

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



**Enlace de comunicación  
para aplicaciones con vehículos aéreos no tripulados**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**Juan Pablo Fallas Vega**

**Cartago, Junio de 2016**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**ACTA DE APROBACIÓN**

Defensa de Proyecto de Graduación  
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica  
Grado Académico de Licenciatura  
Instituto Tecnológico de Costa Rica

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado Enlace de comunicación para aplicaciones con vehículos aéreos no tripulados, realizado por el señor Juan Pablo Fallas Vega y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



Ing. Julio Stradi Granados

Profesor lector



Ing. Esteban Baradín Méndez

Profesor lector



Ing. Javier Pérez Rodríguez

Profesor asesor

Cartago, 17 de junio de 2016

## **Declaratoria de autenticidad**

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado, en su totalidad, por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informa final.

Handwritten signature of Juan Pablo Fallas Vega, with the initials 'F.V.' written below the name.

---

Juan Pablo Fallas Vega

Cédula: 1 1472 0067

## Resumen

La erosión es una de las mayores causas de la degradación del suelo, la cual incide directamente en actividades tan importantes para la vida humana como la agricultura. Debido a esto, es muy importante la cuantificación de este fenómeno, lo que se realiza con técnicas como las parcelas de escorrentía, la cuáles tienen costos elevados y resultados experimentales de baja precisión.

Como una alternativa a estas técnicas, las escuelas de Ingeniería Agrícola e Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se encuentran realizando una investigación para cuantificar la erosión por medio de fotogrametría, utilizando imágenes tomadas con UAVs.

Este proyecto forma parte de dicha investigación, en la que por medio de diversos módulos comerciales, no había sido posible establecer una comunicación fiable, para distancias de hasta un kilómetro, entre el UAV y la estación en tierra.

Para solventar este problema se diseñó un enlace de radiofrecuencia de bajo costo, que permite una comunicación bidireccional, con una pérdida de información menor al 3% en el rango requerido. Para lograrlo se realizó un estudio para determinar la arquitectura de transmisor y receptor adecuada, además se seleccionaron las antenas para ambos extremos del sistema.

**Palabras clave:** Vehículo aéreo no tripulado, enlace de comunicación, radiofrecuencia, antenas.

## Abstract

Erosion is one of the major causes of soil degradation, which directly impacts human activities as important as agriculture. Because of this, it is very important to quantify this phenomenon, which is done by techniques such as runoff plots, which have high costs and low accuracy experimental results.

As an alternative to these techniques, the schools of Agricultural Engineering and Electronic Engineering at Instituto Tecnológico de Costa Rica are conducting research to quantify erosion through photogrammetry, using images taken with UAVs.

This project is part of that investigation, in which through various commercial modules, could not establish reliable communication, for distances up to a kilometer, between the UAV and the ground station.

To solve this problem a radio frequency low cost link was designed, allowing two-way communication, with information loss less than 3% in the required range. To achieve this, a study was conducted, to determine the appropriate architecture for the transmitter and receiver of the link, and select the antennas for both ends of the system.

**Keywords:** Unmanned aerial vehicle, communication link, radiofrequency, antennas.

## **Dedicatoria**

A mi madre Grethel Vega Solano y mi padre Juan Carlos Fallas Zamora.

## Agradecimientos

A Dios por permitirme llegar hasta este momento.

A mis padres Grethel Vega Solano y Juan Carlos Fallas Zamora, por apoyarme, guiarme enseñarme e impulsarme durante toda mi vida, estaré por siempre agradecido con los padres tan maravillosos que tuve la suerte de tener.

A mis compañeros y amigos del TEC, entre ellos, Ricardo Montiel Vega, David Bonilla Picado, Andrés Vargas Guevara y Leonardo Brenes González, con quienes compartí muchos buenos momentos durante el tiempo en la universidad.

A mis profesores del TEC, quienes me ayudaron para entender un poco del inmenso mundo de la electrónica, y específicamente al Dr. Renato Rimolo Donadio y al Ing. Sergio Arriola Valverde, quienes me dieron la oportunidad y el apoyo para trabajar en este proyecto de graduación.

# Índice general

<b>Capítulo 1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2</b>	<b>Meta y objetivos</b>	<b>5</b>
2.1	Meta	5
2.2	Objetivo general	5
2.3	Objetivos específicos	5
<b>Capítulo 3</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Comunicación</b>	<b>6</b>
3.1.1	Generalidades	6
3.1.2	Modos básicos de comunicación	7
3.1.3	Elementos básicos de un sistema de comunicación	8
3.1.4	Tipos de transmisión	9
3.1.5	Teorema de Shannon-Hartley	10
<b>3.2</b>	<b>Espectro electromagnético</b>	<b>11</b>
3.2.1	Bandas ISM	12
<b>3.3</b>	<b>Fundamentos de las ondas electromagnéticas</b>	<b>13</b>
3.3.1	Periodo	13
3.3.2	Longitud de onda	14
3.3.3	Velocidad de propagación	14
<b>3.4</b>	<b>Efectos en la propagación de la señal de radiofrecuencia</b>	<b>15</b>
3.4.1	Pérdida en el espacio libre	15
3.4.2	Presupuesto de enlace	15
3.4.3	Atenuación debido a condiciones atmosféricas	16
3.4.4	Desvanecimiento por difracción	18
3.4.5	Desvanecimiento por multitrayecto	19
<b>3.5</b>	<b>Antenas</b>	<b>21</b>
<b>3.6</b>	<b>Parámetros de las antenas</b>	<b>24</b>
3.6.1	Patrón de radiación	24
3.6.2	Directividad	26
3.6.3	Eficiencia	26

3.6.4	Ganancia .....	27
3.6.5	Polarización.....	28
<b>3.7</b>	<b>Protocolos de comunicación .....</b>	<b>30</b>
3.7.1	UART.....	30
3.7.2	USB.....	31
<b>Capítulo 4</b>	<b>Diseño e implementación del enlace .....</b>	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>Análisis y selección de la solución .....</b>	<b>32</b>
4.1.1	Primera solución: Sistema comercial de telemetría para UAV.....	33
4.1.2	Segunda solución: Sistema de comunicación basado en software y hardware libre con componentes comerciales.....	34
4.1.3	Tercera solución: Sistema de comunicación personalizado .....	35
4.1.4	Selección de la solución .....	35
<b>4.2</b>	<b>Análisis y selección del sistema de comunicación.....</b>	<b>38</b>
4.2.1	Primera opción: Sistema Bluetooth.....	38
4.2.2	Segunda opción: Sistema GSM .....	38
4.2.3	Tercer opción: Sistema de radio .....	39
4.2.4	Selección del tipo de comunicación.....	40
4.2.5	Selección del módulo de radio.....	42
<b>4.3</b>	<b>Análisis y selección de la antena.....</b>	<b>45</b>
4.3.1	Primera opción: Antena rubber-duck .....	45
4.3.2	Segunda opción: Antena patch .....	46
4.3.3	Tercer opción: Antena Yagi.....	47
4.3.4	Selección de las antenas .....	48
<b>4.4</b>	<b>Proceso de diseño.....</b>	<b>50</b>
4.4.1	Sistema a bordo del UAV .....	50
4.4.2	Estación en tierra .....	55
<b>Capítulo 5</b>	<b>Validación y análisis.....</b>	<b>58</b>
<b>5.1</b>	<b>Validación de funcionamiento .....</b>	<b>58</b>
5.1.1	Comunicación entre los módulos de radio.....	58
5.1.2	Rendimiento del enlace .....	61
<b>5.2</b>	<b>Prueba de rango.....</b>	<b>64</b>
<b>5.3</b>	<b>Características adicionales.....</b>	<b>73</b>
5.3.1	Consumo de potencia.....	73

5.3.2	Peso del sistema.....	73
5.3.3	Precio del sistema .....	74
<b>5.4</b>	<b>Cumplimiento de requerimientos y restricciones .....</b>	<b>75</b>
<b>Capítulo 6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>76</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>76</b>
<b>6.2</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>77</b>
<b>Capítulo 7</b>	<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>78</b>
<b>Capítulo 8</b>	<b>Apéndice.....</b>	<b>82</b>
<b>8.1</b>	<b>Configuración del sistema.....</b>	<b>82</b>
8.1.1	Configuración del módulo de radiofrecuencia de la estación en tierra .....	82
8.1.2	Configuración del módulo de radiofrecuencia del UAV.....	87

## Índice de tablas

Figura 1.1	Parcela de esorrentía [2] .....	3
Figura 3.1	Elementos de un sistema de comunicación [12] .....	7
Figura 3.2	Elementos básicos de un sistema de comunicación [13] .....	8
Figura 3.3	Sistema de comunicación con transmisión semidúplex [13] .....	9
Figura 3.4	Sistema de comunicación con transmisión dúplex completa [13] .....	10
Figura 3.5	Espectro electromagnético [16].....	11
Figura 3.6	Frente de onda electromagnético [20] .....	13
Figura 3.7	Curva de absorción atmosférica [20] .....	17
Figura 3.8	Zonas de Fresnel [20] .....	19
Figura 3.9	Ambiente con multitrayecto [20] .....	20
Figura 3.10	Dos señales multitrayecto desfasadas [23] .....	21
Figura 3.11	Antena como dispositivo de transición [23] .....	22
Figura 3.12	Equivalente de Thévenin de una línea de transmisión [23] .....	23
Figura 3.13	Patrón de radiación [23] .....	25
Figura 3.14	Polarización lineal, elíptica y circular [26] .....	29
Figura 3.15	Formato de transmisión protocolo UART [27] .....	30
Figura 3.16	Líneas de comunicación USB 1.1 y 2.0 [27] .....	31
Figura 4.1	Módulo XBee-Pro 900HP [33] .....	44
Figura 4.2	Patrón de radiación de la antena HG908P [37] .....	46
Figura 4.3	Patrón de radiación de la antena HG914YE [38] .....	47
Figura 4.4	Diagrama modular del sistema de comunicación.....	50
Figura 4.5	Sistema UAV X8+ [40] .....	51
Figura 4.6	Módulos del sistema a bordo del UAV .....	52
Figura 4.7	Arduino Mega 2560 [41] .....	53
Figura 4.8	Módulo XBee Shield [42] .....	54
Figura 4.9	Módulos de la estación en tierra.....	55
Figura 4.10	Módulo XBee Explorer Dongle [43].....	56
Figura 4.11	Interfaz gráfica de la estación en tierra .....	57
Figura 5.1	Enlace punto a punto del sistema .....	59

Figura 5.2	Visualización de los datos recibidos desde el UAV .....	60
Figura 5.3	Módulo para el envío de información hacia el UAV .....	61
Figura 5.4	Trayectoria del vuelo de prueba .....	62
Figura 5.6	Ubicación de la prueba de rango obtenida de Google Earth .....	65
Figura 5.7	Perfil de elevación en la prueba de rango obtenido de Google Earth .....	65
Figura 5.8	Cantidad de paquetes perdidos vs distancia entre los módulos .....	67
Figura 5.9	Cantidad de errores de transmisión vs distancia .....	68
Figura 5.10	Porcentaje de paquetes recibidos con respecto a la distancia.....	69
Figura 5.11	Valores de RSSI local y remoto con respecto a la distancia .....	71
Figura 5.12	Nivel de ruido en San Isidro de Heredia .....	72
Figura 8.1	Interfaz de XCTU.....	82
Figura 8.2	Ventana para agregar un módulo de radio al XCTU.....	83
Figura 8.3	Ventana para actualizar el firmware del XBee-Pro 900HP.....	84
Figura 8.4	Parámetros MAC/PHY del módulo de radio.....	85
Figura 8.5	Parámetros de direccionamiento del módulo de radio .....	86
Figura 8.6	Parámetros de comunicación serial del módulo de radio .....	87
Figura 8.7	Parámetros de direccionamiento módulo de radio del UAV.....	88

## Índice de tablas

Tabla 3.1	Bandas ISM [19].....	12
Tabla 4.1	Calificación de las soluciones planteadas.....	37
Tabla 4.2	Calificación de cada tecnología.....	41
Tabla 4.3	Características de los módulos de radio [32][33][34][35].....	42
Tabla 4.4	Calificación de cada módulo.....	44
Tabla 4.5	Características antena S152AH-915S [36].....	45
Tabla 4.6	Características antena HG908P [37].....	46
Tabla 4.7	Características antena HG914YE [38].....	47
Tabla 4.8	Calificación de las antenas.....	49
Tabla 4.9	Características técnicas del Arduino Mega 2560 [41].....	53
Tabla 4.10	Conexión Arduino - Adaptador XBee.....	54
Tabla 5.1	Rendimiento del enlace durante el vuelo de prueba.....	62
Tabla 5.2	Paquetes recibidos/perdidos y errores de transmisión respecto a la distancia... 66	
Tabla 5.3	Valores local y remoto del indicador de intensidad de la señal recibida.....	70
Tabla 5.4	Consumo de potencia del sistema del UAV.....	73
Tabla 5.5	Peso de los componentes a bordo de la aeronave.....	74
Tabla 5.6	Costo de los componentes utilizados.....	74
Tabla 5.7	Cumplimiento de requerimientos y restricciones para el sistema.....	75

## Capítulo 1      Introducción

El suelo es un recurso natural de gran importancia para el ser humano, pues es necesario para sustentar el crecimiento de plantas y otros seres vivos, sin embargo, es susceptible de modificaciones por el ser humano y por eventos naturales, las cuáles pueden provocar el deterioro de sus características químicas, físicas y biológicas. Entre los múltiples procesos que pueden provocar su degradación se encuentran la erosión hídrica o eólica, salinización, anegamiento, agotamiento de los elementos nutritivos, contaminación, compactación y sedimentación [1].

La erosión es el desprendimiento, arrastre y sedimentación de las partículas superficiales del suelo, por acción del agua de escorrentía, viento, deshielo y otros agentes geológicos [1] y es uno de los mayores problemas que afectan a los suelos, especialmente en la regiones tropicales, en donde aparte del efecto del relieve se añade la agresividad climática propia de estos lugares [2].

Los efectos de la erosión se deben tomar en cuenta por los planificadores en el uso de la tierra, especialmente en las actividades agrícolas, ya que tiene consecuencias que pueden ser irreversibles, como la pérdida de fertilidad en el sitio de ocurrencia, por lo que se vuelve necesario conocer cuánto es la pérdida de suelo por efecto de los procesos de erosión hídrica, cuáles son los factores que contribuyen a acelerar estas pérdidas y cómo controlarlos [2].

Sin embargo, los efectos de la erosión no sólo se limitan al área en dónde se da la pérdida de las partículas superficiales del suelo, ya que éstas se desplazan y puede producir problemas fuera del sitio de la erosión, tales como la contaminación de aguas superficiales, sedimentación en represas [4] o incluso inundaciones [5].

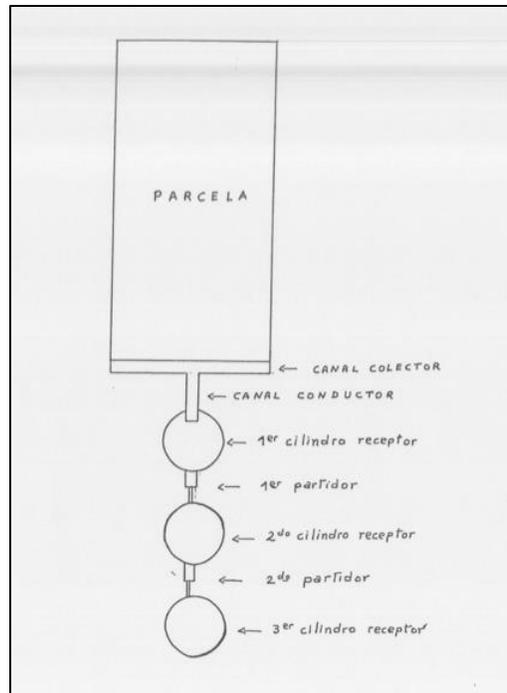
El poco control sobre la pérdida de suelos significa la devaluación de un recurso natural en la economía nacional, y además, es una de las causas de la migración de muchos agricultores hacia otras zonas rurales o hacia las ciudades, con negativas influencias socioeconómicas para las regiones afectadas y el país en general [4].

En Costa Rica aproximadamente un 74% de los suelos dedicados a actividades agrícolas se encuentran severamente degradados debido a la erosión [6], por lo que es de suma importancia la creación de sistemas que permitan el modelado de los procesos erosivos, con el fin de formular un plan para controlar y evitar el aumento en la degradación del suelo de un terreno.

Debido a que el suelo es el activo de mayor importancia patrimonial y productiva para la empresa agraria se creó la Ley 7779, llamada "Uso, manejo y conservación de suelos", la cual tiene como uno de sus objetivos específicos impulsar la implementación y el control de prácticas mejoradas, en los sistemas de uso que eviten la erosión u otras formas de degradación del recurso suelo [3].

La cuantificación de la erosión es un proceso complejo, debido a la naturaleza multivariada del problema, por lo que es necesario emplear una metodología que sea capaz de cuantificar la erosión, con el objetivo de determinar la pérdida física del suelo, la cual permita formular un plan para controlar y evitar un aumento en la degradación, tomando en cuenta la información obtenida [2].

Existen varios métodos directos e indirectos con el uso de fórmulas para cuantificar la erosión. Las medidas directas son aquellas que se realizan en la zona misma en donde ocurre la erosión, entre las que más se usan están las estacas graduadas, las estaciones de aforo y las que tradicionalmente han sido las más utilizadas en nuestro país: las parcelas de escorrentía. Un ejemplo de una parcela de escorrentía se muestra en la figura 1.1, en la cual se delimita un terreno de forma rectangular, y por medio de un sistema de canales y cilindros, se almacena el agua y los sedimentos producidos por la escorrentía superficial de la parcela en tanques receptores [2].



**Figura 1.1 Parcela de esorrentía [2]**

Sin embargo, los métodos actuales como el de las parcelas de esorrentía tienen una gran cantidad de desventajas, como un alto costo de construcción, gastos en funcionamiento, mantenimiento, trabajo manual no calificado, uso ineficiente del suelo y resultados experimentales escasos de precisión [2].

Como una alternativa a los métodos tradicionales de cuantificación de la erosión la Escuela de Ingeniería Agrícola junto con la Escuela de Ingeniería Electrónica, ambas del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se encuentran trabajando en un proyecto de investigación, en el cual se quiere desarrollar un sistema, que utilizando la fotogrametría, permita modelar los procesos de erosión por medio del análisis de variables físicas, imágenes y posicionamiento, que den como resultado mapas del terreno, los cuales permitan evaluar la cantidad de suelo erosionado en un cierto intervalo de tiempo, con la ventaja que permite la monitorización de diferentes lugares sin alterar las parcelas agrícolas [7].

Hay tres tipos de sistemas de observación aérea que son capaces de desarrollar técnicas fotogramétricas: el empleo de satélites ubicados aproximadamente entre 600 y 817 km de altura, el uso de aeronaves tripuladas, que realizan vuelos a unos 500 m de altura, y el uso de sistemas con vehículos aéreos no tripulados (UAV), que pueden realizar vuelos entre los 50 a 400 m sobre el nivel del suelo [8].

Sin embargo, el precio de la obtención de fotografías aéreas utilizando satélites o aviones tripulados es elevado, pudiendo superar los \$700/hora, mientras que con los sistemas UAV los costos disminuyen considerablemente, con la ventaja de que permiten una alta resolución debido a la baja altura a la que se pueden tomar las imágenes [9].

Los UAV son aeronaves no tripuladas, por lo que no poseen un operador a bordo, y son capaces de elevarse mediante fuerzas aerodinámicas, pudiendo volar de manera autónoma o ser controladas remotamente desde tierra. Estos sistemas pueden estar equipados por sensores, unidades de posicionamiento global y tecnologías de comunicación, por lo que se pueden usar para gran cantidad de aplicaciones [10], las cuales van desde usos militares hasta civiles [11].

El presente trabajo forma parte del proyecto desarrollado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, el cual utiliza vehículos aéreos no tripulados para la obtención de imágenes, que son utilizadas para la obtención de mapas tridimensionales de un terreno, a partir de la fotogrametría, pero tenía el problema que la comunicación establecida entre el UAV y la estación de monitoreo central ubicada en tierra, podía alcanzar un rango no mayor a 200 metros, con una potencia relativamente baja, y con deformaciones de la señal debido a problemas de multipath por la frecuencia de transmisión utilizada [7].

Debido a esto se diseñó un sistema capaz de establecer dicha comunicación, con un rango mayor a un kilómetro, el cual facilita la realización de vuelos a mayor distancia, simplificando el proceso que permite cuantificar la erosión de un terreno por medio de la fotogrametría.

## Capítulo 2      Meta y objetivos

En este capítulo se presenta la meta, el objetivo general del proyecto y sus objetivos específicos.

### 2.1 Meta

Facilitar el estudio de los procesos erosivos en los terrenos dedicados a la actividad agrícola, por medio de la fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados, los cuáles puedan ser capaces de enviar información a una estación en tierra ubicada a una distancia un kilómetro como mínimo.

### 2.2 Objetivo general

Diseñar un enlace de radiofrecuencia de más de 1 km de distancia, para la comunicación entre un vehículo aéreo no tripulado con una estación en tierra.

### 2.3 Objetivos específicos

- Determinar, mediante un estudio, la arquitectura del transmisor y receptor adecuadas para el enlace.
- Seleccionar el tipo de antenas adecuado para lograr la comunicación, tanto para la estación en tierra como en el aire.
- Implementar la solución con pruebas físicas.

## Capítulo 3 Marco teórico

En este capítulo se van a tratar varios temas necesarios para comprender el desarrollo de la solución, los cuales incluyen conceptos de comunicaciones, antenas y protocolos utilizados para la transmisión de información.

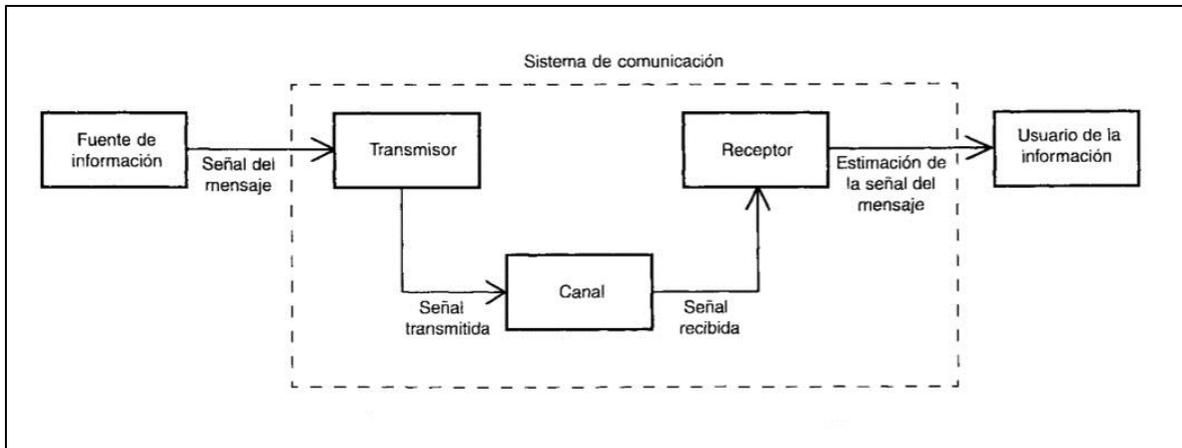
### 3.1 Comunicación

#### 3.1.1 Generalidades

La comunicación implica la transmisión de información de un punto a otro a través de una sucesión de procesos:

1. La generación de una señal del mensaje.
2. La descripción de esa señal del mensaje mediante un conjunto de símbolos, como por ejemplo símbolos eléctricos, auditivos o visuales.
3. La codificación de estos símbolos en una forma que sea adecuada para la transmisión por un medio físico.
4. La transmisión de los símbolos codificados.
5. La decodificación y la reproducción de los símbolos originales.
6. La recreación de la señal del mensaje original, con una degradación definible, ocasionada por las imperfecciones del sistema [12].

En cualquier sistema de comunicación existen tres elementos inherentes: transmisor, canal y receptor, los cuales se muestran en la figura 3.1.



**Figura 3.1 Elementos de un sistema de comunicación [12]**

### 3.1.2 Modos básicos de comunicación

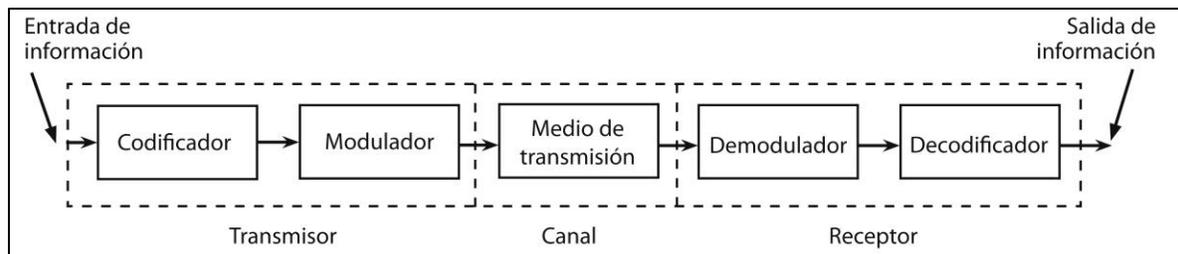
Existen dos modos básicos de comunicación, la transmisión y la comunicación punto a punto.

La transmisión implica el uso de un transmisor poderoso y de numerosos receptores, las señales que contienen la información sólo fluyen en una dirección. Un ejemplo de este tipo de comunicación es la televisión [12].

En la comunicación punto a punto los procesos se llevan a cabo por un enlace entre un solo transmisor y un receptor, por lo general existe un flujo bidireccional de las señales que llevan información, por lo que se requiere el uso de un transmisor y un receptor en cada extremo del enlace [12]. Un ejemplo de este tipo de comunicación es el enlace entre una estación en tierra y un vehículo aéreo no tripulado, como el que se desarrollará en este proyecto.

### 3.1.3 Elementos básicos de un sistema de comunicación

Un sistema de comunicación común se puede dividir en algunos elementos básicos: codificador y modulador (que forman parte del transmisor); demodulador y decodificador (que forman parte del receptor); y el medio de transmisión (que conforma el canal). El flujo de la información a través de estos componentes se muestra en la figura 3.2 [13].



**Figura 3.2 Elementos básicos de un sistema de comunicación [13]**

La función del transmisor es preparar la información para enviarla de tal forma que pueda superar lo mejor posible las limitaciones impuestas por el medio de transmisión y está compuesto por un codificador, que elige la mejor forma de la señal para optimizar su detección en la salida, y un modulador, el cual produce una señal variable, proporcional a la señal que aparece en sus terminales de entrada [13].

El codificador y el decodificador preparan la señal para una transmisión más eficiente, el codificador está diseñado para optimizar la detección de errores en un mensaje que se está transmitiendo, mientras que el proceso de modulación está concebido para imprimir la señal de información sobre la onda que se va a transmitir [13].

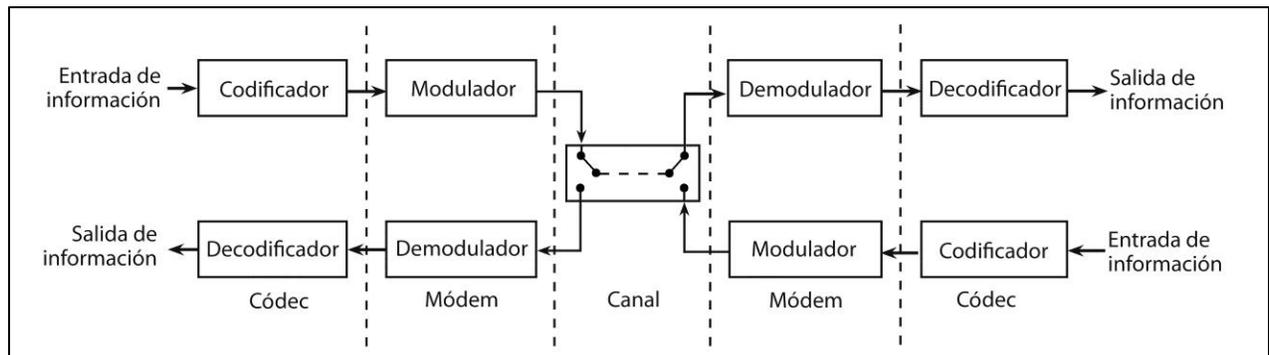
El canal es el subsistema central y es el que restringe el flujo de información, está compuesto por el medio de transmisión, el cual puede incluir desde una simple línea de transmisión hasta capas de la atmósfera, como la tropósfera o la ionósfera. Cualquiera que sea el medio de transmisión genera problemas como la atenuación, la distorsión y algunas señales de ruido que interfieren con la recepción libre de errores de la señal portadora del mensaje [13].

Por otro lado el receptor efectúa las operaciones inversas a las del transmisor para recuperar la información con la menor cantidad de errores posible, y se compone de un demodulador y un decodificador, que realizan las funciones inversas al modulador y decodificador, respectivamente [13].

### 3.1.4 Tipos de transmisión

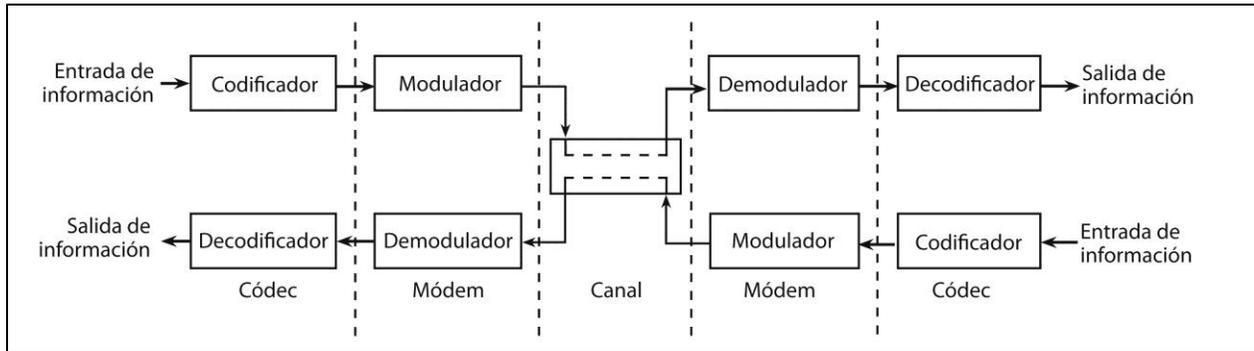
El sistema mostrado en la figura 3.2 se llama sistema de transmisión simplex (SX), y es capaz de transmitir en un solo sentido, sin embargo, en muchos casos es deseable poder establecer una comunicación en ambos sentidos, por ejemplo en una comunicación de una aeronave con una estación en tierra, como el presentado en el presente proyecto.

Una forma de conseguir una transmisión en ambos sentidos es por medio de una transmisión semidúplex (HDX, del inglés “half-duplex”), la cuál se muestra en la figura 3.3 [9]. En este caso se utiliza el mismo canal de manera alterna para transmitir en ambas direcciones, aunque la comunicación fluye en ambas direcciones, en un momento dado, el flujo de información se realiza en un solo sentido [13].



**Figura 3.3 Sistema de comunicación con transmisión semidúplex [13]**

Otro tipo de transmisión, conocido como dúplex completo (FDX, del inglés “full-duplex”), permite una comunicación simultánea en ambos sentidos, por lo que se puede enviar y recibir información en un mismo instante. Este tipo de sistema se muestra en la figura 3.4 [13].



**Figura 3.4 Sistema de comunicación con transmisión dúplex completa [13]**

### 3.1.5 Teorema de Shannon-Hartley

En el proceso de transmisión existen señales de ruido que contaminan la información, las cuáles están presentes en todas partes, éstas pueden ser generadas por numerosos fenómenos naturales o ser provocadas por el hombre [13]. El teorema de Shannon-Hartley establece que el ancho de banda y la potencia del ruido restringen la cantidad de información que puede transmitirse por un canal, tal y como se observa en la ecuación 3.1 [14].

$$C = B \log \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3.1)$$

Donde  $C$  es la capacidad de información del canal, es decir, la velocidad máxima a la que se puede transmitir sin error la información a lo largo del canal, medida en bits por segundo,  $B$  es el ancho de banda del sistema en hertz,  $S$  es la potencia de la señal útil, expresada en watts, y  $N$  es la potencia de ruido presente en el canal, expresada en watts. Al término  $S/N$  se le conoce como relación señal a ruido [14].

## 3.2 Espectro electromagnético

Se conoce como espectro a la clasificación de múltiples frecuencias en orden numérico[15]. En orden creciente de frecuencia, los diferentes tipos de radiación en el espectro se denominan ondas de radio, microondas, infrarrojo, luz visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Nuestros ojos pueden detectar sólo una fracción muy pequeña de todo el espectro, la luz visible. Esto se ejemplifica en la imagen 3.5 [16].

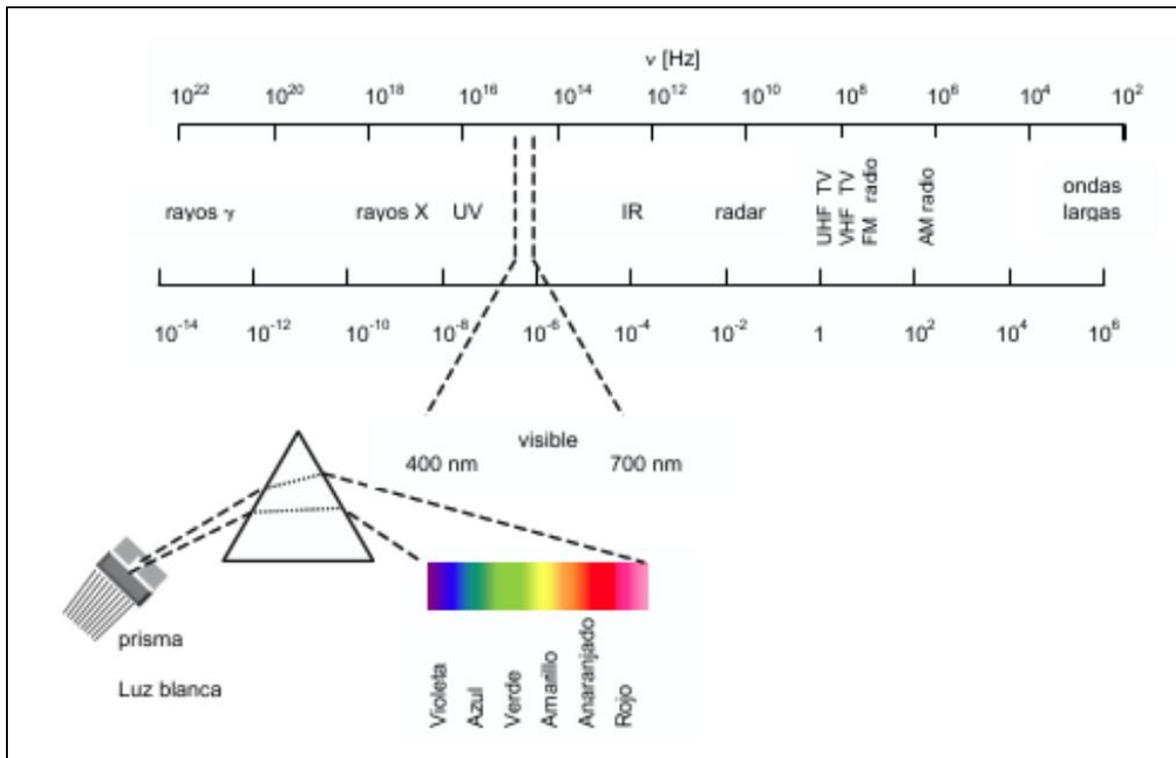


Figura 3.5 Espectro electromagnético [16]

Las frecuencias útiles para las comunicaciones de radio ocurren cerca del extremo inferior del espectro, como por ejemplo la radio AM, que opera en el rango de los kilohertz. Esto se debe a que conforme la frecuencia aumenta, las dificultades prácticas para el empleo de energía electromagnética con fines de comunicación se hacen mayores, sin embargo, el límite de frecuencia utilizable se ha elevado gracias a mejores métodos de comunicación, existiendo satélites que operan a frecuencias próximas a los 14 GHz [15].

Los sistemas radioeléctricos operan en una única frecuencia, algunos utilizan frecuencias diferentes para la transmisión y recepción, sin embargo, funcionan en una frecuencia determinada [17].

### 3.2.1 Bandas ISM

Son bandas definidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), de la cual Costa Rica es miembro desde 1932 [18], las cuales están reservadas la generación y el uso de energía de radio frecuencia de forma local, específicamente en los campos industrial, científico, médico, doméstico y similares. Estas bandas se especifican en los artículos 5.138 y 5.150 de las Regulaciones de Radio de la UIT especifican cuáles son estas bandas, las cuáles se presentan en la tabla 3.1 [19].

**Tabla 3.1** Bandas ISM [19]

<b>Banda ISM</b>	<b>Frecuencia central</b>
6 765 – 6 795 kHz	6 780 kHz
13 553 – 13 567 kHz	13 560 kHz
26 957 – 27 283 kHz	27 120 kHz
40,66 – 40,70 MHz	40,68 MHz
433,05 – 434,79 MHz	433,92 MHz
902 – 928 MHz	915 MHz
2 400 – 2500 MHz	2450 MHz
5 725 – 5 875 MHz	5800 MHz
24 – 24,25 GHz	24,125 GHz
61 – 61,5 GHz	61,25 GHz
122 – 123 GHz	122,5 GHz
244 – 246 GHz	245 GHz

### 3.3 Fundamentos de las ondas electromagnéticas

Cuando una señal de radio recorre una trayectoria a través del aire, una vez que se encuentra en el campo lejano, viaja como un frente de onda electromagnético. Esta onda electromagnética tiene un campo eléctrico que varía sinusoidalmente, el cual es ortogonal a un campo magnético también sinusoidal, y ambos son ortogonales a la dirección de propagación. En la figura 3.6 se muestran los campos magnéticos y eléctricos de una onda que se propaga en la dirección del eje x [20].

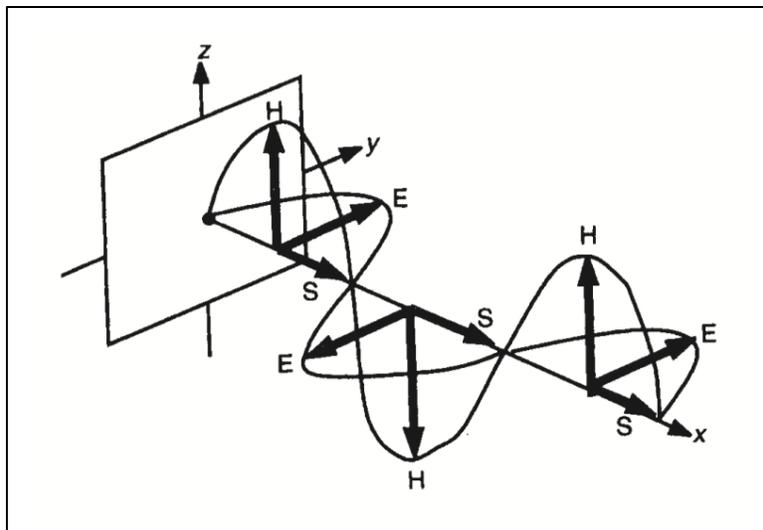


Figura 3.6 Frente de onda electromagnético [20]

#### 3.3.1 Período

El período de una onda es la cantidad de tiempo antes de que la onda se vuelva a repetir, y se puede expresar por medio de la fórmula 3.2, donde  $f$  es la frecuencia (Número de ciclos en 1 segundo) y se mide en hertz [20].

$$T = \frac{1}{f} \quad (3.2)$$

### 3.3.2 Longitud de onda

Es la distancia entre dos puntos de la misma fase, y depende del medio en el cual la onda está viajando, se puede expresar por medio de la fórmula 3.3, en la cual  $v$  es la velocidad de propagación (m/s), mientras que  $f$  es la frecuencia (hertz) [20].

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.3)$$

### 3.3.3 Velocidad de propagación

Se puede expresar por la fórmula 3.4, obtenida de [20].

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \quad (3.4)$$

En donde  $\epsilon$  es la permitividad, la cual se define como  $K \cdot \epsilon_0$ , con  $K$  la permitividad relativa y  $\epsilon_0$  la permitividad del espacio libre, que se aproxima a  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m. Por otra parte  $\mu$  se refiere a la permeabilidad, y se puede expresar como  $K_m \cdot \mu_0$ , en donde  $K_m$  es la permeabilidad relativa, y es dependiente del materia en el cual se propaga la onda, y  $\mu_0$  es la permeabilidad del espacio libre y equivale a  $1,257 \times 10^{-6}$  H/m aproximadamente [20].

## 3.4 Efectos en la propagación de la señal de radiofrecuencia

### 3.4.1 Pérdida en el espacio libre

Las ondas de radio se ven afectadas por la presencia de la Tierra y de la atmósfera que la rodea. Para los links punto a punto, la región de interés de la atmósfera es la porción no ionizada más baja, llamada tropósfera. Para la planificación de la trayectoria de un link es útil determinar una posición de referencia, en la cual la propagación no se vea afectada por la Tierra [20].

La pérdida entre dos antenas que no son afectadas por la Tierra, se conoce como pérdida de espacio libre, y se representa por la fórmula 3.5 [20], en la cual se observa que, esta depende tanto de la distancia que separa a las antenas como de la frecuencia de la radiación.

$$FSL = 92,4 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (3.5)$$

*FSL* son las siglas en inglés de “free-space loss” y sus unidades son los decibeles, mientras que *d* es la distancia en kilómetros y *f* es la frecuencia en Gigahertz.

### 3.4.2 Presupuesto de enlace

Corresponde a una suma de las ganancias y resta de las pérdidas en la trayectoria entre el transmisor y el receptor, y es de gran utilidad para determinar el rendimiento de un enlace. Este se puede determinar por medio de la fórmula 3.6 [20].

$$P_{RX} = P_{TX} - L_{TX} - FL_{TX} + A_{TX} - FSL + A_{RX} - FL_{RX} - L_{RX} \quad (3.6)$$

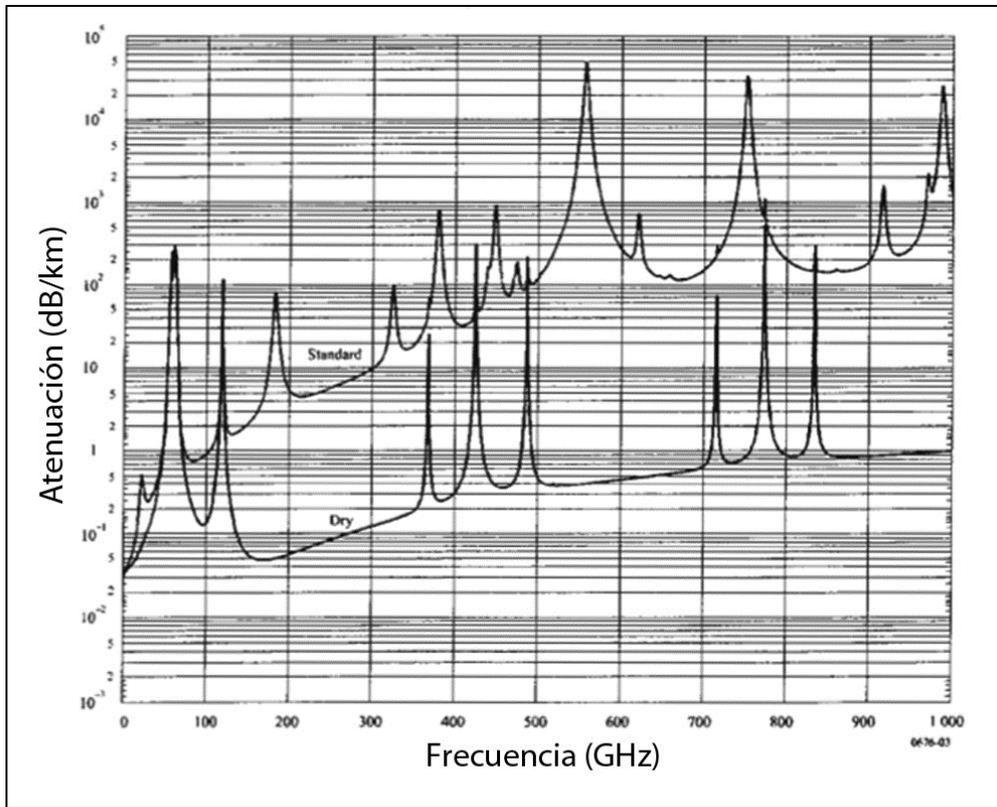
Donde  $P_{RX}$  es el nivel nominal de recepción en dBm,  $P_{TX}$  es la potencia de salida del transmisor también en dBm,  $FL_{TX,RX}$  proviene de “feeder loss” y representa las pérdidas en el cable o guía de onda, su unidad son los decibeles.  $A_{TX,RX}$  es la ganancia de las antenas en dBi, FSL corresponde a las pérdidas en el espacio libre en decibeles, y  $L_{TX,RX}$  se refiere a las pérdidas ocasionadas por la circuitería que se encuentra entre la antena y el transceptor [20].

La diferencia entre el nivel nominal de recepción y el nivel de umbral del receptor (Señal mínima requerida para que el demodulador pueda trabajar a un porcentaje de error específico) se conoce como “fade margin”, y corresponde a un margen de seguridad contra los desvíos de la atenuación que sufre una frecuencia emitida (“fading”). [20]

Un enlace de radio sufre varias fluctuaciones de la señal en el tiempo por diversas causas, que pueden deberse a factores atmosféricos, difracciones y/o refracciones de la onda [20].

### **3.4.3 Atenuación debido a condiciones atmosféricas**

Los principales elementos en la atmósfera que absorben energía electromagnética son el vapor de agua y el oxígeno, lo cual se puede observar gráficamente en la figura 3.7, obtenida de [20].



**Figura 3.7 Curva de absorción atmosférica [20]**

La resonancia del oxígeno ocurre cerca de los 60 GHz, mientras que la resonancia del vapor de agua se da en los 23 GHz. Para frecuencias bajo los 5 GHz este efecto puede ser despreciado. [20]

La lluvia también puede causar que la señal se disperse, especialmente si la cantidad instantánea de agua en la trayectoria de la señal es alta, entre más alta sea la frecuencia, más alta será la absorción en el agua, sin embargo, para enlaces de radio punto a punto su efecto puede ser despreciado. [20]

### 3.4.4 Desvanecimiento por difracción

Las pérdidas por difracción ocurren debido a la obstrucción parcial o total del trayecto, y pueden variar desde un valor mínimo, en el caso de un obstáculo único en arista (filo de cuchillo) hasta un valor máximo, en el caso de una Tierra esférica lisa. Las pérdidas por difracción en un terreno medio se pueden calcular aproximadamente, para pérdidas mayores de unos 15 dB, mediante la ecuación 3.7 [21].

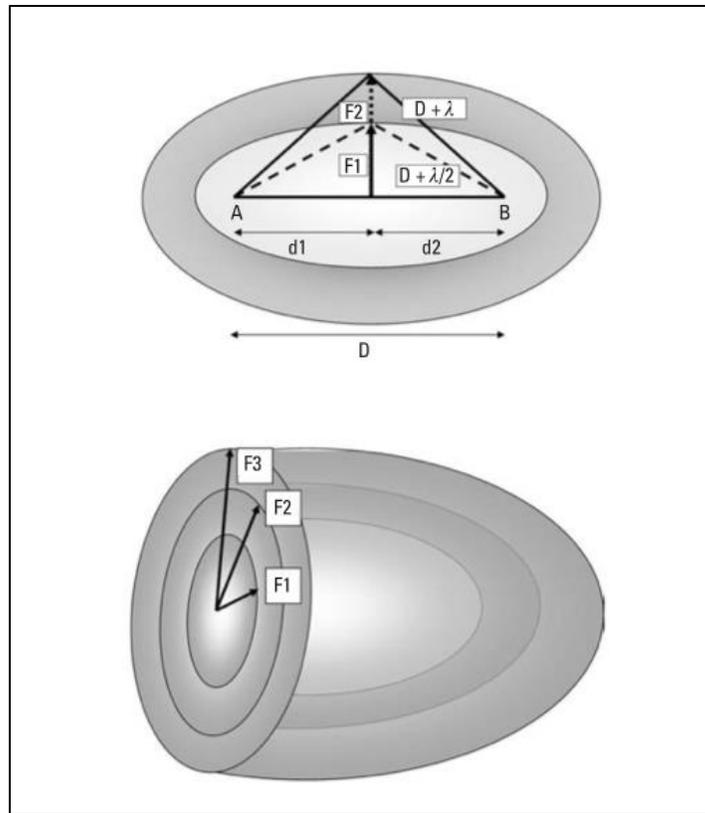
$$A_d = \frac{-20 h}{F_1} + 10 \quad (3.7)$$

En la que  $h$  es la altura en metros del obstáculo más importante del trayecto por encima de la trayectoria de éste (es negativa si la parte superior del obstáculo en cuestión está por encima de la línea de visibilidad directa), y  $F_1$  es el radio del primer elipsoide de Fresnel [21]. El radio de la primera zona de Fresnel se puede expresar con la fórmula 3.8 [20].

$$F_1 = \sqrt{\frac{\lambda(d_1 \cdot d_2)}{d_1 + d_2}} \quad (3.8)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda en metros,  $d_1$  es la distancia del obstáculo del transmisor A en metros, mientras que  $d_2$  es la distancia del obstáculo del transmisor B en metros. Las siguientes  $n$ -ésimas zona de Fresnel se pueden determinar por medio de la ecuación 3.9, en donde  $n$  es número entero. Estas zonas se ilustran en la figura 3.8 [20].

$$F_n = F_1 \sqrt{(n)} \quad (3.9)$$



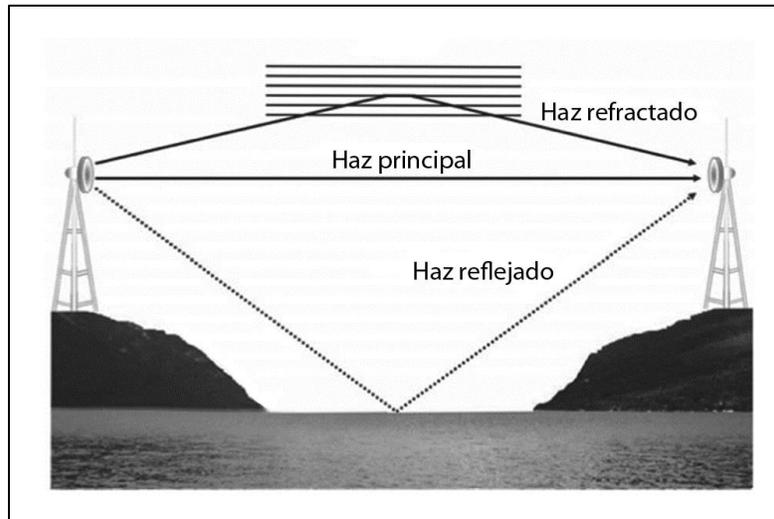
**Figura 3.8 Zonas de Fresnel [20]**

Si por lo menos un 60% de la primera zona de Fresnel está libre de obstáculos, el efecto de la Tierra puede ser ignorado, y las pérdidas de la trayectoria pueden ser aproximadas por medio de las pérdidas en espacio libre [20].

### 3.4.5 Desvanecimiento por multitrayecto

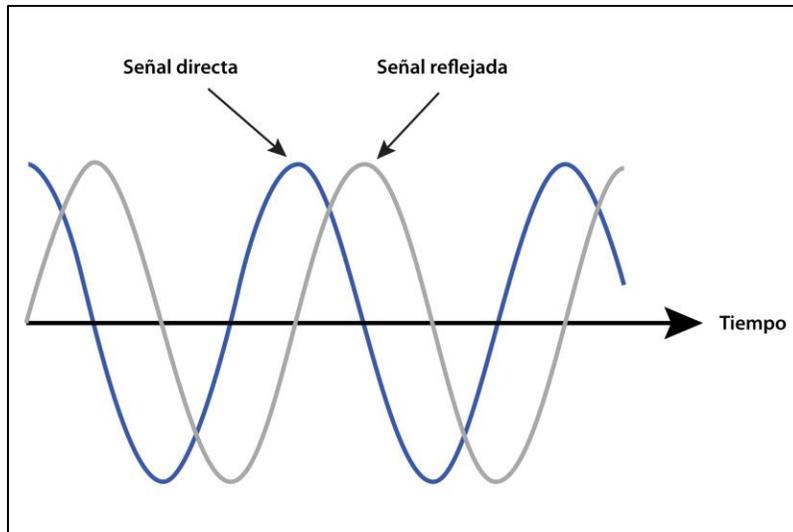
El desvanecimiento debido a la propagación multitrayecto es un factor de propagación dominante en los sistemas de radioenlaces digitales que funcionan en frecuencias por debajo de los 10 GHz, debido a que puede provocar distorsión y atenuación de las señales recibidas en trayectos con visibilidad directa, por lo que puede degradar la calidad de funcionamiento de los sistemas radioeléctricos [22].

Este efecto se puede dar por refracciones de la señal de radio en la atmósfera, en lo que se conoce como multitrayecto atmosférico, o por reflexiones provenientes del suelo o de estructuras cercanas, como los edificios, tal y como se muestra en la figura 3.9 [20].



**Figura 3.9 Ambiente con multitrayecto [20]**

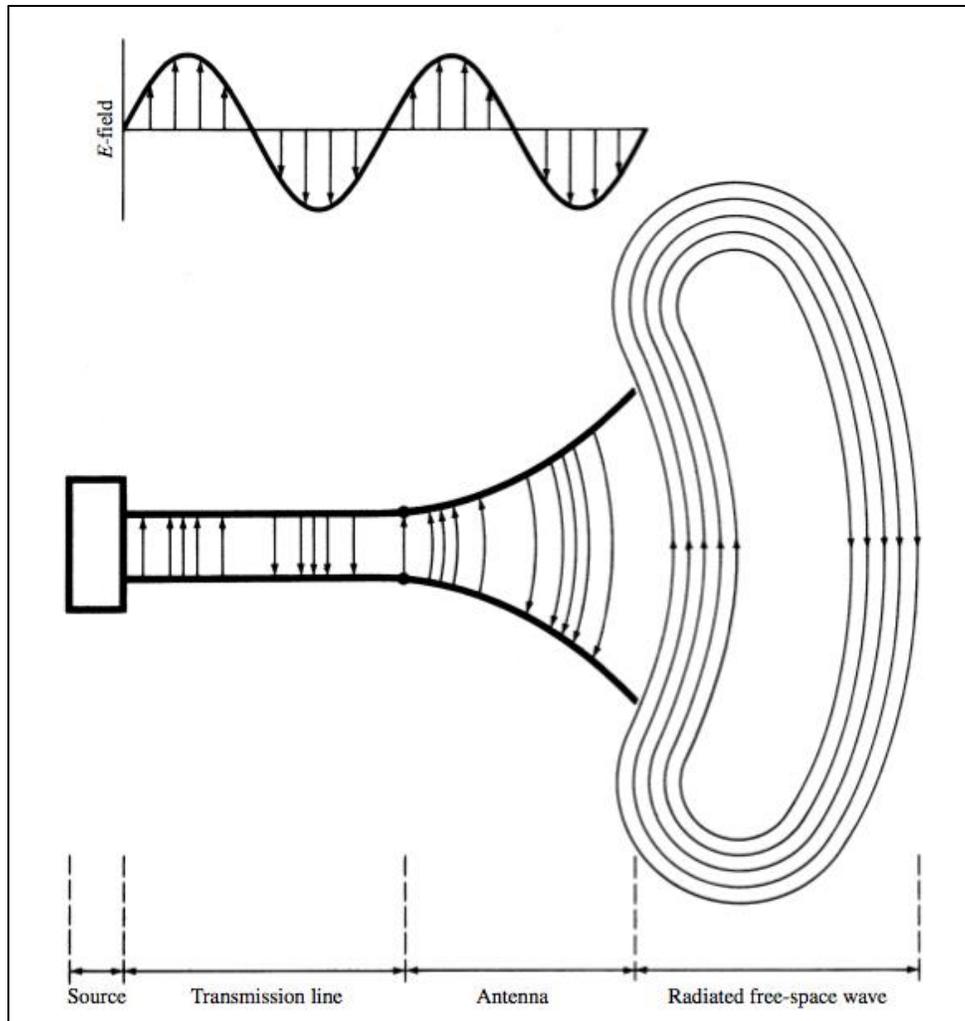
Esto provoca que diversas versiones retrasadas con respecto a la señal principal lleguen al receptor. Estas señales no concuerdan en fase debido a la diferencia en la longitud del trayecto, lo que provoca que se reciba una señal como la que se muestran la figura 3.10 [23].



**Figura 3.10 Dos señales multitrayecto desfasadas [23]**

### 3.5 Antenas

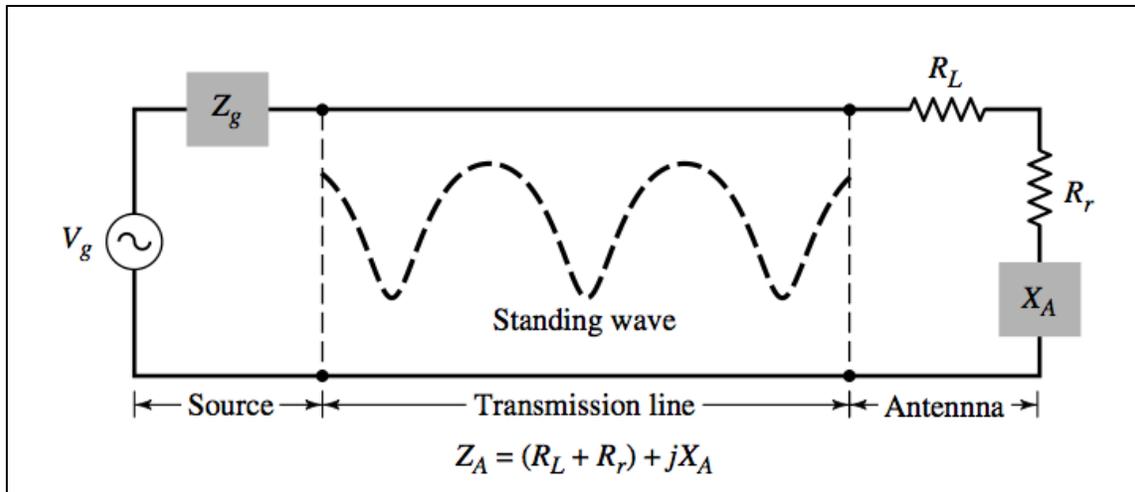
Una antena es una estructura que forma parte de un sistema transmisor o receptor, y está diseñada para radiar o recibir energía electromagnética eficazmente, en una forma prescrita. Cada antena tiene una impedancia de entrada característica y puede considerarse como un transductor para adaptar la línea de transmisión o la guía de ondas a la impedancia intrínseca del medio circundante. Si no hubiera una antena eficiente, la energía electromagnética estaría localizada y no sería posible la transmisión inalámbrica de información a grandes distancias [24]. En la figura 3.11 se muestra la antena como dispositivo de transición en un sistema transmisor.



**Figura 3.11 Antena como dispositivo de transición [23]**

El equivalente de Thévenin de un sistema con una antena se muestra en la figura 3.12, en donde la fuente se representa por una generador ideal, la línea de transmisión se representa por línea con impedancia característica  $Z_C$ , mientras que la antena se representa por una carga  $Z_A$  conectada a la línea de transmisión, en donde  $Z_A$  se muestra en la ecuación 3.10 [23].

$$Z_A = (R_L + R_r) + jX_A \quad (3.10)$$



**Figura 3.12** Equivalente de Thévenin de una línea de transmisión [23]

La resistencia de carga  $R_L$  se usa para representar las pérdidas en el dieléctrico y debido a la conducción, asociadas con la estructura de la antena, mientras que la resistencia de radiación  $R_r$  se usa para representar la radiación de la antena. La reactancia  $X_A$  representa la parte imaginaria de la impedancia asociada con la radiación de la antena [23].

Bajo condiciones ideales, toda la energía generada por la fuente debería ser transferida por completo a la resistencia de radiación  $R_r$ , sin embargo, en un sistema práctico, además de las pérdidas debidas a la conducción y al dieléctrico, existen pérdidas debido a reflexiones en la interface entre la línea de transmisión y la antena [23].

Tomando en cuenta la impedancia interna de la fuente ( $Z_g = R_g + X_g$ ) y despreciando las pérdidas por desacople, la máxima transferencia de potencia se entrega a la antena con un acople conjugado, la cual ocurre cuando se cumplen las ecuaciones 3.11 y 3.12 [23].

$$(R_L + R_r) = R_g \quad (3.11)$$

$$X_A = -X_g \quad (3.12)$$

## 3.6 Parámetros de las antenas

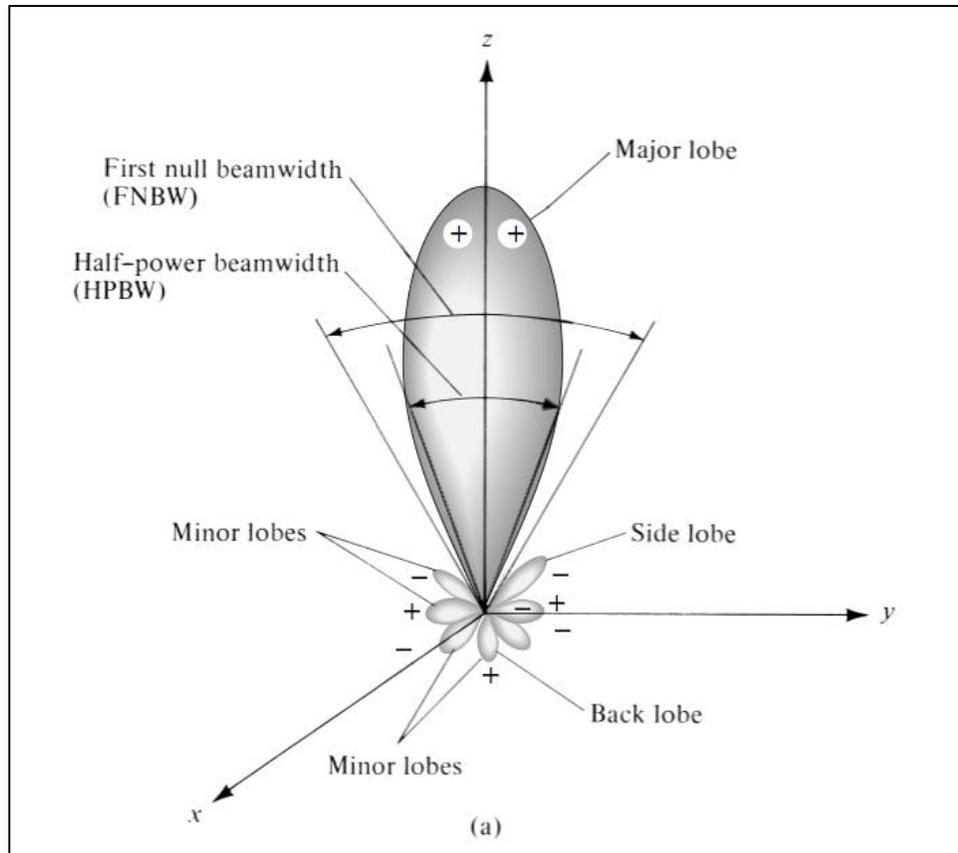
Para describir el rendimiento de una antena es necesario definir ciertos parámetros, algunos de los cuales se muestran a continuación.

### 3.6.1 Patrón de radiación

Es una función matemática o representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena como una función de las coordenadas espaciales, en la mayoría de casos se determina en la región de campo lejano. Las propiedades de radiación incluyen densidad de flujo de potencia, intensidad de la radiación, intensidad del campo, directividad, fase o polarización. Sin embargo, la propiedad de más importancia es la distribución espacial en dos o tres dimensiones de la energía radiada, como una función de la posición del observador a lo largo de una trayectoria o superficie de radios constante [23].

El gráfico del campo eléctrico o magnético recibido, a un radio constante, se llama patrón de campo, mientras que el gráfico de la variación espacial de la densidad de potencia, a lo largo de un radio constante se denomina patrón de potencia. Por lo general los gráficos se normalizan con respecto a un máximo valor, también es más común que patrón de potencia se represente en decibelios, esto debido a que una escala logarítmica puede acentuar con más detalle las partes del patrón con valores bajos [23].

Algunas partes del patrón de radiación se llaman lóbulos, los cuales pueden subdividirse en lóbulo mayor y lóbulos menores. Un lóbulo es una porción del patrón de radiación que está delimitada por regiones de intensidad de radiación relativamente baja, tal y como se muestra en la figura 3.13. [23].



**Figura 3.13 Patrón de radiación [23]**

El lóbulo mayor, también llamado haz principal, es el lóbulo que apunta en la dirección de máxima radiación, por otro lado, un lóbulo menor es cualquier lóbulo exceptuando el principal, y por lo general representa una radiación en direcciones no deseadas. Los lóbulos menores se pueden subdividir a su vez en lóbulos laterales, que se encuentra en cualquier otra dirección que no sea la principal, y en lóbulo trasero, cuyo eje forma un ángulo de aproximadamente  $180^\circ$  con respecto al haz de la antena [25].

Un término estrechamente relacionado con el patrón de radiación es el ancho de haz, que se refiere a la separación angular entre dos puntos idénticos en lados opuestos del haz principal [23], existen diferentes tipos pero el más utilizado es el ancho de haz de potencia media, descrito en un plano que contiene la dirección del lóbulo principal, como el ángulo entre dos direcciones en la cuales la intensidad de radiación es la mitad de su valor máximo [25].

### 3.6.2 Directividad

Se define como la proporción entre la intensidad de radiación de una antena en una dirección dada, entre el promedio de la intensidad a todas direcciones. El promedio de la intensidad de radiación es igual al total de potencia irradiada por la antena dividida por  $4\pi$  [25]. Matemáticamente se muestra en la ecuación 3.13 [23].

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (3.13)$$

Si la dirección no se especifica, la dirección de máxima intensidad de radiación es la que se toma, tal y como se muestra en la ecuación 3.14 [23].

$$D_{max} = D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (3.14)$$

En donde  $D$  es la directividad,  $D_0$  es la directividad máxima,  $U$  es la intensidad de radiación,  $U_0$  es la intensidad de radiación de una fuente isotrópica,  $U_{max}$  es la máxima intensidad de radiación y  $P_{rad}$  es la potencia total irradiada [23].

### 3.6.3 Eficiencia

La eficiencia total de una antena es una medida que toma en cuenta las pérdidas en las terminales de entrada (reflexiones por desacoples entre la línea de transmisión y la antena) y dentro de la estructura de la antena (pérdidas debido a la conducción y al dieléctrico). Este parámetro se calcula con la fórmula 3.15 [23].

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (3.15)$$

En donde  $e_0$  es la eficiencia total y es una cantidad adimensional,  $e_r$  es la eficiencia de reflexión por desacople y se calcula mediante la fórmula 3.16,  $e_c$  es la eficiencia de conducción y  $e_d$  se refiere a la eficiencia del dieléctrico [23].

$$e_r = (1 - |\Gamma|^2) \quad (3.16)$$

$\Gamma$  es el coeficiente de reflexión de voltaje en las terminales de entrada de la antena y se calcula mediante la fórmula 3.17, en la cual  $Z_{in}$  es la impedancia de entrada de la antena, mientras que  $Z_0$  es la impedancia característica de la línea de transmisión [23].

$$\Gamma = \frac{(Z_{in} - Z_0)}{(Z_{in} + Z_0)} \quad (3.17)$$

### 3.6.4 Ganancia

Es una medida del rendimiento de la antena, está muy relacionada a la directividad, sin embargo, toma en cuenta la eficiencia de la antena y sus capacidades direccionales. Según la IEEE, la ganancia se define como la razón de la intensidad de radiación en una dirección dada, a la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena fuera radiada isotrópicamente. La intensidad de radiación correspondiente a la potencia irradiada isotrópicamente es igual a la potencia aceptada en la entrada de la antena dividida por  $4\pi$  [25]. Matemáticamente se puede expresar por medio de la ecuación 3.18 [23].

$$Ganancia = 4\pi \frac{\text{intensidad de radiación}}{\text{potencia de entrada total}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (3.18)$$

La ganancia también se puede expresar en términos de la directividad, ya que la potencia irradiada está relacionada con la potencia total de entrada por medio de la relación mostrada en la ecuación 3.19, en donde el término  $e_{cd}$  se conoce como eficiencia de radiación y es adimensional [23].

$$P_{rad} = e_c e_d P_{in} = e_{cd} P_{in} \quad (3.19)$$

Por lo tanto se obtiene que la ganancia en términos de la directividad se puede expresar por medio de la ecuación 3.20 [23].

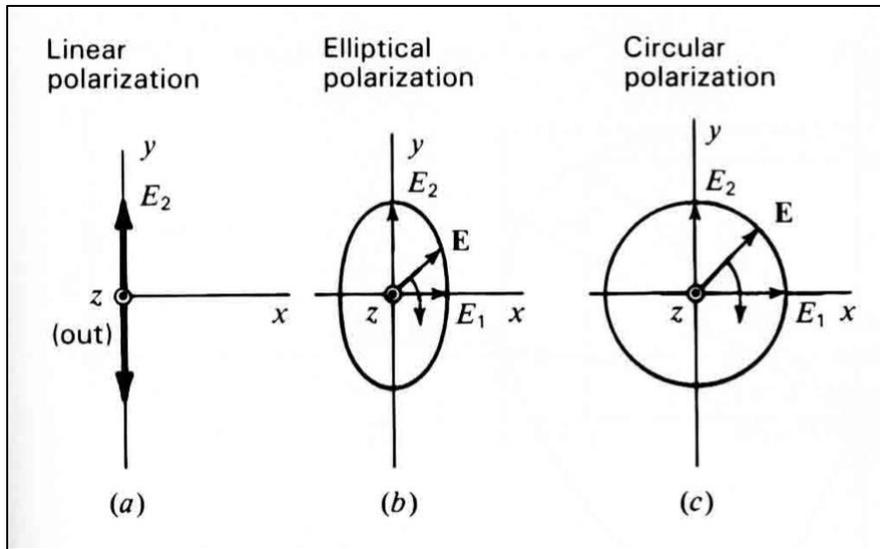
$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[ 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] = e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (3.20)$$

Si no se especifica la dirección, se toma la ganancia en la dirección de máxima radiación y se representa por  $G_0$ . Usualmente la ganancia se da en términos de decibeles contrario a una cantidad adimensional, por lo que se usa la fórmula 3.21 para realizar la conversión [23].

$$G_0(dB) = 10 \log_{10}[e_{cd} D_0(adimensional)] \quad (3.21)$$

### 3.6.5 Polarización

Se refiere a la polarización de la onda transmitida por la antena, y en caso de que no se defina ninguna dirección, se toma como la polarización en la dirección de máxima ganancia [25]. Esta propiedad de las ondas electromagnéticas describe orientación del campo eléctrico  $\mathbf{E}$ . La polarización de una onda se puede clasificar como lineal, circular o elíptica. En la figura 3.14 se muestran estos tipos de polarización para una onda viajando fuera de la página (dirección  $z$  positiva) [26].



**Figura 3.14 Polarización lineal, elíptica y circular [26]**

Si el vector que describe el campo eléctrico en un punto en el espacio, como función del tiempo, siempre se dirige a lo largo de una línea, se dice que el campo es linealmente polarizado [23]. Por ejemplo, en la figura 3.14a para una onda viajando en la dirección  $z$  positiva, el campo eléctrico se mantiene en todo momento en la dirección  $y$ , por lo que se dice que esta onda se encuentra polarizada linealmente en la dirección  $y$  [26].

Sin embargo, en muchos casos la figura que el vector de campo eléctrico traza puede tener tanto una componente  $x$  y una componente  $y$ , en un valor fijo de  $z$  el vector eléctrico  $\mathbf{E}$  rota como función del tiempo, y la punta de este vector describe un elipse, como se muestra en la figura 3.14b, por lo que se dice que la onda se encuentra elípticamente polarizada [26]. Dependiendo de la dirección de giro se dice que la polarización puede tener dirección a favor o en contra de las manecillas del reloj [23].

La polarización lineal y la polarización circular, como la mostrada en la figura 3.14c, son casos especiales de la polarización elíptica y se obtienen cuando el elipse se convierte en una línea recta o en un círculo, respectivamente [23].

## 3.7 Protocolos de comunicación

### 3.7.1 UART

Su nombre proviene de las iniciales de “Universal asynchronous receiver/transmitter” y es una interfaz de comunicación que permite enviar datos entre dispositivos en forma serial, sobre una única línea de transmisión y una única línea de recepción [27].

La característica principal de este protocolo es que la línea se encuentra normalmente en alto cuando no hay transferencia de datos y se usa el formato estándar de transmisión non-return-to-zero. El dato es transmitido y recibido comenzando por el bit menos significativo (LSB), y dependiendo de los dispositivos que se están comunicando se pueden realizar transmisiones simplex, half-duplex o full-duplex [28].

Cuando se desea enviar información se debe enviar un “cero lógico” que corresponde al bit de inicio, seguido de 8 bits de datos, y por último un bit de parada “uno lógico”, sin bit de paridad, configuración conocida como 8N1 y mostrada en la figura 3.15, en la cuál  $t_p$  es el periodo de un bit [27].

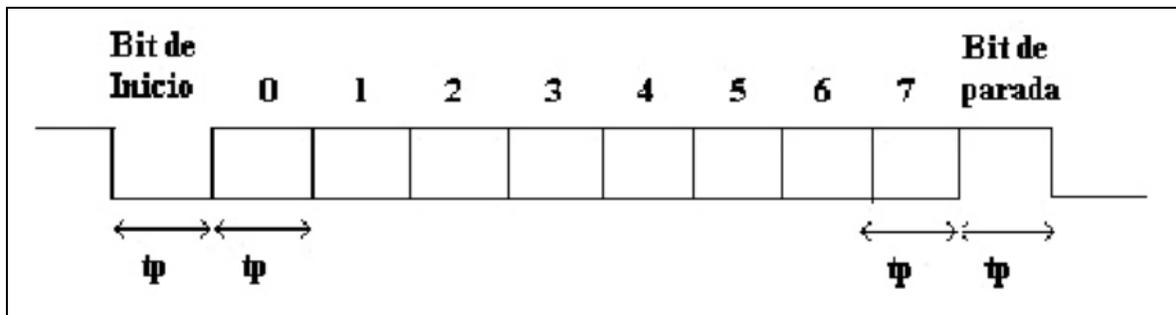


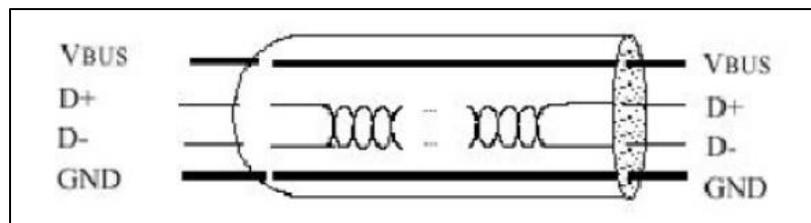
Figura 3.15 Formato de transmisión protocolo UART [27]

### 3.7.2 USB

Su nombre proviene de las iniciales en inglés de “Universal Serial Bus” y se refiere a una serie de especificaciones desarrolladas por el USB Implementers Forum, con el fin de reemplazar el número creciente de puertos diferentes que tenían las computadoras anteriormente por un solo puerto, adecuado para todas las aplicaciones y periféricos [31].

Este protocolo es muy eficiente para el envío de datos y requiere de un dispositivo llamado “host” que maneja la comunicación y de uno o varios dispositivos “slaves”, los cuales se conectan al host para iniciar una transferencia de datos. El protocolo permite la conexión de varios slaves hacia el host mediante la utilización de un hub USB [27].

El cable USB transfiere la señal y la alimentación (5 V) sobre cuatro hilos, tal y como se muestra en la figura 3.17 [27].



**Figura 3.16 Líneas de comunicación USB 1.1 y 2.0 [27]**

El protocolo USB puede funcionar a diferentes velocidades de transferencia, la especificación 1.0 define “low speed” de 1,5 Mbit/s y “full speed” de 12 Mbit/s, mientras que la especificación 2.0 permite una velocidad de bus de 480 Mbit/s [27].

## Capítulo 4      Diseño e implementación del enlace

En este capítulo se abordará en detalle el proceso de selección de hardware y diseño del enlace entre el vehículo aéreo no tripulado y la estación en tierra.

### 4.1 Análisis y selección de la solución

Como primer paso se definieron los requerimientos mínimos y restricciones que deberá cumplir el sistema, los cuáles se especifican en esta sección.

El alcance del enlace deberá ser mayor a 1 km entre la estación en tierra y el vehículo aéreo no tripulado, esta distancia es suficiente para la aplicación en la cual se va a utilizar el drone, la cual no requiere vuelos de grandes distancias para la cuantificación de la erosión en un terreno.

Una restricción al sistema corresponde a la alimentación del mismo, la cual debe ser igual o menor a 5 V, para poder utilizar los puertos de alimentación disponibles en el UAV. También las señales de datos y de control deben cumplir con este valor de tensión máximo.

El tamaño del sistema debe ser pequeño y su peso debe ser bajo, esto para que no se interfiera con el vuelo del drone, un sistema pesado significaría un mayor consumo de potencia para mantener la aeronave en el aire. Estos factores son de especial consideración a la hora de la selección de la antena que irá a bordo.

Se busca que todo el sistema sea una alternativa de bajo costo a los sistemas actuales de medición de erosión, por lo que el sistema de comunicación debe seguir esta tendencia y no aumentar considerablemente el precio del sistema.

La frecuencia a utilizar para la transmisión deberá encontrarse entre las bandas ISM, definidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, las cuáles no requieren licencia para su utilización, estas bandas se mostraron en la Tabla 3.1.

Para la comunicación del sistema con la unidad central de procesamiento a bordo del dron se deberá utilizar el protocolo UART. Para la comunicación con la computadora se deberá utilizar la tecnología USB.

#### **4.1.1 Primera solución: Sistema comercial de telemetría para UAV**

Esta solución consiste en la selección de un sistema comercial de telemetría hecho específicamente para usarlo en vehículos aéreos no tripulados. Estos sistemas se venden como un módulo que se puede conectar a algunos receptores de los sistemas controlados por radiofrecuencia que cuentan con un puerto de datos, aunque algunos receptores ya tienen la función de telemetría integrada.

Estos módulos, al estar pensados especialmente para vehículos aéreos no tripulados, tienen la capacidad de interconectarse con sensores compatibles, que le permiten al operador de la aeronave conocer prácticamente en tiempo real datos como la carga de las baterías, la velocidad, altitud, temperatura, revoluciones por minutos de los motores, datos de GPS, entre otros. La información de estos sensores es enviada desde el receptor, ubicado a bordo de la aeronave, hacia el dispositivo de control remoto, en donde se despliega por medio de una pantalla.

Estos sistemas son de “enchufar y usar”, por lo que funcionan prácticamente sin realizarle ninguna configuración, lo que puede significar una ventaja para personas con poco conocimiento sobre este tipo de dispositivos. Sin embargo, presenta una gran desventaja, pues al no ser configurables, son poco flexibles y prácticamente no permiten realizarle modificaciones al hardware, además que el acceso al software es limitado.

Estos sistemas funcionan con las antenas de fábrica del transmisor y receptor, que por lo general son antenas omnidireccionales de baja ganancia, y no están hechos para cambiarle la antena fácilmente.

#### **4.1.2 Segunda solución: Sistema de comunicación basado en software y hardware libre con componentes comerciales**

Esta solución utiliza plataformas comerciales que permiten la comunicación por radiofrecuencia, las cuales son fabricadas para una gran cantidad de aplicaciones, y no exclusivamente para su uso con vehículos aéreos no tripulados. Estas plataformas permiten la utilización recursos de software libre disponibles en repositorios.

Al ser una plataforma de propósito general se puede configurar dependiendo de las necesidades del usuario, por ejemplo, si se requiere la transmisión de gran cantidad de datos, o una transmisión a larga distancia, parámetros como la velocidad transmisión de los datos en el aire o la potencia de transmisión, se pueden modificar de acuerdo a las necesidades del usuario.

Esta solución permite la elección de las antenas que se ajusten mejor a las necesidades y posibilidades del usuario, pudiéndose cambiar fácilmente, aunque algunos módulos cuentan con antenas incorporadas por si no se desean cambiar.

Otra característica de esta plataforma es que se puede interactuar con una gran cantidad de sistemas, los cuáles no necesariamente deben ser de la misma marca o casa comercial.

### 4.1.3 Tercera solución: Sistema de comunicación personalizado

Esta solución consiste en el desarrollo del sistema de comunicaciones utilizando circuitos integrados disponibles en el mercado, seleccionados específicamente para cumplir con las necesidades del proyecto, además de la construcción de una plataforma para la interconexión de todos los componentes y las pruebas para comprobar el funcionamiento del sistema.

Para esta solución se debe diseñar y fabricar una antena con las características deseadas, especialmente afinada para la frecuencia utilizada y con las características de radiación, directividad, eficiencia y ganancia específicas para el enlace entre el vehículo aéreo no tripulado y la estación en tierra.

Un aspecto a tomar en cuenta en esta solución es la gran cantidad de tiempo que se le debe dedicar a su diseño e implementación, debido a las fases previas de ensamble, interconexión, pruebas y corrección de errores, propios de cualquier implementación “desde cero”.

### 4.1.4 Selección de la solución

Se realizó una comparación entre las tres soluciones planteadas, con el objetivo de seleccionar la propuesta de diseño que se ajuste mejor a los requerimientos y necesidades del proyecto. Para la comparación se consideraron cuatro aspectos fundamentales: funcionalidad, flexibilidad, costo y tiempo de implementación y se les dio una calificación, usando una escala del 1 al 5, en donde:

- Excelente con 5
- Bueno con 3
- Malo con 1

Primero se consideró la funcionalidad de las tres soluciones, se evaluó que las soluciones 2 y 3 están en capacidad de transmitir cualquier tipo de información entre una estación en tierra y un vehículo aéreo no tripulado, por lo que en este aspecto se les da una calificación de 5. Por otra parte, aunque la solución 1 permite la transmisión de datos desde la aeronave a la estación en tierra, estos datos provienen de módulos compatibles.

Respecto a la flexibilidad si existen diferencias significativas, pues al sistema comercial de telemetría para UAV no se le pueden realizar modificaciones al hardware ni al firmware utilizado por sus componentes, además las antenas que traen estos sistemas no se pueden cambiar, por lo que se calificó con una nota de 1. Por otra parte se le asignó una calificación de 5 a la segunda solución, pues estos sistemas se pueden configurar de acuerdo a las necesidades del usuario, además está basado en software y hardware libre, por lo que algunas partes del sistema se pueden cambiar si los requerimientos del proyecto varían en un futuro. También es importante mencionar que estos sistemas permiten seleccionar la antena que mejor se ajuste a la aplicación. A la solución 3 se le asigna una calificación media, pues al ser desarrollada desde cero con un fin específico no está pensada para realizarle muchas modificaciones, sin embargo, es más sencillo realizarle modificaciones a un sistema del cual se conocen exactamente sus circuitos internos y código utilizado, que a un sistema comercial, en donde esta información raramente está disponible.

Seguidamente se evaluó el costo de la implementación de cada sistema, la primer solución presenta el costo más elevado, debido a que es un sistema comercial listo para usarse después de desempacarlo, prácticamente sin ninguna configuración previa, puede llegar a superar los \$1000, aunque su precio varía considerablemente dependiendo del fabricante y la tienda, por lo que se calificó con la nota más baja (1). La segunda solución, presenta la mejor calificación (5), debido a que los componentes utilizados son de propósito general, por lo que su costo baja significativamente. A la tercer solución se le otorgó una calificación de 3, debido a que además de componentes se deben comprar los materiales para realizar las placas de interconexión y las antenas.

Por último se consideró el tiempo de implementación de cada solución. La primer solución ya viene lista de fábrica, prácticamente es “enchufar y usar”, por lo que su tiempo de implementación es mínimo. En la segunda solución se requiere de un mayor tiempo para su implementación pues se debe hacer un estudio para la elección de los módulos y antenas que mejor se adapten a las necesidades del proyecto, además de su respectiva configuración y conexión con los demás componentes del UAV y de la estación en tierra, al ser software libre, esta solución tiene la ventaja que existe gran cantidad de información en repositorios que permiten acelerar el proceso de diseño. Estas dos soluciones se calificaron con un 5 en este apartado, pues es posible implementarlas dentro del tiempo del que se disponía para el desarrollo del proyecto, el cual corresponde a un semestre. La tercer solución se calificó con la nota más baja debido a que lleva mucha mayor cantidad de trabajo que las dos soluciones anteriores y difícilmente su implementación se pueda concluir durante el periodo establecido.

En la tabla 4.1 se muestran los resultados anteriores de forma resumida para cada una de las soluciones, además de una suma que permita seleccionar la mejor solución.

**Tabla 4.1** Calificación de las soluciones planteadas

<b>Característica</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
<b>Funcionalidad</b>	3	5	5
<b>Flexibilidad</b>	1	5	3
<b>Costo</b>	1	5	3
<b>Tiempo de implementación</b>	5	5	1
<b>Sumatoria</b>	10	20	12

Según la comparación de las tres soluciones se escogió la solución número dos, debido a que obtuvo la mejor calificación, superando o igualando a las otras dos soluciones en todos los aspectos evaluados.

## 4.2 Análisis y selección del sistema de comunicación

### 4.2.1 Primera opción: Sistema Bluetooth

Esta opción utiliza la tecnología Bluetooth, la cual utiliza la banda ISM de los 2,4 GHz para su funcionamiento. Existen gran cantidad de módulos que Bluetooth para la conexión inalámbrica, pero la mayoría coincide en algunas características como el bajo costo económico y el bajo consumo de potencia.

Una de las ventajas de este sistema es la facilidad con la que se puede conectar con dispositivos como computadoras portátiles, teléfono móviles o tabletas, las cuales vienen con sistemas Bluetooth incorporados, lo que simplifica en gran medida el hardware requerido para la estación en tierra.

Su mayor desventaja es el poco rango que posee esta tecnología actualmente, el cual difícilmente supera los 100 metros, por lo que su uso permitiría la preparación del UAV mientras este se encuentre en tierra, pero el enlace se perdería muy fácilmente si se aleja estando en vuelo. Además estos módulos tienen la antena integrada, la cual no puede ser cambiada.

La velocidad de transferencia de datos puede llegar a los 3 Mbit/s a partir de la versión 2.0, versión utilizada en los módulos más comunes.

### 4.2.2 Segunda opción: Sistema GSM

Este tipo de sistemas aprovechan la infraestructura GSM (del francés “Groupe Spécial Mobile”) existente para establecer la comunicación ente el UAV y la estación en tierra, para lo cual se utilizan módulos capaces de conectarse a esta infraestructura si se les provee de una tarjeta SIM (acrónimo en inglés de “subscriber identity module”) de un operador de telefonía móvil.

Se debe utilizar un módulo capaz de conectarse a la banda de frecuencias utilizada para la telefonía móvil, las cuales pueden variar entre países, aunque también existen módulos cuatribanda, los cuales pueden conectarse a las bandas GSM de 850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz y 1900 MHz.

Una gran ventaja de esta tecnología es la posibilidad de conectarse a Internet, lo que le permite al UAV acceder a información disponible en la red en tiempo real durante la ejecución de una misión, o acceder a datos de un vuelo desde prácticamente cualquier parte del mundo mientras la aeronave se encuentra en el aire.

Esta solución permite la operación de los UAVs a grandes distancias, ya que se puede establecer un enlace de comunicación siempre y cuando la aeronave se encuentre dentro del área de cobertura de una antena celular y se posea una intensidad de la señal lo suficientemente fuerte. Esta característica permitiría establecer el enlace entre el UAV y la estación en tierra, incluso cuando no exista línea de vista entre la ambos.

El principal problema de estos sistemas es que depende de la cobertura y la robustez de la señal celular en el área donde se realiza el vuelo, por lo que no se puede garantizar que el enlace sea confiable si no existe una intensidad de la señal lo suficientemente fuerte, especialmente en lugares alejados de las ciudades y caminos principales.

La velocidad de transferencia de datos puede variar significativamente entre tecnologías, con las más recientes como la 4G pudiendo alcanzar los cientos de Mbit/s, sin embargo se tomará en cuenta la velocidad de transferencia de datos de la tecnología GPRS, debido a que posee una mayor cobertura, pero su velocidad no supera los 170 kbps.

### **4.2.3 Tercer opción: Sistema de radio**

Esta solución utiliza módulos de radiofrecuencia o transceptores de propósito general que utilizan las bandas de frecuencias ISM para su comunicación, algunas de las más utilizadas son las bandas de 433 MHz, 900 MHz y 2,4 GHz.

Existe una gran cantidad de este tipo de sistemas, con características que pueden variar considerablemente entre ellos, como por ejemplo, la potencia de transmisión soportada, velocidad de los datos en el aire y los protocolos utilizados para la comunicación.

Estos módulos permiten una comunicación punto a punto, pero algunos soportan topologías más complejas como punto a multipunto, estrella o malla, lo cual puede ser útil en caso de que se desee tener varias estaciones en tierra o se quieran volar varios drones al mismo tiempo con un enlace de comunicación entre ellos.

Algunos de estos módulos tienen la ventaja de permitir el intercambio de la antena que utilizan, lo que permite seleccionar una antena más adecuada de acuerdo a los requerimientos del sistema que se esté desarrollando.

#### **4.2.4 Selección del tipo de comunicación**

Para seleccionar el tipo de comunicación más adecuado para la aplicación de cuantificar la erosión por medio de vehículos aéreos no tripulados, se consideraron tres aspectos. A cada categoría se le dio una calificación, usando una escala del 1 al 5, en donde:

- Excelente con 5
- Bueno con 3
- Malo con 1

La principal característica que se tomó en cuenta al elegir el tipo de comunicación fue la distancia que se puede alcanzar con cada tipo de tecnología, debido a esto el sistema Bluetooth quedó prácticamente descartado y la tecnología GSM aunque permite un enlace de muchos kilómetros tiene la gran limitante que depende de la intensidad de la señal celular, por lo que se puede dar el caso que no se pueda establecer un enlace por falta de cobertura. Debido a esto, la solución más adecuada corresponde a la opción tres.

El costo puede variar significativamente entre módulos de la misma tecnología, pero se encontró que los módulos Bluetooth son los de menor costo, por lo que se les da la mejor

calificación en este aspecto. Los módulos GPS también son de bajo costo, sin embargo se les debe sumar el precio que se le debe pagar a la operadora telefónica por el uso del servicio, debido a esto se les da la menor calificación. Los precios de los módulos de radio comunes pueden variar significativamente, encontrándose algunos tan baratos como los módulos Bluetooth, sin embargo, los módulos que permiten mayor rango tienen el precio más elevado, por lo que se les da una calificación de tres.

La siguiente característica evaluada corresponde a la velocidad de transferencia de datos, se le dio la calificación máxima a las opciones de Bluetooth y radio, los cuáles pueden superar los 200 kb/s, incluso llegando a los 2 Mb/s, dependiendo del módulo y la distancia de separación. La opción GSM tiene varias tecnologías asociadas, sin embargo, se calificó la velocidad de la tecnología GPRS, por ser una de las que posee mayor cobertura, la cuál no cumple el requisito de velocidad, por lo que se le otorga una calificación de 1.

Un resumen de las características analizadas para cada tecnología se muestra en la tabla 4.2, en donde se muestra que la mejor calificación la obtuvo la tercer opción: sistema de radio, al obtener 13 puntos.

**Tabla 4.2** Calificación de cada tecnología

<b>Característica</b>	<b>Bluetooth</b>	<b>GSM</b>	<b>Radio</b>
<b>Rango</b>	1	3	5
<b>Costo</b>	5	1	3
<b>Velocidad transferencia de datos</b>	5	1	5
<b>Sumatoria</b>	11	5	13

#### 4.2.5 Selección del módulo de radio

Seguidamente se analizaron varias opciones de módulos de radio con diferentes prestaciones, los módulos escogidos fueron los siguientes:

- Radio SiK
- XBee-Pro 900 HP
- RFD900+
- nRF24L01+ con amplificador de potencia y amplificador de bajo ruido (De ahora en adelante denominado solamente nRF24L01+).

Se resumen en la tabla 4.3 algunas de las características más importantes de cada módulo.

**Tabla 4.3** Características de los módulos de radio [32][33][34][35]

Característica	SiK Radio	XBee-Pro 900HP	RFD900+	nRF24L01+ con PA y LNA
<b>Frecuencia</b>	433 MHz	902 - 928 MHz	902 - 928 MHz	2,4 - 2,484 GHz
<b>Potencia de transmisión</b>	100 mW (+20 dBm)	250 mW (+24 dBm)	1 W (+30 dBm)	100 mW (+20 dBm)
<b>Sensibilidad de recepción</b>	-121 dBm	-110 dBm	-121 dBm	-104 dBm
<b>RF Data Rate</b>	250 kbps	10 kbps 200 kbps	10 kbps 200 kbps	250 kbps 1Mbps 2Mbps
<b>Rango</b>	500 m	14 km (10 kbps)	45 km	1 km
<b>Voltaje de operación</b>	3,3 V	2,1-3,6 V	3,3 V	3,3-3,6 V
<b>Interfaz de datos</b>	UART	UART SPI	UART	UART
<b>Precio</b>	\$ 40	\$ 80	\$ 180	\$ 40

Para seleccionar el módulo más adecuado para la aplicación de cuantificar la erosión por medio de vehículos aéreos no tripulados, se consideraron cuatro aspectos: potencia, velocidad de transferencia de datos, rango y precio. A cada categoría se le dio una calificación, usando una escala del 1 al 5, en donde:

- Excelente con 5
- Bueno con 3
- Malo con 1

En cuanto a la potencia de transmisión se le dio una calificación mínima a los dos módulos de 100 mW SiK Radio y nRF24L01+, luego se le dieron 3 puntos al módulo XBee de 250 mW y la calificación más alta se le dio al RFD900+ que puede llegar a transmitir con una potencia de 1W.

Seguidamente se comparó la velocidad a la que cada módulo puede transferir los datos, se le dio 5 puntos al módulo nRF24L01+ debido a que puede llegar a 2 Mbps, mientras que a los demás módulos se les dio tres puntos, ya que pueden alcanzar los 200 kbps o 250 kbps.

En cuanto al rango, aunque es una característica que en una aplicación puede variar dependiendo de múltiples factores, se tomó en cuenta el dado por los fabricantes en condiciones prácticamente ideales. El XBee Pro 900 HP y el RFD 900+ pueden tener rango de varios kilómetros por lo que se les otorgó una calificación cinco puntos. A los módulos SiK Radio y nRF24L01+ se les dio la mínima calificación debido a que su rango máximo es menor o muy cercano a 1 km, distancia mínima para el enlace.

Seguidamente se evaluó el precio de cada tipo de módulo, y se otorgó la puntuación de acuerdo a los siguientes rangos: se le dio la menor calificación si el precio de dos módulos supera los \$100, luego se dieron tres puntos si el costo se encuentra entre \$50 y \$100, y si los módulos valen menos de \$50 se les dio la mejor calificación.

Los resultados del análisis anterior se muestran en la tabla 4.4, en donde se sumó la calificación obtenida en cada característica para cada módulo de radio.

**Tabla 4.4 Calificación de cada módulo**

Característica	SiK Radio	XBee Pro 900HP	RFD900+	nRF24L01+ con PA y LNA
Potencia	1	3	5	1
Data Rate	3	3	3	5
Rango	1	5	5	1
Precio	5	3	1	5
Sumatoria	10	14	14	12

En comparación realizada en la tabla 4.4 se observa que dos módulos empataron con la mejor calificación, la cual fue de 14 puntos. Entre los módulos empatados se descartó el módulo RFD900+ debido a su elevado precio, el cuál corresponde a más del doble del XBee-Pro 900HP, además, aunque el RFD900+ tiene una mayor potencia de transmisión, la potencia del XBee Pro 900HP es suficiente para un enlace con el rango requerido para el enlace.

En la figura 4.1 se muestra el módulo escogido, el cual cuenta con un conector RP-SMA para la conexión de la antena.



**Figura 4.1 Módulo XBee-Pro 900HP [33]**

### 4.3 Análisis y selección de la antena

Se analizaron tres tipos de antenas de 900 MHz para su uso con el módulo XBee-Pro 900HP: una antena tipo “rubber-duck”, una antena tipo “patch” y una antena tipo “Yagi”.

#### 4.3.1 Primera opción: Antena rubber-duck

Las antena rubber-duck se caracteriza principalmente por irradiar energía de manera omnidireccional en el plano horizontal, ser de bajo costo y de tamaño pequeño. Se escogió una antena modelo S152AH-915S de la empresa Nearson Inc., sus características más importantes se muestran en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5** Características antena S152AH-915S [36]

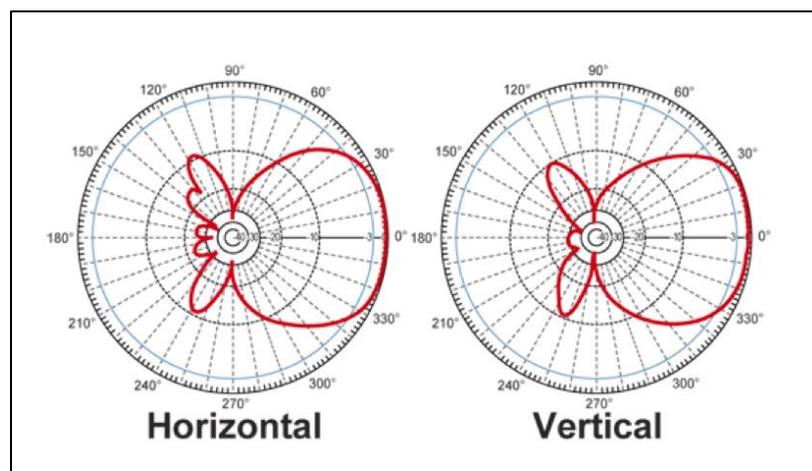
<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
<b>Rango de frecuencias</b>	902 – 908 MHz
<b>Impedancia</b>	50 $\Omega$
<b>Ganancia</b>	2 dBi
<b>VSWR</b>	<2.0:1
<b>Ancho de haz horizontal</b>	360°
<b>Precio</b>	\$ 13.86
<b>Tamaño</b>	Largo: 137 mm Diámetro: 10 mm
<b>Peso</b>	45 g

### 4.3.2 Segunda opción: Antena patch

Se escogió una antena tipo patch plana cuadrada, modelo HG908P de la empresa L-com y sus características más importantes se muestran en la tabla 4.6. Su patrón de radiación se muestra en la figura 4.2

**Tabla 4.6** Características antena HG908P [37]

Característica	Valor
Rango de frecuencias	902 – 928 MHz
Impedancia	50 $\Omega$
Ganancia	8 dBi
VSWR	<1.5:1
Ancho de haz horizontal	75°
Ancho de haz vertical	65°
Precio	\$ 57.15
Tamaño	Largo: 215,9 mm
	Ancho: 215,9 mm
	Alto: 30,4 mm
Peso	0,45 kg



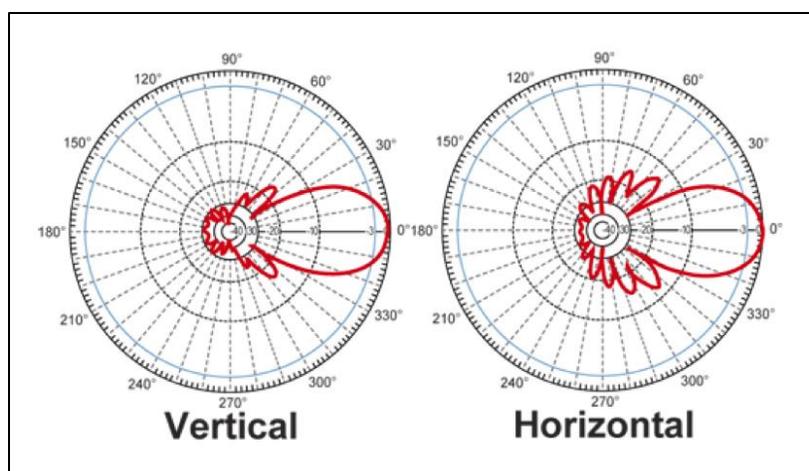
**Figura 4.2** Patrón de radiación de la antena HG908P [37]

### 4.3.3 Tercer opción: Antena Yagi

La antena Yagi escogida es la modelo HG914YE de la empresa L-com y sus características más importantes se muestran en la tabla 4.7. El patrón de radiación se muestra en la figura 4.3.

**Tabla 4.7** Características antena HG914YE [38]

Característica	Valor
Rango de frecuencias	824 – 960 MHz
Impedancia	50 $\Omega$
Ganancia	14 dBi
VSWR	< 1.5:1
Ancho de haz horizontal	31°
Ancho de haz vertical	26°
Precio	\$ 46.95
Tamaño	Largo: 1,40 m
Peso	1,22 kg



**Figura 4.3** Patrón de radiación de la antena HG914YE [38]

#### 4.3.4 Selección de las antenas

Para seleccionar la antena más adecuada para la aplicación de cuantificar la erosión por medio de vehículos aéreos no tripulados se consideraron cuatro aspectos para cada una de las antenas presentadas: cuál patrón de radiación es el más adecuado para un enlace entre una aeronave multirrotor y una estación en tierra, cuál tiene la mayor ganancia, el precio, además del peso y el tamaño. A cada categoría se le dio una calificación, usando una escala del 1 al 5, en donde:

- Excelente con 5
- Bueno con 3
- Malo con 1

En cuanto al patrón de radiación más adecuado para aplicaciones con UAV se tomó en cuenta que la aeronave una vez en el aire puede tomar cualquier dirección dependiendo del lugar en donde se requiera realizar el vuelo, por lo que se debe tener la facilidad de tener un enlace de comunicación sin importar la dirección que tome el vehículo con respecto a la estación en tierra. Es por esto que se le dio la calificación más alta a la antena rubber-duck, la cual es omnidireccional en el plano horizontal. Las otras dos antenas son más direccionales, por lo que quedan prácticamente descartadas para su uso a bordo de la aeronave, debido a que ésta, una vez en el aire, puede dar giros en cualquier dirección, dependiendo del lugar al que se quiera desplazar. Esto provocaría que su lóbulo principal quede apuntando en una dirección contraria a la estación terrestre.

Para la estación en tierra sí se puede considerar una antena más direccional, sin embargo, para distancias muy grandes en donde el dron se perdería de vista fácilmente, es necesario implementar un sistema rastreador. Éste utilizaría las posiciones GPS del UAV y de la estación en tierra para posicionar la antena adecuadamente en dirección a la aeronave. Por la necesidad de sistemas adicionales se le dio la nota más baja a la antena Yagi que solo posee  $31^\circ$  de ancho de haz horizontal y  $26^\circ$  de ancho de haz vertical. Por último se le dio una calificación media a la antena patch, que posee mayores ancho de haz, tanto horizontal como vertical.

La ganancia se tomó en cuenta debido a que se ocupa que el enlace tenga un alcance de al menos 1 km, por lo que se le asignó la nota más alta a la antena con mayor ganancia, es decir la antena Yagi que posee 14 dBi, luego se le dieron tres puntos a la antena patch que posee 8 dBi, y por último un punto a la antena rubber-duck, que sólo tiene 2 dBi.

En cuanto al precio la antena de menor costo con \$13.86 es la rubber-duck por lo que se le dio la mejor calificación, seguida de la antena Yagi con \$46.95 por lo que se le asignaron 3 puntos, y por último la antena patch, que por ser la más cara se le dio una calificación de un punto.

El peso y tamaño de cada antena es importante especialmente si se quiere poner a bordo de un vehículo aéreo de pequeñas dimensiones, por lo que se le asignó la nota más alta a la antena rubber-duck, cuyo peso no supera los 50 gramos. La antena tipo patch le sigue en peso y tamaño, por lo que se le asignó una calificación media. La antena Yagi es de dimensiones muy grandes para su uso en un UAV, por lo que prácticamente queda descartada en esta parte del enlace.

Un resumen del análisis realizado para escoger la antena se muestra en la tabla 4.8., en donde se muestra la calificación obtenida por cada antena en cada característica evaluada, junto con la calificación total de cada una.

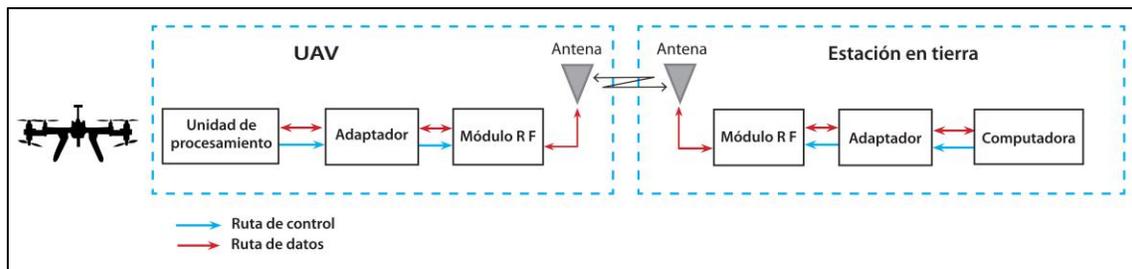
**Tabla 4.8 Calificación de las antenas**

<b>Característica</b>	<b>Rubber-duck</b>	<b>Patch</b>	<b>Yagi</b>
<b>Patrón de radiación</b>	5	3	1
<b>Ganancia</b>	1	3	5
<b>Precio</b>	5	1	3
<b>Peso y tamaño</b>	5	3	1
<b>Ponderación</b>	16	10	10

La antena escogida, tanto para la estación en tierra como para la aeronave, es la tipo rubber-duck, debido a que obtuvo la mejor calificación de las tres antenas analizadas, como se puede observar en la tabla 4.8. Se debe notar que el único aspecto donde las antenas Yagi y patch obtuvieron mejor calificación es en la ganancia, por lo que la antena escogida se deberá usar con un dispositivo que tenga la suficiente potencia para alcanzar la distancia requerida para el enlace con solamente 2dBi en ambas antenas.

#### 4.4 Proceso de diseño

Con los módulos de radio y las antenas seleccionadas, se realizó un diagrama modular para mostrar las conexiones entre cada uno de los componentes del sistema. En la figura 4.4 se muestra este diagrama, tanto para la estación en tierra como para el UAV.



**Figura 4.4 Diagrama modular del sistema de comunicación**

##### 4.4.1 Sistema a bordo del UAV

El UAV que se está utilizando corresponde al sistema X8+ de la compañía 3D Robotics, el cual se muestra en la figura 4.5. Este drone está optimizado para tomar fotografías y video con una cámara GoPro, pero tiene la opción de acoplar otro tipo de gimbals, cámaras profesionales y sensores [39].

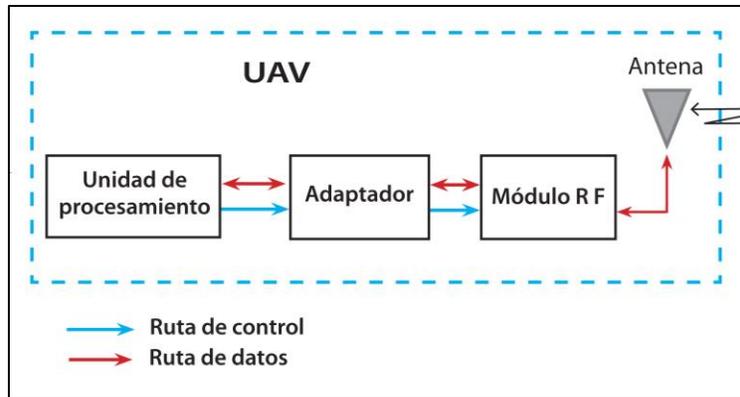


**Figura 4.5 Sistema UAV X8+ [40]**

Algunas de las características más importantes de este sistema se muestran a continuación:

- Dimensiones del vehículo: 35 cm x 51 cm x 20 cm
- Peso del vehículo con batería: 2,56 kg
- Tipo de marco: X
- Batería: LiPo 4S 14,8 V 10,000 mAh 10 C
- Tiempo máximo de vuelo estimado: 15 min
- Capacidad de carga: 800 g (Con posibilidad de llegar a 1 kg con tiempo de vuelo reducido)
- Motores: 8 SunnySky V2216-12 KV800 II [40]

El sistema a bordo del UAV se puede dividir en cuatro partes principales: Unidad de procesamiento, un adaptador que permita la comunicación entre el módulo de radiofrecuencia y la unidad de procesamiento, el XBee Pro 900HP y la antena rubber-duck de 2 dBi, tal y como se muestra en la figura 4.6.



**Figura 4.6 Módulos del sistema a bordo del UAV**

La unidad de procesamiento a bordo del UAV tiene entre sus funciones adquirir, registrar y enviar hacia la estación en tierra, la información proveniente de diversos dispositivos de hardware que están interconectados a ella, además de tomar decisiones, ante instrucciones enviadas por la estación de monitoreo central. [7].

Esta unidad fue desarrollada en un trabajo previo para el proyecto Cuantificación de la erosión por medio de UAV, en el cual se escogió utilizar un Arduino Mega 2560 [7], el cual es una placa de desarrollo con hardware open-source, basada en un microcontrolador ATmega2560, caracterizado por tener 54 pines digitales de entrada/salida, 16 entradas analógicas, 4 puertos UART, un cristal oscilador de 16 MHz, un conector de alimentación y un botón de reinicio. Además, el fabricante proporciona, de manera gratuita, un software multiplataforma llamado Arduino IDE, el cual permite escribir código y cargarlo a la placa por medio de una conexión USB [41]. En la figura 4.7 se muestra una imagen con el módulo, y en la tabla 4.9 se resumen las características más importantes de la plataforma.

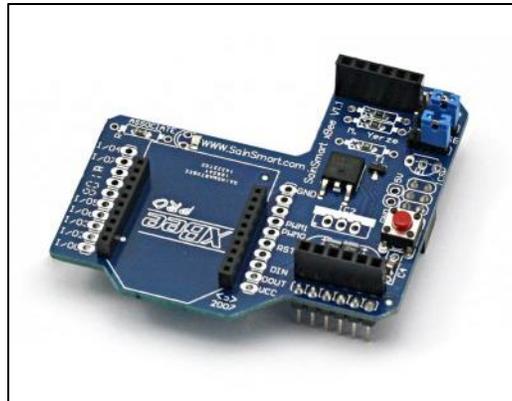


**Figura 4.7** Arduino Mega 2560 [41]

**Tabla 4.9** Características técnicas del Arduino Mega 2560 [41]

<b>Microcontrolador</b>	<b>ATmega2560</b>
<b>Voltaje de operación</b>	5V
<b>Voltaje de alimentación</b>	7-12V
<b>Pines entrada/salida digitales</b>	54 (15 salidas PWM)
<b>Entradas analógicas</b>	16
<b>Protocolos de comunicación</b>	4 UART, SPI, I <sup>2</sup> C
<b>Memoria Flash</b>	256 KB
<b>SRAM</b>	8 KB
<b>EPROM</b>	4 KB
<b>Velocidad de reloj</b>	16 MHz
<b>Largo x ancho</b>	101,52 mm x 53,3 mm
<b>Peso</b>	37 g

El voltaje de operación del Arduino Mega 2560 es de 5 voltios, mientras que el XBee-Pro 900Hp funciona con 3,3 voltios, por lo que para realizar su interconexión se utilizó un adaptador XBee Shield de la marca SainSmart, el cual está diseñado físicamente para montarse sobre la placa Arduino, y se encarga de regular las señales, que de otra forma dañarían permanente el XBee. Este módulo se muestra en la figura 4.8.



**Figura 4.8** Módulo XBee Shield [42]

La conexión del Arduino Mega 2560 con el adaptador XBee Shield se realizó por medio de los pines mostrados en la tabla 4.10.

**Tabla 4.10** Conexión Arduino - Adaptador XBee

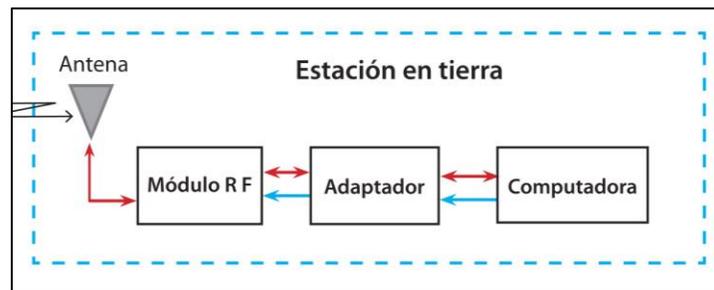
Pin en el Arduino	Función
0	RX
1	TX
2 (ICSP)	5 V
5 (ICSP)	Reset
6 (ICSP)	GND

El tercer bloque del sistema a bordo del UAV corresponde al XBee-Pro 900HP, cuyas características se mostraron en la sección 4.2.5, el cual se debe conectar al adaptador XBee. Como el módulo adaptador está hecho especialmente para cualquier tipo de XBee, la conexión de este módulo se realiza solamente insertando el XBee-Pro 900HP.

El cuarto componente del sistema es la antena rubber-duck de 2 dBi, cuyas características se mostraron en la sección 4.3.1, la cual se conecta al XBee-Pro 900 HP por medio de los conectores RP-SMA.

#### 4.4.2 Estación en tierra

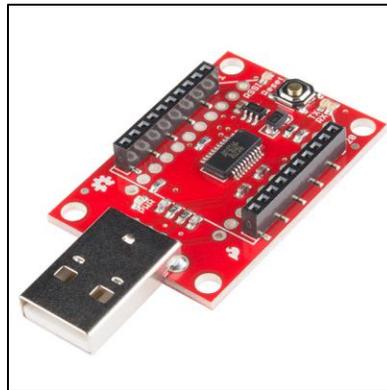
La estación en tierra cuenta con cuatro partes principales: Una computadora, un adaptador que permite la conexión entre la computadora y el módulo de radiofrecuencia, el XBee-Pro 900HP, y una antena rubber-duck de 2 dBi. Estos elementos se muestran en la figura 4.9.



**Figura 4.9 Módulos de la estación en tierra**

Al igual que en el sistema a bordo del UAV, la antena rubber-duck de 2 dBi se conecta al módulo XBee-Pro 900HP por medio de los conectores RP-SMA para la estación en tierra.

Para conectar el XBee-Pro 900HP a la computadora se utilizó el módulo de la empresa SparkFun llamado XBee Explorer Dongle, el cual permite utilizar el puerto USB de la computadora para realizar la conexión. El principal componente de este módulo es un convertidor USB-Serie FT231X, pero también cuenta con un regulador de voltaje de hasta 500 mA para la alimentación del XBee, un botón de reset y 4 LED's: RX, TX, RSSI y un indicador de alimentación [43]. Este módulo se muestra en la figura 4.10.



**Figura 4.10** Módulo XBee Explorer Dongle [43]

En la computadora se utiliza una interfaz gráfica desarrollada previamente para el proyecto “Cuantificación de la erosión por medio de UAV”, utilizando el entorno de Matlab. En la figura 4.11 se muestra la interfaz del programa con la información que se despliega cuando se realiza un vuelo.



**Figura 4.11** Interfaz gráfica de la estación en tierra

Como se muestra en la figura 4.11, algunos de los datos del UAV que se despliegan con la interfaz son:

- Estado de las baterías principales
- Estado de la batería del medidor de voltaje
- Voltaje del microcontrolador
- Latitud y longitud
- Ángulos de pitch, yaw y roll
- Velocidad
- Altura
- Temperatura
- Información del módulo GPS

Además la interfaz permite realizar capturas y almacenaje de fotografías e información georeferenciada y temporizada en cualquier momento o en un intervalo temporal definido por el usuario.

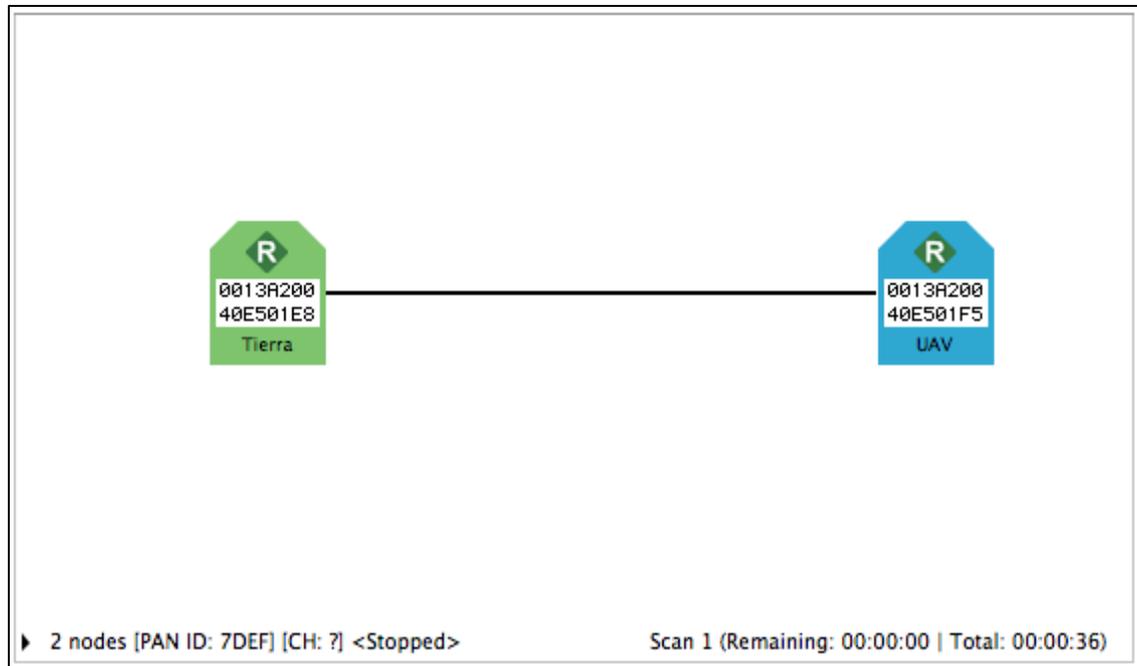
## Capítulo 5 Validación y análisis

En este capítulo se muestran las diferentes pruebas realizadas para validar el correcto funcionamiento del sistema, primero se comprobó el establecimiento de la red punto a punto, luego se realizaron pruebas, tanto para comprobar el rango requerido de un kilómetro, como para conocer el alcance del enlace en un ambiente real, luego se realizaron distintas pruebas con el sistema en pleno vuelo, y por último se comprobó el cumplimiento de los requisitos y restricciones del sistema.

### 5.1 Validación de funcionamiento

#### 5.1.1 Comunicación entre los módulos de radio

Para comprobar la correcta comunicación entre los módulos XBee-Pro 900HP, posteriormente a su configuración, se utilizó el modo “Network working mode” del software XCTU, que permite visualizar la topología e interconexiones de la red. El resultado obtenido se muestra en la figura 5.1, en donde se observa la conexión punto a punto entre el XBee de la estación en tierra y el XBee ubicado a bordo del UAV, cada uno con su respectivo nombre y dirección.

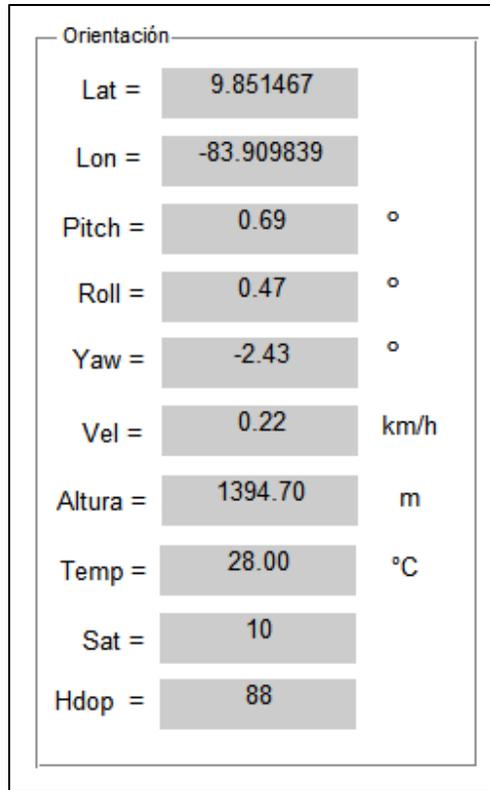


**Figura 5.1 Enlace punto a punto del sistema**

Después de realizar todas las conexiones del sistema se probó la comunicación en la dirección UAV – Estación en tierra, y la correcta interconexión entre los módulos. Para esto se utilizó la interfaz gráfica desarrollada para el proyecto, en la que se desplegaron los siguientes datos, provenientes de la unidad de procesamiento:

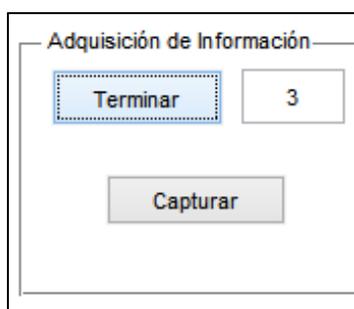
- Carga de las celdas de las baterías del UAV
- Latitud
- Longitud
- Ángulo de pitch
- Ángulo de roll
- Ángulo de yaw
- Velocidad
- Altitud
- Temperatura
- Cantidad de satélites conectados al GPS
- Dispersión de la precisión horizontal del GPS

En la figura 5.2 se muestra una captura de pantalla de la interfaz gráfica mostrando los datos recibidos desde el UAV.



**Figura 5.2 Visualización de los datos recibidos desde el UAV**

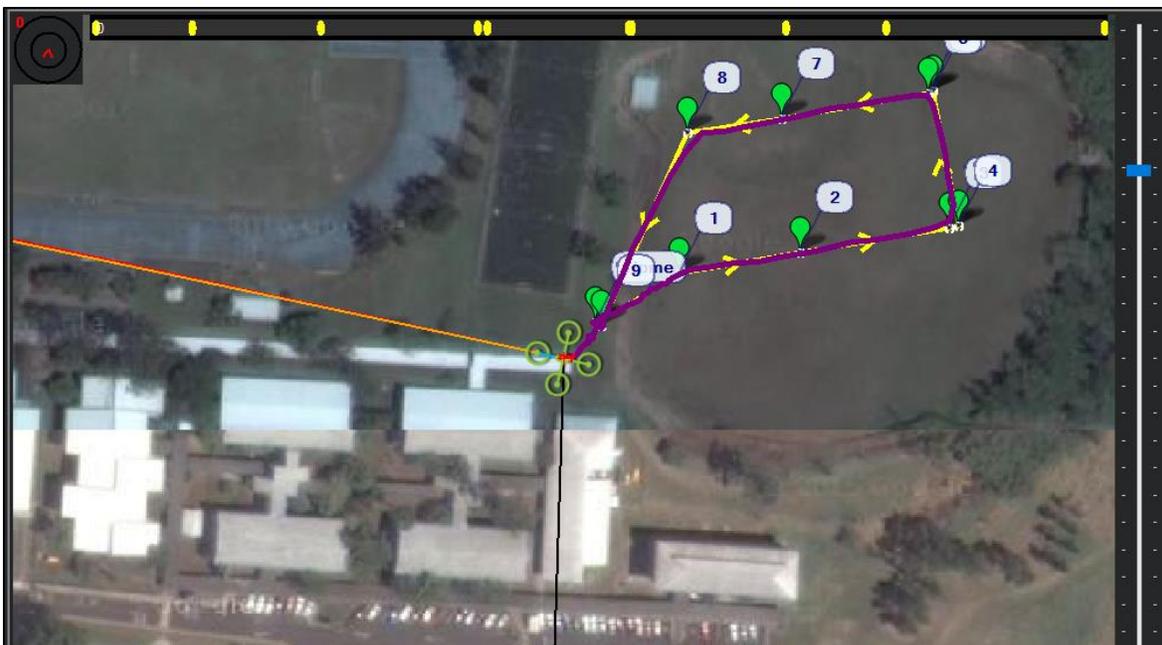
Para probar la comunicación en la dirección Estación en tierra – UAV, se utilizó la interfaz gráfica, la cual permite mandar una señal hacia la aeronave para la captura y almacenaje de fotografías e información georeferenciada y temporizada, esto en cualquier momento o en un intervalo temporal definido por el usuario. En la figura 5.3 se muestra la sección de la interfaz gráfica que permite la adquisición de información. Al presionar “Capturar” en la interfaz gráfica, la unidad de procesamiento a bordo del UAV recibió correctamente el comando para activar una cámara fotográfica y guardar la información georeferenciada y temporizada que se enlaza a la imagen capturada. Al ingresar un valor numérico en el cuadro de texto y presionar “Iniciar Captura”, la unidad de procesamiento repite el proceso de captura de información de forma periódica de acuerdo al valor ingresado.



**Figura 5.3 Módulo para el envío de información hacia el UAV**

### 5.1.2 Rendimiento del enlace

Para comprobar la calidad del enlace se realizó un vuelo a 60 metros de altura, en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en el cantón Central de Cartago, específicamente en las coordenadas 9°51'19.83" latitud norte, 83°54'29.71" longitud oeste. La trayectoria del vuelo se muestra en la figura 5.4.



**Figura 5.4** Trayectoria del vuelo de prueba

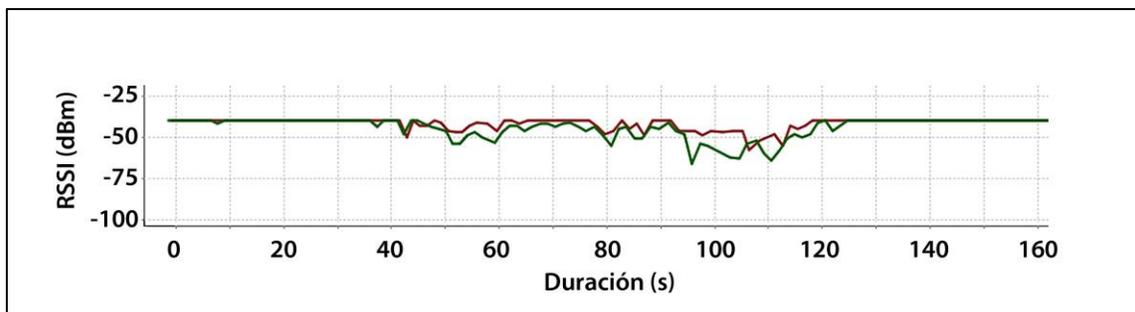
La prueba consistió en el envío de paquetes cada 1 segundo, desde la estación en tierra hacia el UAV, el módulo a bordo de la aeronave devolvió los paquetes a la estación en tierra, en donde se recopiló información sobre paquetes perdidos, errores de transmisión e intensidad de la señal recibida. Cada paquete llevaba una carga útil de 30 bytes, y se consideró perdido si no se vuelve a recibir en el módulo del cual se originó en un intervalo de 1 segundo. Los resultados de la prueba se muestran en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1** Rendimiento del enlace durante el vuelo de prueba

Paquetes enviados	Paquetes recibidos	Paquetes perdidos	Errores de transmisión	Porcentaje de éxito
133	132	1	0	99,25%

Como se observa en la tabla 5.1 los resultados se consideran aceptables, pues sólo se perdió 1 de 133 paquetes enviados, para un rendimiento del 99,25%.

Cada paquete enviado por los módulos de radio lleva, además de la carga útil, información adicional, entre la que se encuentra el indicador de fuerza de la señal recibida o RSSI (“Received Signal Strength Indicator”), cuyo rango de valores varía entre -40 dBm y -100 dBm. Los resultados de este parámetro para el vuelo realizado se muestran en el gráfico de la figura 5.5, en donde el rojo corresponde al RSSI local y el verde al RSSI del UAV.



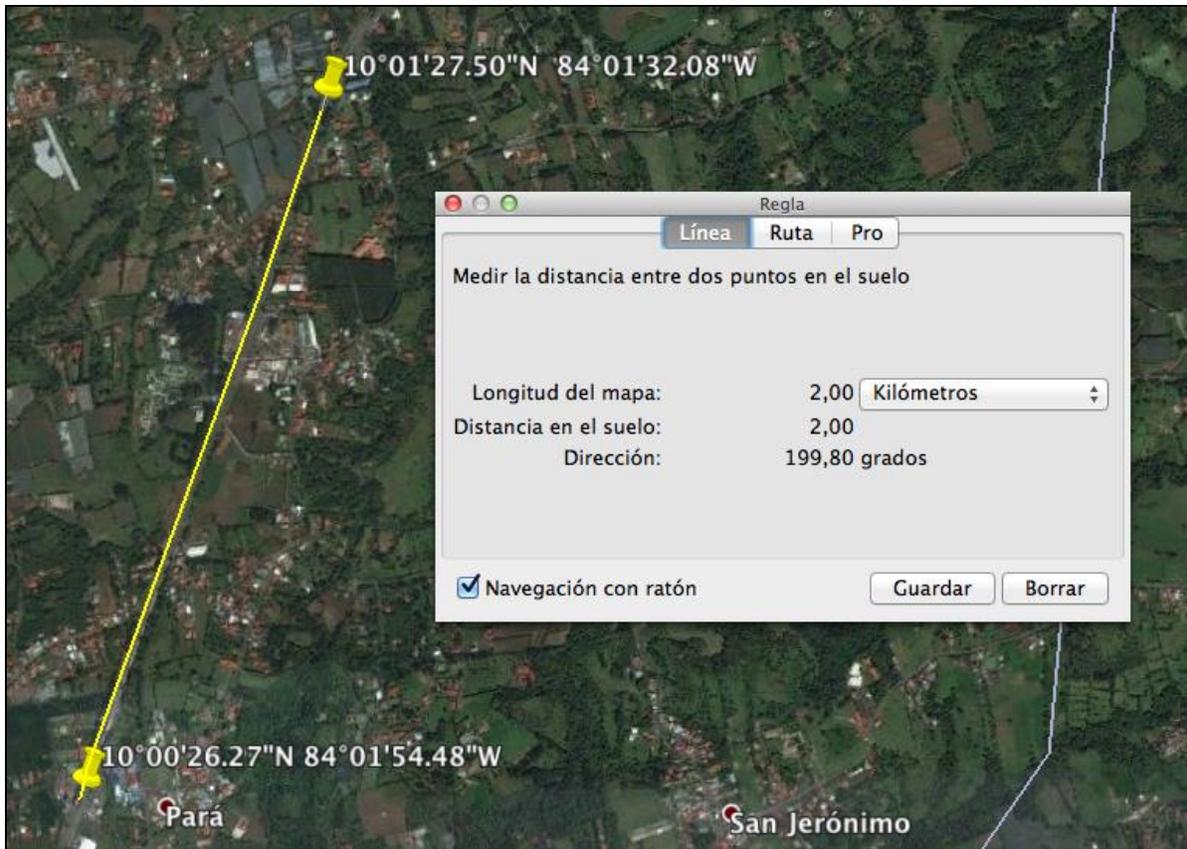
**Figura 5.5** Valores de RSSI vrs duración para el vuelo de prueba

Como se observa en la figura 5.5, la intensidad de la señal se mantuvo por encima de los -60 dBm durante la mayoría de la duración del vuelo, excepto en un corto periodo de tiempo en el cual el UAV bajó a los -70 dBm. El periodo de peor señal coincidió con el paso del UAV cercano a 90 grados sobre la estación en tierra. Esto ocurre debido a que la potencia radiada varía por las antenas monopolo varía con el ángulo de elevación, y cae a cero en el cenit, en el eje de la antena.

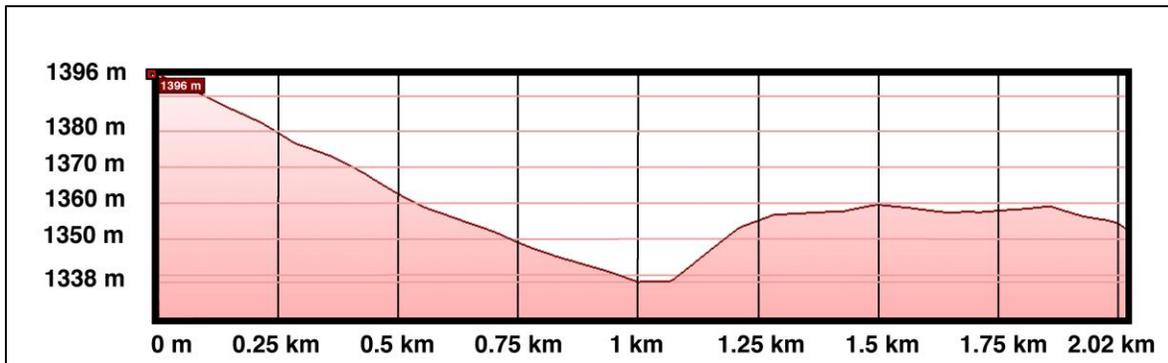
## 5.2 Prueba de rango

Para comprobar el cumplimiento del rango mínimo del sistema en un ambiente real, se realizó una prueba utilizando el software XCTU, que consistió en el envío de una cantidad de 100 paquetes con una carga útil de 30 bytes, desde un XBee conectado a una computadora, a otro módulo ubicado a una distancia que se fue variando en intervalos de 50 metros, el segundo XBee devuelve el paquete al módulo del cual se originó, con lo que se puede saber cuántos paquetes completaron el recorrido y cuántos paquetes se perdieron. Se considera que un paquete se perdió si no llega una respuesta al primer módulo pasado 1 segundo desde que fue enviado el paquete. Los intervalos de 50 metros fueron medidos con un reloj marca Garmin modelo Forerunner 410, el cual mide la distancia por medio de GPS. Al momento de la prueba el reloj tenía con una precisión de  $\pm 3\text{m}$ .

La prueba se llevó a cabo en la Ruta Nacional 32 Braulio Carillo, en una recta de 2 kilómetros con línea de vista, específicamente entre las coordenadas  $10^{\circ}01'27.50''$  latitud norte,  $84^{\circ}01'32.08''$  longitud oeste, en San Isidro de Heredia, y  $10^{\circ}00'26.27''$  latitud norte,  $84^{\circ}01'54.48''$  longitud oeste, en Santo Domingo de Heredia. En la figura 5.6 se muestra la ubicación del lugar en Google Earth, mientras que en la figura 5.7 se presenta el perfil de elevación del terreno en donde se realizó la medición, obtenido también de Google Earth.



**Figura 5.6** Ubicación de la prueba de rango obtenida de Google Earth



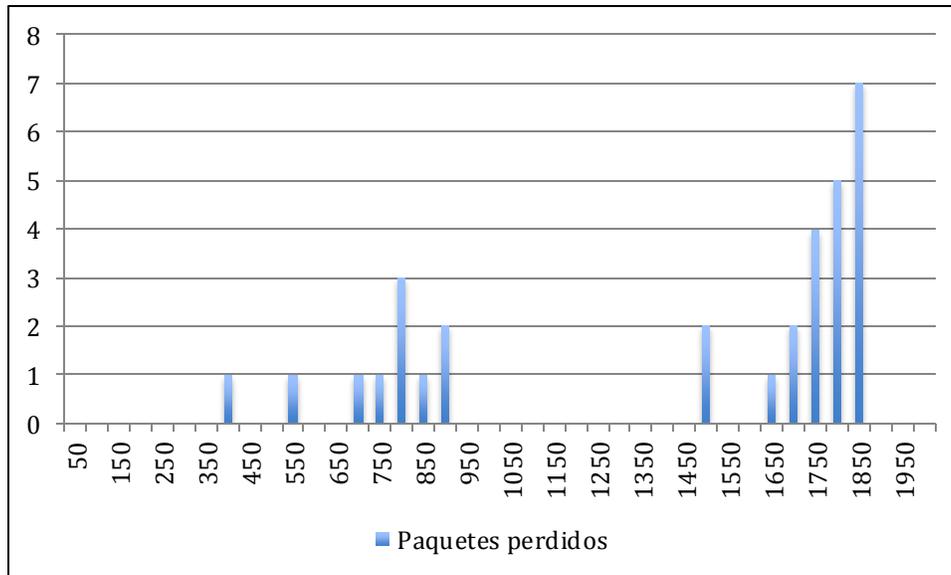
**Figura 5.7** Perfil de elevación en la prueba de rango obtenido de Google Earth

Los resultados de la prueba realizada se presentan en la tabla 5.2, en la cual se muestra la cantidad de paquetes recibidos, paquetes perdidos y errores de transmisión, por cada 100 paquetes enviados.

**Tabla 5.2** Paquetes recibidos/perdidos y errores de transmisión respecto a la distancia

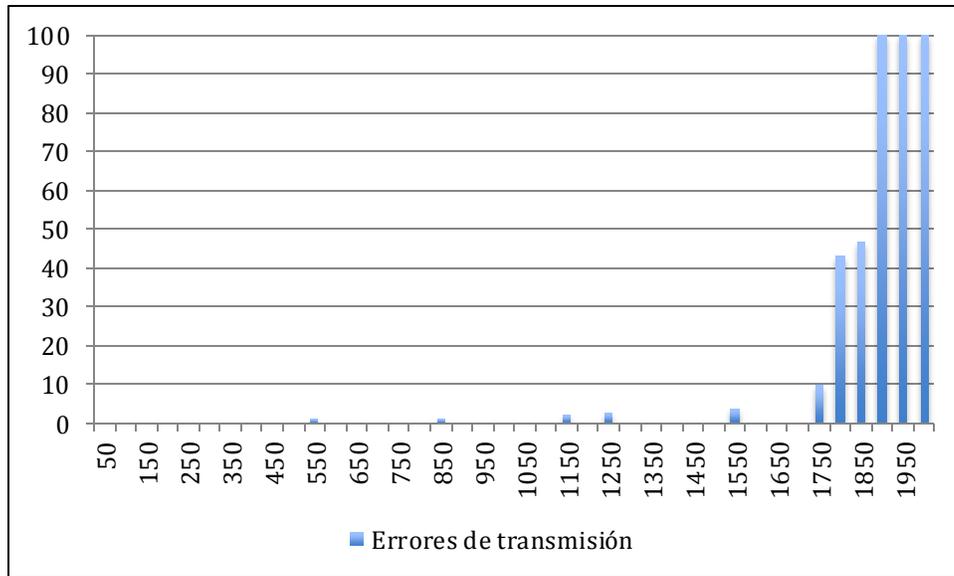
<b>Distancia (m)</b>	<b>Paquetes recibidos</b>	<b>Errores de transmisión</b>	<b>Paquetes perdidos</b>
0	100	0	0
50	100	0	0
100	100	0	0
150	100	0	0
200	100	0	0
250	100	0	0
300	100	0	0
350	100	0	0
400	99	0	1
450	100	0	0
500	100	0	0
550	98	1	1
600	100	0	0
650	100	0	0
700	99	0	1
750	99	0	1
800	97	0	3
850	98	1	1
900	98	0	2
950	100	0	0
1000	100	0	0
1050	100	0	0
1100	100	0	0
1150	98	2	0
1200	100	0	0
1250	97	3	0
1300	100	0	0
1350	100	0	0
1400	100	0	0
1450	100	0	0
1500	98	0	2
1550	96	4	0
1600	100	0	0
1650	99	0	1
1700	98	0	2
1750	86	10	4
1800	52	43	5
1850	46	47	7
1900	0	100	0
1950	0	100	0
2000	0	100	0

Según los datos mostrados en la tabla 5.1 la primer pérdida de paquetes se dio a los 400 metros, pero tal y como se observa en la figura 5.8 no hubo más de 3 paquetes perdidos por cada 100 paquetes enviados en el rango de distancias requerido para el enlace (hasta 1 km). Este comportamiento se mantiene incluso hasta los 1700 metros, distancia a la cual empezaron a aumentar los paquetes perdidos hasta llegar al número de 7, en 1850 metros.



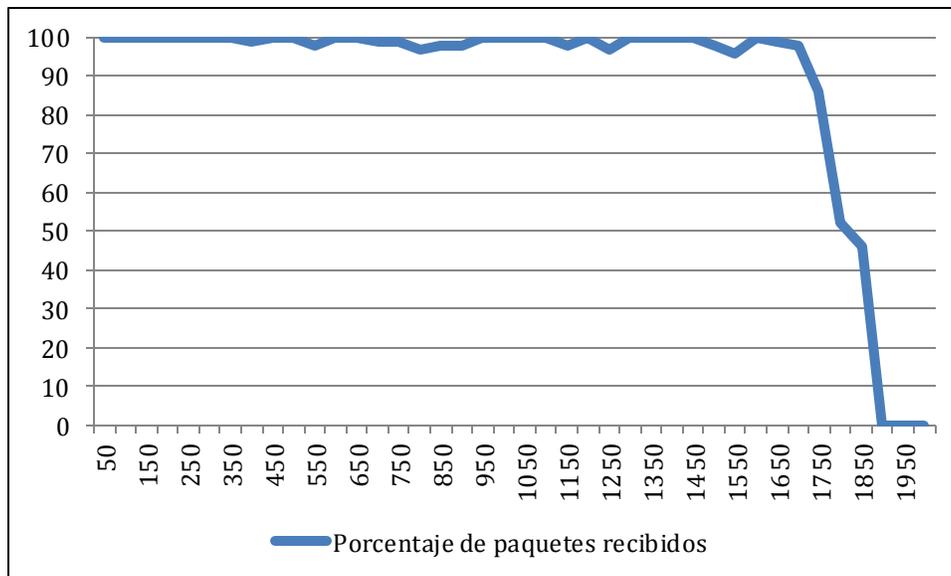
**Figura 5.8 Cantidad de paquetes perdidos vs distancia entre los módulos**

Los errores de transmisión empezaron a ocurrir a los 550 metros, sin embargo, se mantuvieron por debajo de 4 errores en cada punto por cada 100 paquete enviados hasta los 1700 metros. Para la distancia requerida para el enlace sólo hubo un error de transmisión en los 550 metros y otro en los 850 metros, por más de 1100 paquetes enviados. A partir, de los 1750 metros estos errores empezaron a aumentar considerablemente, y para distancias superiores a los 1900 metros no se pudieron transmitir los paquetes correctamente. Esta información se muestra en el gráfico de barras de la figura 5.9.



**Figura 5.9 Cantidad de errores de transmisión vs distancia**

En la figura 5.10 se muestra el porcentaje de los paquetes enviados por el XBee local, ubicado en la computadora, que fueron recibidos después de ser retransmitidos por el módulo XBee remoto, en cada punto en donde se realizó la medición. Se observó que este porcentaje se mantuvo por encima del 97% de transmisiones exitosas en el rango requerido para el proyecto, e incluso se mantuvo por encima del 96% hasta los 1750 metros, en donde decayó al 86%. Para distancias superiores a los 1900 metros, el porcentaje de paquetes recibidos decayó al 0%.

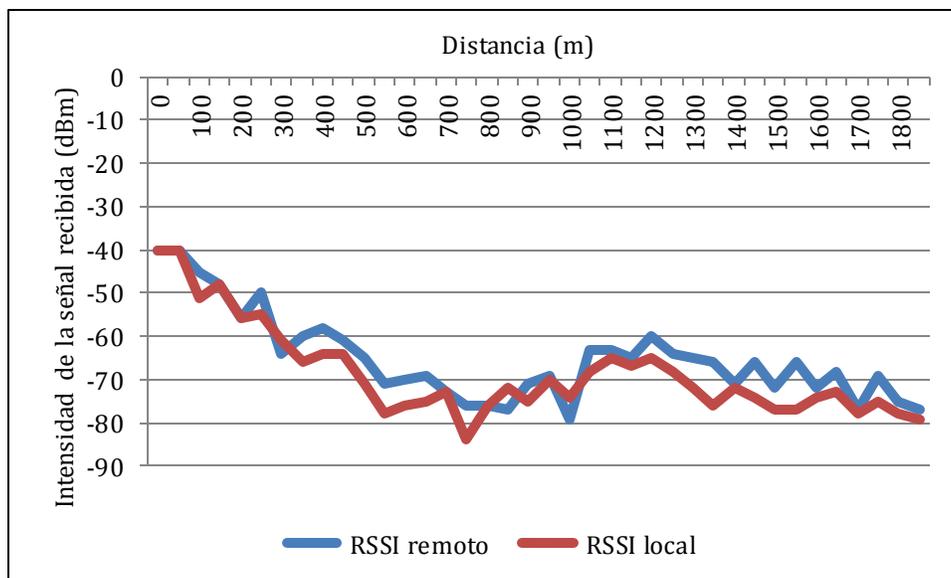


**Figura 5.10** Porcentaje de paquetes recibidos con respecto a la distancia

Los módulos XBee permiten conocer la cantidad de potencia presente en una señal de radio por medio del valor RSSI (“Received Signal Strength Indicator”), cuyo rango de valores varía entre -40 dBm y -100 dBm. Los valores de este indicador para cada uno de los lugares en donde se realizó la medición se muestran en la tabla 5.3. Se observa que los valores son cercanos al valor más alto (-40 dBm), y para las distancias menores a 150 metros, y posee una tendencia a ir empeorando conforme se aumenta la distancia, hasta alcanzar valores cercanos a -80 dBm con los últimos paquetes recibidos a 1850 metros de separación entre los módulos. Esto se puede observar de una forma más clara en el gráfico de la figura 5.11.

**Tabla 5.3** Valores local y remoto del indicador de intensidad de la señal recibida

<b>Distancia (m)</b>	<b>RSSI local (dBm)</b>	<b>RSSI remoto (dBm)</b>
0	-40	-40
50	-40	-40
100	-51	-45
150	-48	-48
200	-56	-56
250	-55	-50
300	-61	-64
350	-66	-60
400	-64	-58
450	-64	-61
500	-71	-65
550	-78	-71
600	-76	-70
650	-75	-69
700	-73	-73
750	-84	-76
800	-76	-76
850	-72	-77
900	-75	-71
950	-70	-69
1000	-74	-79
1050	-68	-63
1100	-65	-63
1150	-67	-65
1200	-65	-60
1250	-68	-64
1300	-72	-65
1350	-76	-66
1400	-72	-71
1450	-74	-66
1500	-77	-72
1550	-77	-66
1600	-74	-72
1650	-73	-68
1700	-78	-77
1750	-75	-69
1800	-78	-75
1850	-79	-77



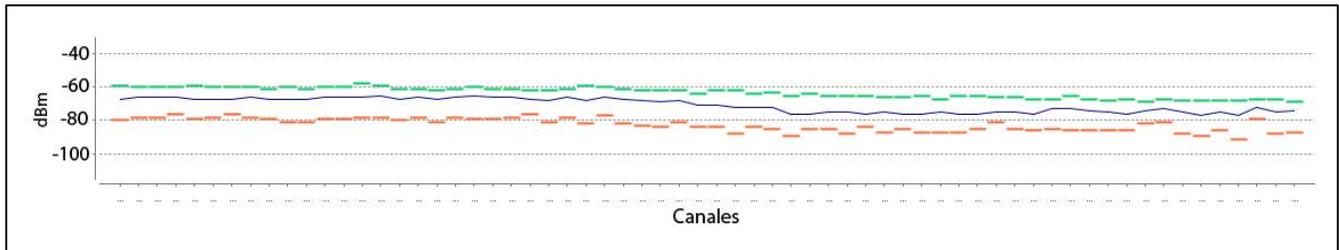
**Figura 5.11 Valores de RSSI local y remoto con respecto a la distancia**

La disminución en el indicador de la intensidad de la señal recibida no sólo se deben a las pérdidas por espacio libre que aumentan proporcionalmente con la distancia (según la ecuación 3.5), sino también a pérdidas por difracción, debido a obstrucciones parciales en el trayecto, como por ejemplo, vehículos circulando en la vía; o a desvanecimientos por multitrayecto, que se deben considerar debido a que se está utilizando una frecuencia de transmisión menor a los 10 kHz, por lo que reflexiones en el suelo o estructuras cercanas están presentes en la transmisión.

Las atenuaciones debido a condiciones atmosféricas se pueden despreciar, pues se está utilizando una frecuencia menor a los 5 kHz, por lo que el oxígeno y el vapor de agua no absorben energía de manera significativa. La dispersión por lluvia tampoco se considera en este enlace, debido a que ésta se desprecia en enlaces punto a punto.

Como se observa en las figuras 5.8, 5.9 y 5.11, cuando los valores de RSSI estuvieron cercanos a -80 dBm, fue cuando se dio la mayor cantidad de errores de transmisión y paquetes perdidos.

En la figura 5.12 se muestra una medición realizada con el software XCTU del nivel de ruido en cada uno de los 64 canales disponibles para la transmisión, indicando el valor mínimo de ruido con una línea naranja, el valor máximo con una línea verde y el valor promedio con una línea azul.



**Figura 5.12 Nivel de ruido en San Isidro de Heredia**

Se observa en la figura 5.12 que el nivel mínimo de ruido presente en el lugar de la prueba es cercano a los -80 dBm para prácticamente todos los canales, lo que explica el aumento de errores de transmisión y paquetes perdidos cuando la intensidad de la señal se acercó a este valor.

En resumen, aunque la prueba se realizó en un sitio con línea de vista, pues siempre hubo visibilidad entre los dos módulos, para que los datos puedan viajar de la manera más óptima se requiere, además de una línea de vista despejada, una zona de Fresnel libre de obstáculos y que en el sitio haya un nivel de ruido blanco bajo. Prácticamente cualquier superficie, especialmente los materiales metálicos o conductores, como vehículos circulando, o líneas de distribución eléctrica, pueden causar interferencia, los cuales, junto con un nivel de ruido blanco alto, pueden resultar en una pérdida de la calidad en la información transmitida.

## 5.3 Características adicionales

### 5.3.1 Consumo de potencia

Utilizando una fuente de poder marca Agilent, modelo E3631A, se alimentó el circuito con una tensión de 7,80 voltios, y se midió la cantidad de corriente consumida por el sistema, lo que permitió calcular la potencia consumida. En la tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos para dos casos extremos: cuando el circuito se encuentra en modo de recepción y cuando se encuentra transmitiendo información.

**Tabla 5.4 Consumo de potencia del sistema del UAV**

Modo	Tensión (V)	Corriente (mA)	Potencia (W)
Recepción	7,80	85	0,663
Transmisión	7,80	255	1,989

### 5.3.2 Peso del sistema

En la tabla 5.5 se muestra el peso de cada uno de los componentes utilizados en el sistema a bordo del UAV, medidos con una balanza de precisión marca Snowrex, modelo EJ-600. Este factor es de suma importancia, ya que la aeronave tiene una capacidad de carga de 1 kilogramo. Se observa que el peso de todos los componentes es menor al 10% de la capacidad de carga del UAV utilizado.

**Tabla 5.5** Peso de los componentes a bordo de la aeronave

Componente	Peso (g)
<b>XBee-Pro 900HP</b>	6,84
<b>Antena rubber-duck</b>	14,73
<b>XBee Shield</b>	14,78
<b>Arduino Mega</b>	35,78
<b>Total</b>	72,13

### 5.3.3 Precio del sistema

En la tabla 5.6 se muestra el precio de cada uno de los componentes utilizados, en la cual se observa que el precio total del sistema es inferior a los \$200.

**Tabla 5.6** Costo de los componentes utilizados

Componente	Precio (\$)
<b>2 x XBee-Pro 900HP</b>	78.00
<b>2 x Antena rubber-duck</b>	27.72
<b>XBee Shield</b>	9.99
<b>Arduino Mega</b>	39.82
<b>XBee Explorer Dongle</b>	24.95
<b>Total</b>	180.48

Se debe tomar en cuenta que a estos precios hay que agregarle los costos de importación, que son variables.

## 5.4 Cumplimiento de requerimientos y restricciones

En la tabla 5.6 se resume el cumplimiento de los requerimientos y restricciones para el sistema desarrollado.

**Tabla 5.7** Cumplimiento de requerimientos y restricciones para el sistema

Requerimientos	¿Cumple especificación?
Alcance $\geq 1$ km	Sí
Alimentación $\leq 5$ V	Sí
Bajo costo	Sí
Liviano y pequeño	Sí
Protocolo UART	Sí
Conexión USB estación en tierra	Sí

## Capítulo 6 Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Mediante el empleo de una solución basada en software y hardware libre se implementó un enlace de radiofrecuencia, que permite la comunicación bidireccional entre una estación en tierra y un vehículo aéreo no tripulado. La implementación tuvo un costo aproximado a los \$200, y un peso menor de 72,13 gramos, lo que representa menos del 10% de la capacidad de carga del UAV.

El sistema desarrollado es capaz de transmitir información a una distancia de 1 kilómetro, utilizando una frecuencia de banda libre, con una pérdida de paquetes menor al 3%, y una intensidad de señal mayor a -80 dBm. Además, el enlace es funcional hasta una distancia de 1700 metros en una zona urbana, pudiendo alcanzar incluso los 1850 metros, aunque ya con una pérdida de información considerable.

Se escogió la utilización de un enlace de radiofrecuencia, debido a que presenta mayores ventajas en cuanto al alcance, costo y velocidad de transferencia de datos, sobre las tecnologías Bluetooth y GSM, para la aplicación de la cuantificación de la erosión por medio de UAVs.

Se escogieron las antenas rubber-duck de 2 dBi para su utilización, tanto en la estación en tierra como a bordo del UAV, debido a que presenta una relación entre patrón de radiación, ganancia, precio, peso y tamaño superior a las antenas patch y Yagi.

## 6.2 Recomendaciones

Mantener una línea de vista en todo momento entre el UAV y la estación en tierra.

Evitar volar la aeronave justo por encima de la estación en tierra.

En el caso que se requiera una comunicación con el vehículo aéreo no tripulado a distancias mayores a 1700 metros en zonas urbanas se tienen varias opciones, todas aumentarían significativamente el costo del proyecto:

- Reemplazar la antena del sistema por una más direccional, como por ejemplo la patch antena, la cual se recomienda utilizar en conjunto con un sistema rastreador. Esto permitiría utilizar la información GPS de la aeronave, junto con la información GPS de la estación en tierra, para mantener el haz principal de la antena direccionado hacia el UAV.
- Utilizar un módulo de mayor potencia como por ejemplo el RFD900+ de 1 Watt.
- Colocar un dispositivo amplificador bidireccional entre el módulo de radio y la antena.

## Capítulo 7      Referencias bibliográficas

- [1] Poder Ejecutivo de la República de Costa Rica, “Reglamento a la Ley de Uso, Manejo y Conservación de Suelos,” 2001.
- [2] C. Felipe-Morales, *Manual Evaluaciones en la Parcela de Escorrentía y Erosión*, Lima, Perú, 1996.
- [3] Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, “Ley 7779 Uso, Manejo y Conservación de Suelos,” 1998.
- [4] G. Hernández y A. Ruiz, “Modelaje de la erosión de suelos en Costa Rica mediante el modelo WEPP,” en *Revista Geográfica de América Central*, vol. 2, no. 36, pp. 11-36, 1998.
- [5] D. Da Silva *et al.* “Propuesta metodológica para medir la escorrentía en sistemas agropecuarios del cantón de Guácimo, zona del Caribe de Costa Rica,” en *Tierra Tropical*, vol. 2, no. 2, pp. 133-142, 2006.
- [6] R. Y. Sibello, “Cuantificación de la erosión de los suelos en zonas de interés económico y ambiental de la provincia de Cienfuegos, Cuba, utilizando el cesio-137 como radiotrazador,” Ph.D. dissertation, Univ. Alicante, Cienfuegos, Cuba, 2013.
- [7] S. Arriola, “Diseño de un sistema de adquisición de datos para un vehículo aéreo no tripulado (UAV),” Tesis de licenciatura, Ing. Electrónica, TEC, Cartago, Costa Rica, 2015.
- [8] J. V. Cofré, “Planificación estratégica 2014 -2018 para la empresa Aerovisión de la industria de la fotografía aérea,” Master dissertation, Depart. Ing. Industrial, Univ. de Chile, Chile, 2014.
- [9] E. O. Arriaza y M.E. Dávila, “Sistema de Fotografía Aérea de Bajo Costo para Agricultura de Precisión en el Trópico,” Tesis de licenciatura, Univ. Earth, Limón, Costa Rica, 2009.
- [10] X. Li y L. Yang, “Design and Implementation of UAV Intelligent Aerial Photography System,” en *2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 2012, pp. 200-203.

- [11] A. M. Samad *et al.*, “The Potential of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Civilian and Mapping Application,” en *2013 IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology*, 2013, pp. 313-318.
- [12] S. Haykin, *Sistemas de Comunicación*, 1a ed. Ciudad de México, México: Editorial Limusa, 2002.
- [13] F. G. Stremler, *Introducción a los sistemas de comunicación*, 3ª ed. Delaware, Estados Unidos de América: Addison-Wesley Iberoamericana, 1993.
- [14] B. P. Lathi, *Introducción a la teoría y sistemas de comunicación*, Ciudad de México, México: Editorial Limusa, 2001.
- [15] M. Sadiku, *Elementos de electromagnetismo*, 3a ed. Ciudad de México, México: Oxford University Press, 2003.
- [16] J. Fernández, *El universo de las radiaciones*, 1a ed. Buenos Aires, Argentina: Eudeba, 2009.
- [17] R. J. Bates, *Comunicaciones inalámbricas de banda ancha*, 1a ed. Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana, 2010
- [18] International Telecommunication Union. *List of Member States*. [En línea]. Disponible : <https://www.itu.int/online/mm/scripts/gense18>
- [19] International Telecommunication Union. (2012). *Radio Regulations Articles*. [En línea], Disponible: [http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-s/oth/02/02/S02020000244501PDFE.PDF](http://www.itu.int/dms_pub/itu-s/oth/02/02/S02020000244501PDFE.PDF)
- [20] T. Manning, *Microwave Radio Transmission Design Guide*, 2a ed. Massachusetts, Estados Unidos de América: Artech House, 2009.
- [21] International Telecommunication Union. (Julio 2015). *Recommendation ITU-R P.530-16 Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. [En línea]. Disponible: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-16-201507-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-16-201507-I!!PDF-E.pdf)
- [22] International Telecommunication Union (1997). *Recomendación ITU-R F.1093-1 Efectos de la propagación multitrayecto en el diseño y funcionamiento de los sistemas de*

- radioenlaces digitales con visibilidad directa* [En línea]. Disponible: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/f/r-rec-f.1093-1-199709-s!!pdf-s.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/f/r-rec-f.1093-1-199709-s!!pdf-s.pdf)
- [23] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 3a ed. New Jersey, Estados Unidos de América:Wiley-Interscience, 2005.
- [24] D. K. Cheng, *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*, 1a ed. México, México: Addison Wesley Longman de México, 1997.
- [25] *IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas*, IEEE Standard 145, 2013.
- [26] J. D. Krauss, *Antennas*. 2a ed. Estados Unidos de América: McGraw-Hill, 1988.
- [27] J. R. Osio *et al.* (Setiembre 2011). *Descripción General de un Microcontrolador (Módulos de Comunicación)* [En línea]. Disponible: [http://www.academia.edu/2115930/Descripción\\_General\\_de\\_un\\_Microcontrolador\\_Módulos\\_de\\_Comunicación](http://www.academia.edu/2115930/Descripción_General_de_un_Microcontrolador_Módulos_de_Comunicación)
- [28] J. Díaz. *El transceptor NRF24L01+* [En línea]. Disponible: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12159/fichero/3.pdf>
- [31] R. Hershenhoren y O. Reznik, “USB2.0 Protocol Engine,” Proyecto final, Ing. Computación, Univ. Bar-Ilan, Tel Aviv, Israel, 2010.
- [32] *3DR Radio V2 Quick Start Guide* [En línea]. Disponible: <https://3dr.com/wp-content/uploads/2013/10/3DR-Radio-V2-doc1.pdf>
- [33] *XBee-Pro 900HP* [En línea]. Disponible: <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/modules/xbee-pro-900hp#specifications>
- [34] *RFD900+ Telemetry Radios* [En línea]. Disponible: <https://event38.com/product/rfd900-telemetry-radios/>
- [35] *2.4G Wireless nRF24L01p with PA and LNA* [En línea]. Disponible: [http://www.elecfreaks.com/wiki/index.php?title=2.4G\\_Wireless\\_nRF24L01p\\_with\\_PA\\_and\\_LNA](http://www.elec Freaks.com/wiki/index.php?title=2.4G_Wireless_nRF24L01p_with_PA_and_LNA)
- [36] *Nearson-Inc. S152AH-91S* [En línea]. Disponible: <http://www.digikey.com/product-detail/en/nearson-inc/S152AH-915S/730-1007-ND/1628302>

- [37] *HyperLink Wireless 900 MHz 8 dBi Flat Patch Antenna Model: HG908P* [En línea]. Disponible: [http://www.l-com.com/multimedia/datasheets/DS\\_HG908P.PDF](http://www.l-com.com/multimedia/datasheets/DS_HG908P.PDF)
- [38] *HyperLink Wireless 900MHz (824-960MHz) 14 dBi High Performance Yagi Antenna for ISM, GSM and Wireless LAN Systems* [En línea]. Disponible: [http://www.l-com.com/multimedia/datasheets/DS\\_HG914YE.PDF](http://www.l-com.com/multimedia/datasheets/DS_HG914YE.PDF)
- [39] *X8+* [En línea]. Disponible: <https://3dr.com/x8/>
- [40] *X8+ Operation Manual* [En línea]. Disponible: <https://3dr.com/wp-content/uploads/2015/04/X8-Operation-Manual-vC.pdf>
- [41] *Arduino Board Mega 2560* [En línea]. Disponible: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
- [42] *SainSmart XBee Shield module for ZigBee ARDUINO UNO Duemilanove Mega 1280 2560*. [En línea]. Disponible: <http://www.sainsmart.com/sainsmart-xbee-shield-module-for-zigbee-arduino-uno-duemilanove-mega-1280-2560.html>
- [43] *SparkFun XBee Explorer Dongle* [En línea]. Disponible: <https://www.sparkfun.com/products/11697>

## Capítulo 8 Apéndice

### 8.1 Configuración del sistema

Para el correcto funcionamiento del sistema se configuraron algunos parámetros de los módulos de radiofrecuencia XBee-Pro 900HP.

#### 8.1.1 Configuración del módulo de radiofrecuencia de la estación en tierra

Para configurar los módulos XBee-Pro 900HP se utilizó el programa XCTU, aplicación gratuita y multiplataforma, que permite interactuar con los módulos de radiofrecuencia de la empresa DIGI, por medio de una interfaz gráfica, la cual se muestra en la figura 4.12.

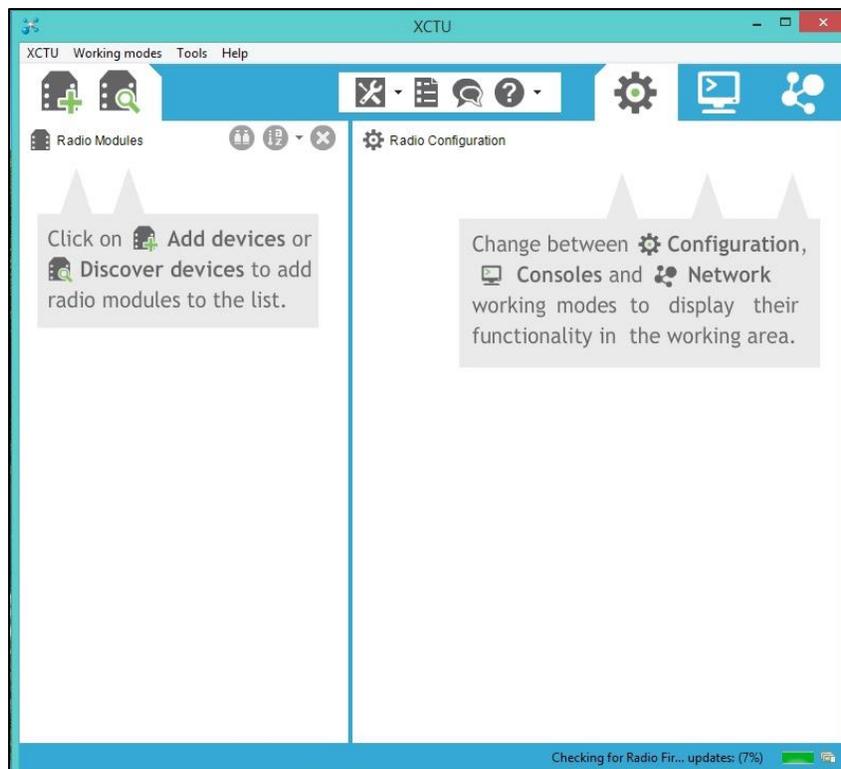
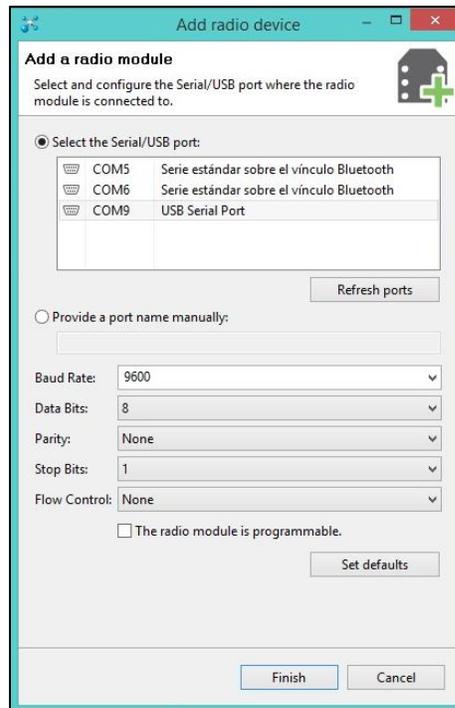


Figura 8.1 Interfaz de XCTU

Primero se debe insertar el módulo de radiofrecuencia de la estación en tierra al XBee Explorer Dongle, el cual se conecta a una computadora y se inicia el programa XCTU. Por medio de la interfaz del programa se debe “agregar el módulo”, por medio del botón con el símbolo del XBee junto con el signo más  , seleccionando en la ventana emergente el puerto USB al que se conectó el adaptador y los parámetros de comunicación serial respectivos del módulo, lo que se muestra en la figura 4.13.

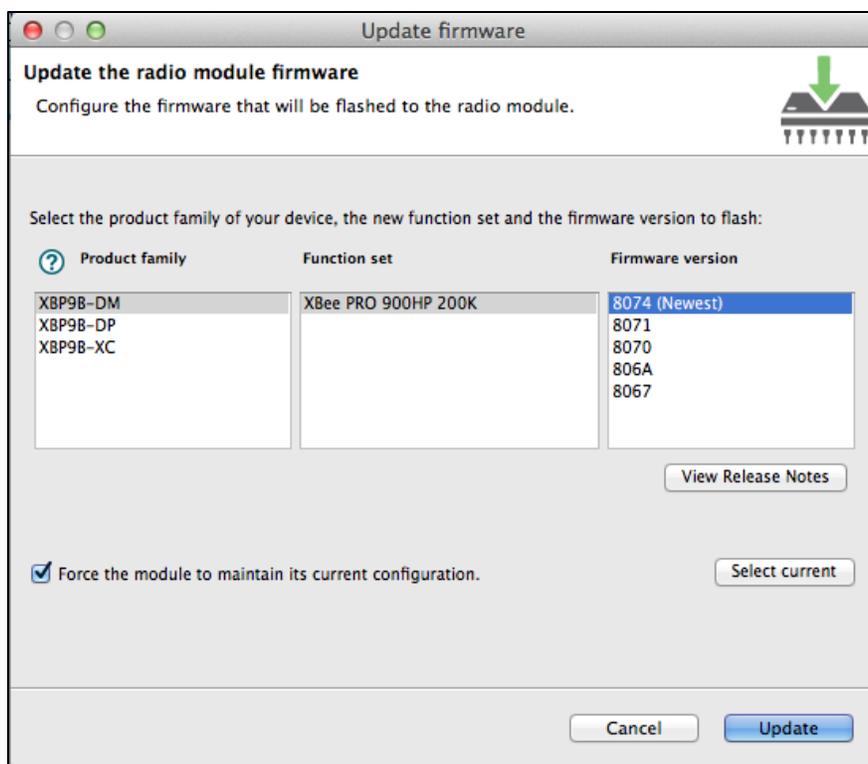


**Figura 8.2 Ventana para agregar un módulo de radio al XCTU**

Una vez agregado el XBee a la lista de dispositivos, el programa carga la información con todos los ajustes de configuración al seleccionar el módulo de esta lista. Luego se debe seleccionar el modo “Configuration working mode” en la barra de herramientas del XCTU:

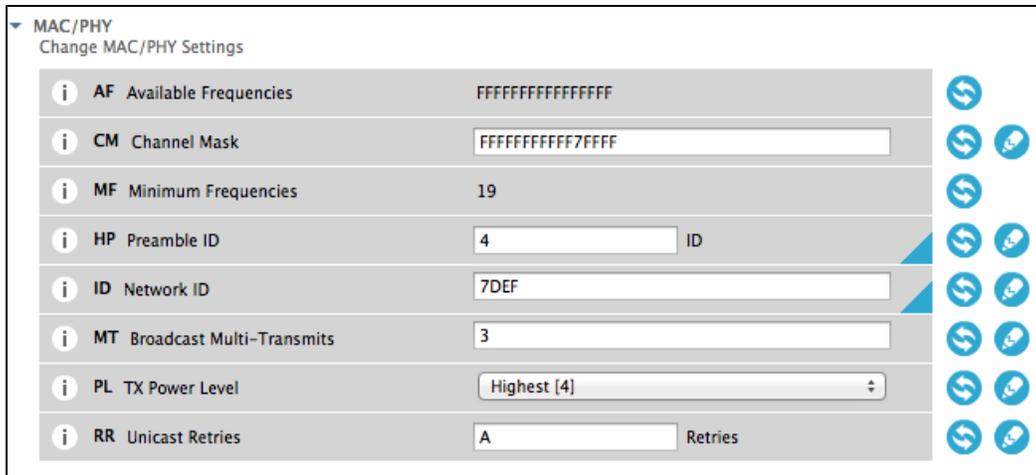
  , para actualizar el firmware y cambiar algunos parámetros.

Para actualizar el firmware del módulo de radio, presionando el botón con la forma:  lo que abre la ventana mostrada en la figura 4.14, en donde se selecciona la familia de producto XBP9B-DM, el set de funciones XBee Pro 900HP 200K y la última versión de firmware, que al momento de realizar el proyecto correspondía a la 8074. Al presionar “Update” se configurará el firmware seleccionado en el módulo.



**Figura 8.3** Ventana para actualizar el firmware del XBee-Pro 900HP

Seguidamente se configuraron diversos parámetros, los cuales vienen ordenados por secciones. En la sección MAC/PHY Settings, mostrada en la figura 4.15, permite configurar los parámetros correspondientes a la capa física (responsable de manejar el hardware que modula y demodula los bits radiofrecuencia) y a la capa de control de acceso al medio (responsable de enviar y recibir los paquetes de radiofrecuencia). Entre los parámetros que configuraron en esta sección se encuentran Channel Mask (CM), Preamble ID (HP) , Network ID (ID) y TX Power Level (PL).



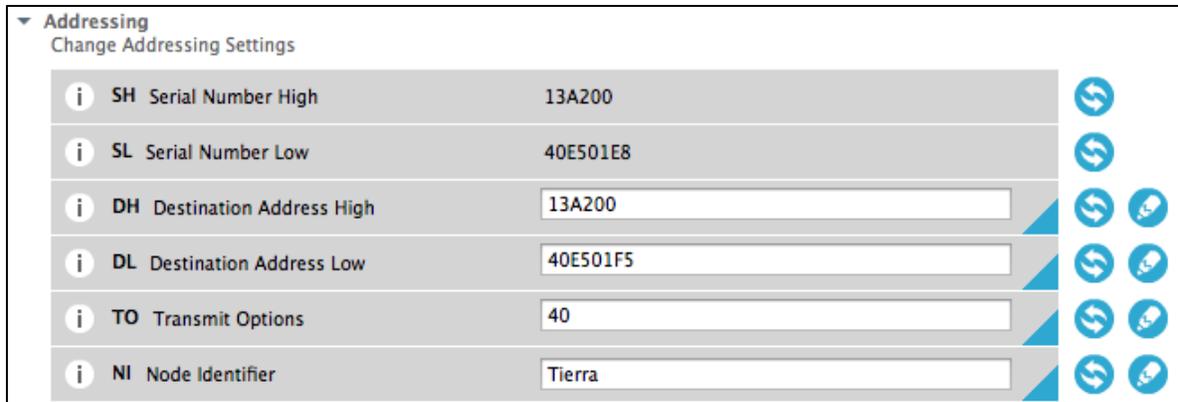
**Figura 8.4** Parámetros MAC/PHY del módulo de radio

El parámetro CM permite que algunos canales de los 64 disponibles para la comunicación puedan ser habilitados o deshabilitados. Un mínimo de 19 canales deben habilitarse para los módulos. Para este parámetro se utilizará el valor 0xFFFFFFFF7FFFF, el cual habilita todos los canales, excepto el canal 19 (910 MHz), el cual se deshabilita por recomendación del fabricante, debido a que tiene aproximadamente 2 dB de peor sensibilidad de recepción que los demás canales.

Los parámetros HP e ID tienen que ser iguales en los dos módulos, debido a que solamente los módulos con el mismo identificador de preámbulo e identificador de red se pueden comunicar entre sí. Se utilizó 4 para HP y 7DEF para ID.

El parámetro PL permite modificar la potencia de transmisión a la que el módulo de radiofrecuencia transmitirá, se utilizó la más alta, que corresponde a +24 dBm y se configura con un 4.

La siguiente sección que se configuró se llama Addressing y corresponde a los parámetros que permiten el direccionamiento de los paquetes, esta se muestra en la figura 4.16. Entre los parámetros que se configuraron se encuentran Destination Address High (DH), Destination Address Low (DL), Transmit Options (TO) y Node Identifier (NI).



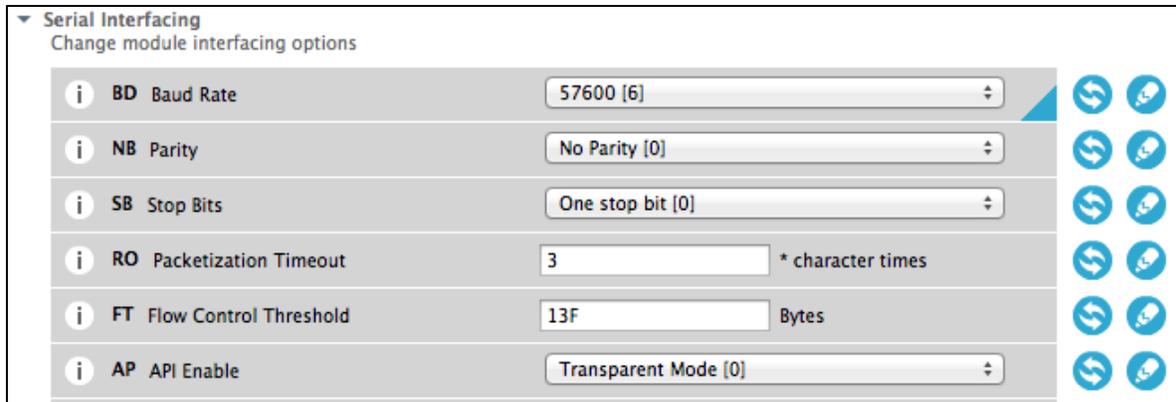
**Figura 8.5** Parámetros de direccionamiento del módulo de radio

Cada módulo XBee cuenta con una dirección única IEEE de 64 bits asignada, la cual se puede observar en los parámetros Serial Number High (SH) y Serial Number Low (SL), y además se encuentra impresa en la parte inferior del módulo XBee. En DH se coloca el valor 13A200, mientras que en DL se coloca 40E501F5, estos valores corresponden al SH y SL, respectivamente, del módulo XBee que va colocado a bordo del UAV.

El parámetro TO sirve para configurar el método de entrega, debido a que el diseño requiere de un enlace punto a punto para el enlace, se utilizará la opción 40, que corresponde a Point to Point/Multipoint en la cual todos los mensajes se envían directamente a su destino, sin repeticiones del paquete por parte de otros nodos que pudieran haber en la red.

Por último, en NI se coloca una cadena de hasta 20 caracteres ASCII para identificar el módulo, por lo que se coloca la palabra “Tierra”.

En la sección Serial Interfacing se cambian los parámetros para la comunicación del XBee con la computadora por medio del módulo adaptador USB, se configuraron los parámetros Baud Rate (BD), Parity (NB), Stop Bits (SB) y API Enable (AP). Estos parámetros se muestran en la figura 4.17.



**Figura 8.6 Parámetros de comunicación serial del módulo de radio**

El parámetro BD corresponde a la velocidad para la transferencia de datos entre el módulo de radio y la computadora y se configuró con 6, que corresponde a 57600 bps. Los parámetros NB y SB se dejaron con el valor por defecto de 0 en los dos casos, que corresponde a que el mensaje transmitido no tiene paridad y tiene un bit de parada.

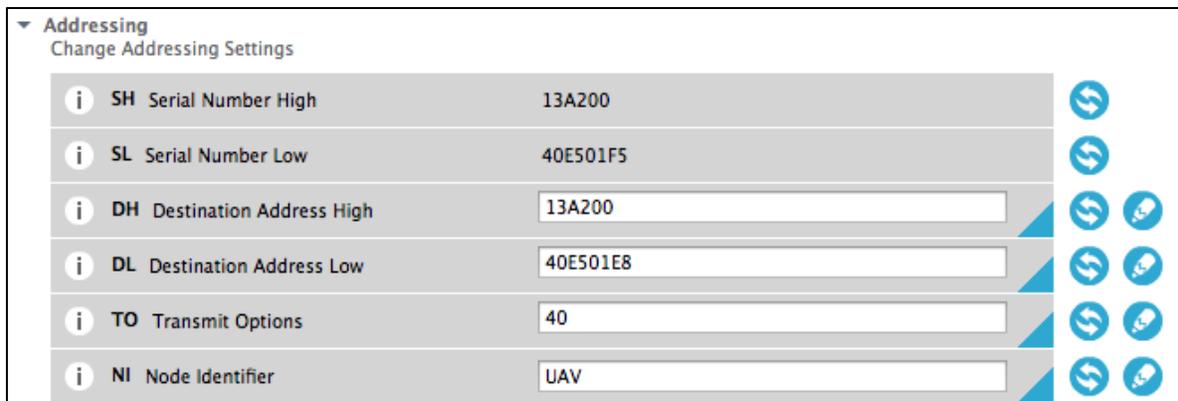
En el parámetro AP se utiliza el modo transparente, el cual se configura con 0 y en el que la entrada y salida se información cruda, tal y como se quiere transmitir.

Por último se deben guardar los datos en la memoria del XBee, presionando el botón con forma de lápiz: .

### 8.1.2 Configuración del módulo de radiofrecuencia del UAV

La configuración del módulo XBee se debe realizar de forma similar a la configuración del módulo de la estación de tierra, conectándolo por medio de un XBee Explorer Dongle a la computadora y utilizando el software XCTU de DIGI. Después de actualizar el firmware a la última versión, la mayoría de parámetros se configuran con los mismos valores utilizados en la sección 4.5.1, a excepción de los parámetros de la sección Addressing llamados Destination Address High (DH), Destination Address Low (DL), y Node Identifier (NI).

Para DH y DL se deben utilizar los primeros y últimos 32 bits de dirección IEEE de 64 bits del módulo de la estación en tierra, que corresponden a 13A200 y 40E501E8, respectivamente. En el campo NI se decidió identificar al módulo con la palabra “UAV”. La configuración realizada se muestra para los parámetros de direccionamiento se muestran en la imagen 4.18.



**Figura 8.7** Parámetros de direccionamiento módulo de radio del UAV