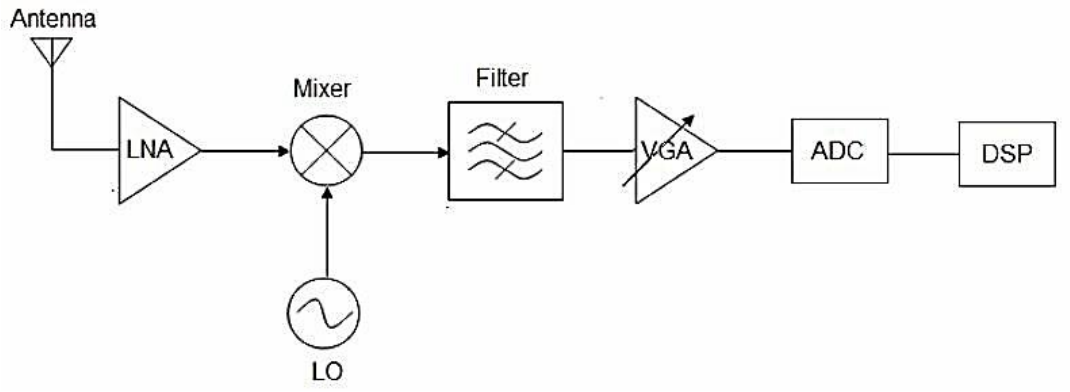

Figura 1.28 Diagrama de bloques del receptor [24].

En la Figura 1.28, LNA por sus siglas en inglés, significa amplificador de bajo ruido; LO, oscilador local; VGA, amplificador de ganancia variable; ADC, conversor analógico-digital; DSP Procesador Digital de Señales.

- **Umbral de Potencia**

El receptor a su entrada debe tener una señal reconocible, es decir una señal con una potencia que supere la potencia del ruido térmico, de esta manera se pueden interpretar los datos que llegan. A esta potencia mínima reconocible de recepción se la conoce como sensibilidad (S) [19].

1.3.4.5 Presupuesto del enlace

Para un correcto funcionamiento del sistema de comunicaciones, se toman en cuenta los parámetros más representativos del enlace. Con ellos se puede estimar la potencia en el receptor. La ecuación (1.9) reúne los parámetros de potencia de transmisión (P_t), ganancias de las antenas (G_t, G_r) y la pérdida por propagación en el aire (espacio libre $\frac{\lambda_0}{4\pi R}$). Además, se toman en cuenta las pérdidas del sistema $\left(\frac{1}{L_{sys}}\right)$ incluyendo pérdidas por conectores, desacoplamiento, pérdidas por factores atmosféricos, pérdidas por polarización y errores de apuntamiento cuando el enlace es muy directivo [18]. Matemáticamente se expresa:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda_0}{4\pi R}\right)^2 \left(\frac{1}{L_{sys}}\right) \text{[W]} \qquad (1.9)$$

A esta ecuación se la conoce como la ecuación de enlace, donde R es la distancia entre las antenas transmisora y receptora, λ_0 representa la longitud de onda de trabajo. A esta ecuación de pérdidas se añaden también las pérdidas del sistema. Al convertir la Ecuación (1.9) a decibelios se obtiene la Ecuación (1.10).

$$10\log P_r = 10\log P_t + 10\log G_t + 10\log G_r - 20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda_0}\right) - 10\log L_{sys} \text{ [dB]} \qquad (1.10)$$

Las pérdidas por espacio libre se las puede calcular aisladamente mediante la ecuación (*1.11*).

$$L_{fs} = 20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda_0}\right) = 20\log\left(\frac{4\pi R f}{c}\right) \qquad (1.11)$$

Donde c representa la velocidad de la luz en el vacío, f la frecuencia de operación.

Dejando la ecuación simplificada para usar para cualquier frecuencia y distancia se obtiene:

$$L_{fs} = 32.4 + 20\,log\,f + 20\,log\,R \qquad (1.12)$$

Donde f: $[MHz]$, R: $[km]$.

Las pérdidas del sistema se la representarán como L_{fading} las cuales se sumarán a la sensibilidad del receptor para dar un margen de seguridad.

Las pérdidas del sistema (L_{sys}) se componen de las pérdidas por obstrucción de las zonas de Fresnel ($L_{Fresnel}$), pérdidas por desvanecimiento (L_{Fading}) y pérdidas en cables y conectores ($L_{cab-con}$).

$$P_t + G_t - L_{fs} + G_r - L_{cab-con} - L_{fading} - L_{Fresnel} \geq S \qquad (1.13)$$

Siendo S la sensibilidad del receptor.

2 METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan los pasos para el diseño del sistema de telecomunicaciones, tanto para el Humedal Jatunhuaycu como para el Humedal Pugllohuma. Se desarrolla el cálculo del presupuesto del enlace del sistema de telemetría, radiocontrol y video en ambos humedales. Cada sistema presenta condiciones propias de diseño, mismas que se ajustan a las necesidades puntuales de alcance, frecuencia, ganancia, etc. Posteriormente, se realiza la selección de equipos en cada sistema basados en una comparación de los equipos presentes en el mercado con los valores teóricos obtenidos. Finalmente, se presentan las simulaciones de cada sistema de telecomunicaciones para ambos humedales.

El cálculo del presupuesto del enlace debe tomar en cuenta todos los factores que intervienen en la pérdida de potencia, así como los elementos que permiten aumentar el rango de operación. Para este análisis se separan los elementos en el lado del transmisor, el canal inalámbrico, y el lado del receptor. Cada sección que constituye un subsistema de telecomunicaciones presenta tanto potencias, ganancias y pérdidas de ésta. Las mismas se tabulan para ordenar los datos y facilitar el uso de las ecuaciones detalladas en el capítulo anterior. La Figura 2.1 ilustra la forma en la que se analiza el presupuesto del enlace de cada subsistema del sistema de telecomunicaciones ya que, cada uno funciona a diferentes frecuencias.

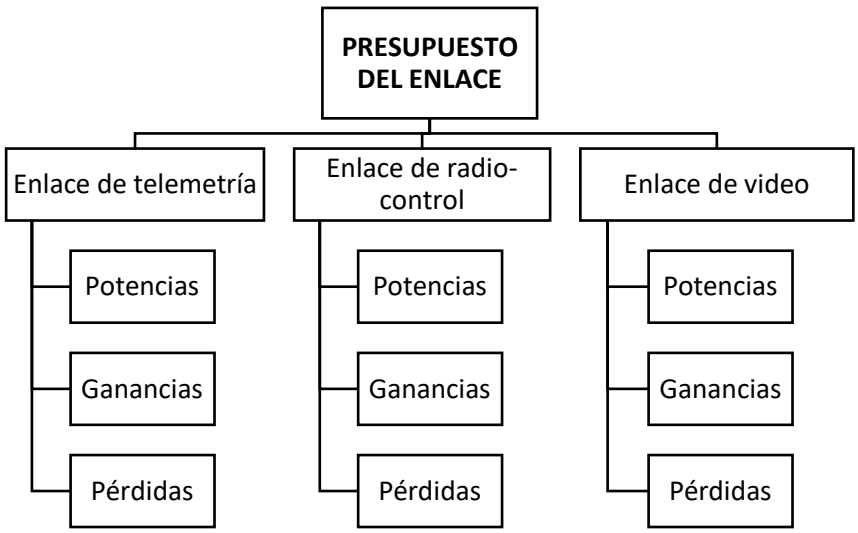

Figura 2.1 Presupuesto del enlace para cada subsistema del sistema de telecomunicaciones.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones en su recomendación UIT-R P.530-17 [25], muestra el procedimiento a seguir para estimar las pérdidas en el medio inalámbrico. La Figura 2.2 muestra el análisis que se realizará en cada subsistema del sistema de telecomunicaciones.

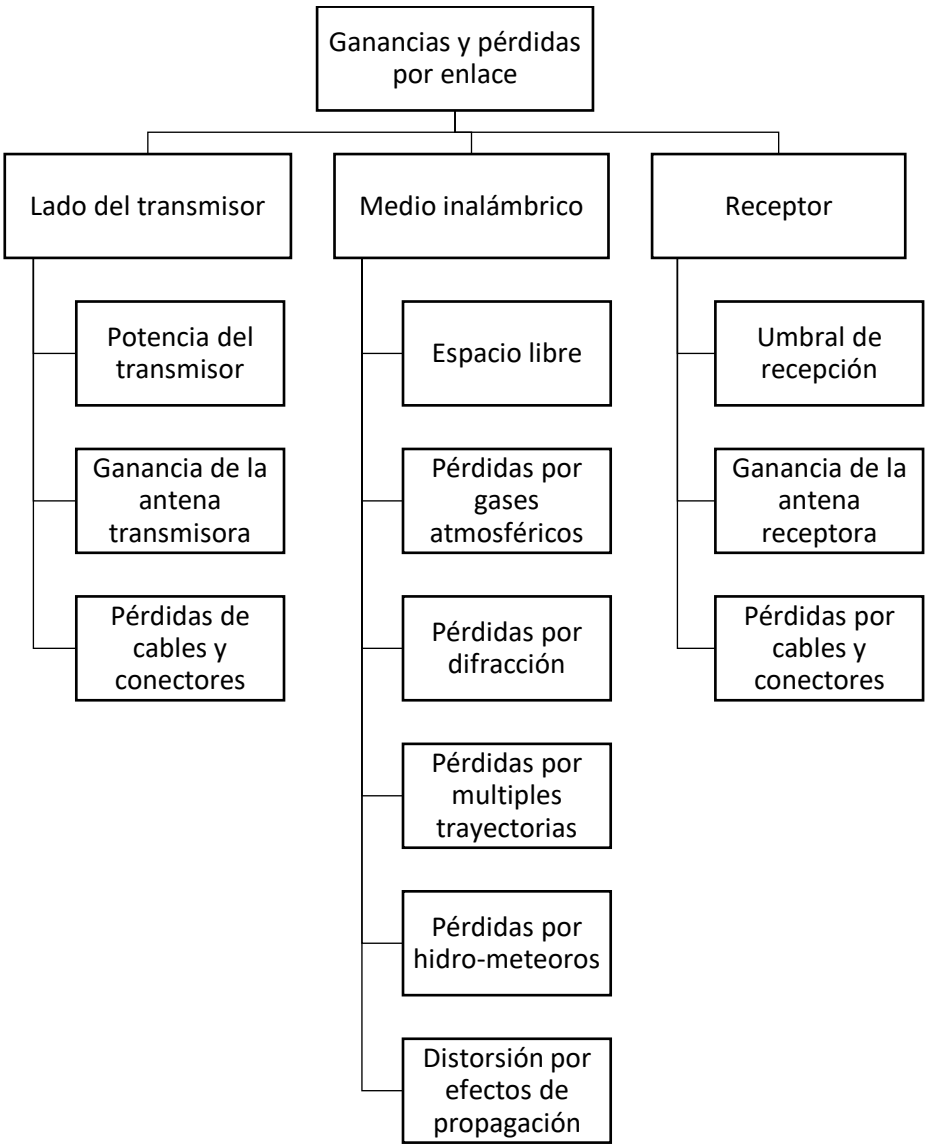

Figura 2.2 Potencias, ganancias y pérdidas de cada enlace con sus respectivos elementos de consideración.

La recomendación P.530 [25] toma en cuenta varias pérdidas en el canal inalámbrico, sin embargo, el criterio de ingeniería para cada uno de ellos usará o no estos elementos en función de las consideraciones de diseño como: frecuencias de operación, distancias entre transmisor y receptor, etc.

Dado que las pérdidas por gases atmosféricos solo son relevantes para frecuencias mayores a los 10 GHz y, sabiendo que ninguno de los enlaces de telecomunicaciones supera los 8 km, no se toman en cuenta dichas pérdidas ni el desvanecimiento por difracción (curvatura de la tierra).

El Humedal Jatunhuaycu es mucho más grande que el Humedal Pugllohuma, por lo tanto, el diseño más importante es el del Jatunhuaycu, pues, las condiciones de autonomía, debido a las potencias, distancia de cobertura, etc., son las más exigentes. Se puede intuir que, si el sistema de telecomunicaciones funciona correctamente para el humedal más grande, funcionará también para el más pequeño. Sin embargo, se realizará el análisis del presupuesto del enlace para ambos. Dado que el Humedal Pugllohuma es mucho más pequeño que el Jatunhuaycu, se puede incrementar la autonomía reduciendo la potencia de transmisión.

2.1 CÁLCULO DE PRESUPUESTO DEL ENLACE PARA HUMEDAL JATUNHUAYCU

El radio del área de cobertura del humedal Jatunhuaycu es de 3835.35 m, por lo tanto, el diseño debe permitir giros con arcos abiertos del dron. Para este fin, se debe tomar en cuenta un radio mayor de tolerancia, el cual será de 4 km.

2.1.1 ENLACE DE TELEMETRÍA

El enlace de telemetría transmite y recibe señales que transportan información digital. Es el corazón del sistema de telecomunicaciones ya que se encarga de la transmisión de información de: posición, altura, comandos del disparador de la cámara fotográfica, carga de misión en el piloto automático, etc. Este enlace debe ser de alta disponibilidad ($\mathrm{R} = 0.9999$) ya que su monitoreo en tierra implica conocer en cada instante su ubicación. Conocer la ubicación es útil tanto para la toma de fotografías aéreas como la de recuperación de equipos a bordo en el caso de que se presentasen inconvenientes técnicos o ambientales y el dron llegase a caer sin control.

La potencia del equipo transmisor se asume para fines de diseño: $P_{tx} = 25$ dBm, ya que son las potencias usadas en equipos de aeromodelismo (ver subcapítulo 2.3.1). La sensibilidad se considera de $S = -100$ dBm. Las antenas de los equipos, para tener una cobertura simétrica son omnidireccionales. La ganancia de las mismas es de $G = 2.15$ dBi.

La frecuencia usada en el enlace de telemetría es $f_{tel} = 928$ MHz debido a que la legislación ecuatoriana permite el uso del espectro contenido entre 915 – 928 MHz, como

se muestra en la Tabla 1.4. También, la frecuencia al ser la más baja disponible permite el mayor alcance y la menor atenuación, lo cual es conveniente para enlaces de telemetría especialmente en zonas de alta montaña.

2.1.1.1 Pérdidas en espacio libre del enlace de telemetría

La distancia máxima entre el dron y la estación terrena para el enlace telemétrico será de $D = 4km$ a una frecuencia de $f = 928\ MHz$, reemplazando en la ec. (*1.12*) se obtiene:

$$L_{fs} = 32.4 + 20\,log\,928 + 20\,log\,4 \tag{2.1}$$

$$L_{fs} = 103.7922\ dB$$

2.1.1.2 Desvanecimiento por condiciones geográficas para telemetría

Para el diseño se considera la distancia máxima del enlace $D = 4\ km$. Debido a que el vuelo se planifica sobre humedales que son cuerpos de agua, se considera un factor de rugosidad $A = 4$. Se requiere una disponibilidad muy alta, por lo tanto, el factor de conversión es $B = 1$. La frecuencia máxima de operación es de $f = 0.928\ GHz$ y el valor de la confiabilidad es $R = 0.9999$. Reemplazando en la ecuación (*1.8*) se obtiene:

$$L_{fading} = 30\,log\,4 + 10\,log[(6)(4)(1)(0.928)] - 10\,log(1 - 0.9999) - 70 \tag{2.2}$$

$$L_{fading} = 1.539\ dB$$

2.1.1.3 Atenuación por obstrucción de la primera zona de Fresnel

Dado que el terreno presenta irregularidades debido a que las inmediaciones del volcán Antisana son áreas montañosas, se va a realizar el análisis y diseño tomando en cuenta el obstáculo más representativo, mismo que presenta el mayor riesgo de obstrucción de la primera zona de Fresnel. Para el cálculo de la atenuación de la primera zona se toma en cuenta la distancia desde la estación terrena hacia el dron cuando sobrevuela cerca del borde del área planificada de cobertura, es decir a $D = 4\ km$ aproximadamente. Haciendo uso del software Radio Mobile se encuentra el obstáculo más representativo. Los mapas de nivel entregan información de alturas en escalas de temperaturas de color. Los colores cercanos al azul muestran alturas menores, mientras que, a medida que los colores de la imagen se acercan al rojo se incrementa la altura. En la Figura 2.3 se observa que los obstáculos representativos se encuentran a la izquierda de la estación terrena, pues ahí se encuentra el humedal.

Figura 2.3 Ubicación del humedal Jatunhuaycu respecto a la estación terrena.

Con el software Radio Mobile se encuentra el obstáculo de mayor altura visualizando el diagrama de temperatura de colores (alturas) simultáneamente con la grilla de elevación del mismo software y comparándolas. Una vez identificado dicho obstáculo como se muestra en la Figura 2.4, el resto del análisis se hará para este lugar el cual representa la peor condición posible.

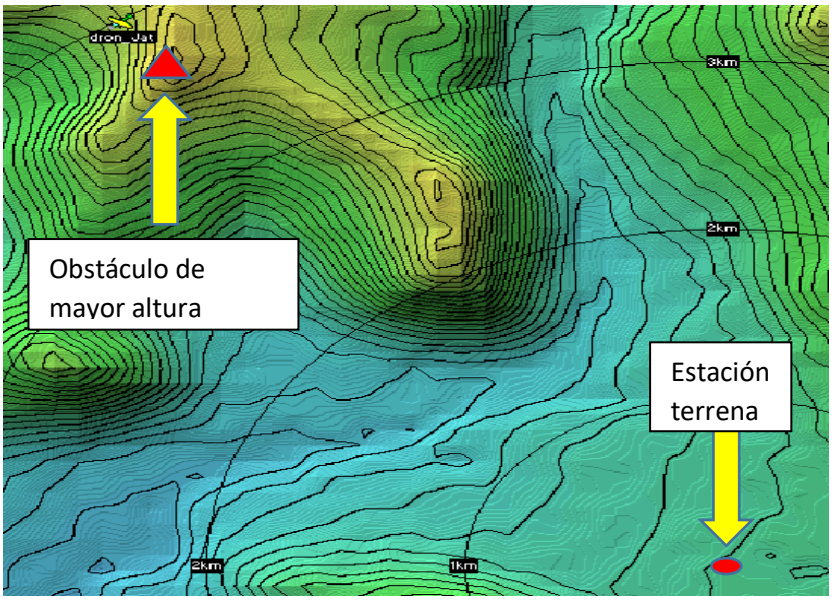

Figura 2.4 Localización del obstáculo de mayor altura en Radio Mobile.

Para fines de diseño, se asume que en el peor de los casos el dron se encuentra volando en el borde del radio de cobertura, detrás del obstáculo de mayor altura. La Figura 2.5 muestra las alturas de los dos obstáculos representativos haciendo uso de Google Earth.

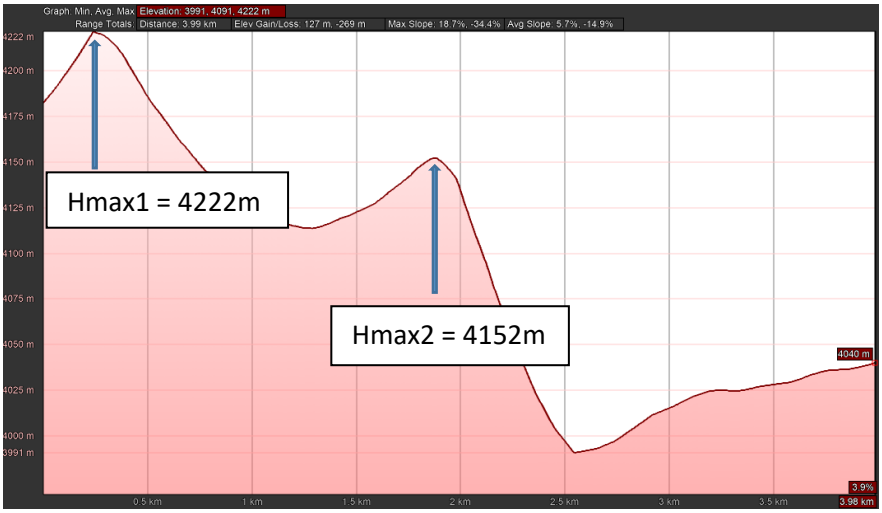

Figura 2.5 Perfil de altura del terreno para el enlace de telemetría incluidas las distancias.

Para saber si la montaña obstaculiza o no la primera zona de Fresnel, se trasladan las ubicaciones y las alturas a un plano cartesiano. El origen del sistema de referencia se considera la ubicación de la antena trasmisora respecto al nivel del mar. La antena en la estación terrena se ubica en el punto $A = (0{,}4040)m$. La antena del dron en la peor condición (detrás de la obstrucción más alta) se ubica en el punto $B = (4000{,}4183)m$. El primer obstáculo representativo se ubica a una distancia de 2.12 km de la estación terrena, y tiene una altura respecto al nivel del mar de 4.152 km, sus coordenadas tomarán el nombre de $P_1 = (2120{,}4152)m$. El segundo obstáculo representativo se ubica a una distancia de 3.57 km de la estación terrena y su altura respecto al nivel del mar es de 4.221 km, sus coordenadas tomarán el nombre de $P_2 = (3750{,}4221)m$. La altura de la antena respecto al piso en la estación terrena es de $h = 1.5\ m$ y la altura del dron respecto al suelo es de $h_{dron} = 120\ m$. El cálculo del radio despejado de la primera zona de Fresnel se realiza usando la ecuación (*1.4*) como se muestra a continuación:

$A = (0{,}4041.5)m.$

$B = (4000{,}4303)m.$

$P_1 = (2120{,}4152)m.$

$P_2 = (3750{,}4221)m.$

Las coordenadas en y de los puntos A y B corresponden a la suma de la altura sobre el nivel del mar del terreno más la altura de las respectivas antenas. La Figura 2.6 muestra un esquema de alturas, distancias y el elipsoide de la primera zona de Fresnel a escala.

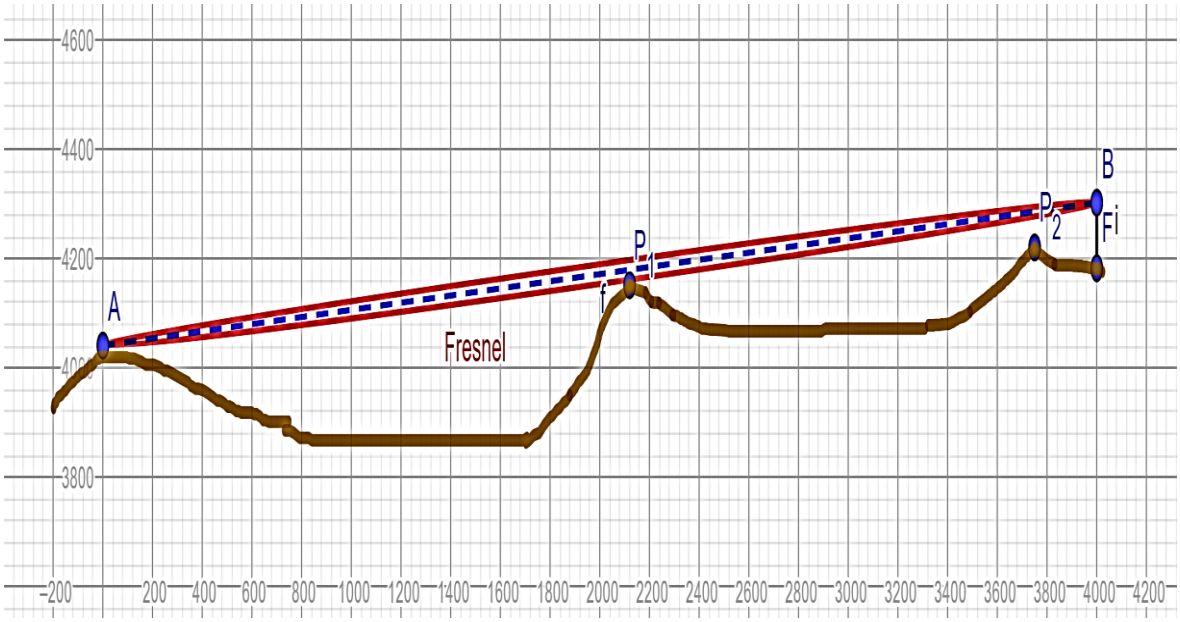

Figura 2.6 Diagrama a escala del perfil terrestre del enlace usando el software GeoGebra.

Se dijo que se asumirá el vuelo del dron en el borde del área de cobertura, por lo tanto:

$d = 4\ km.$

$f = 0.928\ GHz.$

Para el primer obstáculo de coordenadas $P_1 = (2120{,}4152)km$ con:

$d_{11} = 2.12km.$

$d_{12} = 1.88km.$

Reemplazando en la Ec. (1.5) se obtiene:

$$R_{11} = 17.3\sqrt{\frac{2.12 * 1.88}{4 * 0.928}} \tag{2.3}$$

$$R_{11} = 17.926\ m$$

Siendo R_{11} el radio de la primera zona de Fresnel para el primer obstáculo.

Para el segundo obstáculo de coordenadas $P_2 = (3750{,}4221)km$:

$d_{21} = 3.75km.$

$d_{22} = 0.250km.$

Reemplazando estos valores en la Ec. (1.5):

$$R_{21} = 17.3\sqrt{\frac{3.75 * 0.25}{4 * 0.928}} \tag{2.4}$$

$$R_{21} = 8.694\ m$$

Siendo R_{21} el radio de la primera zona de Fresnel para el segundo obstáculo.

La ecuación de la recta que pasa por los puntos A, B es:

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}x + b \tag{2.5}$$

Teniendo en cuenta que:

$A = (0,4041.5)\ m.$

$B = (4000,4303)\ m.$

$b = 4041.5\ m.$

Se calcula:

$$y = 0.065375x + 4041.5 \tag{2.6}$$

Dejando en la forma $ax + by + c = 0$ se obtiene:

$$\overline{AB}: 0.065375x - y + 4041.5 = 0 \tag{2.7}$$

La distancia del punto P_1 y P_2 hasta la recta de visibilidad directa entre las antenas se calcula fácilmente como la distancia de un punto a una recta. Se sustituyen los valores de x e y por las coordenadas de los puntos P_1 y P_2 respectivamente.

$P_1 = (2120,4152)\ m.$

$P_2 = (3750,4221)m.$

Es conocido que, la distancia de un punto a una recta es:

$$D = \frac{Ax - By + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \tag{2.8}$$

Distancia del punto P_1 a la recta $\overline{AB}$:

$$D_{P_1-\overline{AB}} = \frac{0.065375(2120) - 4152 + 4041.5}{\sqrt{0.065375^2 + 1^2}} \tag{2.9}$$

$$D_{P_1-\overline{AB}} = 28\ m$$

Distancia del punto P_2 a la recta $\overline{AB}$:

$$D_{P_2-\overline{AB}} = \frac{0.065375(3750) - 4221 + 4041.5}{\sqrt{0.065375^2 + 1^2}} \tag{2.10}$$

$$D_{P_2-\overline{AB}} = 62.523\ m$$

La Tabla 2.1 resume los resultados obtenidos en los cálculos anteriores.

Tabla 2.1 Comparación entre las distancias desde los puntos que representan las alturas máximas y los radios de los elipsoides de la primera zona de Fresnel

Puntos	**Distancia punto a recta [m]**	**1er radio de Fresnel [m]**	**Obstrucción [%]**
P_1	28	17.926	0
P_2	62.523	8.694	0

Se concluye por tanto que no existe obstrucción de los elipsoides de la primera zona de Fresnel.

2.1.1.4 Presupuesto del enlace de telemetría para el Humedal Jatunhuaycu

La atenuación por gases atmosféricos es relevante en transmisiones superiores 10 GHz debido a la absorción de las moléculas de oxígeno y vapor de agua. A frecuencias menores este valor es insignificante [25]. Por esta razón, no se tomará en cuenta para el presupuesto de ningún enlace.

La potencia de transmisión, pérdidas y umbral de recepción se detallan en la Tabla 2.2.

Reemplazando los valores calculados en la Ec. (*1.13*) se obtiene:

$$25 + 2.15 - 103.79 + 2.15 - 1 - 1.5394 - 0 \geq -100 \tag{2.11}$$

$$-77.03 \geq -100\ \ [dBm]$$

Se observa que el nivel de potencia a la entrada del receptor es mayor que la sensibilidad del receptor. Por lo tanto, para el peor de los casos se tendrá un margen de seguridad de 22.97 dB por encima de la sensibilidad. Este resultado se puede observar esquemáticamente en la Figura 2.7.

Tabla 2.2 Presupuesto del enlace de telemetría para el monitoreo del Humedal Jatunhuaycu

Valores de potencia, ganancias y pérdidas para el enlace de Telemetría	
Potencia del transmisor (P_{tx}) $[dBm]$	25
Ganancia de la antena transmisora (G_{tx}) $[dBi]$	2.15
Pérdidas por espacio libre (L_{fs}) $[\mathrm{dB}]$	103.79
Margen de desvanecimiento (M_{fad}) $[\mathrm{dB}]$	1.5394
Pérdida por obstrucción de Fresnel (L_{mod}) $[\mathrm{dB}]$	0
Ganancia de la antena receptora (G_{rx}) $[\mathrm{dBi}]$	2.15
Pérdida de cables y conectores $(L_{cab-con})$ $[\mathrm{dB}]$	1
Sensibilidad del receptor (S) $[dBm]$	-100

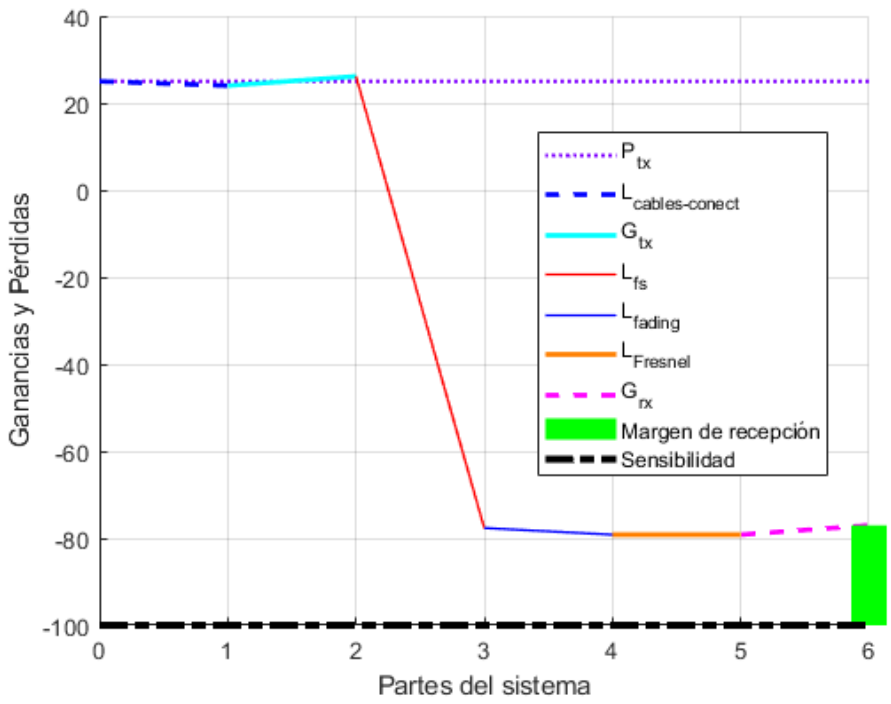

Figura 2.7 Gráfico esquemático del presupuesto del enlace de telemetría.

2.1.2 ENLACE DE RADIOCONTROL

El sistema de radiocontrol se requiere para el despegue y aterrizaje el cual se puede realizar de forma manual o automática dependiendo de la necesidad, la comodidad del piloto en tierra o las condiciones del viento. Si el viento es desfavorable, es mejor usar el despegue con piloto automático, ya que el dron de esta manera maneja las superficies de control para que éste vuele de forma estable, elevándose hasta alcanzar la altura de vuelo.

De manera similar, el aterrizaje en ocasiones puede verse dificultado por el viento cambiante o por animales cerca de la zona. De esta manera usar el aterrizaje manual para no lastimar a personas o animales es la opción más adecuada. El radiocontrol permite tres modos de control, a saber: manual, automático y retorno a casa[15].

El radiocontrol se usa a distancias relativamente cortas, es decir a distancias entre 100 y 200 metros. Sin embargo, se analizará el diseño del radiocontrol para 500 metros. Las potencias generalmente oscilan entre 0.5 Watios y 1 Watio. Por lo tanto, se considera para el diseño una potencia de transmisión $P_{tx} = 26\ dBm$. La sensibilidad del receptor tiene valores de entre -90 y -50 dBm. Para este trabajo se considera el valor de $S = -80$, el cuál es el más comúnmente usado. Las antenas se consideran monopolos con ganancia $G = 2.1\ dBi$ (ver subcapítulo 2.3.3).

2.1.2.1 Pérdidas en espacio libre para el enlace de Radiocontrol

Dado que se requiere trabajar con un radio de $D = 0.5\ km$, a una frecuencia de $f = 2483.5\ MHz$, reemplazando en la ecuación (*1.12*) se obtiene:

$$L_{fs} = 32.4 + 20\ log\ 2483.5 + 20\ log\ 0.5 \tag{2.12}$$

$$L_{fs} = 94.28\ dB$$

2.1.2.2 Desvanecimiento por condiciones geográficas para radiocontrol

Para el diseño se toman los siguientes parámetros: distancia máxima del enlace $D = 0.5\ km$. Debido a que el vuelo se planifica sobre humedales que son cuerpos de agua, se considera un factor de rugosidad $A = 4$. Se requiere una disponibilidad alta para este enlace, pero no tan conservadora como el enlace de telemetría, aun así, por razones de diseño, el factor de conversión se mantendrá como: $B = 1$ dadas las condiciones de alta nubosidad y precipitaciones. La frecuencia máxima de operación es de $f = 2.4835\ GHz$. El valor de la confiabilidad es $R = 0.9999$. Reemplazando en la ecuación (*1.8*) se obtiene:

$$L_{fading} = 30\ log\ 0.5 + 10\ log[(6)(4)(1)(2.4)] - 10\ log(1 - 0.9999) - 70 \tag{2.13}$$

$$L_{fading} = -21.2781\ dB$$

[15] El modo de retorno a casa consiste en hacer regresar al dron de manera automática a sobrevolar el punto del cual despegó. Su referencia de altura es la misma altura de despegue. Sin embargo, el retorno a casa se puede tener varias configuraciones en el piloto automático. Una de las formas más comunes es dar la orden al dron de que sobrevuele el punto de despegue. Otra forma común de retorno a casa es hacer que el dron descienda en espirales hasta tocar suelo. La última forma y menos deseable en condiciones de montaña y viento es hacer que se aproxime sin perder altura hasta el punto de despegue y posteriormente abrir el paracaídas hasta esperar que tope tierra.

Los valores negativos muestran que la pérdida por las condiciones geográficas del terreno no es representativa. Por lo tanto, $L_{fading} = 0\,dB$.

2.1.2.3 Atenuación por obstrucción de la primera zona de Fresnel

Haciendo uso de las curvas de nivel de Radio Mobile se observa claramente que no existen obstáculos representativos dentro de los 500m del área de cobertura del sistema de control remoto. Por esta razón se asigna la atenuación por obstrucción de la primera zona de Fresnel como: $L_{Fresnel} = 0\ [dB]$.

2.1.2.4 Presupuesto del enlace de Control Remoto para el Humedal Jatunhuaycu

La Tabla 2.3 contiene los valores encontrados en los análisis de potencias de cada equipo del sistema de radiocontrol.

Tabla 2.3 Presupuesto del enlace para el enlace de radiocontrol para el Humedal Jatunhuaycu

Valores de potencia, ganancias y pérdidas para el enlace de Radiocontrol	
Potencia del transmisor (P_{tx}) $[dBm]$	26
Ganancia de la antena transmisora (G_{tx}) $[dBi]$	2.1
Pérdidas por espacio libre (L_{fs}) $[dB]$	94.28
Desvanecimiento (M_{fad}) $[dB]$	0
Pérdida Por obstrucción de Fresnel (L_{mod}) $[dB]$	0
Ganancia de la antena receptora (G_{rx}) $[dBi]$	2.1
Pérdida de cables y conectores ($L_{c_{tx}}$) $[dB]$	1
Sensibilidad del receptor S $[dBm]$	-80

Reemplazando los valores calculados en la Ec. (*1.13*) se obtiene:

$$26 + 2.1 - 94.28 + 2.1 - 1 - 0 - 0 \geq -80 \qquad (2.14)$$

$$-65.08 \geq -80\ \ dBm$$

Este presupuesto muestra que existe un margen de seguridad de 14.92 dB. La Figura 2.8 muestra un diagrama esquemático de este resultado.

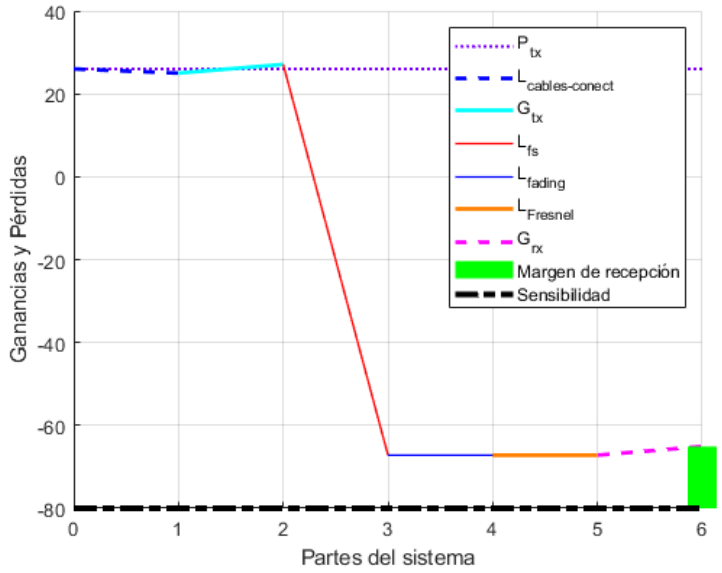

Figura 2.8 Gráfico esquemático del presupuesto del enlace del sistema de radiocontrol para el Humedal Jatunhuaycu.

2.1.3 ENLACE DE VIDEO ANALÓGICO

Este enlace se diseñará para cubrir un radio de hasta 1 km. Tiene una utilidad limitada especialmente en despegues y aterrizajes. Permite también visualizar obstáculos que puedan representar un riesgo para la integridad del dron. El enlace permite también observar características del terreno si se necesita obtener información de los humedales. Finalmente, si el dron se extraviase, habría una oportunidad de encontrarlo si al caer no se desconectase. O mientras desciende, podría observarse características del terreno que sirvan como puntos de referencia para recuperarlo.

La frecuencia más comúnmente usada en estas aplicaciones es la de 2.4 GHz, sin embargo, debido a que es una banda libre bastante saturada, se prefiere usar transmisores de video analógico de 5.8 GHz. Hoy en día, es fácil conseguirlos en el mercado. Éste último es el que se elegirá debido a la poca presencia de estos transmisores tanto en la zona de monitoreo en las inmediaciones del volcán Antisana como en algún otro sector cercano a ciudades o lugares más poblados y debido a que se quiere evitar la interferencia con el transmisor de radio el cual opera a 2.4 GHz.

La potencia de los transmisores de video es generalmente fija y no regulable. El mercado (ver subcapítulo 2.3.4) ofrece equipos comerciales con potencias de entre 23 y 30 dBm. La sensibilidad del receptor se asumirá de -80 dBm debido a que ese es el valor promedio de la sensibilidad de los equipos comerciales usados en aeromodelismo. Para el caso de

análisis, se considera una potencia de transmisión de 26 dBm. Las antenas usadas pueden tener ganancias entre 1 y 20 dBi. Para este diseño se consideran antenas de 2.5 dBi. Finalmente, este enlace no necesita ser diseñado con valores de disponibilidad tan exigentes, pues, la distancia de cobertura es bastante pequeña. Para fines de diseño se toma en cuenta una disponibilidad de 0.999.

2.1.3.1 Pérdidas de espacio libre para el enlace de video analógico

Dado que se requiere trabajar con un radio $D = 1\ km$, a una frecuencia $f = 5850\ MHz$, reemplazando en la Ec. (*1.12*) se obtiene:

$$L_{fs} = 34.2 + 20\,log\,5850 + 20\,log\,1 \tag{2.15}$$

$$L_{fs} = 107.74\,dB$$

2.1.3.2 Desvanecimiento por condiciones geográficas para video analógico

En el diseño se toma en cuenta una distancia máxima del enlace $D = 1\ km$. Debido al humedal, se considera un factor de rugosidad $A = 4$. La disponibilidad en este caso no requiere ser demasiado alta. Por lo tanto, se le asigna una tasa de conversión de $B = 0.5$ dadas las condiciones de alta nubosidad y precipitaciones. La frecuencia de operación es de $f = 5.85\ GHz$. El valor de la confiabilidad es $R = 0.999$. Reemplazando en la ecuación (*1.8*) se obtiene:

$$L_{fading} = 30\,log\,1 + 10\,log[(6)(4)(0.5)(5.85)] - 10\,log(1 - 0.999) - 70 \tag{2.16}$$

$$L_{fading} = -21.54\,dB$$

Dado que los valores de las pérdidas por desvanecimiento son muy pequeñas, para este sistema son despreciables. Por lo tanto, $L_{fading} = 0\ [dB]$.

2.1.3.3 Atenuación por obstrucción de la primera zona de Fresnel

Se observa en Google Earth y Radio Mobile que no existen obstáculos geográficos representativos en este enlace, por lo tanto, se considera una pérdida por obstrucción de la primera zona de Fresnel de $0\ [dB]$.

Este valor será corroborado en simulación en subcapítulos posteriores.

2.1.3.4 Presupuesto del enlace de video analógico para el Humedal Jatunhuaycu

La Tabla 2.4 recopila los datos de ganancias y pérdidas de los sistemas de video analógico para el Humedal Jatunhuaycu.

Tabla 2.4 Presupuesto del enlace para el enlace de video en el Humedal Jatunhuaycu

Valores de potencia, ganancias y pérdidas para el enlace de Video	
Potencia del transmisor (P_{tx}) [dBm]	26
Ganancia de la antena transmisora (G_{tx}) [dBi]	2.5
Pérdidas por espacio libre (L_{fs}) [dB]	107.74
Margen de desvanecimiento (M_{fad}) [dB]	0
Pérdida Por obstrucción de Fresnel (L_{mod}) [dB]	0
Ganancia de la antena receptora (G_{rx}) [dBi]	2.5
Pérdida de cables y conectores ($L_{c_{tx}}$) [dB]	1
Sensibilidad del receptor de video (S) [dBm]	-80

Reemplazando los valores calculados en la Ec. (*1.13*) se obtiene:

$$26 + 2.5 - 107.74 + 2.5 - 1 - 0 - 0 \geq -80 \qquad (2.17)$$

$$-77.74 \geq -80\ dBm$$

Se observa que el nivel de potencia a la entrada del receptor de video es mayor que la sensibilidad del receptor. Por lo tanto, para el peor de los casos se tendrá un margen de seguridad de 2.26 dB por encima de la sensibilidad. Este resultado se puede observar esquemáticamente en la Figura 2.9.

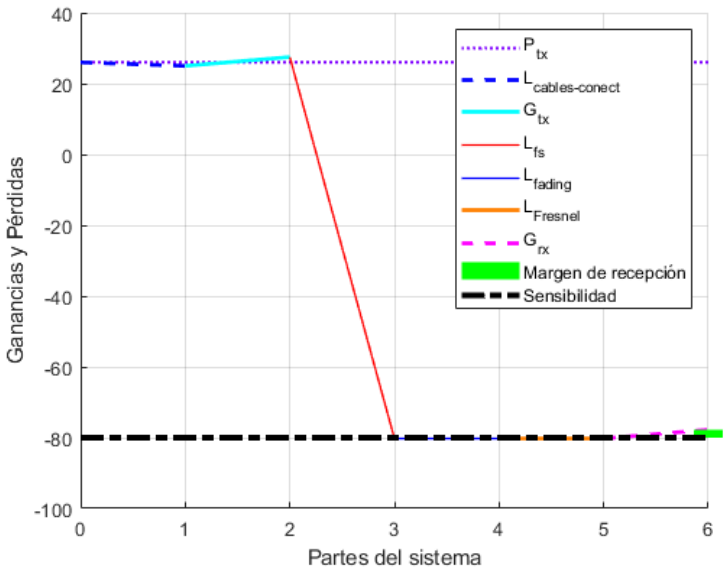

Figura 2.9 Gráfico esquemático del presupuesto del enlace del sistema de video analógico del Humedal Jatunhuaycu.

2.2 CÁLCULO DEL PRESUPUESTO DEL ENLACE PARA EL HUMEDAL PUGLLOHUMA

2.2.1 ENLACE DE TELEMETRÍA

El humedal Pugllohuma tiene un radio de aproximadamente $330\ m$, sin embargo, dado que la estación terrena puede encontrarse al borde de la circunferencia ideal de cobertura, se usa como valor de cálculo un $D = 660\ m$. Además de esta consideración, se debe tomar en cuenta que los giros del dron en las misiones que cubren superficies pequeñas como el humedal Pugllohuma pueden tener radios de giro grandes si el viento lo empuja. Por lo tanto, se toma en consideración una distancia $D = 1\ km$. Las pérdidas por cables y conectores se asumen de 1 dB. Conservando las condiciones climáticas y de terreno del humedal Jatunhuaycu. La ganancia de las antenas será de 2.15 dBi.

2.2.1.1 Pérdidas en espacio libre del enlace de telemetría

Dado que se requiere trabajar con un radio de $D = 1\ km$, a una frecuencia de $f = 928\ MHz$, reemplazando en la ec. (*1.12*) se obtiene:

$$L_{fs} = 34.2 + 20\ log\ 928 + 20\ log\ 1 \tag{2.18}$$

$$L_{fs} = 91.75\ dB$$

2.2.1.2 Desvanecimiento por condiciones geográficas para telemetría

Haciendo uso de la ecuación (*1.8*), se obtiene:

$$L_{fading} = 30\ log\ 1 + 10\ log\big(6(4)(1)(0.928)\big) - 10\log(1 - 0.9999) - 70 \tag{2.19}$$

$$L_{fading} = -16.52\ dB$$

Al ser las pérdidas tan pequeñas, estas son despreciables y, por lo tanto, $L_{fading} = 0$.

2.2.1.3 Atenuación por obstrucción de la primera zona de Fresnel

Realizando la observación del mapa de alturas de Radio Mobile se confirma que no existen obstáculos geográficos representativos a $1\ km$ a la redonda y a la derecha de la estación terrena, donde se encuentra ubicado el Humedal Pugllohuma. Esto quiere decir que las pérdidas por obstrucción de la primera zona de Fresnel son: $L_{fresnel} = 0$.

2.2.1.4 Presupuesto del enlace de telemetría para el Humedal Pugllohuma

La Tabla 2.5 contiene los valores de las potencias de los equipos de transmisión, ganancias de las antenas y pérdidas del sistema de telemetría.

Tabla 2.5 Presupuesto del enlace de telemetría para el Humedal Pugllohuma

Valores de potencia, ganancias y pérdidas para el enlace de Telemetría	
Potencia del transmisor (P_{tx}) $[dBm]$	25
Ganancia de la antena transmisora (G_{tx}) $[\mathrm{dBi}]$	2.15
Pérdidas por espacio libre (L_{fs}) $[\mathrm{dB}]$	91.75
Margen de desvanecimiento (M_{fad}) $[\mathrm{dB}]$	0
Pérdida Por obstrucción de Fresnel $(L_{Fresnel})$ $[\mathrm{dB}]$	0
Ganancia de la antena receptora (G_{rx}) $[\mathrm{dBi}]$	2.15
Pérdida de cables y conectores $(L_{cab-con})$ $[\mathrm{dB}]$	1
Sensibilidad del receptor (S) $[dBm]$	-100

Reemplazando los valores calculados en la Ec. (*1.13*) se obtiene:

$$25 + 2.15 - 91.75 + 2.15 - 1 - 0 - 0 \geq -100 \qquad (2.20)$$

$$-63.45 \geq -100\ dBm$$

Este resultado muestra que existe un margen de seguridad de $36.55\ dB$. La Figura 2.10 muestra el diagrama esquemático de este resultado.

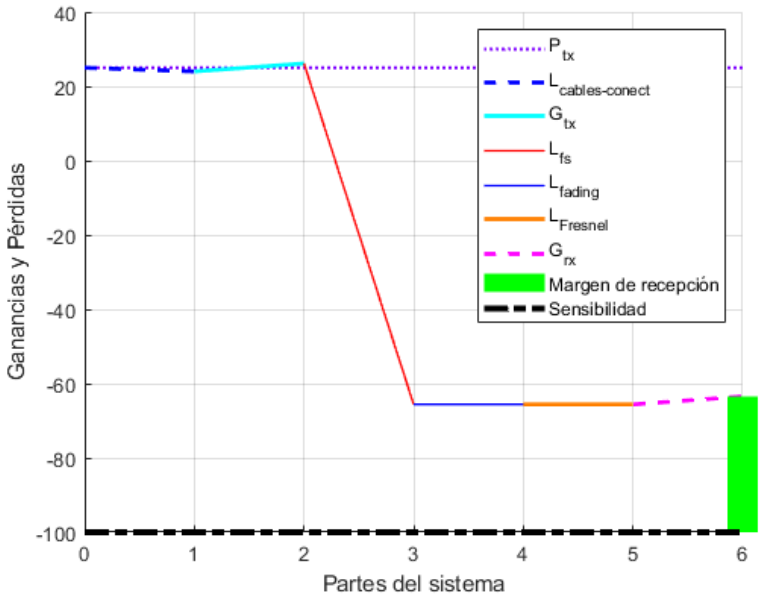

Figura 2.10 Diagrama esquemático del presupuesto del enlace del sistema de telemetría del Humedal Pugllohuma.

2.2.2 ENLACE DE RADIOCONTROL

Se conservan todas las condiciones de diseño del sistema de transmisión de datos de radiocontrol del humedal Jatunhuaycu. La única diferencia entre el diseño de ambos humedales es la ubicación de la estación terrena y el dron. El radio de cobertura del enlace no presenta obstáculos geográficos representativos ni variación de terreno. Esto quiere decir que el presupuesto del enlace de radiocontrol es el mismo para ambos Humedales.

2.2.3 ENLACE DE VIDEO ANALÓGICO

De la misma manera que para el caso del sistema de radiocontrol del subcapítulo anterior, se conservan todas las condiciones de diseño del sistema de transmisión de video analógico del humedal Jatunhuaycu. La única diferencia entre el diseño de ambos humedales es la ubicación de la estación terrena y el dron. El radio de cobertura del enlace no presenta obstáculos geográficos representativos ni variación de terreno. Esto quiere decir que el presupuesto del enlace es el mismo para ambos Humedales.

2.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS EN FUNCIÓN DE LOS CÁLCULOS REALIZADOS EN EL PRESUPUESTO DE ENLACE

Dado que el Humedal Pugllohuma es considerablemente más pequeño que el Jatunhuaycu y las condiciones climáticas se mantienen similares en ambos debido a su proximidad, se asume que, si el sistema tiene un buen desempeño en el humedal de mayor tamaño, los equipos seleccionados y todo el sistema diseñado permitirá funcionar al dron en plena capacidad en el Pugllohuma. El mercado de las telecomunicaciones presenta una amplia gama de equipos que se adaptan a las necesidades de la mayoría de los diseños con sus condiciones particulares.

2.3.1 EQUIPOS DE TELEMETRÍA COMERCIALES

Algunos de los módulos de telemetría presentes en el mercado del aeromodelismo son:

2.3.1.1 **3DR Radio Telemetry System** [26]

Características técnicas:

- Frecuencia de operación: 915 MHz.
- Peso: 23 g.
- Potencia de transmisión: 500 mW (26 dBm).
- Sensibilidad del receptor: -117 dBm.

- Velocidad de datos en aire: 250 kbps.
- Protocolo de trama: MAVLink.
- Modulación: Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSP).
- Multiplexación: por división de tiempo (TDM).
- Ciclo de trabajo configurable.
- Corrección de errores de hasta 25% de bits.
- Firmware de Open Source.
- Dimensiones: 26.7 cm x 55.5 cm x 13.3 cm

Figura 2.11 Transeptores de telemetría 3DR

2.3.1.2 RFD 900 [27]

Características técnicas:

- Frecuencia de operación: 902 - 928 MHz.
- Velocidad de datos en aire: 4, 8, 16, 19, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 y 250 [kbps].
- Soporta técnicas de diversidad: espacial y de polarización.
- Temperatura de operación: -40 a 85 °C.
- Peso: 14.5 g.
- Dimensiones: 30 mm x 57 mm x 12.8 mm.

- Potencia del transmisor: 0 – 30 dBm en paso de 1dBm.
- Sensibilidad del receptor: -121 dBm.
- Amplificador de bajo ruido > 20dB.
- Técnica de transmisión: FHSS.
- Canales de frecuencia: por encima de 50 canales de salto de frecuencia.

Figura 2.12 Transeptor de telemetría RFD900.

2.3.2 SELECCIÓN DE ANTENAS PARA EQUIPOS DE TELEMETRÍA

Algunas antenas comerciales para equipos de telemetría son:

2.3.2.1 Antena Dipolo 900 MHz (900-928 MHz) Rubber Duck [28]

- Ganancia: 2.5 dBi.
- Lóbulo de radiación: omnidireccional.
- Conector: SMA.

Figura 2.13 Antena para 900MHz Rubber Duck.

2.3.2.2 ANT900 (SUCONEL) [29]

- Frecuencia de Operación: 900MHz
- Bisagras para rotación.
- Ganancia: 2.1 dBi.
- Longitud: 17 cm.

Figura 2.14 Antena de 900 MHz ANT900

2.3.2.3 Antena STUBBY de ¼ de onda [30]

- Frecuencia de operación: 806-941 MHz.
- Longitud: 4 pulgadas.
- Ganancia: 2.1 dBi.

Figura 2.15 Antena STUBBY para 900MHz.

2.3.2.4 AN2404 [31]

- Frecuencia de operación: 900-930 MHz.

- Ganancia: 1 dBi.
- Potencia máxima: 1 W.

Figura 2.16 Antena de 900MHz AN2404.

2.3.3 EQUIPOS DE CONTROL REMOTO COMERCIALES

2.3.3.1 QUANUM I8 [32]

- Canales PPM: 8
- Frecuencia de operación: 2.4 GHz
- Técnica de transmisión: FHSS

Figura 2.17 Control remoto a 2.4GHz QUANUM I8.

2.3.3.2 SPEKTRUM DX6 [16]

- 6 canales PPM
- Técnica de transmisión: DSSS
- Frecuencia de operación:

Figura 2.18 Control remoto a 2.4GHz SPEKTRUM DX6.

2.3.3.3 Receptor AR610 [33]

- 6 canales.
- Compatible con control remoto spektrumDX6.

Figura 2.19 Receptor de Radiocontrol a 2.4GHz AR610.

2.3.3.4 Spektrum AR6600T [34]

- Receptor de control remoto para aire.
- 6 canales.
- Compatible con control remoto Spektrum DX6.

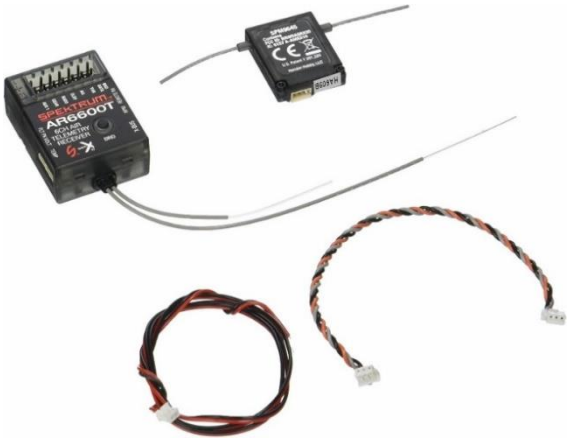

Figura 2.20 Receptor de radiocontrol SPEKTRUM AR6600T a 2.4GHz.

2.3.3.5 Receptor Quanum I8 2.4 GHz [35].

- 8 canales.
- Receptor a 2.4 GHz.
- Salidas soportadas: PPM y PWM.
- Cable USB para cargar y actualización de firmware

Figura 2.21 Receptor QUANUN I8 de 2.4 GHz.

2.3.4 EQUIPOS DE VIDEO ANALÓGICO COMERCIALES

2.3.4.1 FX796T [36]

- Frecuencia de operación: 5.8 GHz
- Potencia de transmisión: 25 mW.
- Botón para cambio de canales con indicador led.
- Micrófono integrado.

- Peso: 7.5 g.
- Sensibilidad: -90 dBm.

Figura 2.22 Transmisor de video a 5.8GHz FX796T.

2.3.4.2 TS832 FVP 5.8G [37]

- Potencia de transmisión: 600 mW.
- 40 canales.
- Frecuencia de operación: 5.8 GHz.
- Transmisor de video analógico.

Figura 2.23 Transmisor de video TS832 a 5.8GHz.

2.3.4.3 Receptor de video RC832 [38]

- Sensibilidad: -90 dBm.
- 40 canales.
- Receptor de video analógico.

Figura 2.24 Receptor de video analógico a 5.8 GHz RC832.

2.3.5 SELECCIÓN DE ANTENAS PARA EQUIPOS DE VIDEO

2.3.5.1 DJI FVP Antena de aire [39]

- Frecuencia de operación: 5.4 - 6 GHz.
- Ganancia: 2.75 dBi.
- Peso: 3.9 g.

Figura 2.25 Antena DJI FVP a 5.8 GHz.

2.3.5.2 Banbie8409 FVP antena de trébol [40]

- Frecuencia de operación: 5.8 GHz.
- Ganancia: 5 dBi.
- Peso: 4 g.

Figura 2.26 Antenas Banbie8409 FVP tipo trébol a 5.8GHz.

2.3.5.3 SpiroNet LHCP inmersionRC [41]

- Frecuencia de operación: 5.8GHz.
- Polarización circular.
- Protección contra elementos.
- Ganancia: 2.15 dBi.

Figura 2.27 Antenas Spironet LHCP recubiertas a 5.8GHz.

2.3.6 SELECCIÓN DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES EN FUNCIÓN DEL ANÁLISIS REALIZADO

Se seleccionan los equipos en función de los cálculos del presupuesto del enlace para tratar de cumplir las condiciones de diseño.

2.3.6.1 Selección de equipos de telemetría

Se selecciona el transeiver de telemetría RFD900 (pareja) por las siguientes razones:

- Potencia regulable 0 – 30 dBm. La potencia máxima es mayor a la potencia considerada en el diseño teórico y las simulaciones por 5 dBm.
- Sensibilidad -121 dBm. Lo cual es mucho mejor que las consideradas en el diseño (-100dBm).
- Permite diversidad, tanto espacial como en frecuencia. Esta característica mejorará la recepción de la señal. En las simulaciones solo se consideró un sistema sin diversidad.
- Dimensiones adecuadas a un dron de ala fija.
- Se consigue fácilmente en el mercado.
- Facilidad de manejo y configuración con plataformas de Open Source.
- El equipo en el mercado se lo consigue con sus respectivas antenas, tanto el dipolo de media onda para la estación en tierra y el monopolo de cuarto de onda para la estación aérea.
- Las antenas que se incluyen son las Dipolo “Rubber Duck” de media onda de ganancia 2.5 dBi.

2.3.6.2 Cálculo corregido con datos reales de equipos de telemetría

La Tabla 2.6 resume los valores nominales de los equipos seleccionados para una distancia máxima entre el dron y la estación terrena de 4km.

Tabla 2.6 Presupuesto del enlace de telemetría de equipos seleccionados

Valores de potencia, ganancias y pérdidas para el enlace de Telemetría	
Potencia del transmisor (P_{tx}) $[dBm]$	30
Ganancia de la antena transmisora (G_{tx}) $[\mathrm{dBi}]$	2.15
Pérdidas por espacio libre (L_{fs}) $[\mathrm{dB}]$	103.79
Margen de desvanecimiento (M_{fad}) $[\mathrm{dB}]$	1.539
Pérdida Por obstrucción de Fresnel (L_{mod}) $[\mathrm{dB}]$	0
Ganancia de la antena receptora (G_{rx}) $[\mathrm{dBi}]$	2.5
Pérdida de cables y conectores $(L_{cab-con})$ $[\mathrm{dB}]$	1
Sensibilidad del receptor (S) $[dBm]$	-121

Reemplazando los valores calculados en la Ec. (*1.13*) se obtiene:

$$30 + 2.15 - 103.79 + 2.5 - 1 - 1.54 - 0 \geq -121 \tag{2.21}$$
$$-71.68 \geq -100 \ \ [dBm]$$

Se observa que el nivel de potencia a la entrada del receptor es mayor que la sensibilidad del receptor. Por lo tanto, para el peor de los casos se tendrá un margen de seguridad de 49.32 dB por encima de la sensibilidad.

2.3.6.3 Selección de equipos de radiocontrol

Se selecciona el equipo QUANTUM I8 debido a:

- Facilidad de configuración y compatibilidad con el PIXHAWK PX4.
- Facilidad de consecución en el mercado.
- La antena de transmisión puede ser reemplazada por una más direccional si se presentase la necesidad.

Se seleccionan también los receptores de radiocontrol Quanum I8 a 2.4 GHz, debido a su compatibilidad.

2.3.6.4 Selección de los equipos de video analógico

Se selecciona el transmisor TS832 debido a:

- La potencia del transmisor es de 27-28 dBm. Las potencias del equipo están un poco por encima de la considerada en el diseño (26 dBm).
- La sensibilidad del receptor es de -90 dBm. El equipo tiene una sensibilidad mejor que la considerada en el diseño (-80 dBm).
- Facilidad de consecución en el mercado.
- Posee 40 canales para evitar la interferencia (si la hubiese). Esta cantidad de canales permite también aumentar el número de cámaras (40 cámaras en total teóricamente).
- El transmisor de video incluye una cámara de video analógica pequeña.

Las antenas seleccionadas para este equipo son las antenas tipo trébol de 5.8 GHz debido a:

- Ganancia de 5 dBi. La ganancia es mayor a la considerada en el diseño (2.5 dBi).

- Facilidad de consecución en el mercado.

2.3.6.5 Cálculo corregido con datos reales de equipos de video

La Tabla 2.7 resume las características nominales de los equipos seleccionados. Tomando en cuenta que el alcance es de $D = 1$ km.

Tabla 2.7 Presupuesto del enlace de video analógico con valores nominales de quipos seleccionados

Valores de potencia, ganancias y pérdidas para el enlace de Video	
Potencia del transmisor (P_{tx}) $[dBm]$	28
Ganancia de la antena transmisora (G_{tx}) [dBi]	5
Pérdidas por espacio libre (L_{fs}) [dB]	107.74
Margen de desvanecimiento (M_{fad}) [dB]	0
Pérdida Por obstrucción de Fresnel (L_{mod}) [dB]	0
Ganancia de la antena receptora (G_{rx}) [dBi]	5
Pérdida de cables y conectores ($L_{c_{tx}}$) [dB]	1
Sensibilidad del receptor de video (S) $[dBm]$	-90

Reemplazando los valores calculados en la Ec. (*1.13*) se obtiene:

$$28 + 5 - 107.68 + 5 - 1 - 0 - 0 \geq -90 \tag{2.22}$$

$$-70.74 \geq -90 \;\; dBm$$

Se observa que el nivel de potencia a la entrada del receptor es mayor que la sensibilidad del receptor. Por lo tanto, para el peor de los casos se tendrá un margen de seguridad de 19.26 dB por encima de la sensibilidad.

2.4 SIMULACIÓN DE COBERTURA DE ENLACES DE TELECOMUNICACIONES PARA EL HUMEDAL JATUNHUAYCU EN EL SOFTWARE RADIO MOBILE

2.4.1 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA EL HUMEDAL JATUNHUAYCU

Las coordenadas de la estación terrena se han colocado en el centro del círculo de cobertura, el mismo está ubicado junto a la carretera por lo cual su ubicación es viable. Las

coordenadas han sido tomadas con Google Earth y comprobadas con Radio Mobile. Las coordenadas son:

- Latitud: 0°31’13’’.
- Longitud: 78°13’49.9’’.

Una vez ubicadas las estaciones, tanto terrena como móvil, se procede a configurar las características de cada sistema. Se inicia con el sistema: “Est_terrena”, colocando la potencia de transmisión menor a la máxima ($P_{max} = 30\ dBm$ según el manual del equipo RFD900), esta será de 25 dBm. Al ser un transceptor, éste posee también una sensibilidad la cual es de -121 dBm [27]. Éste se ubica tanto en la estación terrena como en la aérea. El transmisor usa en la práctica dos antenas con diversidad espacial, sin embargo, en el software Radio Mobile no se permite esta configuración por lo cual se trabajará como si existiese una sola antena. Por lo tanto, en la realidad el sistema tendrá mejores características de funcionamiento. Las pérdidas por cables y conectores se agregan asumiéndose 1dB, siendo éste un caso exagerado puesto que las líneas de transmisión tienen distancias muy cortas. Las ganancias de las antenas se configuran: $G_{tx} = 2.15\ dBi$, $G_{rx} = 2.5\ dBi$. La altura de la antena en la estación terrena es aproximadamente: $h_{est-terrena} = 1.5m$ y la del dron: $h_{dron} = 120m$. Como se sabe, las antenas seleccionadas tienen un patrón de radiación omnidireccional.

Se procede a crear la red (“telemetría” para este trabajo), en la misma se configuran los parámetros como sugiere el manual de uso de Radio Mobile [42], estos se muestran en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Parámetros de la red de telemetría

PARÁMETRO	**VALOR**
Refractividad superficial	301 [N-unidades]
Conductividad del suelo	0.02 [S/m]
Permitividad relativa del suelo	81
Frecuencia mínima	915 [MHz]
Frecuencia máxima	928 [MHz]
Polarización	Vertical
Modo de variabilidad	Móvil
Clima	Continental templado

Una vez creada la red, se le asigna una topología, la cual para el caso de la telemetría será: Red de datos, con topología estrella (maestro/esclavo). Se procede a asociar los miembros de la red “telemetría”. Se seleccionan las unidades creadas: “Est_terrena” y “dron_Jat”. Se nombra a “Est_terrena” como maestro y “dron_Jat” como esclavo.

Finalmente se selecciona el estilo y se configura el tipo de propagación que se va a simular. El modo de propagación permite usar y omitir el modelo de Dos Rayos. Además, se especifica si la propagación es “normal” o “interferencia”. Para este caso se selecciona normal debido a que el vuelo se lo realizará en un sector apartado sin fuentes de interferencia.

Una vez que se han configurado todos los parámetros de la simulación se la lleva a cabo en la opción de “Cobertura de Radio Polar” en la barra de herramientas. Para dar paso a la simulación se selecciona la unidad que estará en el centro la cual representa la estación terrena “Est_terrena”, la estación móvil se asocia a “dron_Jat”. La simulación presenta la cobertura y la leyenda de la parte superior muestra los niveles de potencia en cada punto del mapa usando un gráfico de temperaturas; en rojo los niveles más altos de potencia (cercanos a -81 dBm) y en tonos violetas los niveles más pobres (cercanos a -121 dBm), como se observa en la Figura 2.28.

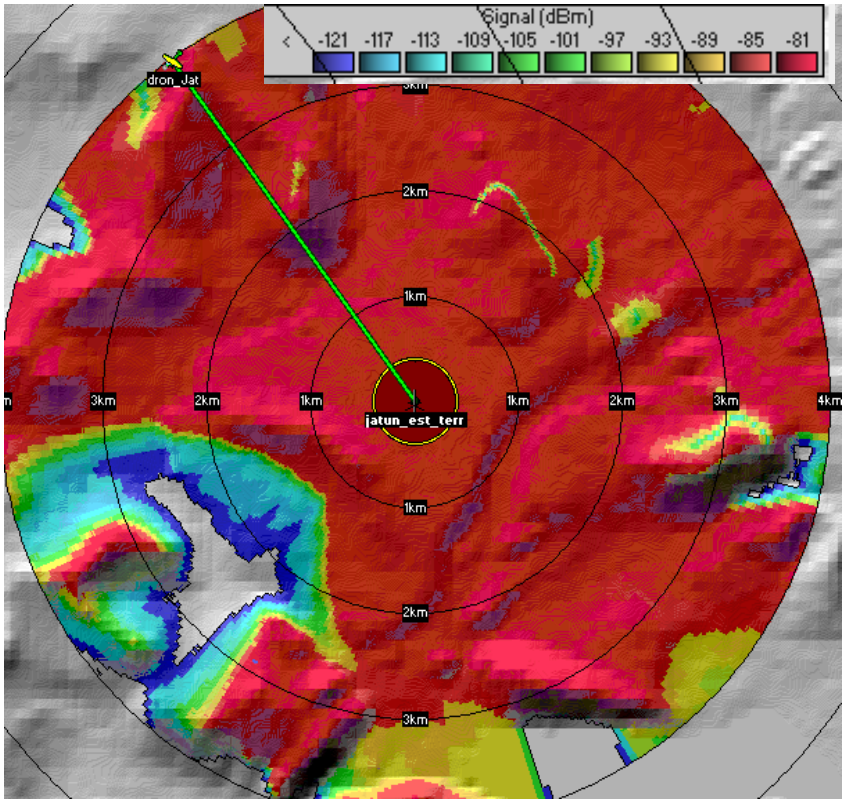

Figura 2.28 Simulación de cobertura de radio polar para el sistema de telemetría para el Humedal Jatunhuaycu.

Recordando que el dron está ubicado en el punto con mayor obstrucción posible por el terreno se procede a observar el enlace de radio como se muestra en la Figura 2.29.

Se puede observar claramente que no existen obstrucciones de la zona de Fresnel tal como se analizó en el diseño del sistema en el subcapítulo 2.1.1.3. Se observa que el nivel de recepción en el dron, según la simulación será de $-81.6\ dBm$ (ver Figura 2.29), lo cual está por encima de la sensibilidad del receptor.

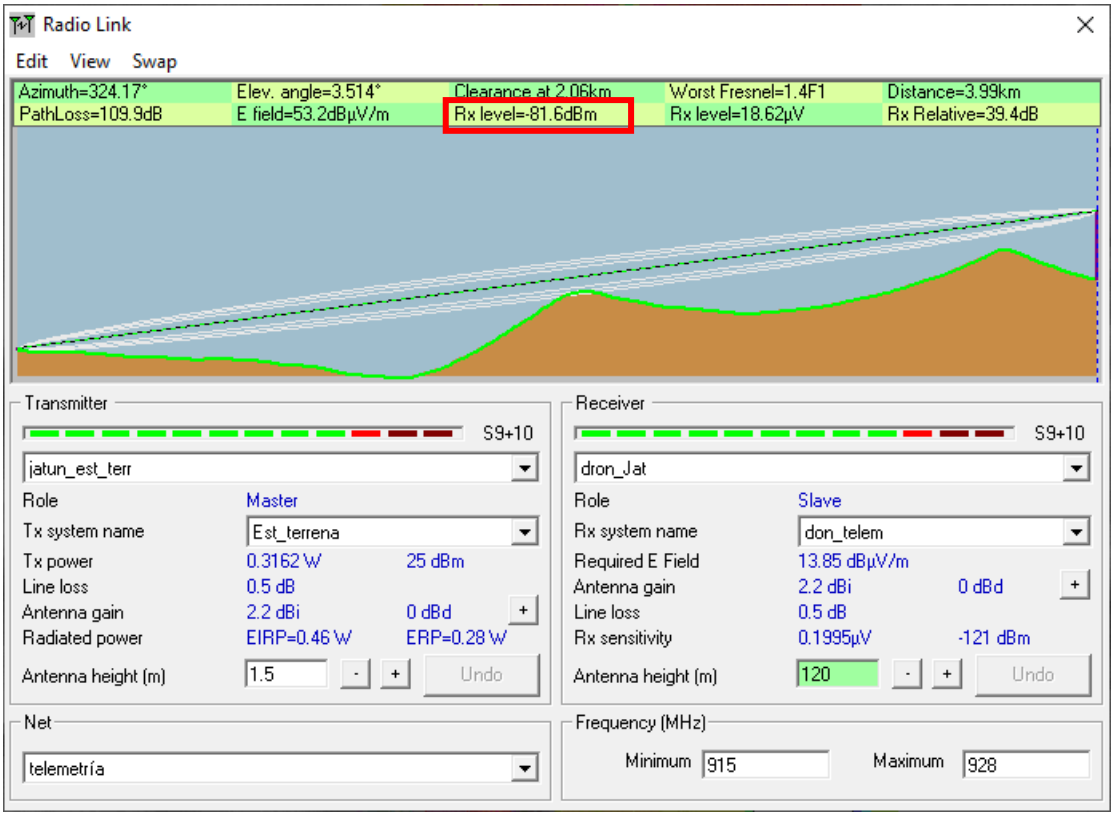

Figura 2.29 Simulacion del radio enlace punto a punto con despeje de las zonas de Fresnel de telemetría del Humedal Jatunhuaycu.

Si se realiza la simulación tomando como transmisor de datos al dron se obtienen los resultados mostrados en la Figura 2.30. Cabe mencionar que el dron se encuentra al borde de la zona de cobertura, es decir a 4 km de la estación terrena.

Se observa en el Enlace de Radio una respuesta similar a la anterior. El resultado se muestra en la Figura 2.31. Con estos resultados de simulación se refuerza el análisis teórico desarrollado en subcapítulos anteriores.

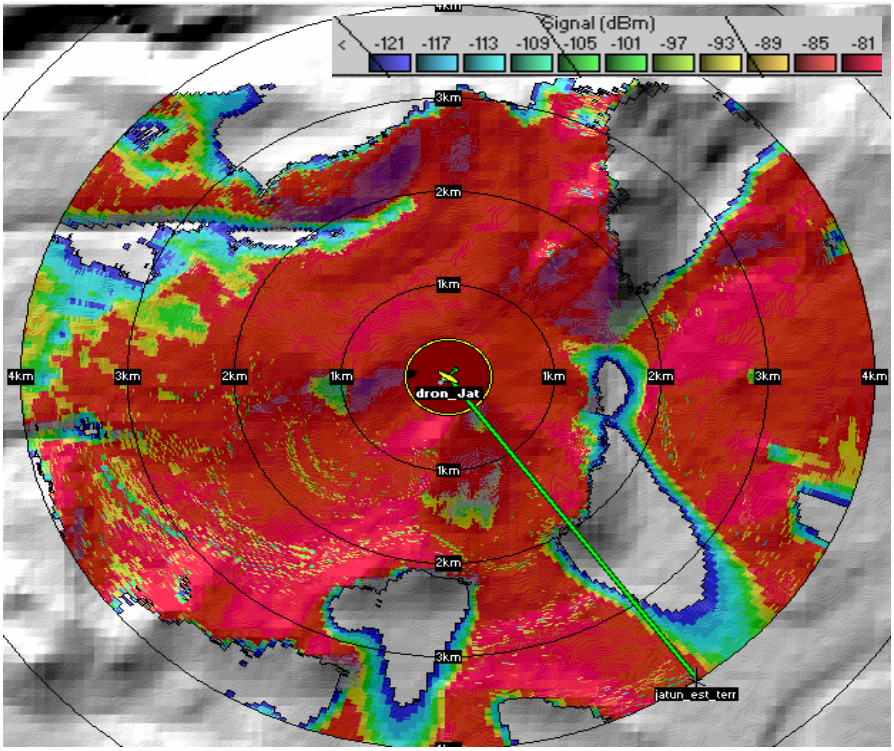

Figura 2.30 Simulación de cobertura de radio polar desde el dron hacia la estación terrena para el enlace de telemetría del Humedal Jatunhuaycu.

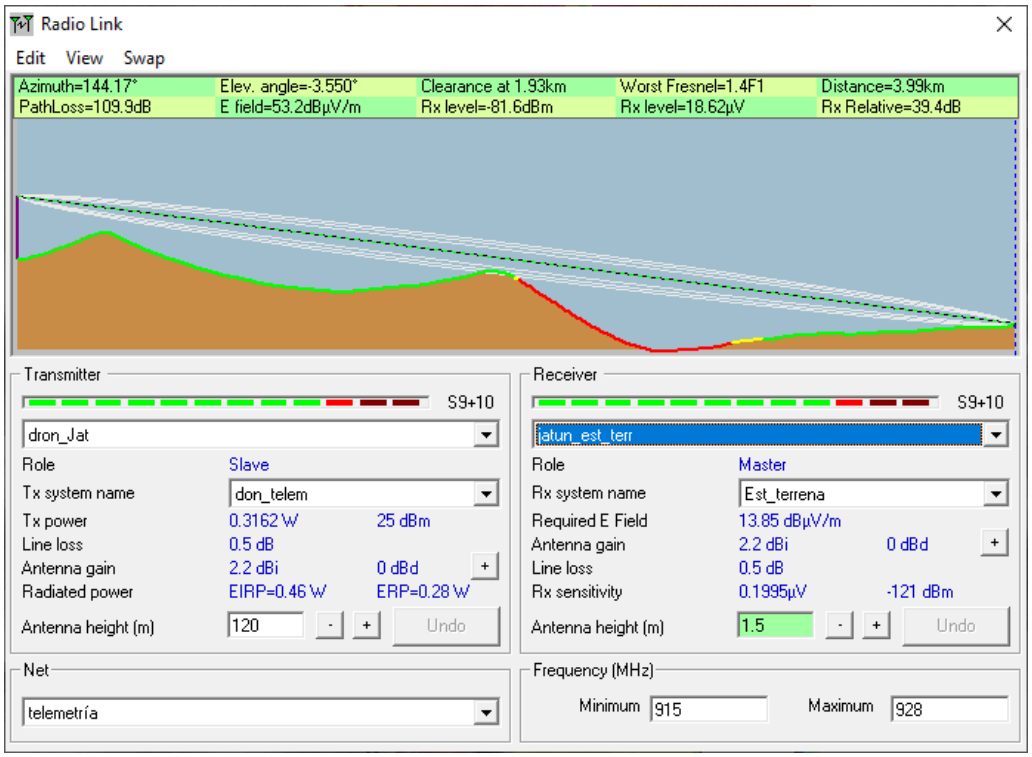

Figura 2.31 Simulación de Radio Enlace desde el dron a la estación terrena con despeje de las zonas de Fresnel para el Humedal Jatunhuaycu.

2.4.2 SIMULACIÓN DE COBERTURA DEL SISTEMA DE CONTROL REMOTO PARA EL HUMEDAL JATUNHUAYCU

La ubicación de la estación terrena se mantiene, pero la posición del dron cambia debido a que este enlace solo requiere una cobertura de 500 m. Las nuevas coordenadas del dron son:

- Latitud: 0°30’47,8’’ S.
- Longitud: 78°13’36’’ O.

El dron se coloca en la peor ubicación cercana, sin embargo, se destaca la ausencia de obstáculos representativos en el rango cercano a 1 km a la redonda. A las unidades se les asigna el nombre de “jat_control_rem” y “don_cont_rem”.

Se crean para este fin, dos nuevos sistemas, los cuales se llamarán “est_terr_control” y “dron_control”. A pesar de que se dijo que los rangos de sensibilidad de los equipos fluctúan entre -90 y -50 para el caso de la simulación tomamos el peor de los casos. Siendo este $S = -50$.

Es necesario crear una nueva red llamada “radio_control”. Esta red opera a la frecuencia de 2.4 GHz. La topología de la red será una vez más datos. Por lo tanto, se mantiene la topología maestro-esclavo. La única variación es que la comunicación es unidireccional, pues el control remoto siempre entregará los comandos y el dron los ejecutará.

Se agregan dos unidades llamadas “jat_control_remo” (maestro) y “dron_cont_rem” (esclavo) a los miembros de la red. Se procede a la simulación del sistema de control remoto obteniéndose los resultados de la Figura 2.32.

Se aprecia una cobertura muy adecuada para el enlace de radiocontrol. Los resultados muestran niveles de potencia de -74 dBm dentro los 500 m de cobertura del enlace de la estación terrena de control remoto. Cabe destacar que el anillo alrededor de la estación terrena muestra una distancia de 1 km a la redonda.

Se observa también en la opción Radio Enlace Figura 2.33 que no existen obstáculos representativos y que la potencia del receptor es de -66 dBm según la simulación, lo cual es muy satisfactorio ya que se cumplen los cálculos teóricos realizados.

2.4.3 SIMULACIÓN DE COBERTURA DEL SISTEMA DE VIDEO ANALÓGICO PARA EL HUMEDAL JATUNHUAYCU

La distancia de cobertura del enlace de video analógico es de 1 km. Por lo tanto, se mantie-

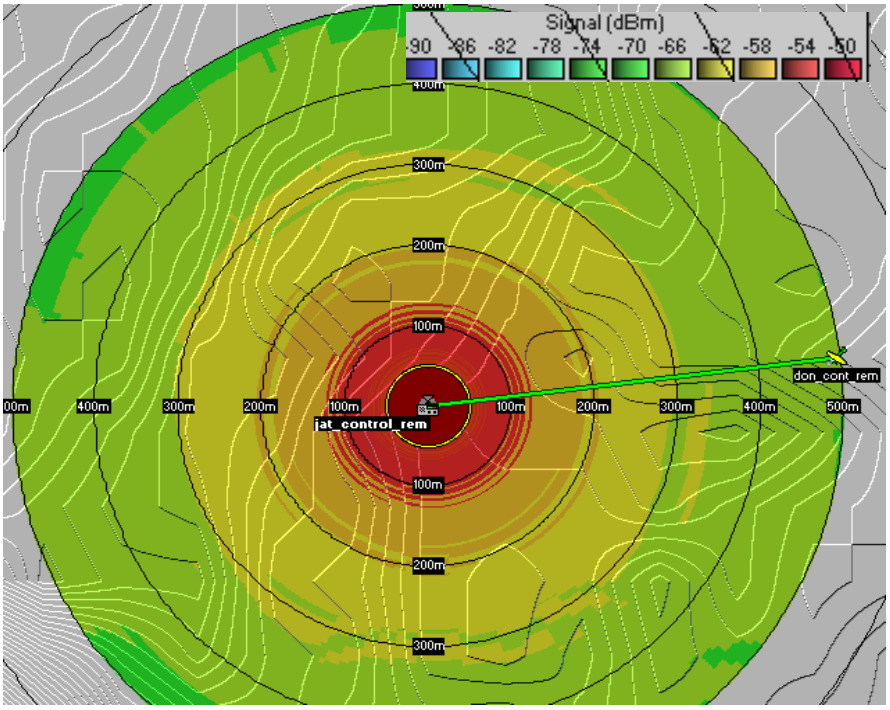

Figura 2.32 Simulación de cobertura del sistema de control remoto del Humedal Jatunhuaycu.

Figura 2.33 Simulación de radio enlace del sistema de Radiocontrol con despeje de las zonas de Fresnel para el Humedal Jatunhuaycu.

ne la ubicación de la estación terrena pero la ubicación del dron se debe cambiar nuevamente a una posición cercana al borde de cobertura. Las nuevas coordenadas del dron son:

- Latitud: 0°31’13,5’’ S.
- Longitud: 78°14’16,2’’ W.

Se crean las nuevas unidades: “jat_video_tierra” y “dron_video_jat”. Se crea una nueva red llamada “video_jatun” operando a una frecuencia de 5.8 GHz con valores de banda de operación según la Tabla 1.4. La topología es ahora una red de voz debido a que eso simula la comunicación analógica del video que se transmitirá. Se crean los nuevos sistemas “est_terrena_video” y “dron_video_jat”. La potencia de transmisión será de 600 mW (27.8 dBm) y la sensibilidad del receptor será de -90 dBm. Las pérdidas en cables y conectores se asumirán de 1 dB. Las ganancias de las antenas son de 5 dBi en el dron y 2.15 en la estación terrena. Se asocian las unidades a la red siendo el dron quien transmite (comando) y la estación terrena (subordinado) solo recibe.

El resultado de la simulación de radio polar de cobertura se muestra en la Figura 2.34.

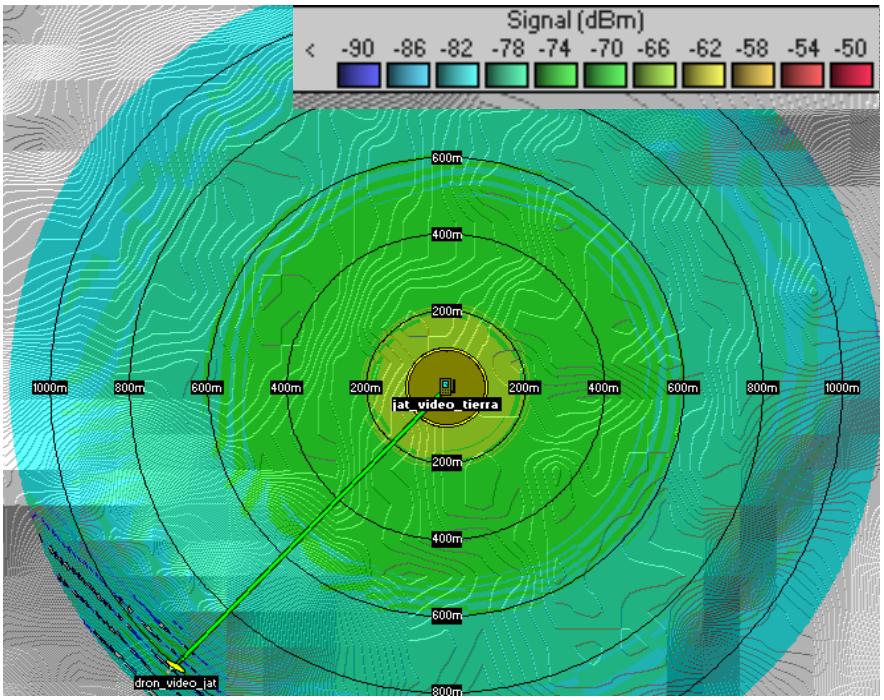

Figura 2.34 Simulación de cobertura de radio polar del enlace de video para el humedal Jatunhuaycu.

La opción Radio Enlace (ver Figura 2.35) muestra que el mayor obstáculo geográfico no interrumpe la primera zona de Fresnel, tal como se esperaba en los cálculos teóricos.

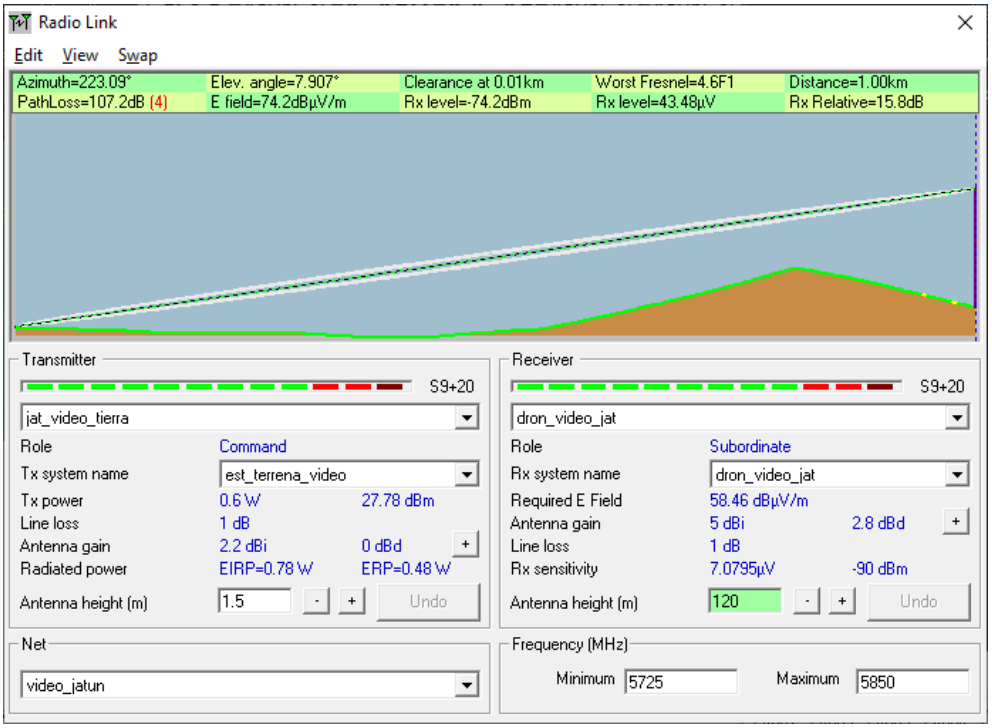

Figura 2.35 Simulación de radio del enlace de video con despeje de las zonas de Fresnel para el Humedal Jatunhuaycu.

2.5 SIMULACIÓN DE COBERTURA DE ENLACES DE TELECOMUNICACIONES PARA EL HUMEDAL PUGLLOHUMA EN EL SOFTWARE RADIO MOBILE

Dada la cercanía entre el camino y el humedal, es conveniente situar la estación terrena en un lugar junto a la carretera. Las coordenadas de la estación terrena son: Latitud: 0°30’4.40’’S; longitud: 78°12’55.80’’W.

2.5.1 SIMULACIÓN DE COBERTURA DE SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA EL HUMEDAL PUGLLOHUMA

La Figura 2.36 muestra la simulación de cobertura de radio polar para el sistema de telemetría del Humedal Pugllohuma. Se observa claramente que no existen obstáculos representativos a 1km a la redonda. El humedal se encuentra ubicado a la derecha de la estación terrena por lo cual elevaciones a la izquierda de este punto no son de importancia ya que el dron no volará en esa zona para cubrir misiones de monitoreo. Las curvas de nivel muestran diferencias de altura de 5 m.

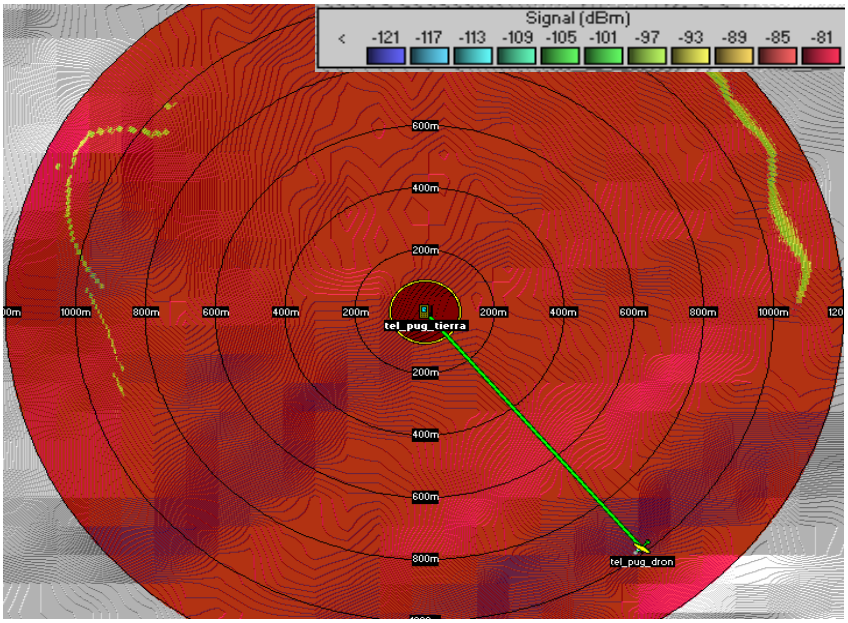

Figura 2.36 Simulación de cobertura del enlace de telemetría del Humedal Pugllohuma.

La Figura 2.37 muestra el despeje absoluto de las zonas de Fresnel para el radioenlace de telemetría del Humedal Pugllohuma.

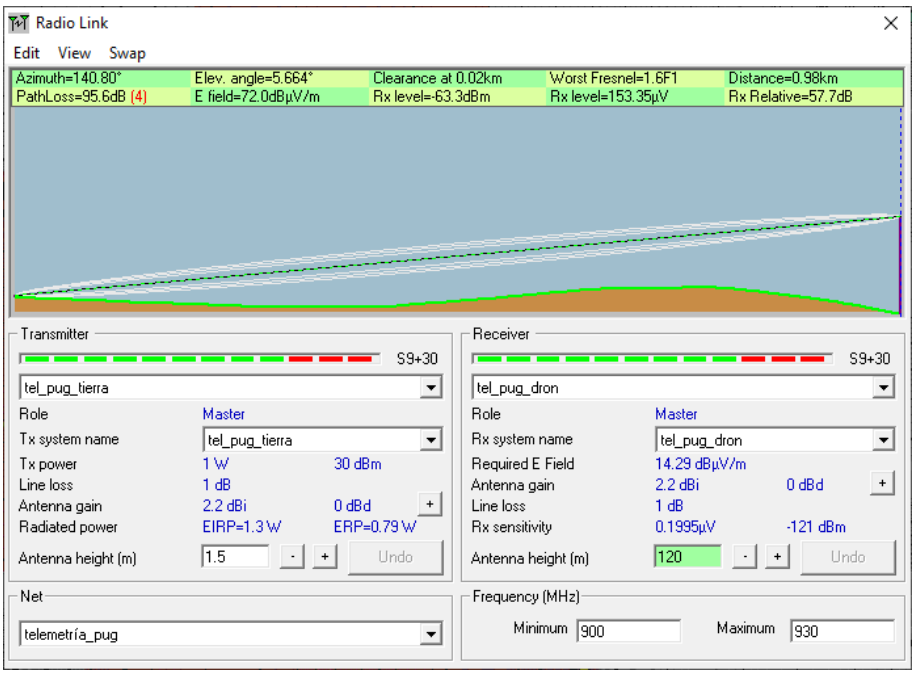

Figura 2.37 Simulación de enlace de radio con despeje de las zonas de Fresnel para el enlace de telemetría del Humedal Pugllohuma.

2.5.2 SIMULACIÓN DE COBERTURA DE SISTEMA DE RADIOCONTROL PARA EL HUMEDAL PUGLLOHUMA

La Figura 2.38 muestra la cobertura de radio polar del enlace de radiocontrol para el humedal con curvas de nivel que muestran alturas de 5 m. Se puede evidenciar fácilmente que no existen obstáculos representativos en la zona de cobertura del radioenlace.

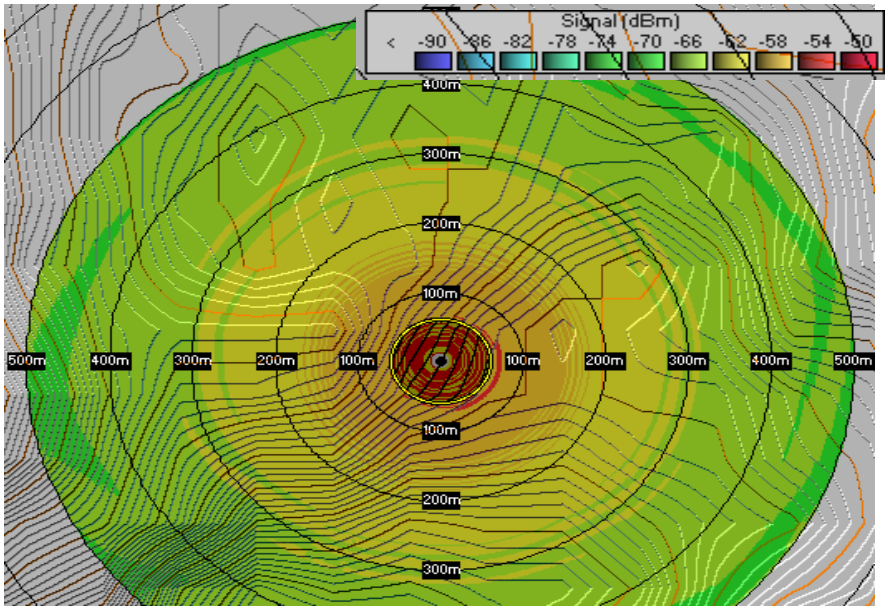

Figura 2.38 Simulación de cobertura de radio polar del enlace de radiocontrol para el Humedal Pugllohuma con curvas de nivel a 5m.

La Figura 2.39 muestra el despeje absoluto de las zonas de Fresnel para el sistema de radiocontrol. La simulación refuerza los cálculos realizados en el subcapítulo 2.1.1.1.

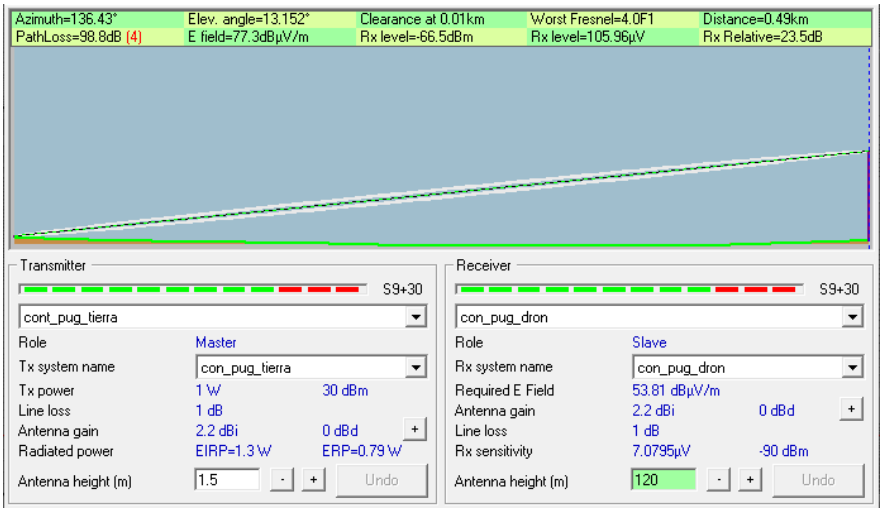

Figura 2.39 Simulación de radioenlace del sistema de radiocontrol del humedal Pugllohuma con despeje de las zonas de Fresnel.

2.5.3 SIMULACIÓN DE COBERTURA DE SISTEMA DE VIDEO ANALÓGICO PARA EL HUMEDAL PUGLLOHUMA

La Figura 2.40 muestra la simulación de cobertura de radio polar del sistema de video analógico. Se puede evidenciar que no existen obstáculos geográficos representativos.

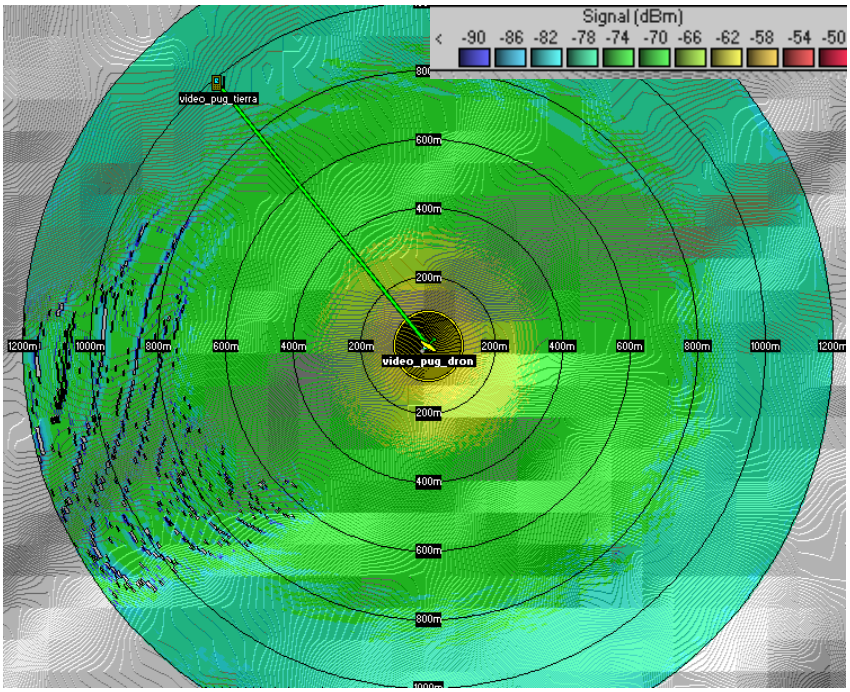

Figura 2.40 Simulación del sistema de video analógico del Humedal Pugllohuma.

La Figura 2.41 muestra el perfil del terreno. Se puede apreciar claramente que existe un despeje absoluto de las zonas de Fresnel.

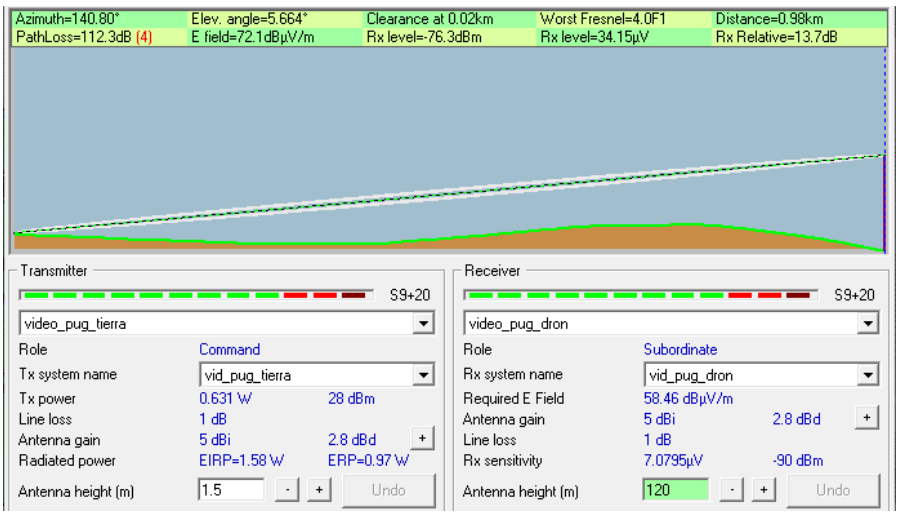

Figura 2.41 Simulación de radioenlace del sistema de video para el Humedal Pugllohuma con despeje absoluto de las zonas de Fresnel.

2.6 ENSAMBLAJE DE EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES EN LA PLATAFORMA AÉREA

La estación terrena puede ser cualquier ordenador que tenga instalado el software Mission Planner. Para las pruebas se ocupó el computador Lenovo V330, como se muestra en la Figura 2.42. La Figura 2.43 muestra el transceptor fijado al fuselaje del UAV EVENT 386.

La Figura 2.44 muestra el controlador Pixhawk PX4. En él se encuentra configurada toda la información de control automático del UAV de ala fija. Se conectan al PX4 los equipos de telemetría, el GPS a bordo y algunas salidas PWM para controlar los servos de los alerones y timones de dirección y profundidad.

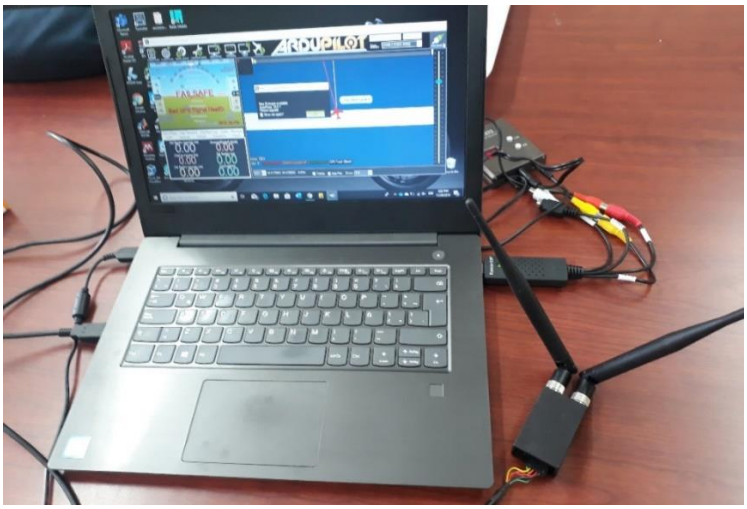

Figura 2.42 Ordenador de la estación terrena.

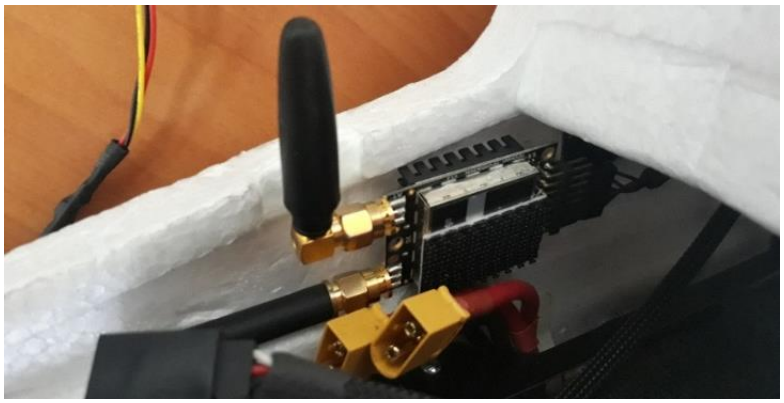

Figura 2.43 Transmisor-receptor de telemetría adosado al fuselaje del UAV.

Figura 2.44 Pixhawk PX4 ubicado en la parte superior del UAV junto al paracaidas de emergencia.

La Figura 2.45 muestra el receptor QUANUM I8 para operar a 2.4 GHz.

Figura 2.45 Receptor de radiocontrol, ubicado junto al PIXHAWK en el mismo compartimento.

La Figura 2.46a muestra el transceptor de telemetría de la estación terrena. La Figura 2.46b muestra el receptor de telemetría en el UAV. La Figura 2.46c muestra el radiocontrol usado para el despegue. La Figura 2.46d muestra la ubicación del receptor de radiocontrol dentro del UAV, en la cavidad junto al contenedor del paracaídas.

La Figura 2.46e muestra el transmisor de video analógico, el cual se fija al UAV. La Figura 2.46f muestra el equipo receptor de video para la estación terrena. La Figura 2.46g permite observar la ubicación de la cámara de video, misma que mostrará el video en Radio Mobile

en tiempo real. Todos los equipos son probados en tierra antes de llevarlos al campo para efectuar las misiones de vuelo y la toma de fotografías.

El video requiere necesariamente la instalación de drivers para su correcto funcionamiento. Una vez instalados, se puede configurar el tamaño del video como se muestra en la Figura 2.47.

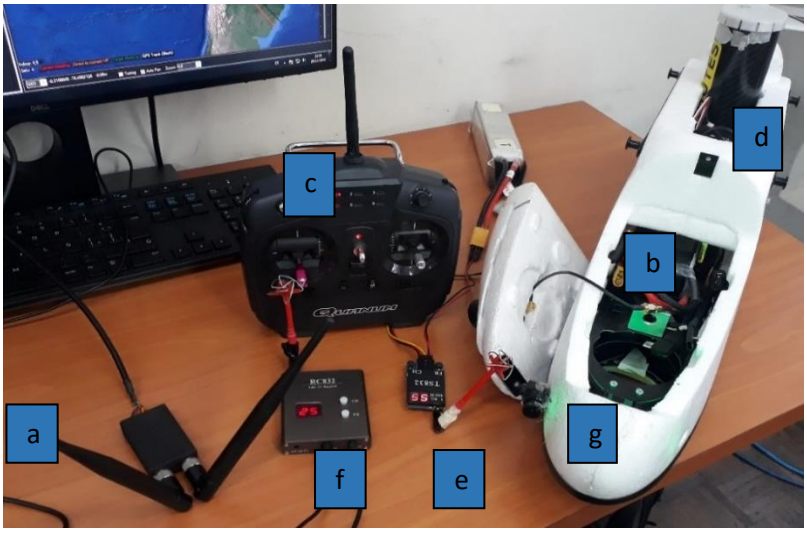

Figura 2.46 a) Transmisor-receptor de telemetría de la estación terrena, b) receptor de telemetría (dentro del fuselaje) en el UAV, c) transmisor de radiocontrol, d) receptor de radiocontrol (dentro del fuselaje), e) transmisor de video, f) receptor de video, g) cámara de video.

Figura 2.47 Visualizador de la cámara de video (izquierda). Visualizador del sistema de GPS (derecha).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se llevaron a cabo varias pruebas iniciando por el Humedal Pugllohuma. Se empieza por él debido a que es un área de monitoreo pequeña y el radio no supera el 1 km. Los resultados de los vuelos sobre el Humedal Pugllohuma se muestran a continuación.

Los datos de nivel de potencia son tomados cada segundo y enviados en “tiempo real” tanto en el sentido dron - estación terrena como estación terrena - dron. Los mismos son transportados a través de tramas MAVlink como se mostró en la Figura 1.19.

3.1 PRUEBAS DEL SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA EL HUMEDAL PUGLLOHUMA

Se realizan tres pruebas de vuelo, cada una en un día diferente. Las condiciones climáticas en las inmediaciones del volcán Antisana suelen ser variables. Las pruebas se llevaron a cabo en condiciones de llovizna, vientos fuertes y tenues, días soleados y despejados. Estas condiciones climáticas pueden variar de un momento a otro, sin embargo, dieron ventanas de tiempo en las cuales las condiciones para volar fueron lo suficientemente buenas. Por lo tanto, dado que se realizaron tres pruebas de vuelo a tres condiciones climáticas un tanto distintas, se pone a prueba el diseño del sistema de telemetría.

La potencia de transmisión configurada en los equipos fue de 25 dBm ya que, para el Humedal Pugllohuma no requiere ser la más alta posible (30 dBm), pues, esto reduce la autonomía del dron debido a que todos los equipos se alimentan a través de una única batería, excepto el sistema de video, el cual tiene su propia batería. Los datos se almacenan tanto en una memoria en el dron, como en el computador de la estación terrena. Estos datos tienen una extensión del tipo “.log”, los cuales pueden ser analizados en Mission Planner. Una vez que el dron llega a tierra se pueden tabular y analizar las variables recolectadas. Se transforman estos datos a un formato que puede ser interpretado por MATLAB para graficarlos y mostrarlos. De esta manera se analizan los resultados permitiendo hacer ajustes de ser necesario.

3.1.1 PRUEBA 1

Se lleva a cabo un sobrevuelo del humedal a una distancia máxima de 800 m en condiciones de alta nubosidad y presencia de llovizna. La Figura 3.3 muestra la ruta que siguió el UAV y la planificada. El nivel de recepción en la estación terrena se muestra en la Figura 3.1, mientras que el nivel de recepción del dron se muestra en la Figura 3.2.

La presencia de fuertes vientos limitó el vuelo a aproximadamente 16 minutos. Al enfrentar vientos más fuertes el UAV requiere incrementar la potencia en el motor para empujar al dron a una velocidad mayor que la del viento. Esto implicó aumentar la potencia del motor al máximo cuando el dron no podía vencer la fuerza del viento.

Una vez tabulados los datos en Matlab se realiza el análisis de niveles máximos y mínimos de potencia de señal recibida cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.1. Al comparar estos resultados con los valores de diseño y simulados se puede observar que la potencia de recepción del UAV y la Estación Terrena están muy por encima de las mínimas para un correcto funcionamiento sin que existan interrupciones de la señal. Esto permite tener una disponibilidad muy alta.

La sensibilidad del receptor es de -121 dBm, y, si se deja un margen de desvanecimiento de 10 dB, el margen de potencia en exceso es de aproximadamente 70 dB.

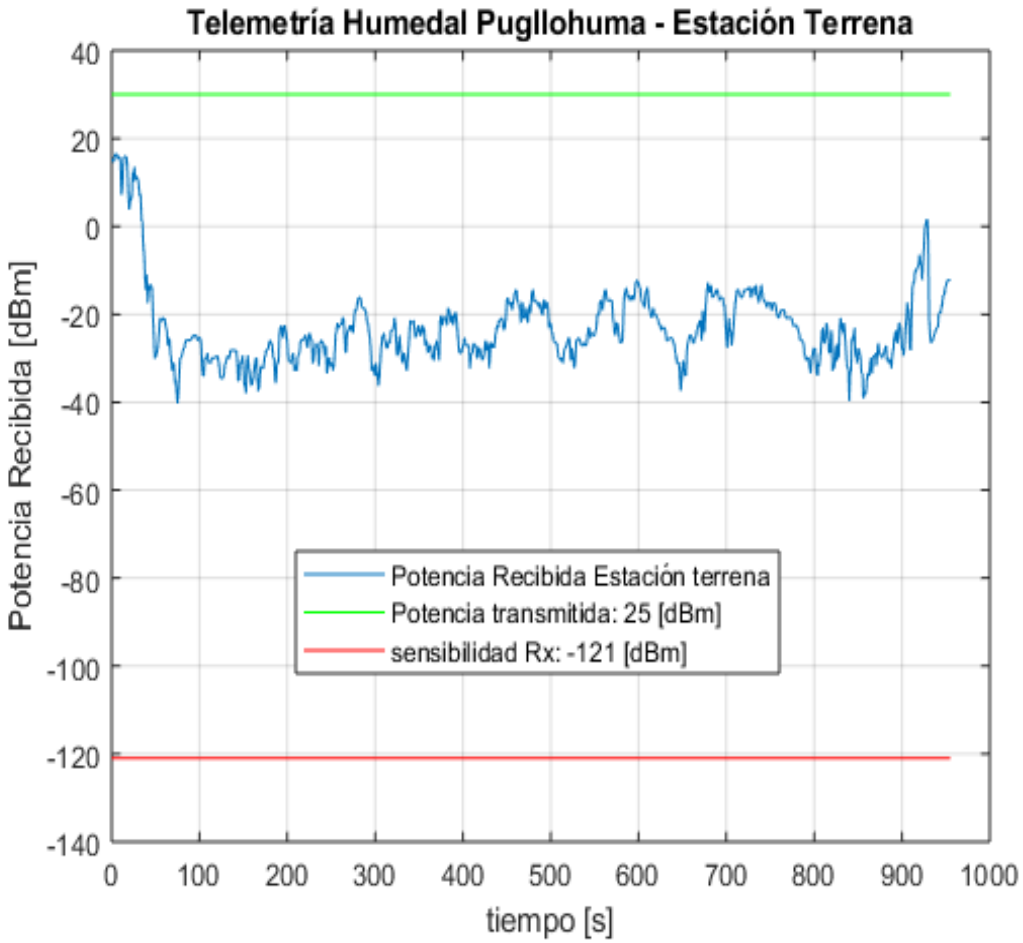

Figura 3.1 Potencia en el receptor en la estación terrena. Prueba 1 Pugllohuma.

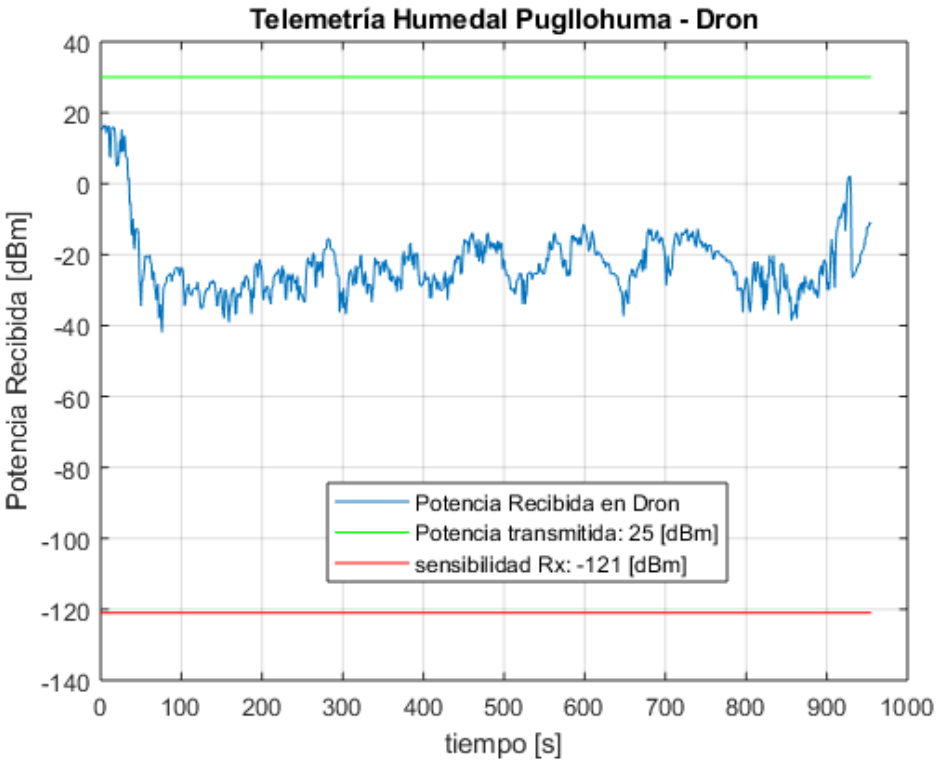

Figura 3.2 Potencia en el receptor en el UAV. Prueba 1 Pugllohuma.

Figura 3.3 Ruta planificada (blanco) vs ruta seguida por el UAV (amarillo) en la prueba 1.

Tabla 3.1 Resultados máximos y mínimos de la prueba 1 en el Humedal Pugllohuma

POTENCIAS DE RECEPCIÓN DE LA PRUEBA 1		
Estación Terrena	P. máxima	16.411765 dBm
	P. mínima	-40.270588 dBm
UAV	P. máxima	16.411765 dBm
	P. mínima	-40.270588 dBm

3.1.2 PRUEBA 2

Se lleva a cabo un sobrevuelo del humedal a una distancia máxima de 900m en condiciones de alta nubosidad y presencia de llovizna. El nivel de recepción en la estación terrena se muestra en la Figura 3.4, mientras que el nivel de recepción del dron se muestra en la Figura 3.5. No hubo presencia de vientos fuertes, gracias a esto, la duración del vuelo fue aproximadamente 20 minutos. La Figura 3.6 muestra la ruta que siguió el UAV y la planificada.

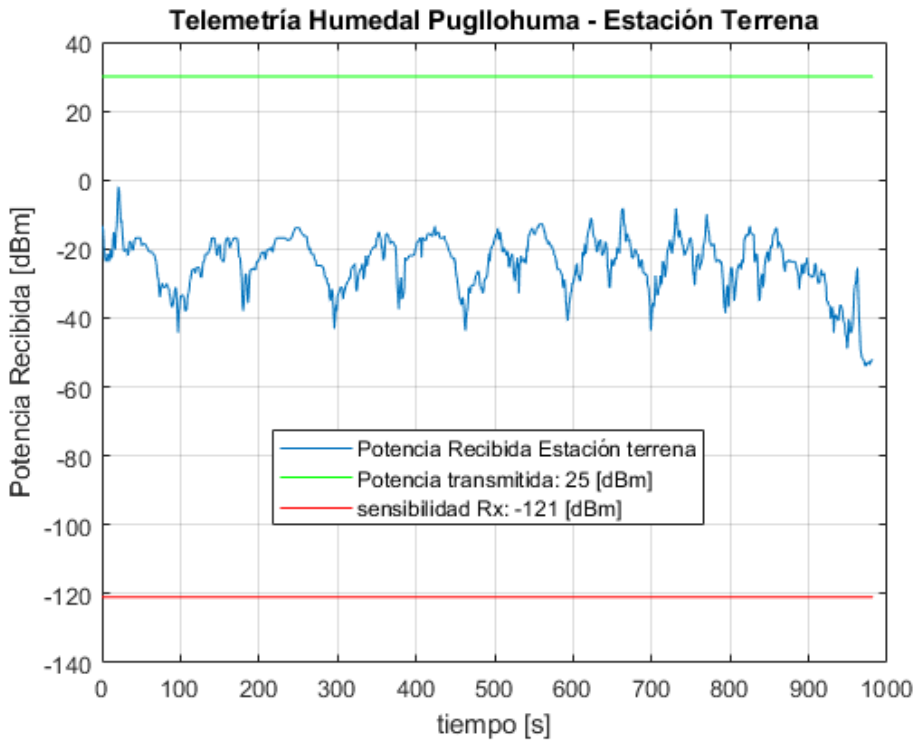

Figura 3.4 Potencia del receptor en la estación terrena. Prueba 2 Pugllohuma.

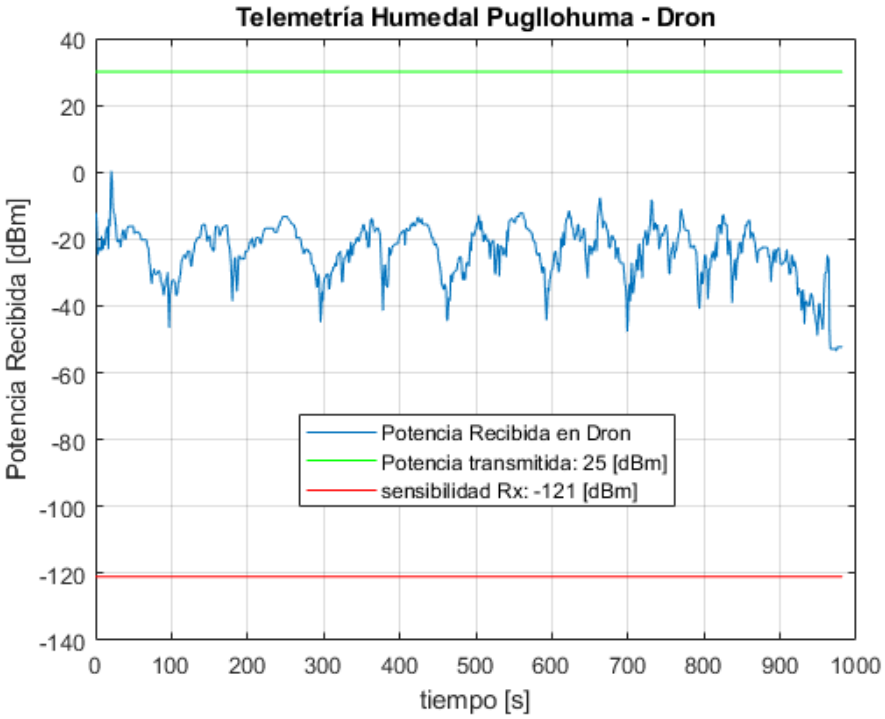

Figura 3.5 Potencia del receptor en el UAV. Prueba 2 Pugllohuma.

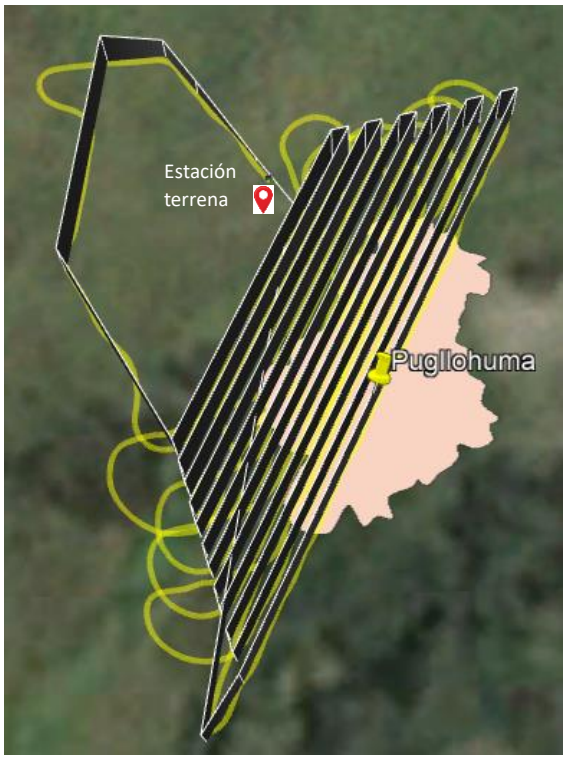

Figura 3.6 Ruta planificada (blanco) vs ruta seguida por el UAV (amarillo) en la prueba 2.

Una vez tabulados los datos en Matlab se realiza el análisis de niveles máximos y mínimos de potencia de señal recibida cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Resultados máximos y mínimos de la prueba 2 en el Humedal Pugllohuma

POTENCIAS DE RECEPCIÓN DE LA PRUEBA 2		
Estación Terrena	P. máxima	-1.909804 dBm
	P. mínima	-54.011765 dBm
UAV	P. máxima	-1.909804 dBm
	P. mínima	-54.011765 dBm

Al comparar estos resultados con los valores de diseño y simulados se puede observar que la potencia de recepción del UAV y la Estación Terrena están muy por encima de las mínimas para un correcto funcionamiento, sin que existan interrupciones de la señal. Esto permite tener una disponibilidad muy alta.

La sensibilidad del receptor es de -121 dBm, y, si se deja un margen de desvanecimiento de 10 dB, el margen de potencia en exceso es de aproximadamente 55 dB.

3.1.3 PRUEBA 3

Se lleva a cabo un sobrevuelo del humedal a una distancia máxima de aproximadamente 1.6 km (ver Figura 3.17) en condiciones climáticas con sol. En esta prueba se adquieren datos sobre la transmisión de video, lo cual se observará en el subcapítulo 3.4. El nivel de recepción en la estación terrena se muestra en la Figura 3.7, mientras que el nivel de recepción del dron se muestra en la Figura 3.8. La duración del vuelo fue de aproximadamente 10 minutos. La Figura 3.9 muestra la ruta que siguió el UAV (línea amarilla) y la planificada (línea blanca).

Una vez tabulados los datos en Matlab se realiza el análisis de niveles máximos y mínimos de potencia de señal recibida cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.3. Al comparar estos resultados con los valores de diseño y simulados se puede observar que la potencia de recepción del UAV y la Estación Terrena están muy por encima de las mínimas para un correcto funcionamiento sin que existan interrupciones de la señal.

Ya que, la sensibilidad del receptor es de -121 dBm, y, si se deja un margen de desvanecimiento de 10 dB, el margen de potencia en exceso es de aproximadamente 71 dB.

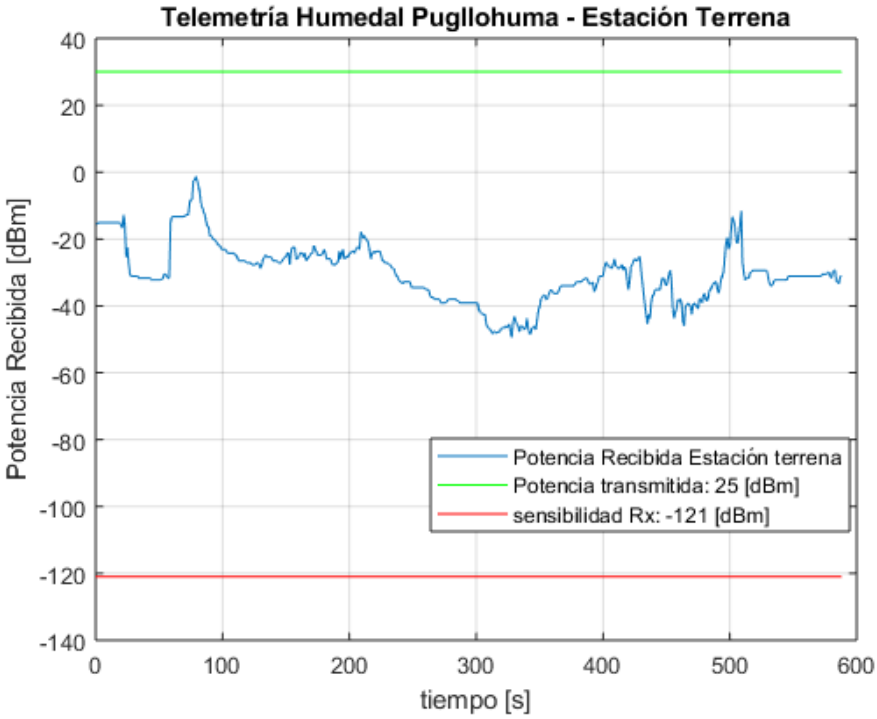

Figura 3.7 Potencia del receptor en la estación terrena. Prueba 3.

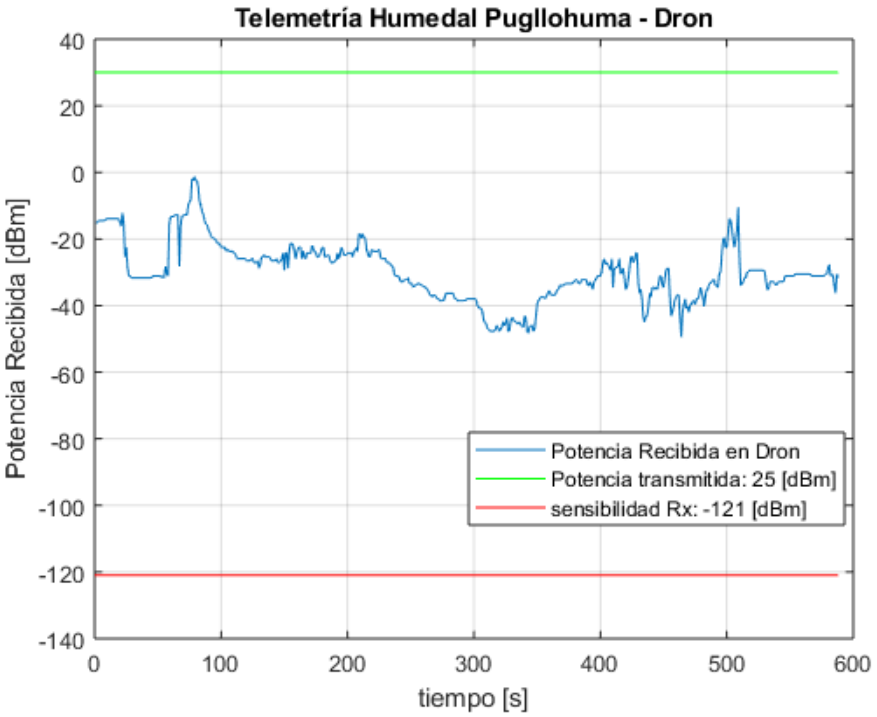

Figura 3.8 Potencia del receptor en el UAV. Prueba 3.

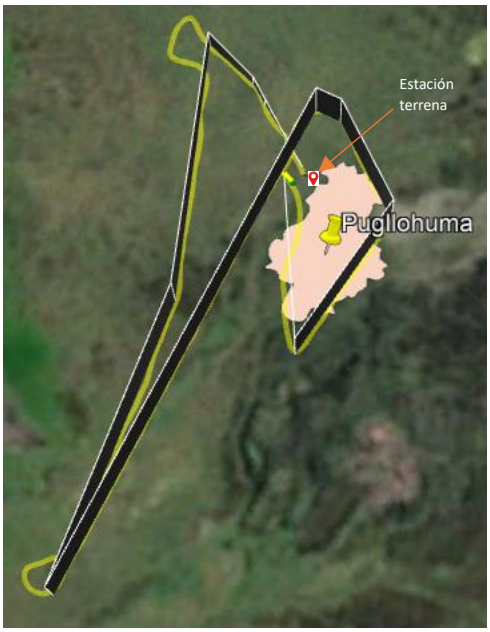

Figura 3.9 Ruta planificada (blanco) vs ruta seguida por el UAV (amarillo) en la prueba 3.

Tabla 3.3 Resultados máximos y mínimos de la prueba 3 en el Humedal Pugllohuma

POTENCIAS DE RECEPCIÓN DE LA PRUEBA 3		
Estación Terrena	P. máxima	-1.337255 dBm
	P. mínima	-49.431373 dBm
UAV	P. máxima	-1.337255 dBm
	P. mínima	-49.431373 dBm

3.2 PRUEBA DEL SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA EL HUMEDAL JATUNHUAYCU

Las pruebas de funcionamiento del sistema de telemetría representan un riesgo mayor debido a la extensión del humedal, las condiciones geográficas y climáticas. Se realizan tres pruebas de vuelo. Las pruebas de funcionamiento de equipos y obtención de datos se realizaron en tierra a pocos metros de la estación terrena. Finalmente, la última se llevó a cabo a una distancia superior a los 5.6 km como se puede observar en la Figura 3.10.

Las pruebas se llevaron a cabo en condiciones soleadas y despejadas, de esta manera, se comprueba el correcto diseño y funcionamiento del sistema de telemetría para el Humedal Jatunhuaycu. La potencia de transmisión configurada en los equipos fue de 25 dBm ya que, transmitir a la potencia más alta posible (30 dBm) requiere de una corriente muy alta que puede reducir el tiempo de vida del equipo transmisor.

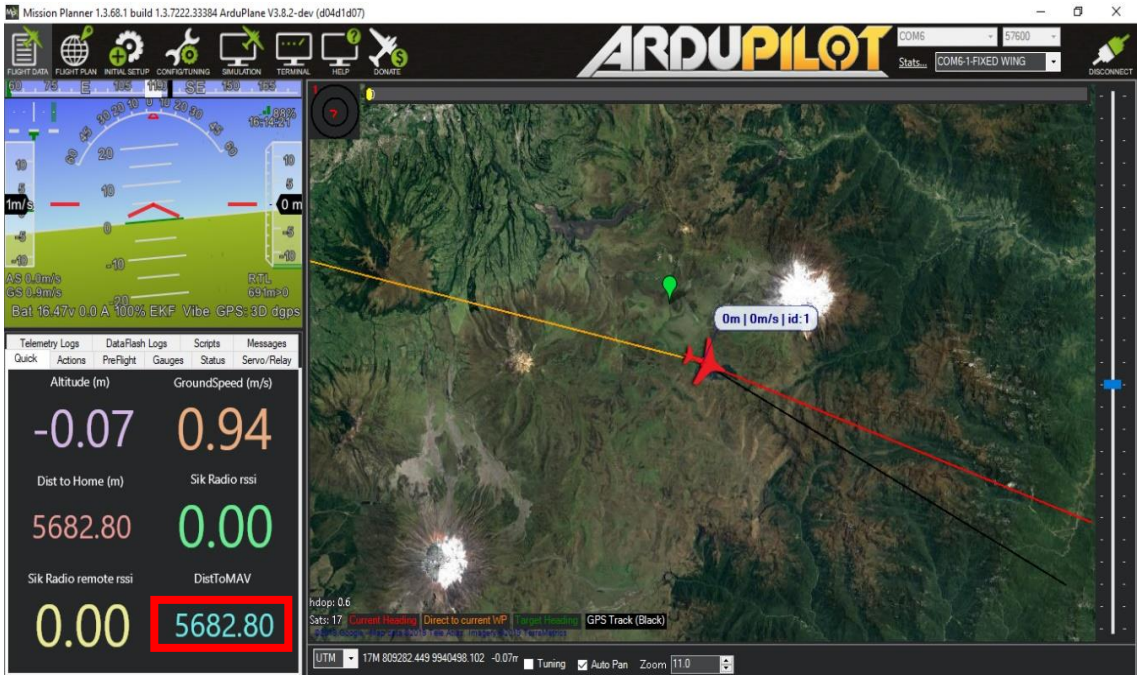

Figura 3.10 Distancia máxima de separación entre el UAV y la estación terrena en la prueba 3 del humedal Jatunhuaycu.

Debido a la finalización de permisos de ingreso a las zonas de protección hídricas administradas por el FONAG, las pruebas fueron llevadas a cabo en tierra. Al ser áreas de protección hídrica la regulación es estricta respecto al ingreso y permanencia de personas externas a la organización administradora.

Se buscó replicar condiciones de comunicación en vuelo. El lugar donde se ubicó el dron fue el Mirador “El Condor”, situado en las coordenadas: Latitud: 0°32'15.05"S y Longitud: 78°13'21.89"O, mientras que la estación terrena se movilizó desde el parqueadero de la entrada a la Laguna “La Mica” hasta llegar a separarse una distancia final superior a los 4 km. Las coordenadas del punto de separación fueron: Latitud: 0°29'36.04"S y Longitud: 78°14'53.11"O.

La altura de la estación terrena fue de aproximadamente 4080 msnm. Por su parte, el dron se ubicó a una altura inicial de aproximadamente 4093 msnm. Estas alturas variaron tanto en la estación terrena como en el dron debido a que ambas estuvieron en movimiento durante la prueba debido al intento de recrear condiciones de vuelo. En principio la estación terrena se mantuvo en movimiento mientras el dron se mantuvo fijo. Luego la estación terrena fija y el dron en movimiento y finalmente durante una parte de la prueba ambas estaciones se movieron, la estación terrena unos cuantos metros y el dron alrededor del mirador procurando mantener la línea de vista entre las estaciones.

3.2.1 PRUEBA 1

Se realiza una pequeña prueba a 50m. Su importancia radica en la comprobación del correcto funcionamiento de equipos de telecomunicaciones, batería y comprobación de la existencia de la línea de vista con el dron. El nivel de recepción en la estación terrena se muestra en la Figura 3.11, mientras que el nivel de recepción del dron se muestra en la Figura 3.12. En esta prueba la estación terrena se mantuvo estática mientras el dron se movió en las cercanías de la estación terrena.

Una vez tabulados los datos en Matlab se realiza el análisis de niveles máximos y mínimos de potencia de señal recibida cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.4. Al comparar estos resultados con los valores de diseño y simulados se puede observar que la potencia de recepción del UAV y la Estación Terrena están por encima de las mínimas, sin embargo, esta prueba se realiza a una distancia significantemente menor a 4km.

Ya que la sensibilidad del receptor es de -121 dBm, y, si se deja un margen de desvanecimiento de 10 dB, el margen de potencia en exceso es de aproximadamente 86dB.

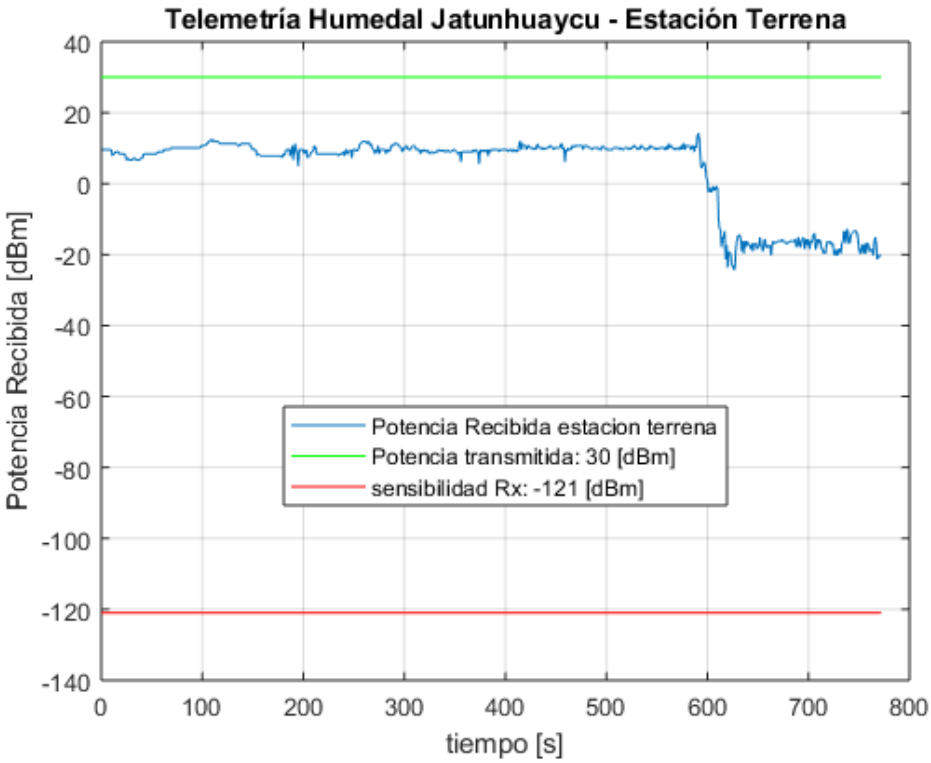

Figura 3.11 Potencia del receptor en el UAV. Prueba 1 Jatunhuaycu.

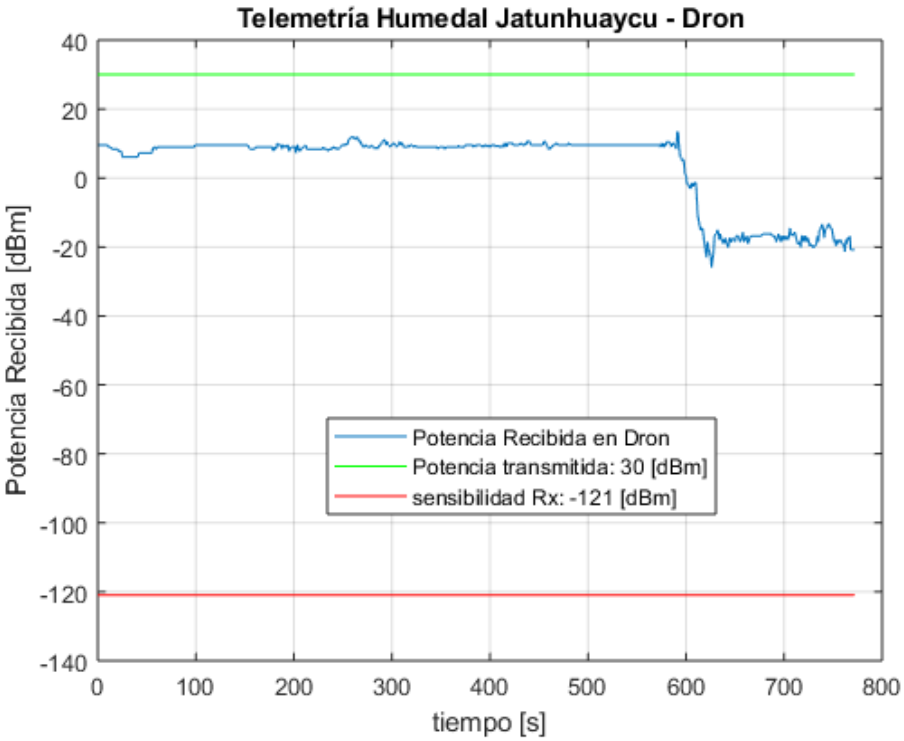

Figura 3.12 Potencia del receptor en la estación terrena. Prueba 1 Jatunhuaycu.

Tabla 3.4 Resultados máximos y mínimos de la prueba 1 en el Humedal Jatunhuaycu

POTENCIAS DE RECEPCIÓN DE LA PRUEBA 1		
Estación Terrena	P. máxima	14.121569 dBm
	P. mínima	-24.239216 dBm
UAV	P. máxima	14.12156 dBm
	P. mínima	-24.239216 dBm

3.2.2 PRUEBA 2

Se lleva a cabo una prueba en las cercanías del humedal a una distancia máxima de 600m en condiciones climáticas favorables, cielos despejados y baja humedad. A esta distancia se inicia la prueba del enlace de telemetría. El nivel de recepción en la estación terrena se muestra en la Figura 3.13, mientras que el nivel de recepción del dron se muestra en la Figura 3.14.

La estación terrena se movilizó hasta el punto de control seleccionado de coordenadas: Latitud: 0°29'36.04"S y Longitud: 78°14'53.11"O mientras el dron se lo ubicó fijo en la cima del mirador. La duración de la prueba fue aproximadamente 7 minutos.

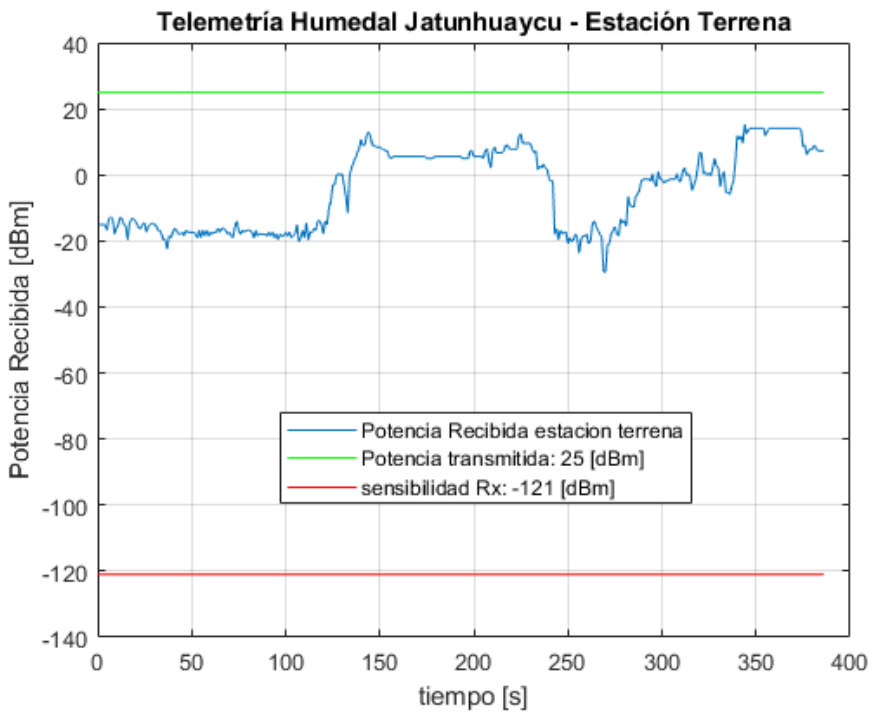

Figura 3.13 Potencia del receptor en la estación terrena. Prueba 2 Jatunhuaycu.

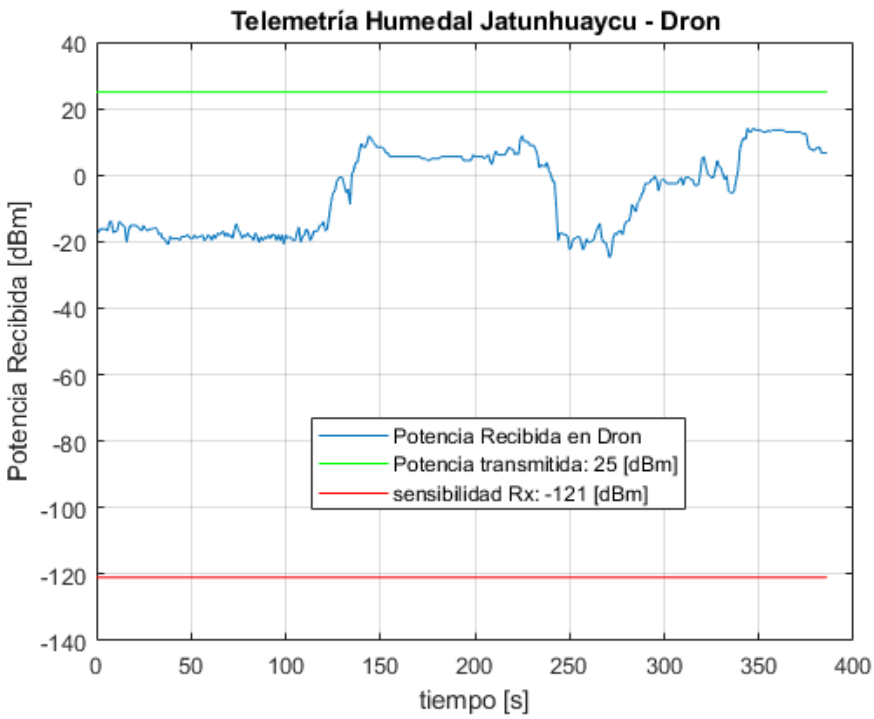

Figura 3.14 Potencia del receptor en el UAV. Prueba 2 Jatunhuaycu.

Una vez tabulados los datos en Matlab se realiza el análisis de niveles máximos y mínimos de potencia de señal recibida cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.5. Al comparar estos resultados con los valores de diseño y simulados se puede observar que la potencia

de recepción del UAV y la Estación Terrena están muy por encima de las mínimas para un correcto funcionamiento sin que existan interrupciones de la señal. Esto permite tener una disponibilidad muy alta.

Ya que, la sensibilidad del receptor es de -121 dBm, y, si se deja un margen de desvanecimiento de 10 dB, el margen de potencia en exceso es de aproximadamente 81 dB.

Tabla 3.5 Resultados máximos y mínimos de la prueba 2 en el Humedal Jatunhuaycu

POTENCIAS DE RECEPCIÓN DE LA PRUEBA 2		
Estación Terrena	P. máxima	15.266667 dBm
	P. mínima	-29.392157 dBm
UAV	P. máxima	15.266667 dBm
	P. mínima	-29.392157 dBm

3.2.3 PRUEBA 3

Se lleva a cabo la prueba a una distancia máxima de 5.6 km (ver Figura 3.10) en condiciones climáticas muy favorables al principio, es decir, cielo despejado, baja humedad y excelente línea de vista. Casi al final de la prueba las condiciones climáticas cambiaron en pocos minutos. El cielo se nubló parcialmente y luego totalmente. Hubo presencia de granizo durante pocos minutos que posteriormente mermó. El nivel de recepción en la estación terrena se muestra en la Figura 3.15, mientras que el nivel de recepción del dron se muestra en la Figura 3.16. La duración de la prueba fue de aproximadamente 1.6 horas. Ambas estaciones se movieron, la terrena un poco hasta llegar al punto esperado, mas, una vez llegado al punto se detuvo el movimiento. El dron se movió alrededor del mirador “El Condor”, procurando mantener el enlace con línea de vista. Durante algunos segundos ésta se interrumpió, recuperándose con el posterior desplazamiento del dron en el mirador.

Las pruebas se llevaron a cabo de esta manera debido a que el dron tiene una batería capaz de alimentar el sistema durante varios minutos de manera autónoma. Sin embargo, en la estación terrena se consume un poco más de energía debido a que el equipo transmisor-receptor de telemetría se conecta al computador, en él se mantiene un interfaz gráfico de usuario para la visualización y almacenamiento de datos. Además, se recibe también la información “en tiempo real” con datos altamente relevantes, razón por la cual el ordenador debe mantenerse encendido todo el tiempo. Para este fin debe ser conectado a la batería del vehículo para así mantener el enlace activo.

Una vez tabulados los datos en Matlab se realiza el análisis de niveles máximos y mínimos de potencia de señal recibida cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.6. Se demostró que incluso en condiciones climáticas desfavorables la potencia más baja recibida en la estación terrena fue de -74.623529 dBm, y, si se deja un margen de desvanecimiento de 10dB, el margen de potencia en exceso es de aproximadamente 36 dB. Imágenes de las pruebas se muestran en el Anexo A.

Durante pequeños intervalos de tiempo, se registran valores de potencia de recepción en el UAV de -121dBm (ver Figura 3.16), mientras que en la estación terrena en los mismos intervalos de tiempo (Figura 3.15) sí existen valores que corresponden a los esperados. Esto puede deberse a que en el UAV se encuentran las antenas con diversidad espacial, las cuales durante el movimiento pueden desalinearse. Otra de las posibles explicaciones es que las antenas en la estación terrena son más grandes, por lo tanto, de mayor ganancia, razón por la cual, a pesar de que hubo lluvia tenue y granizo, la potencia recibida, a pesar de ser pequeña sigue siendo medible por el receptor. También, durante la prueba al dron se movilizó a pie, y debido a los obstáculos geográficos en pequeños intervalos de tiempo se perdió la línea de vista.

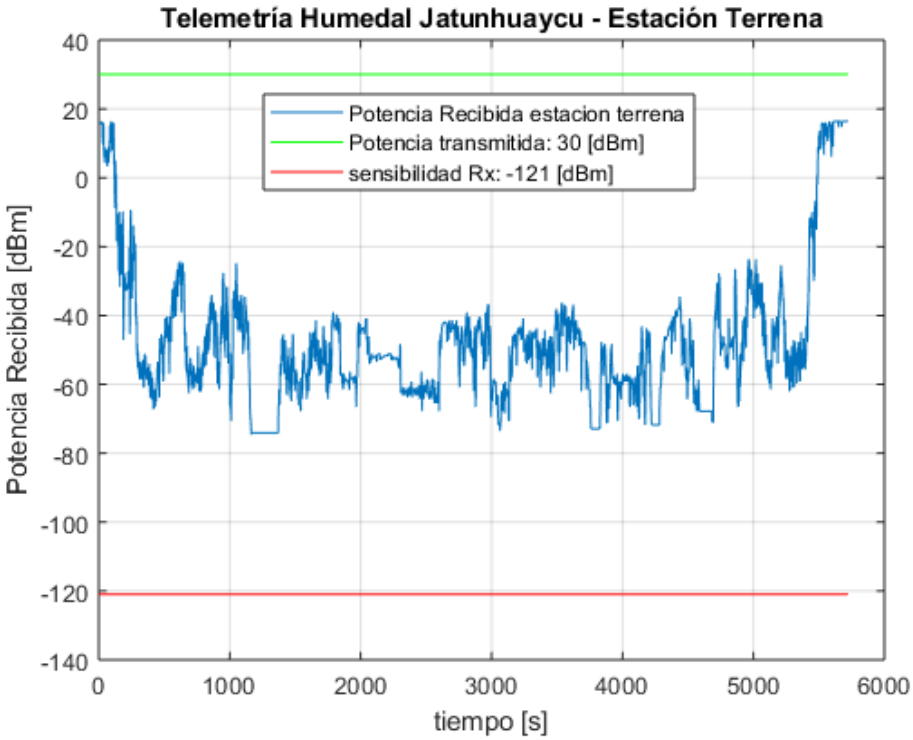

Figura 3.15 Potencia del receptor en la estación terrena. Prueba 3 Jatunhuaycu.

Al comparar estos resultados con los valores de diseño y simulados se puede observar que la potencia de transmisión del UAV y la Estación Terrena son adecuados e incluso superiores a los valores mínimos requeridos para un correcto funcionamiento.

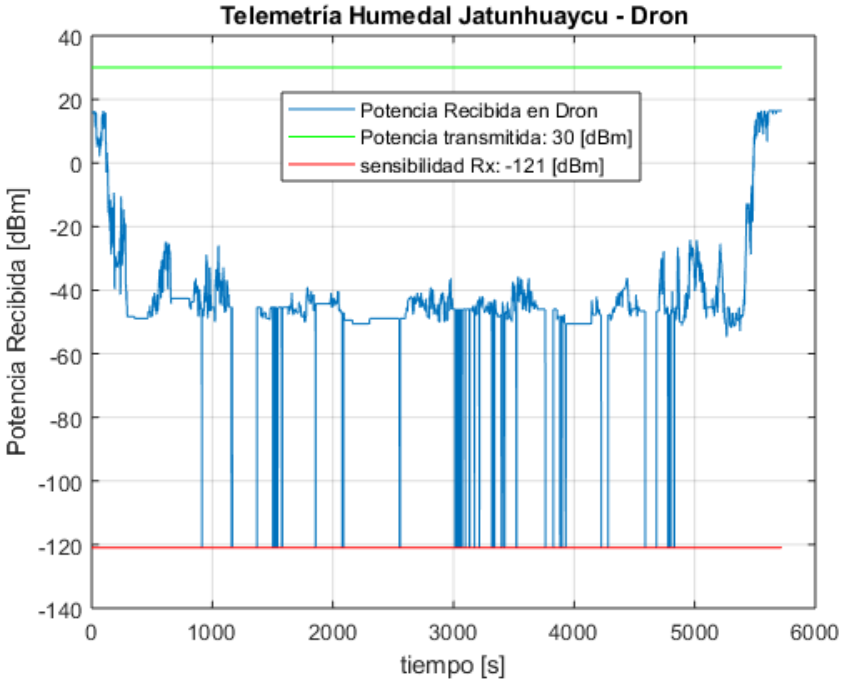

Figura 3.16 Potencia del receptor en el UAV. Prueba 3 Jatunhuaycu.

Se demostró que incluso en condiciones climáticas desfavorables la potencia más baja recibida en la estación terrena fue de -74.623529 dBm. Y, ya que, la sensibilidad del receptor es de -121 dBm, y, si se deja un margen de desvanecimiento de 10 dB, el margen de potencia en exceso es de aproximadamente 36 dB. Imágenes de las pruebas se muestran en el Anexo A.

Tabla 3.6 Resultados máximos y mínimos de la prueba 3 en el Humedal Jatunhuaycu

POTENCIAS DE RECEPCIÓN DE LA PRUEBA 3		
Estación Terrena	P. máxima	16.411765 dBm
	P. mínima	-74.623529 dBm
UAV	P. máxima	16.41176 dBm
	P. mínima	-121 dBm

3.3 PRUEBA DEL SISTEMA DE CONTROL REMOTO

El sistema de control remoto se lo utilizó a menos de 100 m al momento del lanzamiento. (corroborar en el Anexo D). No existió una necesidad mayor para el control remoto que el despegue. Para el aterrizaje nunca se usó el control remoto en ninguna de las misiones ya que el dron tuvo una extensa área para aterrizar en todos los casos.

3.3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL CONTROL REMOTO

El resultado esperado de este control remoto fue mucho mayor del necesario y fue superior al planificado ya que en ningún momento se mostró la pérdida del enlace en la pantalla del ordenador de la estación terrena. Las distancias alcanzadas durante todo el monitoreo del humedal Pugllohuma son máximo 600m, superando por 100 m la distancia esperada en el diseño (500 m). En el Anexo D se observa que la distancia máxima de vuelo fue cercana a 1500m.

El control remoto en tierra solo fue usado en todas las misiones únicamente para cambiar el switch de modo manual a automático para iniciar el despegue, una vez que se cambia el switch a automático, todo el sistema pasa a ser controlado por el autopiloto y la información se transmite por el enlace de telemetría e incluso el aterrizaje no requiere de la intervención del piloto en tierra.

La Figura 3.17 muestra que no apareció ningún mensaje de aviso de pérdida de conexión del control remoto. Este mensaje aparece en la pantalla del ordenador de la estación terrena cuando entre el dron y el control remoto se pierde la conexión. El aviso viaja a través del enlace de telemetría y se muestra en la pantalla. Este mensaje suele mostrarse sobre el horizonte artificial, el cual es la pantalla del recuadro superior izquierdo como en la Figura 3.17.

El enlace, al estar en la banda de 2.4 GHz requiere necesariamente línea de vista y mucho más cuando se aleja el UAV de la estación terrena. Este enlace demostró durante las pruebas no perderse y no falló en ningún despegue.

3.4 PRUEBA DEL SISTEMA DE VIDEO

El enlace estuvo activo durante toda la misión de vuelo. El Anexo D muestra la viabilidad del enlace, así como su correcto funcionamiento. El video analógico no permite detección ni corrección de errores, tampoco permite tabulación de datos ya que la señal analógica solo transporta imágenes que se van a ir presentando en la pantalla pero que no se puede almacenar sino solo demodular para ser mostradas, posteriormente, en pantalla y en “tiempo real”.

3.4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE VIDEO

El video demuestra funcionar perfectamente a distancias superiores a las planificadas. En este trabajo el video permaneció activo a una distancia de 1571.23 m como se muestra en la Figura 3.17, superando los 1000 m planificados en el diseño.

Figura 3.17 Distancia de vuelo para la prueba de video (esquina superior izquierda). Pantalla de captura de video (esquina superior izquierda). Plan de vuelo para la prueba de video (cuadro de la derecha).

El video, al ser transmitido analógicamente, no permite la corrección de errores ni ninguna técnica digital que permita mejorar las imágenes mostradas en pantalla. Aun así, su ventaja radica en que aun a grandes distancias, las imágenes se siguen mostrando aun cuando estas no sean perfectamente claras ni de la más alta calidad posible.

Se presentan pequeñas distorsiones en la imagen cuya duración fue menor a un segundo, reestableciéndose sin afectar la visualización del video, tampoco se han perdido detalles en las imágenes. Este resultado se puede corroborar en el Anexo D (digital).

La inclinación de las antenas en ciertos momentos de turbulencia y giros del UAV para mantener el rumbo de la misión planificada produce estos efectos negativos en la señal de video analógico. Sin embargo, los resultados son completamente positivos. El enlace permaneció ininterrumpido durante toda la prueba de vuelo, superando las distancias esperadas. Se verificó y validó el análisis de diseño, así como también la simulación en Radio Mobile.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Los sistemas de telecomunicaciones: telemetría a 915 MHz (bidireccional), control remoto a 2.4 GHz (unidireccional) y video a 5.8 GHz (unidireccional), presentan un funcionamiento muy adecuado al estar separado en el rango de frecuencias por bandas suficientemente espaciadas. Esto evita la interferencia entre sistemas, y debido a la ausencia de equipos de telecomunicaciones en la zona de estudio, no se presentaron interferencias con otros sistemas diferentes a los diseñados.

- Los modelos de propagación usados se ajustan a las condiciones climáticas particulares de la zona. Todas las recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones se siguieron. Por esta, razón algunas de los modelos para frecuencias menores a 10GHz no requieren análisis tan estrictos debido a que el canal presenta anomalías casi despreciables excepto en las pérdidas por espacio libre.

- El sistema de telemetría diseñado funciona correctamente como se observa en los resultados experimentales. Así también se constata que los equipos seleccionados son adecuados para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo.

- Para el humedal Pugllohuma la potencia de recepción es en el caso más crítico de -54.01dBm y para el Jatunhuaycu -74.62dBm. Si se toma en cuenta que se deja un rango de seguridad de 10 dB, se obtiene que para el humedal Pugllohuma hay un exceso de potencia de -56.99 dB y Jatunhuaycu de -36.38 dB aproximadamente. Por lo tanto, se concluye que, si se transmitiese a la potencia mínima de los transmisores RFD900, es decir a 0 dBm, todavía se recibiría la información. La autonomía del UAV se puede incrementar al hacerlo.

- El objetivo de diseño del sistema de radiocontrol es que funcione a 500 metros entre el receptor del UAV y el control remoto en tierra. Mediante la simulación y la práctica se observa que el sistema diseñado funciona adecuadamente a esta distancia. Sin embargo, en las pruebas solo se requirió que este opere en los primeros 50-100 metros del control remoto, debido a que el piloto automático es quien realiza el despegue y aterrizaje prácticamente sin la intervención del piloto en tierra.

- El sistema de video prácticamente no influye mayormente en la autonomía de vuelo debido a que usa una batería propia y separada de la batería que alimenta todos los sistemas del UAV. Sin embargo, esta batería pequeña que a pesar de su bajo

peso no requiere mayores consumos de energía representa un pequeño esfuerzo para el motor al tener que empujar una masa adicional.

- El sistema de video superó por mucho las expectativas de alcance. Fue capaz de mantenerse activo e ininterrumpido a distancias superiores a 1500m, lo cual demuestra la factibilidad de la elección de los equipos de video. Por estas razones se puede concluir que el sistema de video cumple los objetivos de este trabajo.
- Todos los equipos fueron ensamblados e implementados en el fuselaje del EVENT E386 ocupando un espacio adecuado y con pesos evidentemente soportados por el sistema de propulsión del UAV, lo que permitió sobrevolar las zonas de estudio y obtener datos en tiempo real. Este objetivo se cumplió exitosamente.
- Las simulaciones de cada enlace corroboraron los cálculos teóricos. Al llevarlas a cabo se realizaron los vuelos con plena confianza de la fiabilidad de los equipos de telemetría.
- Los equipos seleccionados tanto de telemetría, control remoto y video analógico, son capaces de cumplir los objetivos de alcance de cada radioenlace. El equipo de telemetría puede ser configurado a potencias menores de transmisión para reducir el consumo de potencia del UAV aumentando de esta manera drásticamente la autonomía. Por tales razones se concluye que la elección de los equipos de telecomunicaciones fue la adecuada.
- Las pruebas se realizaron exitosamente tanto en tierra como en vuelo para cada sistema diseñado y ensamblado en el fuselaje. Este UAV puede ser perfectamente replicado para aplicaciones con necesidades y condiciones similares a las del volcán Antisana. Su producción puede masificarse para el monitoreo de recursos hídricos e incluso para aplicaciones que tengan menores exigencias y mejores condiciones ambientales.
- La altura de vuelo del dron es uno de los principales desafíos para el vuelo, pues, a esa altura, el motor tuvo que exigirse al máximo para despegar por la escasa densidad de aire en las inmediaciones del volcán Antisana. Esta condición de baja densidad de aire se compensa escuetamente con las corrientes de viento del sector.

4.2 RECOMENDACIONES

- Una lanzadera (catapulta) para el despegue podría reducir la potencia invertida por el sistema de propulsión en el despegue, lo cual aumentaría la autonomía y reduce el riesgo de lesiones y accidentes para el personal en tierra, quien lo suele lanzar manualmente.

- La impermeabilización de los sistemas es un factor crucial y a la vez difícil que debe ser llevado a cabo en futuros trabajos, pues en los climas volcánicos, las lluvias, agua en suspensión suelen ser frecuentes. Además, cuando se filtra agua entre los conectores de las antenas y los transmisores o receptores, reduce la eficiencia de la transmisión de la potencia radiada. Este factor detuvo en algunas ocasiones el avance de esta tesis, pues las lluvias, granizadas y neblina se presentaron con mucha regularidad.

- El calentamiento de los equipos es un problema que debe ser resuelto en futuros trabajos relacionados, pues si bien el impermeabilizar los equipos los mantiene en condiciones secas, esta misma acción, también se constituye en encapsularlos en una cavidad no ventilada que acumula el calor, aumentando la temperatura de funcionamiento y la reducción de la eficiencia de los equipos llevándolos a los límites de fabricación.

- En trabajos futuros se puede realizar un estudio pormenorizado de los valores alternantes menores o iguales a la sensibilidad del receptor en el UAV. Debido a que el alcance de este trabajo no profundiza en la explicación de los mismos.

- Finalmente, una recomendación de seguridad es sumamente relevante, pues la realización del lanzamiento del dron, así como su aproximación a tierra representa un riesgo para las personas o animales debido a las altas revoluciones de la propela del motor. Es altamente recomendable usar equipo de protección para manos y ojos especialmente debido a que un error al momento del lanzamiento podría terminar en cortes profundos, graves o letales.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] D. A. Flores, C. Saito, J. A. Paredes, and F. Trujillano, “Aerial photography for 3D reconstruction in the Peruvian Highlands through a fixed-wing UAV system,” *Proc. - 2017 IEEE Int. Conf. Mechatronics, ICM 2017*, pp. 388–392, 2017.

[2] J. Rivera, “Reserva Ecológica Antisana,” *Guía del Patrim. Áreas Nat. Protegidas del Ecuador*, pp. 209–2018, 2007.

[3] Gobierno-Ecuador, Gobierno-Chile, CONDESAN, and TNC-Chile, “Estrategia Regional de Conservación y Uso Sostenible de los Humedales Altoandinos,” *Conv. Ramsar y Grup. Contacto EHAA*, no. Euroecuatoriana Indgrafsa S. A., p. 34, 2008.

[4] FAO Sala de Prensa, “La ganadería amenaza el medio ambiente,” *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*, 2006. [Online]. Available: http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html. [Accessed: 08-Oct-2019].

[5] J. Gundlach, *Designing Unmanned Aircraft Systems*. 2012.

[6] M. A. Boon, A. P. Drijfhout, and S. Tesfamichael, “Comparison of a fixed-wing and multi-rotor UAV for environmental mapping applications: A case study,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 42, no. 2W6, pp. 47–54, 2017.

[7] Donecode, “Holybro Pixhawk 4 · PX4 v1.9.0 User Guide.” [Online]. Available: https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk4.html. [Accessed: 08-Oct-2019].

[8] The United States Army, “RQ-11B RAVEN SMALL UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS (SUAS).” [Online]. Available: https://www.army.mil/article/137604/rq_11b_raven_small_unmanned_aircraft_systems_suas. [Accessed: 08-Oct-2019].

[9] Event 38 Unmanned Systems, “The E386 Mapping Drone.” [Online]. Available: https://event38.com/fixed-wing/e386-mapping-drone/. [Accessed: 08-Oct-2019].

[10] UAV Factory, “Unmanned Platforms and Subsystems.” [Online]. Available: http://www.uavfactory.com/product/16. [Accessed: 08-Oct-2019].

[11] UIT, “Rec. UIT-R V.431-6 NOMENCLATURA DE LAS BANDAS DE FRECUENCIAS Y DE LAS LONGITUDES DE ONDA EMPLEADAS EN

TELECOMUNICACIONES," *Rec. ITU-R*, pp. 1–3, 1999.

[12] C. A. Balanis, *Antenna theory*, vol. 25, no. 2. 2005.

[13] CONATEL, "NORMA TÉCNICA PARA EL USO DE BANDAS LIBRES PARA APLICACIONES INDUSTRIALES, CIENTÍFICAS Y MÉDICAS," pp. 1–7, 2013.

[14] ARCOTEL, "NORMA TÉCNICA DE ESPECTRO DE USO LIBRE Y DE ESPECTRO PARA USO DETERMINADO EN BANDAS LIBRES," vol. 10, no. 2, pp. 1–26, 2018.

[15] C. Durán, "Hackeo de las comunicaciones de comandos y control de vehículos aéreos no tripulados," Universidad de Sevilla, 2017.

[16] SPEKTRUM, "Direct Sequence Spread Spectrum: Spektrum - The Leader in Spread Spectrum Technology." [Online]. Available: https://www.spektrumrc.com/Technology/DirectSeqSpread.aspx. [Accessed: 10-Oct-2019].

[17] Equipo de Expertos UIV, "Diferencias entre señal analógica y digital," 2018. [Online]. Available: https://www.universidadviu.com/diferencias-senal-analogica-digital/. [Accessed: 10-Oct-2019].

[18] K. Chang, *Rf and Microwave Wireless Systems*, 1ra ed., vol. 1, no. 3. New York: JOHN WILEY & SONS, INC., 2000.

[19] D. Pozar, *Microwave Engineering*, 4ta ed. Danvers: JOHN WILEY & SONS, INC.

[20] UIT-R, "Técnicas de diversidad para sistemas de relevadores radioeléctricos Disposiciones," in *Recomendación UIT-R F.752-1*, 2008, no. Cuestión UIT-R 106/9, pp. 1–10.

[21] A. Cardama, L. Roca, J. Rius, J. Romeu, S. Blanch, and M. Ferrando, *Antenas*, 2da ed. Barcelona, España: El Tinter, 2002.

[22] P. Stavroulakis, *Interference Analysis and Reduction for Wireless System*. 2003.

[23] W. Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, 4ta ed. Phoenix, Arizona: PEARSON EDUCATION, 2003.

[24] R. Gomez, "Design and Optimization of a Direct-Conversion Double-Balanced Mixer for RF Receiver Front-End," *Prog. Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 3, pp. 1–9, 2018.

[25] UIT-R, “Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa,” in *Recomendación UIT-R P.530-17*, 2017, pp. 1–63.

[26] 3D Robotics Inc., “3DR Radio V2 Quick Start Guide,” pp. 1–4, 2013.

[27] RFDesign Pty Ltd, “RFD900 Radio Modem Data Sheet.”

[28] NetDepot, “Rubber Duck.” [Online]. Available: http://www.netdepot.cl/producto/antenas/698-960-mhz/antena-dipolo-900-mhz-900-928-mhz-rubber-duck-2-5-dbi-con-conector-rp-sma-omnidireccional/60. [Accessed: 27-Oct-2019].

[29] SUCONEL, “ANT 900.” [Online]. Available: https://suconel.com/product/antena-rpsma-hembra-de-900mhz/. [Accessed: 27-Oct-2019].

[30] MOTOROLA Solutions, “8505241U06 - ANTENA STUBBY DE CUARTO DE ONDA.” [Online]. Available: https://www.motorolasolutions.com/es_xl/productos/two-way-radio-accessories/antenna-accessories/portable-radio-antennas/8505241u06.html#tabaccessoryinfo. [Accessed: 27-Oct-2019].

[31] alfacomp, “AN2404 antenna.” [Online]. Available: https://www.alfacomp.ind.br/antenas/antena-monopolo-para-teste-de-comunicacao. [Accessed: 27-Oct-2019].

[32] QUANUM, “QUANUM I8 INSTRUCTION MANUAL.”

[33] SPEKTRUM, “AR610.” [Online]. Available: https://www.spektrumrc.com/Products/Default.aspx?ProdID=SPMAR610. [Accessed: 13-Nov-2019].

[34] SPEKTRUM, “SPEKTRUM AR6600T.” [Online]. Available: https://www.spektrumrc.com/Products/Default.aspx?ProdID=SPMAR6600T. [Accessed: 13-Nov-2019].

[35] O. Liang, “Quanum i8 8ch Radio Control Transmitter 2.4GHZ.” [Online]. Available: https://oscarliang.com/quanum-i8-radio-transmitter/. [Accessed: 03-Dec-2019].

[36] RCInnovations, “Mini Transmisor 5.8Ghz 600mW 40CH RACE BAND 90º.” [Online]. Available: https://rc-innovations.es/Transmisores-receptores-video-UAV-RPA-drones-FPV-5.8-Ghz/mini-transmisor-5.8ghz-600mw-40ch-race-band-

conector-vertical. [Accessed: 27-Oct-2019].

[37] TS832, “TS832 FVP 5.8G.” [Online]. Available: https://emaxmodel.com/catalog/product/view/id/530/s/boscam-5-8ghz-32ch-600mw-ts832-fpv-transmitter/category/1797/. [Accessed: 13-Nov-2019].

[38] RC832, “Receptor video RC832.” [Online]. Available: https://www.amazon.com/-/es/sinopine-TS832-RC832-transmisor-receptor-inalámbrico/dp/B01LQ04E5E. [Accessed: 13-Nov-2019].

[39] DJI, “DJI FVP antena.” [Online]. Available: https://store.dji.com/product/dji-fpv-air-unit-antenna-sma. [Accessed: 13-Nov-2019].

[40] Banbie8409, “Banbie8409 5.8G RC FPV Antena/Trébol.” [Online]. Available: https://www.amazon.es/Banbie8409-Antena-Trébol-recibe-Hojas-Azul/dp/B07PRRWFVX.

[41] SPIRONET, “antenas LHCP.” [Online]. Available: https://www.immersionrc.com/fpv-products/spironet-omni-5-8ghz-cp-antenna/. [Accessed: 13-Nov-2019].

[42] P. García, “MANUAL DE USO DE RADIO MOBILE,” 2006.

ANEXOS

Los anexos que se detallan a continuación son:

ANEXO A. Imágenes de pruebas de vuelo en las zonas de monitoreo.

ANEXO B (Digital). Norma técnica de espectro de uso libre y de espectro para uso determinado en bandas libres.

ANEXO C (Digital). Hoja de datos del equipo de radiofrecuencia RFD900.

ANEXO D (Digital). Prueba de sistemas de telemetría y video analógico sobre el humedal Pugllohuma.

ANEXO A.

Figura A.0.1 Humedal Pugllohuma visto desde la carretera. Al fondo el volcán Antisana.

Figura A.0.2 Humedal Pugllohuma, visto de norte a sur.

Figura A.0.3 Ensamblaje del dron y equipos en el UAV previo al sobrevuelo del Humedal Pugllohuma.

Figura A.0.4 Preparación del GPS del UAV para los vuelos sobre el Humedal Pugllohuma.

Figura A.0.5 UAV preparado para el despegue y sobrevuelo del Humedal Pugllohuma.

Figura A.0.6 Vista del Humedal Jatunhuaycu desde la carretera.

Figura A.0.7 Transmisor de video con su antena (antena roja tipo trébol). En el lado derecho del UAV se puede identificar la cámara de video.

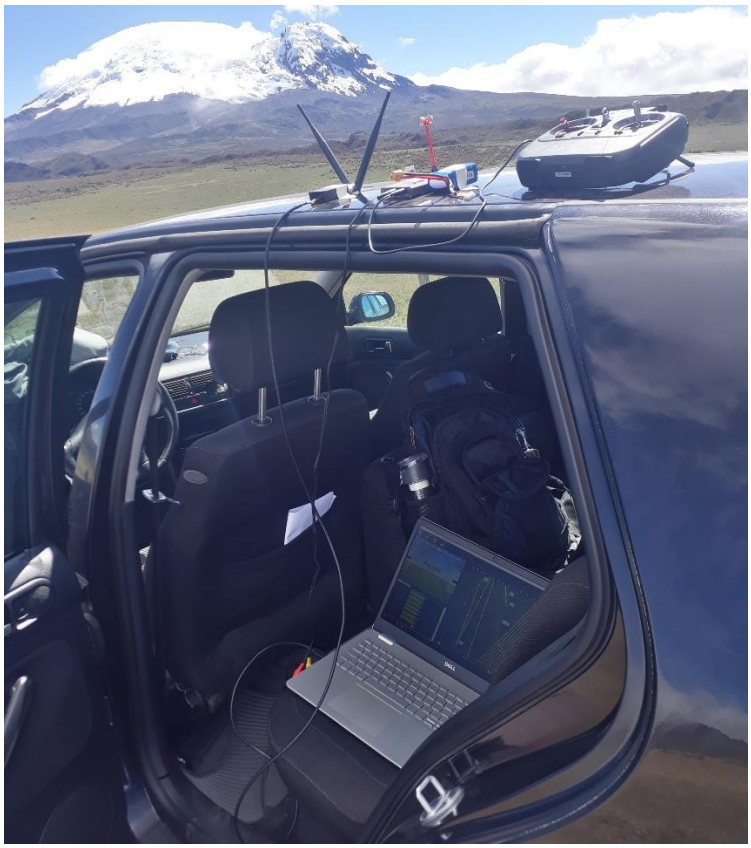

Figura A.0.8 Visualización de la estación terrena con sus antenas de recepción de telemetría, video y transmisor de control remoto.

Figura A.0.9 Prueba del UAV ubicado en el Mirador "El Condor". Al fondo, a la izquierda, se ubica el humedal Jatunhuaycu.

Figura A.0.10 UAV en el mirador "El Condor". Al fondo el volcán Antisana.

Figura A.0.11 UAV sobre el mirador "El Condor". Al fondo la laguna "La Mica".

ANEXO B (Digital)

ANEXO C (Digital)

ANEXO D (Digital)

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Campus Politécnico "J. Rubén Orellana R."

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
DECANATO

ORDEN DE EMPASTADO

De conformidad al Artículo 101 del **REGLAMENTO DE RÉGIMEN ACADÉMICO DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL** aprobado por Consejo Politécnico en Octubre de 2017 y al **INSTRUCTIVO PARA EL PROCEDIMIENTO DE TRABAJOS DE TITULACIÓN DE LAS CARRERAS DE PRE-GRADO Y PROGRAMAS DE POSGRADO DE LA FIEE,** aprobado por Consejo de Facultad el 24 de enero de 2019 que establece que "*El Decano de la FIEE, remitirá los informes de calificación al Director del Trabajo de Titulación y le solicitará un informe de conformidad en relación a las observaciones planteadas, este informe será presentado al Decano en un plazo no mayor a diez días, quien a su vez emitirá la autorización de impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación o Tesis de Grado.",* una vez verificado el cumplimiento del formato de presentación establecido, autorizo la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación presentado por el señor:

HENRY DAVID GUERRA CAMPOVERDE

Fecha de autorización: ***08 de abril de 2020***

M.Sc. Fabio González
Decano

Alejandra P.